

B. Neubauer, F. Arens-Fischer, H. Heinrich und H.-D. Schulze \*

## Metallurgische Prüfungen an Bauteilen

### 1. Einleitung

Die Kosten für Planung, Bau und Inbetriebnahme von Kraftwerksneuanlagen sind in den letzten Jahren enorm angestiegen. Gleichzeitig ist das Risiko, die angestrebten Termine und Kosten für die Anlagenerstellung einzuhalten, angesichts von umwelttechnischen Auflagen und Widerstände in der betroffenen Bevölkerung im Umfeld der Neuanlage weithin unkalkulierbar geworden. Aus diesem Grunde wird heute vielfach der Lebensdauerverlängerung bereits bestehender Anlagen der Vorzug gegeben [1]. Erfahrungen aus den letzten Jahren haben gezeigt, daß thermische Kraftwerke unter günstigen Randbedingungen durchaus eine Betriebszeit erreichen können, die erheblich über der Auslegungslbensdauer liegt.

Für bestehende Kraftwerksanlagen sind bzw. werden demnächst erhebliche Investitionen für Rauchgasreinigungsanlagen erforderlich, für deren Abschreibung die Anlagen ca. 10 bis 15 Jahre weiterbetrieben werden müssen. Es ist daher zweckmäßig, sich im Rahmen dieser Investitionen Gewißheit darüber zu verschaffen, ob ein zuverlässiger Weiterbetrieb der Anlage in diesem Zeitrahmen auch tatsächlich noch technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist. Der erste Schritt hierbei ist die Analyse der noch verfügbaren Restlebensdauer.

Die bisher zu Restlebensdaueranalysen herangezogenen Verfahren waren allerdings meist nur dazu angelegt, den sicheren Weiterbetrieb der Anlage für die nächsten Jahre, meist bis zur nächsten inneren Prüfung zu gewährleisten, sie hatten also lediglich den Charakter einer kurz- bis mittelfristigen Vorhersage.

Die in Zukunft benötigten Analyseverfahren müssen aber mittel- bis langfristige Vorhersagen liefern können. Zu diesem Thema fand 1987 ein Expertengespräch über metallkundliche Möglichkeiten für längerfristige Lebensdaueranalysen statt [2,3]. Im folgenden soll aus metallurgischer Sicht abgeleitet werden, welche Verfahren für derartige langfristige Analysen in Frage kommen.

### 2. Vorgehensweise bei Restlebensdaueranalysen

Die Vorgehensweise bei Restlebensdaueranalysen ist in Bild 1 dargestellt. Die wesentliche Grundlage der Restlebensdaueranalyse von Anlagen ist zunächst die Ermittlung derjenigen Komponenten, die im angestrebten Lebensdauerzeitraum der Anlage zu vorzeitigem Versagen oder Betriebsstörungen führen können. Hierfür muß der Betreiber aufgrund betrieblicher Gegebenheiten zunächst einen Lebensdauerzeitraum projektieren. Für die erkannten lebensdauerrelevanten Komponenten werden sodann in einer Versagensanalyse die relevanten Versagensmechanismen ermittelt und aus diesen ein komponentenspezifisches Prüfkonzept entwickelt. Im Rahmen einer Beanspruchungsanalyse werden kritische Beanspruchungen an den Komponenten ermittelt, die als Grundlage für die Inspektion der Komponenten dienen. Die Inspektion liefert schließlich die Informationen, die eine möglichst zweifelsfreie Beurteilung des derzeitigen Zustands der Komponenten erlaubt, sowie im Rahmen der abschließenden Restlebensdaueranalyse eine möglichst genaue Ermittlung der verbleibenden Lebensdauer.

\* alle: Rheinisch-westfälischer Technischer Überwachungsverein (RWTUV) e.V.

### Lebensdaueranalyse von Kraftwerkskomponenten

Definition der Lebensdauererwartung  
Versagensanalyse  
Prüfkonzept  
kritische Betriebsbeanspruchungen  
Inspektion  
Bewertung der Ergebnisse  
Lebensdauer / Empfehlungen

BN 230 D

Bild 1

### Fehleranalyse von Kesselrohren

**Verdampfer**  
Korrosion - Kesselwasser  
Erosion - Feuergase  
Überhitzung - Feuergase, Belagbildung, Wassermangel

**Überhitzer**  
Oxidation - Feuergase  
Hochtemperaturkorrosion/-erosion - Feuergase, Asche  
Kriechen - Temperatur, Innendruck  
Überhitzung - Feuergase, Belagbildung, Dampfmenge  
Deformation - Hängesystem

BN 240 D

Bild 2

Von den lebensdauerrelevanten Systemen einer Kraftwerksanlage sollen im folgenden Kessel, Rohrleitungen und Turbine betrachtet werden. Die Versagensanalyse liefert für diese 3 Systeme die in Bild 2 bis 4 dargestellten Versagensmechanismen:

### Fehleranalyse von Rohrleitungen

	FD / HZÜ	KZÜ
<b>allgemein</b>	Kriechen	(Stillstands)- Korrosion
<b>Bögen</b>	Kriechbruch	dto
<b>Geradrohr</b>	Kriechbruch	dto
<b>Rundnähte</b>	Leck, Typ 4 Risse	SpRK
<b>Längsnähte</b>	SN-Herstellungsfehler	(Stillstand) SpRK
<b>Sammler (Formstücke)</b>	Übertemperatur Thermoschock, Lochkantenrisse	

FD = Frischdampfleitung  
HZÜ/KZÜ = Heiße/Kalte Zwischenüberhitzerleitung

BN 241 D

Bild 3

### Turbinenbauteile Schädigungsmechanismen

**Allgemein:** Temperatur- und  
dehnungsinduzierte Versprödung;  
Wachstum von  
Herstellungsfehlern

**HD Eintritt:** Kriechen / Ermüden

**HD Austritt:** Ermüden / Kriechen

**MD / ND:** Ermüden / Korrosion  
Kavitation

BN 231 D

Bild 4

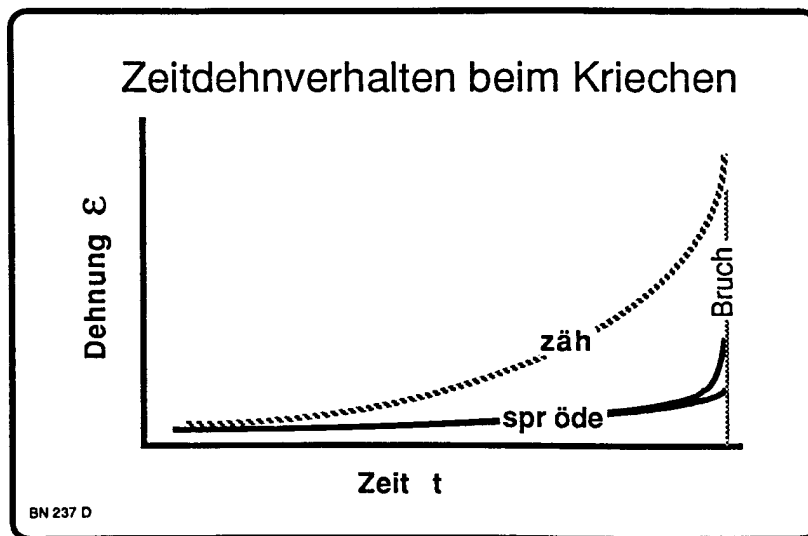


Bild 5

Aus dieser Versagensanalyse wird dann ein aussagefähiges Prüfkonzept für die Komponenten abgeleitet. Als Beispiel soll hier das Verformungsverhalten im Zeitstandbereich betrachtet werden, das schematisch in Bild 5 dargestellt ist:

Bei einem "spröden" Zeitstandverhalten, das durch geringe Zeitstandbruchdehnungen gekennzeichnet ist, wie es zum Beispiel bei Turbinenrotoren auftritt, können beispielsweise Dehnungsmessungen keinen nützlichen Beitrag zur Beurteilung der Restlebensdauer liefern. Kraftwerksrohrleitungen, die im Zeitstandbereich betrieben werden, sind dagegen meist so dehnfähig, daß die Messung der Kriechdehnung nützliche Information für die Restlebensdauerbestimmung liefert.

Die wichtigsten Prüf- und Analyseverfahren, die beispielsweise zur Bestimmung der Restlebensdauer von Kraftwerksrohrleitungen nutzbringend eingesetzt werden können, sind in Bild 6 dargestellt:

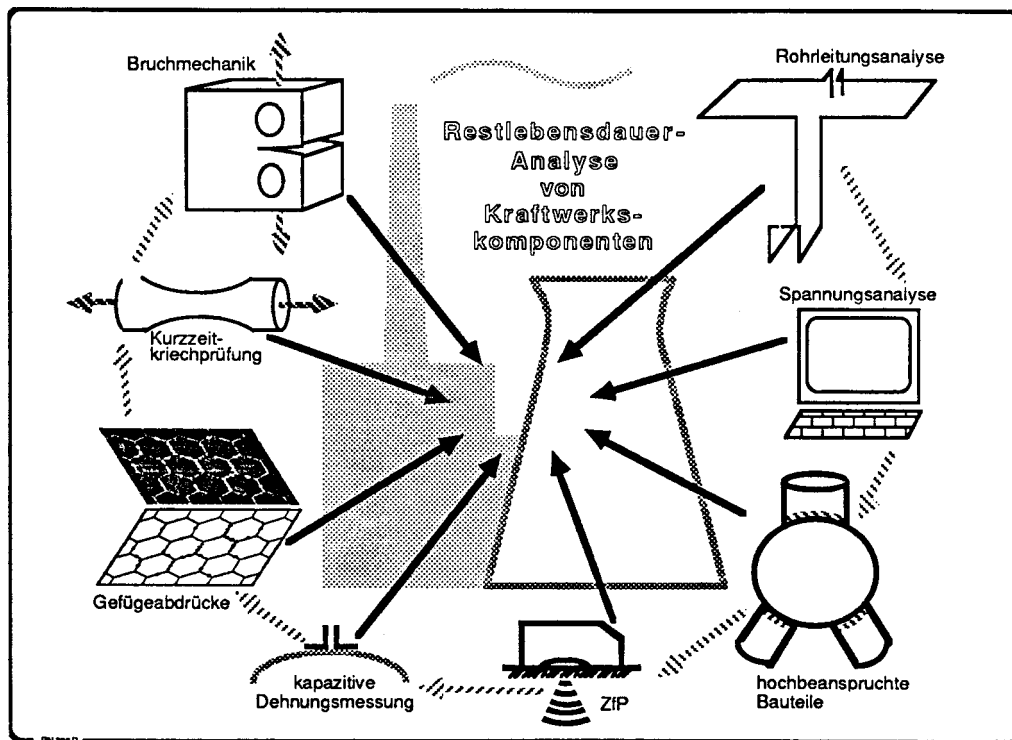


Bild 6

### 3 Werkstoffveränderungen als Grundlage für Prüfverfahren

Werden Werkstoffe bei hoher Temperatur eingesetzt, so kommt es unter dem gemeinsamen Einfluß der Beanspruchungsparameter Temperatur, Spannung und Beanspruchungszeit zu Veränderungen im Gefüge der Werkstoffe, die letztlich zum Versagen durch Kriechen führen. Fehlt der Beanspruchungsparameter "Spannung", so hat der Werkstoff eine praktisch unbegrenzte Lebensdauer. Es liegt daher nahe, aus dem Vergleich der Gefügeänderungen, die sich bei einer langfristigen Glühung ("Auslagerung") und einer vergleichbaren Zeitstandbeanspruchung ("Kriechbeanspruchung") ergeben, solche Meßverfahren abzuleiten, die eine Beurteilung der bisherigen Beanspruchung bzw. der Werkstoff"schädigung" durch diese Beanspruchung erlauben. Die Restlebensdauer ergibt sich dann folgerichtig durch die Zuordnung der augenblicklichen Werkstoffschädigung zur Werkstoffschädigung beim engültigen Bruch sowie durch die Ermittlung einer lastabhängigen Schädigungsgeschwindigkeit. Wichtig für lebensdauerrelevante Meßverfahren ist, daß sie die auftretenden Werkstoffschädigungen in Abhängigkeit aller 3 Lastparameter Temperatur, Zeit und Spannung eindeutig beschreiben. Es zeigt sich jedoch, daß solche ideale Meßverfahren in erster Näherung nicht existieren.

Die Grundlagen für das Verhalten von Werkstoffen bei hoher Temperatur sind systematisch in [4] dargestellt. Die wesentlichen Vorgänge bei der Zeitstandbeanspruchung stellt Bild 7 in Teilbild (a) bis (e) vereinfachend dar [5].

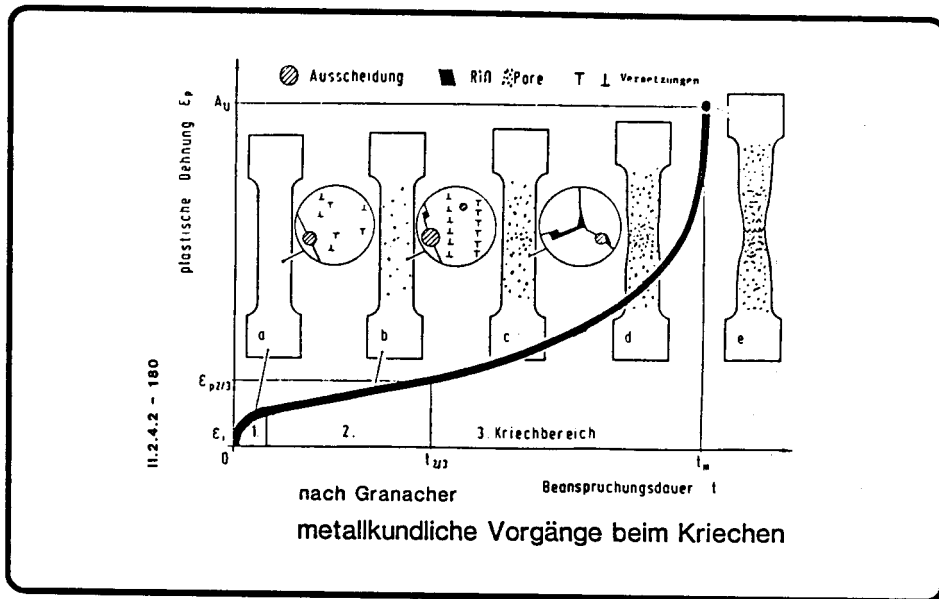


Bild 7

1. während des *primären Kriechens* (a) kommt es zur Ausbildung eines Versetzungsnetzwerkes, das durch die angelegte Beanspruchung gekennzeichnet ist. Dadurch nimmt die hohe anfängliche Kriechgeschwindigkeit ab, bis sich eine konstante, minimale Kriechgeschwindigkeit einstellt.
2. das *stationäre Kriechen* (b) ist gekennzeichnet durch eine mehr oder weniger konstante Kriechgeschwindigkeit und durch die Wechselwirkung zwischen Versetzungen und (Karbid)ausscheidungen. Hierbei verändern sich die Zusammensetzung und die Struktur der Karbide in Richtung auf eine stabilere Mikrostruktur. Gleichzeitig nimmt der Gehalt der Karbide an karbidbildenden Elementen auf Kosten der Matrix zu. Durch die allmähliche Auflösung von Feinausscheidungen und die Vergrößerung der Karbide kommt es einerseits zum Kornwachstum, andererseits zum Erweichung des Werkstoffes ("thermal softening"). Dieses thermal softening tritt vorzugsweise an Korngrenzen auf und es können sich dann ausscheidungsfreie Bereiche bilden. Die Bildung dieser ausscheidungsfreien Bereiche ist möglicherweise eine wichtige Vorbedingung für die Bildung von Kriechporen oder "cavities". Die erste Bildung von Kriechporen kann materialabhängig bereits sehr frühzeitig auftreten, an Reineisen z.B. wurden Kriechporen bereits im primären Kriechbereich beobachtet [6].
3. Die Überleitung zum *tertiären Kriechen* mit stetig zunehmender Kriechgeschwindigkeit erfolgt einerseits durch zunehmendes thermal softening, aber auch - vor allem beim üblichen "constant bad test" - durch Abnahme bzw. Schwächung des tragenden Querschnitts der Proben durch Dehnung und Kriechporen-Bildung (c), aber auch durch Oxidation und Abkohlung der Randschichten bei Prüfung ohne Schutzgas. Das Zusammenwachsen der Kriechporen führt dann schließlich zu Mikrorissen (d) und später zum endgültigen Kriechbruch (e).

#### 4. Eignung der Prüfverfahren

Prüfverfahren zur Lebensdauerermittlung sollen im Idealfall schnell, kostengünstig und zerstörungsfrei sein und eine möglichst genaue Restlebensdaueraussage liefern. Diese Vorstellungen sind leider ein Wunschtraum. Im folgenden sollen bewährte und aussichtsreiche Prüfverfahren

hinsichtlich ihrer kurz-, mittel- oder langfristigen Vorhersagemöglichkeiten bewertet werden.

#### 4.1 Prüfverfahren auf Basis von Mikrostrukturänderungen

Die vor der Werkstoffschädigung ablaufenden Mikrostrukturänderungen lassen sich nur teilweise im Sinne der oben aufgestellten Kriterien zu langfristigen Restlebensdaueraussagen nutzen. Da hierzu in der Regel elektronenmikroskopische Untersuchungen erforderlich sind, geht der Aufwand erheblich über den einer normalen Gefügeuntersuchung hinaus, die Messungen erfordern meist die Entnahme von Probestücken aus dem Bauteil.

Bei den Chrom-Molybdän-Vanadin-Stählen ändert sich die Karbid- bzw. die Subkornstruktur eindeutig in Abhängigkeit von den 3 Lastparametern Zeit, Temperatur und Spannung [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Diese Mikrostrukturelemente lassen sich daher direkt für Lebensdaueraussagen nutzen. Weitere Untersuchungen an diesen Stählen zur Quantifizierung der auftretenden Mikrostrukturänderungen wären daher in Zukunft von Nutzen.

Für die Chrom-Molybdän-Stähle sind diese zeitlichen Gefügeänderungen lediglich temperaturinduziert, nicht jedoch spannungsabhängig [16, 17, 18, 19]; sie eignen sich deshalb zur Restlebensdauerbestimmung nur in solchen Sonderfällen, in denen die Betriebsspannungen genau bekannt sind. Solche Sonderfälle können sein: Rotoren bei Turbinen, bestimmte Sammlergeometrien oder gerade Rohrleitungsabschnitte.

Die Karbideinformung als Maß für Grobstrukturänderungen, die metallografisch oder durch Härtemessungen relativ einfach erfaßt werden können, läßt sich dagegen nicht isoliert für Lebensdauerbestimmungen nutzen. Gründe hierfür sind: keine oder nur geringfügige spannungsabhängige Veränderung, sowie fehlende Korrelation zum verbleibenden Kriechwiderstand und damit zur Restlebensdauer. Die Karbideinformung kann jedoch als Indikator der betrieblichen Temperaturbelastung außerordentlich nützlich sein, z.B. bei fehlender Information über die bisherige Betriebsbeanspruchung. Weitere Untersuchungen zur Quantifizierung der auftretenden Effekte sind deshalb wünschenswert.

#### 4.2 Prüfverfahren auf Basis der Werkstoffschädigung durch Kriechporen

Es kann keinen Zweifel darüber geben, daß die Bildung von Kriechporen und das endgültige Versagen spannungsabhängig sind. Hier ist demzufolge die Abhängigkeit von allen 3 Lastparametern gegeben, wie oben postuliert. Werkstoffmechanische Grundlagen für die Bildung und das Wachsen von Kriechporen hat H. Riedel unter Berücksichtigung metallkundlicher Vorgänge im Gefüge formuliert [20]. Porenbildung und -wachstum sind in komplexer Weise von der Spannung abhängig, und zwar sowohl von der Hauptnormalspannung als auch von der Vergleichsspannung. Die Kriechporenbildung ist also nicht nur von der Spannung, sondern auch vom Spannungszustand abhängig. Ergebnisse aus einachsigen Versuchen lassen sich deswegen nicht ohne weiteres auf mehrachsige beanspruchte Bauteile übertragen.

Porenbildung: $J^* = \alpha \cdot \dot{\epsilon} \propto \sigma_e^2$	Porenwachstum: $\dot{R} \sim B \cdot \sigma_e^{n-1} \cdot \sigma_I$
--	---

Diese komplexe Spannungsabhängigkeit erschwert die Vorausberechnung von Kriechporenbildung und -wachstum in Kraftwerksbauteilen erheblich, weil hierfür die verschiedenen Spannungskategorien in Einzelvektoren zerlegt und jeweils wieder beanspruchungsgerecht kombiniert werden müssen [21].

Zur quantitativen Beschreibung des Schädigungsfortschritts durch Kriechporen hat sich der A-

Parameter als geeignet erwiesen. Hierfür werden die Anzahl der Korngrenzen, die Kriechporen enthalten, zur Gesamtzahl der Korngrenzen ins Verhältnis gesetzt, und zwar unabhängig von der Anzahl der Kriechporen auf diesen Korngrenzen. Der Vorteil des A-Parameters ist seine weitgehende Unabhängigkeit von metallografischen Präparationstechniken [22], sowie seine Verträglichkeit mit werkstoffmechanischen Porenbildungstheorien, die davon ausgehen, daß die Tragfähigkeit der Korngrenze dann erschöpft ist, sobald die erste Kriechpore auftritt - "constrained cavitation" [23]. Nachteil des A-Parameters ist, daß er bei der Beschreibung fortgeschrittener Kriechschädigung unbefriedigend differenziert.

Bei einem "round robin"-Test, der durch Eurotest organisiert wurde [24], hatten einige der beteiligten Prüfstellen bereits Schwierigkeiten, einen zugelieferten Testabdruck auszuwerten; außerdem waren leider nicht alle Teilnehmer der Versuchsreihe in der Lage, wenigstens im Labor einen Gefügeabdruck von hinreichender Qualität zu erzeugen. Das Ergebnis dieses "round robin"-Tests unterstreicht die Notwendigkeit einer exzellenten Schulung des Prüfpersonals, um auch unter Feldbedingungen die notwendige hohe Qualität von Gefügeabdrücken sicherzustellen.

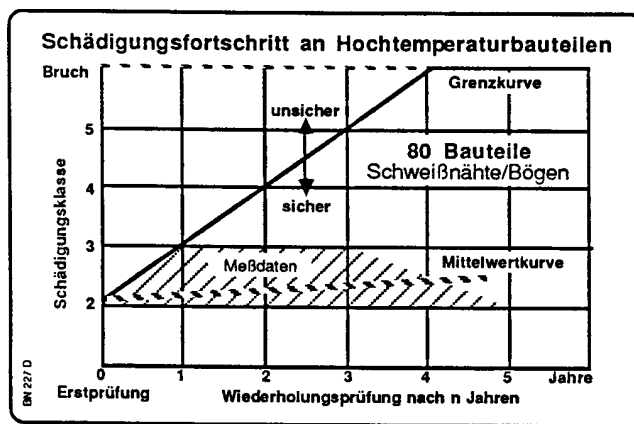


Bild 8

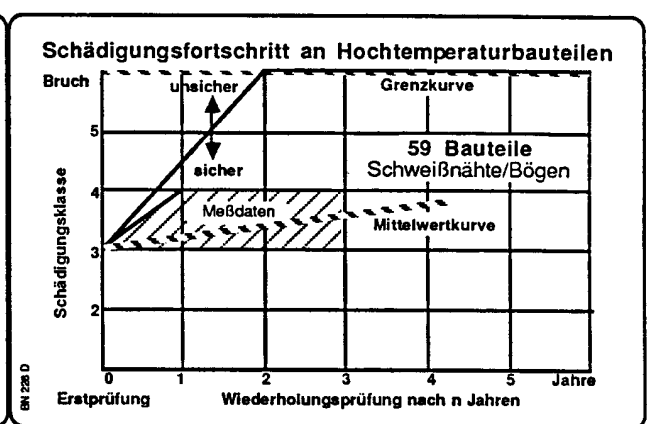


Bild 9

Das heute zu kurz bzw. mittelfristigen Lebensdauervorhersagen routinemäßig eingesetzte Gefügeabdruckverfahren zur Messung und Beurteilung der beanspruchungsabhängigen Kriechporenbildung hat sich bewährt; besonderer Vorteil des Verfahrens hierbei ist seine weitgehende Unabhängigkeit von der Kenntnis betrieblicher Beanspruchungen. Eine langfristige Lebensdauervorhersage läßt sich dann ableiten, wenn aufwendigere quantitative Auswertungen an den Abdrücken durchgeführt werden, hier sind dann allerdings auch genauere Kenntnisse der Betriebsbeanspruchungen notwendig. Grundlage für derartige Vorhersagen ist allerdings die genaue Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Spannung, Dehnung und Kriechporenbildung für die eingesetzten Kraftwerkswerkstoffe. Diese Zusammenhänge sind jedoch heute noch nicht ausreichend genau bekannt. Hier sehen wir für die Zukunft noch weiteren Tätigkeitsbedarf.

### 4.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren für die Inspektion

Die Situation bei den klassischen zerstörungsfreien Prüfverfahren wie Oberflächenrißprüfung und Ultraschallprüfung ist aus lebensdauer technischer Sicht unbefriedigend, trotzdem sind diese Prüfverfahren zur Sicherstellung der Rißfreiheit der Komponenten als verspätete Qualitätssicherungsmaßnahme unerlässlich. Sowohl die gängigen Oberflächen- als auch Volumenprüfverfahren erlauben derzeit noch keine befriedigende Aussage über vorhandene Mikrorisse. Die Entwicklung von Oberflächenprüfverfahren mit höherer Auflösung wäre wünschenswert.

Aufweitungsmessungen sollen Aufschluß geben über die verbrauchte Dehnung in den Bauteilen und eine erste Bewertung des Lebensdauer verbrauchs liefern. Das Erreichen der in TRD 508, Anlage 1, festgelegten Grenzwerte von 2 bzw. 1 % bleibender Dehnung muß jedoch nach neuerer Auffassung nicht notwendigerweise das Ende der Lebensdauer des Bauteils bedeuten [25].

An die praktische Durchführung der Aufweitungsmessung müssen hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt werden. Bei der Bewertung der Messungen sollte man sich vor Augen führen, daß die in den Prüfindervallen zu erwartende Bauteildehnung im Bereich der Meßgenauigkeit liegt. Erfahrene Praktiker wissen, daß die Auswahl repräsentativer Prüfstellen außerordentlich problematisch ist. Das endgültige Versagen der Rohrleitung kann meist nicht durch Aufweitungsmessungen vorherbestimmt werden. Das liegt daran, daß nach einer Periode gleichmäßiger geringer Bauteildehnung die erwarteten hohen Restdehnungen meist nur lokal in der unmittelbaren Umgebung des späteren Risses auftreten und so bei der Aufweitungsmessung nicht auflösbar sind. Überdies ist die Aufweitungsmessung nur für einfach geformte Bauteile, z.B. gerade Rohrleitungen, geeignet. Solche Bauteile sind aber in der Regel nicht durch vorzeitiges Versagen gefährdet.

Wesentlich höhere Genauigkeiten bei der Dehnungsmessung von Bauteilen lassen sich durch den Einsatz von kapazitiven Dehnungsmeßstreifen erzielen, jedoch auf Kosten einer sehr kleinen Prüffläche. Das führt zu der Forderung, daß der Anwendung derartiger DMS eine sorgfältige Analyse der Bauteilbeanspruchung vorausgehen muß, um sicherzustellen, daß der DMS an einer Stelle des Bauteils appliziert wird, an der später auch repräsentative Dehnungen auftreten. Mit ihrer hohen Genauigkeit und Stabilität, auch bei längerfristigen Prüfaufgaben, eignen sich kapazitive Dehnungsmeßstreifen besonders zur Überprüfung der Richtigkeit von Spannungsanalysen sowie zur on-line Kontrolle von Optimierungen im Hängersystem.

#### 4.4 Zerstörende Prüfverfahren

Durch die Betriebsbeanspruchung bei hoher Temperatur wird Lebensdauer bzw. Kriechdehnung verbraucht. Die verbleibende Lebensdauer kann - mit gewissen Einschränkungen - direkt aus der Extrapolation von kurzzeitigen Kriechversuchen ermittelt werden, siehe Bild 10. Der höhere Aufwand für längerlaufende Versuche und die damit gewonnene Genauigkeit der Extrapolation lohnt sich lediglich bei der Untersuchung von Proben aus einem teuren Einzelbauteil.

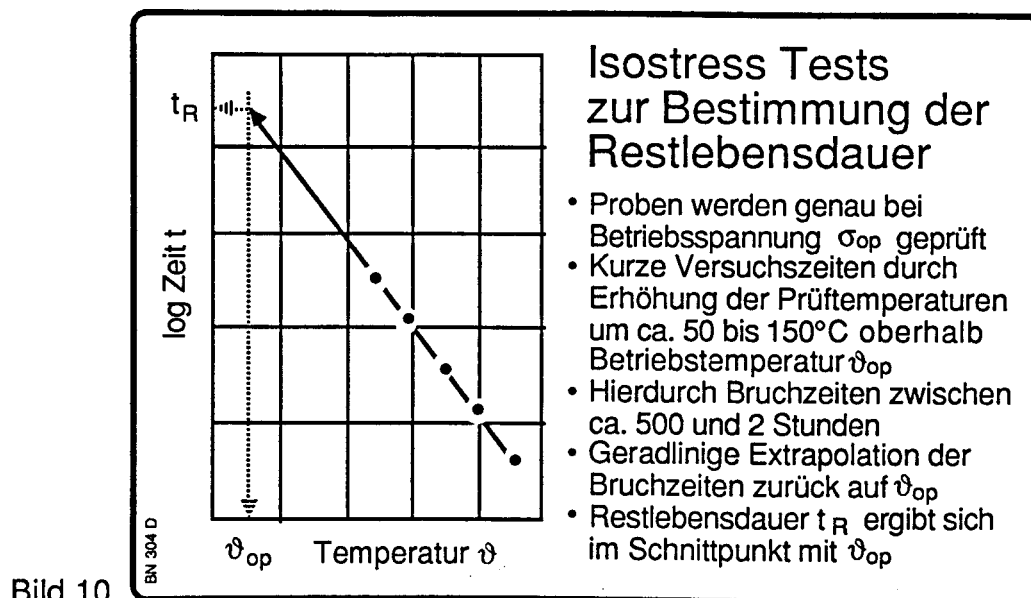


Bild 10

Ob Kriechversuche oder Kriechzugversuche längerer oder kürzerer Dauer verwendet werden und ob die Extrapolation der Versuche linear über  $T$ , über  $1/T$  oder noch komplizierter erfolgt, ist relativ unerheblich; die extrapolierte Restlebensdauer muß ohnehin zur Absicherung von Probenahmeunsicherheiten mit einem Sicherheitsfaktor bewertet werden. Zeitstandversuche kurzer Dauer - ja oder nein - das ist mittlerweile fast eine Glaubensfrage geworden; es sollte jedoch anerkannt werden, daß die Kurzzeitstandversuche in der Praxis zufriedenstellend funktionieren. Warum sie so überraschend gut funktionieren und warum sich offensichtlich Versuche mit erhöhter Temperatur treffsicherer extrapolieren lassen, als solche mit erhöhter Spannung, ist noch

weithin ungeklärt und sollte in nächster Zukunft metallkundlich untersucht werden. Begrüßenswerte Ansätze stellen Arbeiten von Etienne u.M. dar, das Verformungsverhalten der Proben im Rahmen metallkundlicher Untersuchungen mit zu beurteilen [26, 27]. Die Versuche führen unter anderem zu dem Schluß, daß Kurzzeitkriechversuche besonders dann befriedigend extrapoliert werden können, wenn die Verformungsfähigkeit des Werkstoffes bereits deutlich reduziert ist.

Unsicherheiten bei Zeitstandversuchen ergeben sich prinzipiell dadurch, daß sie die Betriebsbeanspruchung nur sehr unvollkommen simulieren. Lastwechselversuche oder Zugschwellversuche wären besser, hierfür wäre dann allerdings eine sehr genaue Analyse der Betriebsbedingungen zur Festlegung der Versuchsbedingungen erforderlich. Zur Ermittlung der früheren Betriebsbeanspruchung zum Zwecke einer genaueren Festlegung der Prüfbedingungen können Dehnungsmessungen am Bauteil, aber auch zerstörende Verfahren wie Dichtemessungen oder der Sulzer-Stufenkriechversuch außerordentlich nützlich sein. Weiterführende Untersuchungen wären hier sicherlich von Wert.

Bruchmechanische Verfahren tragen wesentlich bei zur Beurteilung der Restlebensdauer von Bauteilen, weil sie einerseits die Bauteilzähigkeit bewerten und andererseits das Wachstum von bereits vorhandenen Anrissen beurteilen und das endgültige Versagen vorherberechnen können. Da bruchmechanische Verfahren in der Regel erst dann zum Einsatz kommen, wenn bereits Anrisse im Bauteil vorhanden sind, kommen sie in der Regel nicht mehr für langfristige Lebensdauererhersagen infrage. Für die Anwendung bruchmechanischer Analysen sind zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung der Rißgrößen sowie Gefügeabdücke zur Ermittlung des relevanten Schädigungsmechanismus erforderlich

## 5. Analyseverfahren

Im Rahmen der Lebensdaueranalyse von Hochtemperaturrohrleitungen lassen sich drei verschiedene Anwendungsbereiche mit der Spannungsanalyse erschließen:

- Systemabhängige Beanspruchungen für eine verbesserte rechnerische Lebensdauerermittlung, die z.B. analog TRD 508, Anlage 1 durchgeführt werden kann.
- Lokalisierung der hochbeanspruchten Stellen zur Vorbereitung von zerstörungsfreien oder zerstörenden Werkstoff- oder Bauteiluntersuchungen im Rahmen von Inspektionen
- Detektion von konstruktiven Schwachstellen in der Verlegung und Lastabtragung, wie sie gerade bei Altanlagen immer wieder festgestellt werden. Anschließende Parameterstudien führen dann zu Maßnahmen der Lebensdauererweiterung durch konstruktive Verbesserungen des Unterstützungskonzeptes oder der Verlegung.

Wie wichtig eine möglichst genaue Beanspruchungsermittlung im Hinblick auf die rechnerische Lebensdauerermittlung ist, zeigt Bild 11, das den Einfluß üblicher Toleranzen bei den Eingangsgrößen auf die rechnerisch ermittelte Zeitstanderschöpfung für Stahl 10 CrMo 9 10 bei 535 °C, einer typischen Einsatztemperatur, darstellt: Eine Abweichung von  $\pm 10\%$  bei der Bauteilspannung führt hier bereits zu einem Toleranzband der Zeitstanderschöpfung von 0,6 bis 1,7. Aus dieser vereinfachten Darstellung folgt unmittelbar, daß eine genaue rechnerische Lebensdaueranalyse nur dann ermöglicht wird, wenn auch die zeitliche Abfolge der Betriebsbeanspruchungen und ihre genaue Höhe bekannt sind. Die Gegenüberstellung macht aber auch sehr deutlich, daß einer der dominierenden Einflußparameter für die Zeitstanderschöpfung das Streuband der Werkstoffeigenschaften ist. Hieraus läßt sich unmittelbar ableiten, daß ohne Untersuchungen des Werkstoffes bzw. der Bauteile im Rahmen der Lebensdaueranalyse nur eine sehr ungenaue Restlebensdauerabschätzung möglich ist.



## Rechnerische Zeitstanderschöpfung $e_z$ Einfluß von Toleranzen in den Eingangsgrößen

Eingangsgröße	Toleranz	Streuband $e_z$
Temperatur	$\Delta\vartheta = \pm 5^\circ\text{C}$	$0,7 \leq e_z \leq 1,5$
Spannung	$\Delta\sigma = \pm 10\%$	$0,6 \leq e_z \leq 1,7$
Zeitstandfestigkeit	--	$1 \leq e_z \leq 4$
Stahl 10 CrMo 9 10 $\vartheta = 535^\circ\text{C}$	$Z_{\vartheta/\rho} = Z_{B/\vartheta/\rho} = 200\ 000\ \text{h}$ Zeitstandfestigkeiten nach DIN 17 175	

BN 329 D

Bild 11

Zusatzlasten aus Hängerfehlanspassungen, Bild 12, führen zu einer Erhöhung der Eigengewichtsmomente und damit zu einer Erhöhung der kriechrelevanten Primärspannungen. Die Folge können sichtbare und meßbare Verlagerungen der Rohrleitung sein. Dehnungsbehinderungen, Bild 13, durch Reib- oder Klemmeffekte in starren Lagern oder Kollisionen und Blockaden verursachen eine Erhöhung der Sekundärspannungen. Dies kann bei zyklischem Lastaufbau durch An- und Abfahrvorgänge zu einer vorzeitigen Erschöpfung des Werkstoffes führen. Daher kommt der Ermittlung der tatsächlichen Bauteil- und Leitungsgeometrie, des aktuellen Lastabtragungskonzeptes und der Detektion von Hängerfehlanspassungen und möglichen Zwängungen im Rahmen der Inspektionstätigkeiten vor Ort eine zentrale Bedeutung zu.

### Zusatzbeanspruchungen in Rohrleitungen - Ursachen

#### Fehlanspassung von Hängern durch:

- falsche Gewichtsermittlung
- fehlerhafte Hängerauswahl
- fehlerhafte Vorspannung
- Veränderung der Federrate bzw. der Hängerkraft durch Alterung

BN 326 D

Bild 12

### Zusatzbeanspruchungen in Rohrleitungen - Ursachen

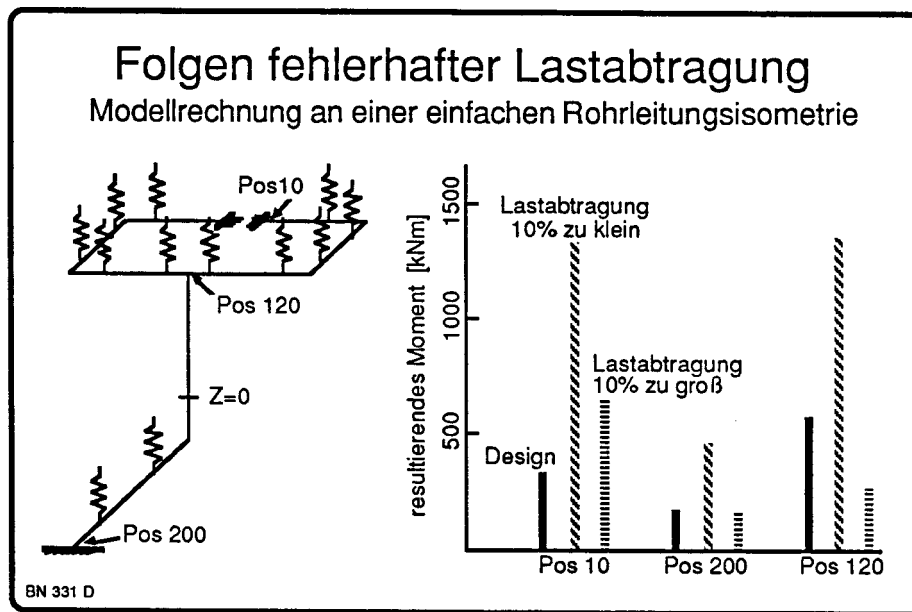
#### Zwängungen durch:

- hohe Reibung in Gleitlagern und Führungen
- Rückstellkräfte infolge Hängerschragstellung bei zu kurzen Pendellängen
- konstruktiv ungünstig ausgeführte Lastabtragungen (fehlende kardänische Lagerung von Z-Stops)
- Kollision der Rohrleitungen mit anderen Gewerken
- blockierte Feder- und Konstanthänger

BN 327 D

Bild 13

Die Messungen der Wanddicke, Rohrverschiebungsmessungen und die Erfassung des Ist-Zustandes der Rohrleitungsaufhängung sind als integraler Bestandteil der rechnerischen Rohrleitungsanalyse bzw. der rechnerischen Ermittlung des Lebensdauer verbrauchs oder der Restlebensdauer unverzichtbar. Ohne diese Basismessungen an der Rohrleitung ist eine rechnerische Analyse, unabhängig vom betriebenen Rechenaufwand, praktisch wertlos. Bild 14 verdeutlicht, daß bereits bei unzureichender Lastabtragung von nur 10% bis zu 3-fach höhere Momente entstehen können, als im Rahmen der Rohrleitungsanalyse mit Auslegungsdaten errechnet. Hierdurch verdreifacht sich auch die Längsspannung aus Eigengewichtsmomenten, die zu der Längsspannung aus Innendruck addiert werden muß. Dies kann im Extremfall bei voller Ausnutzung der Werkstofffestigkeit für die Umfangsspannungen aus Innendruck zu einer Erhöhung der kriechrelevanten Primärspannungen um den Faktor 2 führen. Hierdurch wird die Lebensdauer um einen Faktor von ca. 5 reduziert.



## 6. Zusammenfassung und Diskussion

Die Zuverlässigkeit und eine zufriedenstellende Lebensdauererwartung von Kraftwerksbauteilen hängt wesentlich von der gezielten Anwendung metallurgischer Prüfverfahren sowohl im Rahmen der Qualitätssicherung als auch bei den Inspektionen ab. Für die mittel- bis langfristige Restlebensdauerbestimmung kommen weiterhin bewährte Verfahren infrage wie Kurzzeitkriechversuche und Cavity-Untersuchungen; für deren mehr quantitative Anwendung sind jedoch noch weitere Forschungsanstrengungen nötig. Dehnungsmessungen an Bauteilen und evtl. neuentwickelte ZfP-Verfahren können weitere Fortschritte bringen, entsprechende Untersuchungen sind bereits im Gange.

Alle Verfahren benötigen allerdings wegen der zukünftig erforderlichen höheren Genauigkeit für mittel- und langfristige Lebensdauervorhersagen einen gegenüber bisher wesentlich gesteigerten Prüf- und Analyseaufwand. Dieser erhöhte Aufwand bezieht sich insbesondere auf:

- Erfassung der bisherigen und zukünftigen betrieblichen Beanspruchung
- Quantifizierung der angewandten Meßverfahren und ihrer Auswertung
- Einsatz werkstoffgerechter Extrapolationsverfahren
- Verbesserte und beanspruchungsgerechte Probenahme
- Optimierte problemgerechte Kombination von Prüftechniken
- Verbesserte quantitative Analysetechniken

Bei der Beurteilung der Restlebensdauer haben metallkundliche Verfahren bisher noch einen für ihre Aussagemöglichkeiten zu geringen Anteil. Das dürfte daran liegen, daß bisher zwar die Gefügeänderungen im Kriechbereich qualitativ verstanden werden, aber quantitative Zusammenhänge zwischen Zeitstandsbeanspruchung und Gefügeänderungen noch nicht vorliegen.

Die steigenden Anforderungen an die Restlebensdaueranalyse machen es jedoch mehr als bisher nötig, in Zukunft Verfahren miteinander zu kombinieren und auf die jeweiligen Anforderungen hin maßzuschneidern. Isolierte Prüfmaßnahmen, die nicht durch entsprechende analytische Maßnahmen flankiert sind, liefern in der Regel nur eine begrenzte Aussage. Isolierte spannungsanalytische Untersuchungen ohne geeignete Flankierung durch prüftechnische Maßnahmen sind sogar in der Regel völlig nutzlos.

Es kann vorkommen, daß die Zielvorgaben für die zukünftige Betriebsweise und -dauer wegen des fortgeschrittenen Schädigungs- oder Beanspruchungszustandes der Anlage nicht eingehalten werden können. In diesem Falle können Alternativen vorgeschlagen werden. In Zusammenarbeit

mit dem Betreiber kann aber auch versucht werden, aus den Ergebnissen die noch verbleibenden wirtschaftlichen Betriebsmöglichkeiten herauszufiltern.

Im Rahmen von Reparaturen nach betriebsbedingten Bauteilschäden oder Fehl-funktionen von Bauteilen sollten immer lebensdauer verlängernde Maßnahmen vorgesehen werden, die durch Beseitigung der Schadensursache den wiederholten Eintritt der Schädigung oder des Schadensereignisses verhindern können. Dieser Aspekt von Reparaturmaßnahmen ist in der Vergangenheit meist nicht ausreichend berücksichtigt worden. Hierzu gehören:

- Beanspruchungsanalyse an den schadhafte Bauteilen und Schwachstellenanalyse zum Auffinden weiterer schadhafte Bauteile
- Erweiterte Inspektion zur Analyse der Schadensursache sowie Stichprobenprüfung von kritisch beanspruchten Bauteilen an Schwachstellen
- Einleitung von Maßnahmen zur Lebensdauer verlängerung:
  - Optimierung des Lastabtragungskonzeptes
  - Reparatur oder Austausch fehlerhafter Bauteile
  - beanspruchungsgerechte Gestaltung neuer Komponenten
  - Optimierung der Betriebsbedingungen

Empfehlungen zur Durchführung gezielter lebensdauer verlängernder Maßnahmen ergeben sich automatisch bei der Restlebensdaueranalyse. Sie kommen spätestens immer dann in Betracht, wenn sich hierbei eine unvertretbar kurze Restlebensdauer ergeben hat. Es hat sich gezeigt, daß bei der Lebensdaueranalyse und bei lebensdauer verlängernden Maßnahmen Stufenkonzepte vorzuziehen sind, die sich flexibel und wirtschaftlich an praktische Gegebenheiten und an zwischenzeitlich gewonnene Erkenntnisse anpassen können.

### Schrifttum:

- 1 F.J. Spalthoff: "Lebensdauer verlängerung, so aktuell wie nie zuvor", Technische Überwachung Bd. 28 (1987), 7/8, 5. 257
- 2 Expert Discussion on "Microstructural Aspects of Creep", MPI Eisenforschung, Düsseldorf, 19. Mai 1987
- 3 B. Neubauer, P. Auerkari, R. Blum, K. Borggreen, C.F. Etienne, 6. IIschner, H. Riedel, G. Sauthoff, ~h. Solenthaler:  
"Werkstofftechnische Möglichkeiten für die mittel- und langfristige Restlebensdauer vorhersage von kriechbeanspruchten Kraftwerkskomponenten", Vortrag auf der VGB-Konferenz Forschung im Kraftwerk, Essen, 16.117. März 1988
- 4 B. IIschner: "Hochtemperaturplastizität", Springer-Verlag, Berlin, 1983
- 5 J. Granacher, H. Kaes, K.-H. Keienburg, M. Krause, K.-H. Mayer und H. Weber: "Langzeitverhalten von Stählen für den Kraftwerksbau – Aufgabenstellungen im Wandel der technischen Anforderungen", VGB-Konferenz "Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk 1980", 9./10. Dez, Düsseldorf
- 6 D. Gräschel: "Beitrag zur Kriechporenbildung", Studienarbeit 1973, Inst. Werkstoffkde., Univ. Erlangen
- 7 K.R. Williams: "Examination of the creep behaviour of microstructurally unstable ferritic steels", in "creep and Fracture of Engineering Materials and Structures", Proceedings of the International conference, Swansea, Mar 24-27, 1981
- 8 K.R. Williams und 6. Wilshire: Materials Science and Engineering, 47(1981), pp 151 -60
- 9 T. Polzin: "Qualitative und quantitative Zusammenhänge zwischen Felnggefüge und Zeitstandverhalten des warmfesten Stahls 14 MoV 6 3, Dissertation D 17, Darmstadt 1977
- 10 K. Borggreen: "Investigation of Service Exposed Material from Hot Reheat Pipes of steel 1/2 Cr 1/2 Mo 1/4 ~ Department of Metallurgy, The Technical University if Denmark, Jun 1985
- 11 P. Huntley: "The oxidation resistance and structural stability of a 12% Cr -steel undergoing creep", Ph.D.-Thesis, Department of Metallurgy, The Technical University if Denmark, Jul 1986
- 12 H.D. Schulze, H. Brenner und 6. Wittwer-Hardt: "Gefügeuntersuchungen am Werkstoff X 20 CrMoV 12 1 nach langzeitiger betrieblicher Beanspruchung bei 5402C und Im Neuzustand", in-erner Bericht, RWTÜV, 1981
- 13 G. Eggeler, 6. IIschner, P. Schepp und R. Zohner: "Kurzzeitkriechverhalten des warmfesten Stahls X 20 CrMoV 12 1 bei 500 bis 60000, material + technik 14 (1986) 4, 5. 187-95
- 14 G. Eggeler, N. Nilsvang and 6. IIschner: "Microstructural changes in a 12% Chromium steel during creep", steel research 58 (1987) 2, 5. 97-103
- 15 Ch. Solenthaler, A. Rosset und 6. Walser: "Development and Application of 9-12% Cr -Steels for

- Temperatures between 550 and 620°C, ~OST 501 Project OH 2, Final Report, Jan 1988
- 16 O. Schulze und G. Sauthoff: "Einfluß des Kriechens auf das Ausscheidungsgefüge bei Langzeitbeanspruchung -IV. Untersuchungen an dem Stahl 10 CrMo 9 10", Archiv Eisenhüttenwes. 55 (1984) 2, 5. 73-80
- 17 G. Sauthoff: "Einfluß des Kriechens auf das Ausscheidungsgefüge bei Langzeitbeanspruchung -1. Abschätzung möglicher Einwirkungen der Kriechspannung", Archiv Eisenhüttenwes. 54 (1983) 4, 5. 151-54
- 18 G. Sauthoff: "Einfluß des Kriechens auf das Ausscheidungsgefüge bei Langzeitbeanspruchung -II. Abschätzung möglicher Einwirkungen der plastische Dehnung", Archiv Eisenhüttenwes. 54 (1983) 4, 3. 155-59
- 19 O. Schulze und G. Sauthoff: "Einfluß des Kriechens auf das Ausscheidungsgefüge bei Langzeitbeanspruchung -III. Untersuchungen an ferritischen Modellstählen", Archiv Eisenhüttenwes. 54 (1983) 8, 3. 337-42
- 20 H. Riedel: "Fracture at High Temperatures", Springer-Verlag, Heidelberg, 1987
- 21 R.J. Browne, D. Lonsdale and P.E.J. Flewitt: "The role of stress state on the creep rupture of 1 Cr /2 Mo and 12 Cr 1 Mo <sup>1</sup>/<sub>4</sub>V W tube steels", in "Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures", Proceedings of the International Conference, Swansea, Mar 24-27, 1981
- 22 M.S. Shamma, "Predicting the Residual Life of 1 Cr /2 Mo Coarse-grained HAZ-Material by Quantitative Cavitation Measurements", CEGB-Report TPRD/L/3199/R87, Nov 1987
- 23 H. Riedel: "Bildung und Wachstum von Cavities", Expert Discussion on "Microstructural Aspects of Creep", MPI für Eisenforschung, Düsseldorf, 19. Mai 1987
- 24 Eurotest Replica Working Group: "Round Robin Test on Replication", Restricted Eurotest Report, 1987
- 25 F. Arens-Fischer und B. Neubauer: "Prüfungen für den sicheren Weiterbetrieb zeitstandbeanspruchter Bauteile", VGB-Sondertagung "Beurteilung von Bauteilen nach Betriebsbeanspruchung im Kriechbereich", Essen 1984
- 26 C.F. Etienne: "Evaluation of ECSC-Studies on Residual Life", Contract No. 7210-ZZ/439, Synthesis Report, EUR 9878 EN, 1985
- 27 C.F. Etienne, W. Husslage: "Restlebensdauerermittlung von warmfesten Stählen mit Hilfe von Dehnungswechselfersuchen", Arch. Eisenhüttenwes. 48 (1977) 9, 5. 495-99