

43. Vortrags- und Diskussionstagung

Werkstoffprüfung 2025

FWWHT

Forschungsvereinigung für Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe

Gemeinschaftsforschung bei der Hochtemperatur-Werkstoffcharakterisierung

Dr.-Ing. Paul Hahn

Dr.-Ing. Torsten-Ulf Kern, Dr.-Ing. Annett Udoh,

Dr.-Ing. Michael Schwienheer, Dr.-Ing. Stefanie Brockmann

Dresden & online, 27.11.2025

Gemeinschaftsforschung bei der Hochtemperatur-Werkstoffcharakterisierung

- Einleitung
- Die Forschungsvereinigung für Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe (FVWHT)
 - Historie und Ziele
 - Mitglieder und Aufgaben
 - Projektgruppen
- Hochtemperaturprüfung vom Bauteil bis zur Standardprobe
- Langzeitprüfung - auch heute noch erforderlich?
- Industrielle Anwendung
- Erfahrungsaustausch, Vortragsveranstaltung der FVWHT
- Zusammenfassung

Gemeinschaftsforschung bei der Hochtemperatur-Werkstoffcharakterisierung

■ Einleitung

Dem Bedarf, Lösungen für wichtige Fragestellungen in der industriellen Anwendung zu finden und erarbeitetes Wissen durch Erfahrungsaustausch aufrechtzuerhalten, weiterzugeben, und final weiterzuentwickeln, kann man in verschiedenen Formen gerecht werden.

Hier spielt z.B. die vorwettbewerbliche Zusammenarbeit eine wichtige Rolle. Sie kann innerhalb von Verbänden oder Vereinen konzentriert werden und ermöglicht somit den Austausch zu technischen Fragestellungen sowie der Erstellung von Normen, Regelwerken und anderen hilfreichen technischen Unterlagen.

Durch die Einbeziehung von Instituten und Forschungseinrichtungen ergeben sich wichtige Schnittstellen zwischen Grundlagenarbeiten und der Umsetzung von technischen Lösungen in der Praxis. Gleichzeitig wird der technische Nachwuchs entwickelt und sichergestellt, dass die wirtschaftlichen Errungenschaften einer Gesellschaft erhalten werden können.

Historie zur Forschungs-Vereinigung für Warmfeste und Hochtemperatur-Werkstoffe (I)

- Mitte der 1930er Jahre hatte die deutsche Industrie als erste weltweit Dampfkesselanlagen mit Betriebstemperaturen oberhalb 500°C eingeführt. Berechnungsgrundlage waren zunächst Kurzzeitversuche von rd. 50 h Dauer.
- Aufgrund von Schadensfällen musste man erkennen, dass Langzeitversuche bis zu 50.000 h notwendig waren.
- Nach Ende des 2. Weltkrieges setzte in Deutschland mit dem Wiederaufbau von Kraftwerken und Produktionsanlagen eine rasante industrielle Entwicklung ein. Eine Steigerung der Effizienz war nur über die Erhöhung der Prozesstemperaturen und -drücke zu erreichen. Hieraus ergaben sich höhere Bauteiltemperaturen mit entsprechend komplexeren mechanischen und korrosiven Beanspruchungen.
- Bereits 1950 entstand die Idee, die Dampftemperaturen auf 600°C und darüber hinaus zu steigern.
- Für die Werkstoffhersteller ergab sich daraus ein Ansporn zur Entwicklung von neuen Werkstoffen mit verbesserten Eigenschaften.

Historie zur Forschungs-Vereinigung für Warmfeste und Hochtemperatur-Werkstoffe (II)

- Im Jahr 1949 wurde deshalb der Arbeitskreis „Gemeinschafts-Dauerstandversuche“ von verschiedenen Herstellern von Röhren, Guss- und Schmiedestücken gegründet.
- Da auch für die Stahlanwender aus den geplanten Langzeitversuchen ein direkter Nutzen entsteht, wurden sie überzeugt, sich an den gemeinschaftlichen Untersuchungen zu beteiligen. Dies war die Geburtsstunde der **Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle - AGW**.
- Fokuspunkte der Tätigkeit waren:
 - Langzeitverhalten verschiedener Werkstoffklassen bis > 100.000 Stunden (11,4 Jahre),
 - Ermittlung von 1-%-Zeitdehngrenzen und Zeitstandfestigkeiten >500°C,
 - Ermittlung der Ursachen für Sprödbruch,
 - Untersuchung langzeitiger Gefügeveränderungen,
 - Werkstoffverhalten unter Wechselbeanspruchungen.
- Im Laufe der Jahrzehnte hat sich die AGW weiterentwickelt in die heutige **Forschungsvereinigung für Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe – FVWHT** mit Sitz in Düsseldorf.

Ziele der FVWHT

- Es werden Langzeitprüfungen (insbesondere Kriechversuche) im Temperaturbereich von 450°C bis 1200°C durchgeführt.
- Werkstoffhersteller kooperieren mit Werkstoffanwendern und Herstellern von Energiewandlungsanlagen sowie Forschungsinstituten.
- Kriechbeständige Werkstoffe (ferritisch/martensitische Stähle, austenitische Stähle, Nickellegierungen) und ihre Schweißverbindungen werden untersucht und charakterisiert mittels
 - Zeitstandversuchen,
 - Ermüdungsversuchen,
 - Relaxationsversuchen,
 - Rissfortschrittsversuchen.
- Lösung von Fragestellungen, die sowohl Grundlagenarbeiten umfassen als auch anwendungsorientierte Probleme helfen zu beantworten.
- Einfluss des Produktherstellungsweges quantifizieren: konventionell (subtraktiv), aufbauend (additiv).

Mitglieder der FVWHT

- Trägerorganisationen
 - BDG - Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e.V.,
 - VAIS- Verband für Anlagentechnik und Industrie Service e.V.,
 - FVV e.V.,
 - Stahlinstitut VDEh,
 - vgbe energy e.V.
- Prüfstellen
 - IfW der TU Darmstadt,
 - MPA Stuttgart,
 - Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft
- Energiewandlungsunternehmen
 - Accelleron Switzerland Ltd,
 - Everllence SE,
 - General Electric,
 - MTU Aero Engines AG,
 - Power Service Solution GmbH,
 - SIEMENS Energy AG
- Hersteller:
 - AG der Dillinger Hüttenwerke,
 - Bilfinger Engineering & Technologies GmbH,
 - BGH Edelstahlwerke GmbH,
 - DMV GmbH,
 - Edelstahl Rosswag GmbH,
 - Saarschmiede GmbH Freiformschmiede,
 - Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH,
 - Sande Stahlguss GmbH,
 - Schmiedewerke Gröditz GmbH,
 - Schoeller Werk GmbH & Co. KG,
 - Tenaris Deutschland GmbH,
 - VDM Metals International GmbH,
 - voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG,
 - voestalpine Böhler Welding Group GmbH,
 - voestalpine Foundry Group

Aufgaben der FVWHT

- Bereitstellung erforderlicher Auslegungskennwerte für unterschiedlichste Bauteile bei erhöhten Temperaturen
- Planung, Betreuung und Auswertung von Gemeinschaftsversuchen innerhalb von 5 Projektgruppen
- Zeitstandversuche als Schwerpunkt der Gemeinschaftsarbeit, sowohl für Bauteile konventioneller Herstellung als auch für additiv gefertigte Bauteile (draht- oder pulverbasiert)
- Untersuchung und Bewertung des Einflusses von Wasserstoff auf die verschiedensten Werkstoffe
- Förderung des Erfahrungsaustausches in spezialisierten Projektgruppen zu Fachthemen, und Initiierung von externen Forschungsvorhaben, die auch durch projektbegleitende Arbeitsausschüsse fachlich begleitet werden

Projektgruppen der FVWHT

- W 1: Warmfeste Rohre und Blech
- W 2: Warmfeste Gusswerkstoffe
- W 3: Warmfeste Schmiedestücke und Stäbe
- WH2: H2-Werkstoffe
- W4AM: Additive Fertigung
- W 10: Hochtemperaturverhalten unter veränderlicher Beanspruchung
- W 11: Relaxationsverhalten
- W 12: Restlebensdauer
- W 13: Prüftechnik und Auswertefragen
- W 14: Kriechrisswachstum
- W 15: Fachausschuss Warmfeste Werkstoffe

**Betreuung der
langzeitigen
Untersuchungen**

**Betreuung von
Forschungsvorhaben
und Erfahrungs-
austausch**

**Förderung
durch z.B.**



FORSCHUNGSVEREINIGUNG DER
ARBEITSGEMEINSCHAFT DER EISEN UND
METALL VERARBEITENDEN INDUSTRIE E.V.

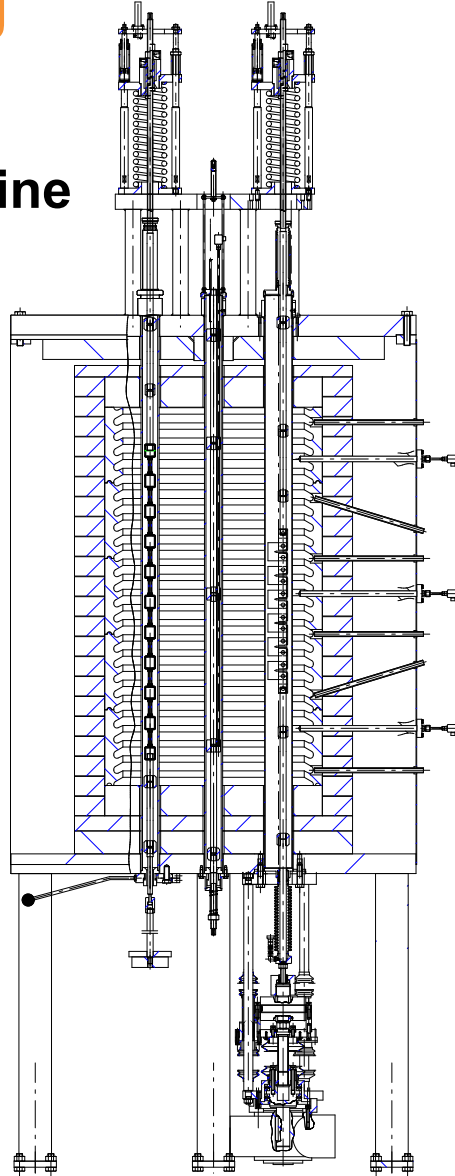
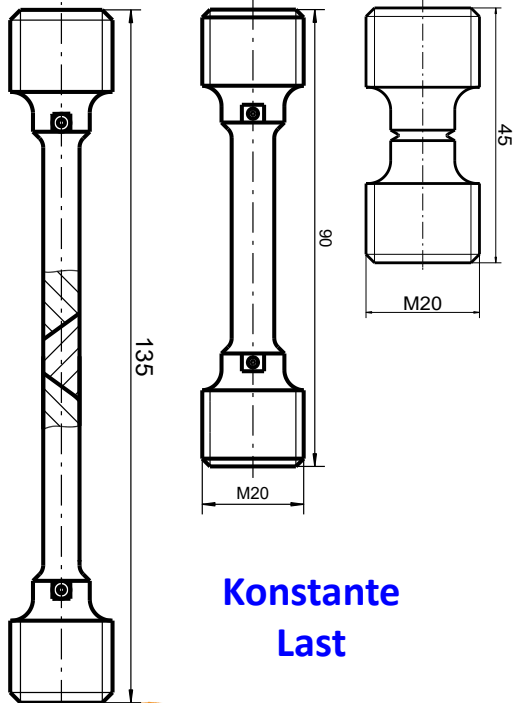


Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Zeitstandprüfung DIN EN ISO 204

Vielpostenprüfmaschine

- bis zu 60 Proben
- unterbrochene Dehnungsmessung
- Langzeitversuche > 100.000 h (11,4 Jahre)

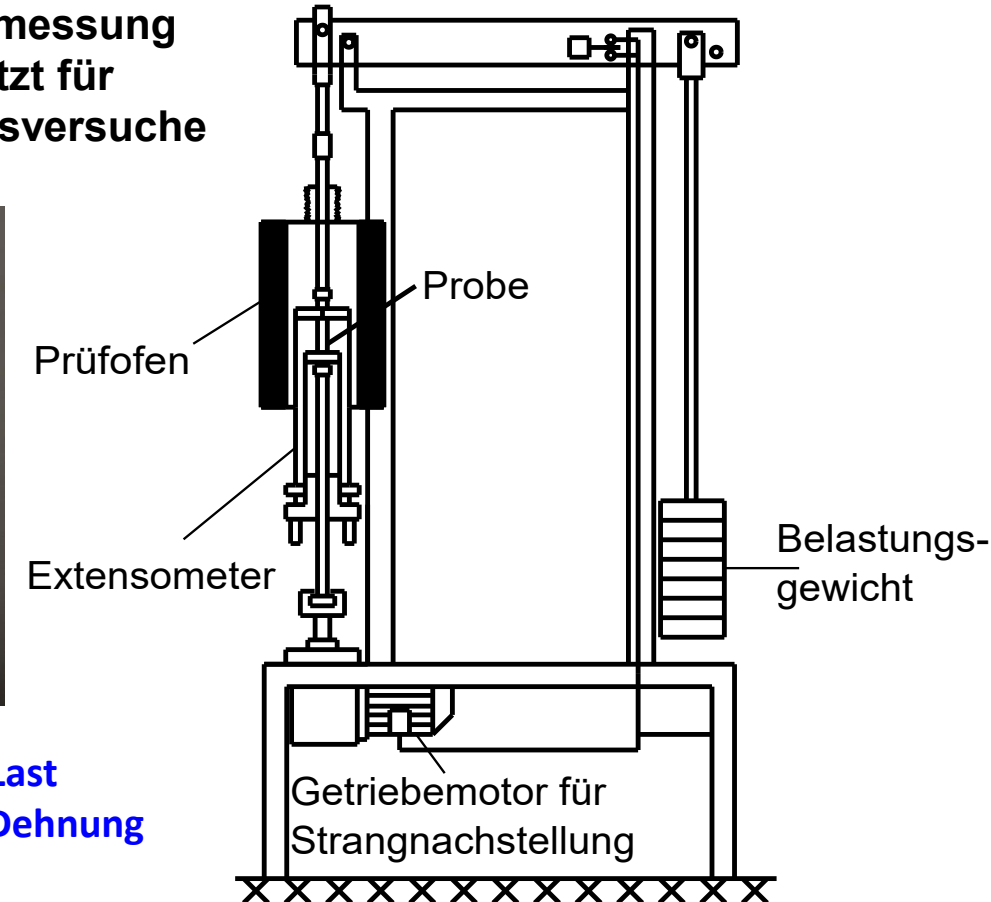


Einzelprüfmaschine

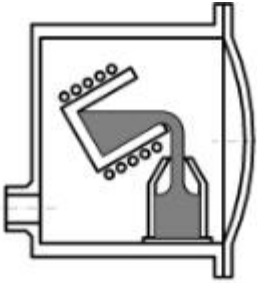
- kontinuierliche Dehnungsmessung
- auch genutzt für Relaxationsversuche



Zeitstand: konst. Last
Relax: konst. Dehnung



Quellen für Streuung von Kennwerten bei der Hochtemperaturprüfung



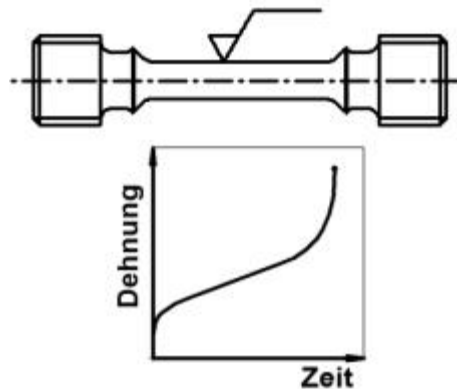
Werkstoffherstellung

- chemische Zusammensetzung
- Verfahrenstechnik
- Abgussparameter
- Schmiedeparameter



Bauteilherstellung:

- Wärmebehandlung
- Schweißen
- Nachverdichtung (HIP)



Zeitstandprüfung:

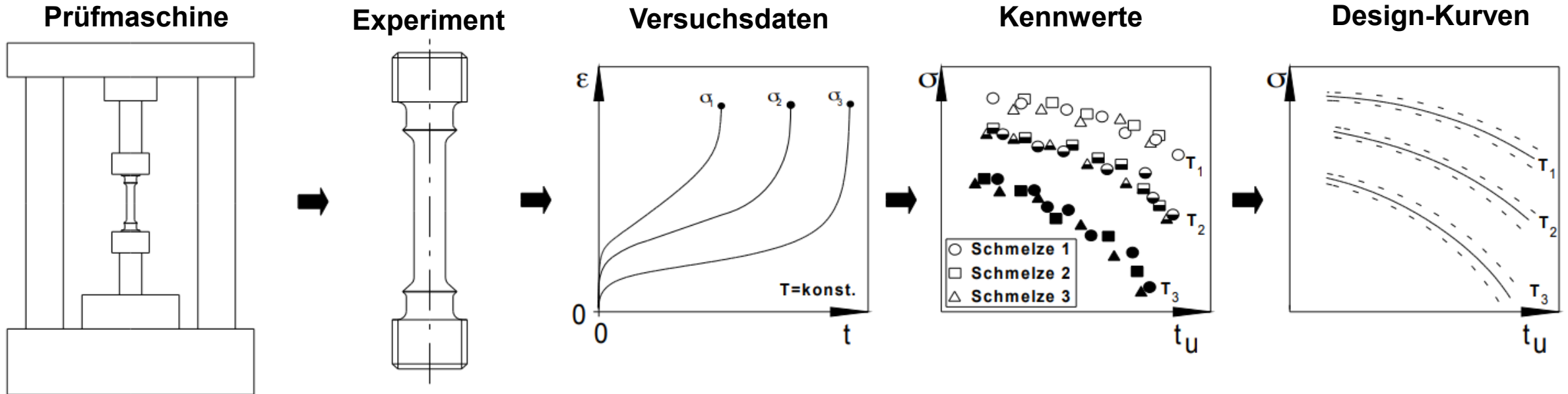
- Probenentnahme im Bauteil/Halbzeug
- Probenfertigung, Probengeometrie
- Prüfverfahren

Eigenschaften der Schmelze

Eigenschaften der individuellen Probe

Messunsicherheiten

Hochtemperaturversuche Datengenerierung und Kennwertermittlung



Werkstoffdaten

- Datenqualität
- Vergleichbarkeit
- Vorprüfungszeugnis

Experimentelle Daten

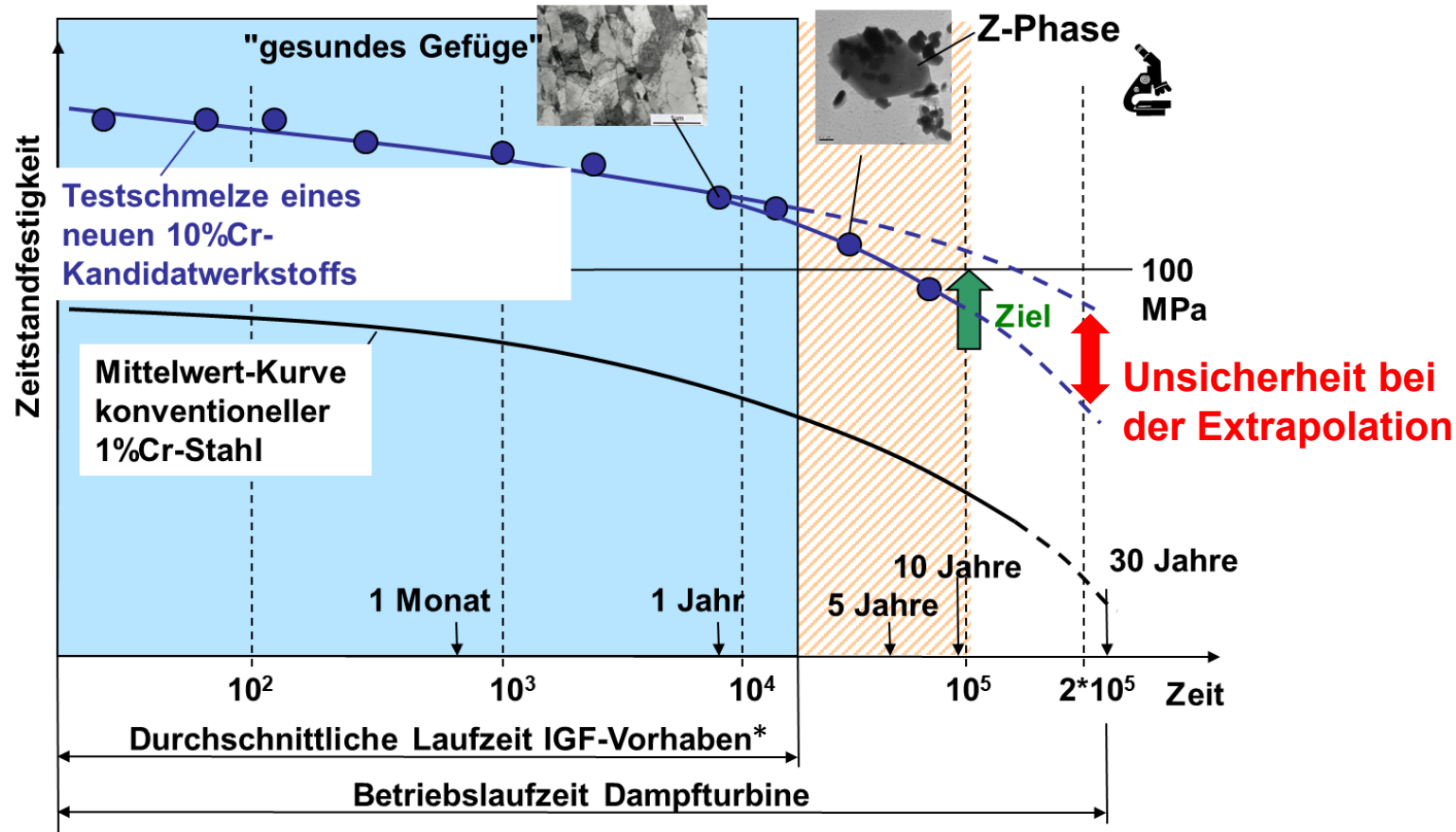
- Prüfnormen
- Messunsicherheiten
- Verfahrensanweisungen
- Harmonisierung
- Gefügeanalysen

Ergebnisdaten

- Schmelzeneinfluss
- Streubandanalyse
- Auswertungs-Software
- Datenmanagement
- Gefügecharakterisierung

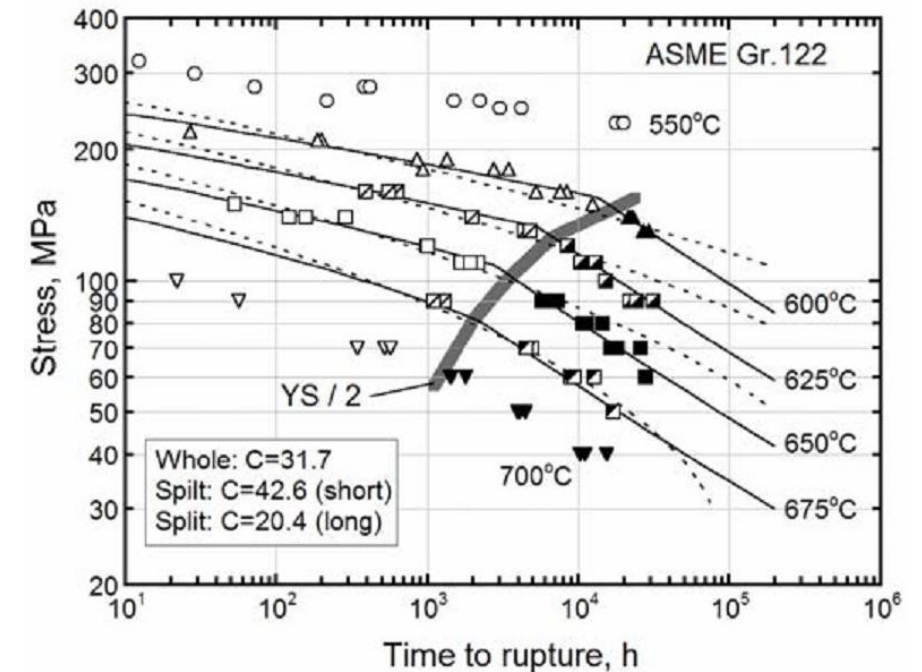
Zeitabhängige komplexe Vorgänge in der Mikrostruktur erfordern Langzeitprüfung

→ Erst nach langen Beanspruchungszeiten bilden sich festigkeitsmindernde Phasen aus



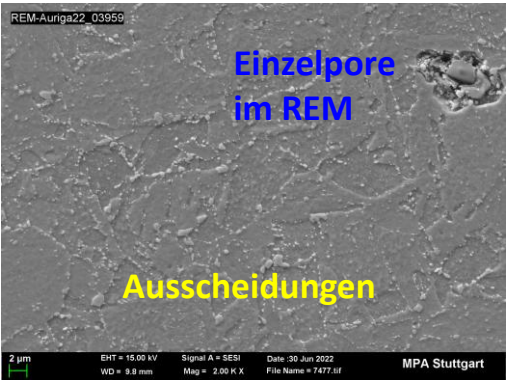
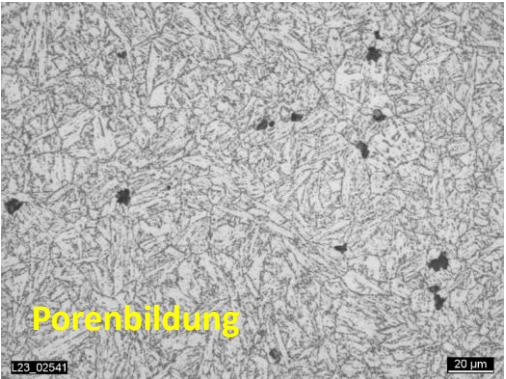
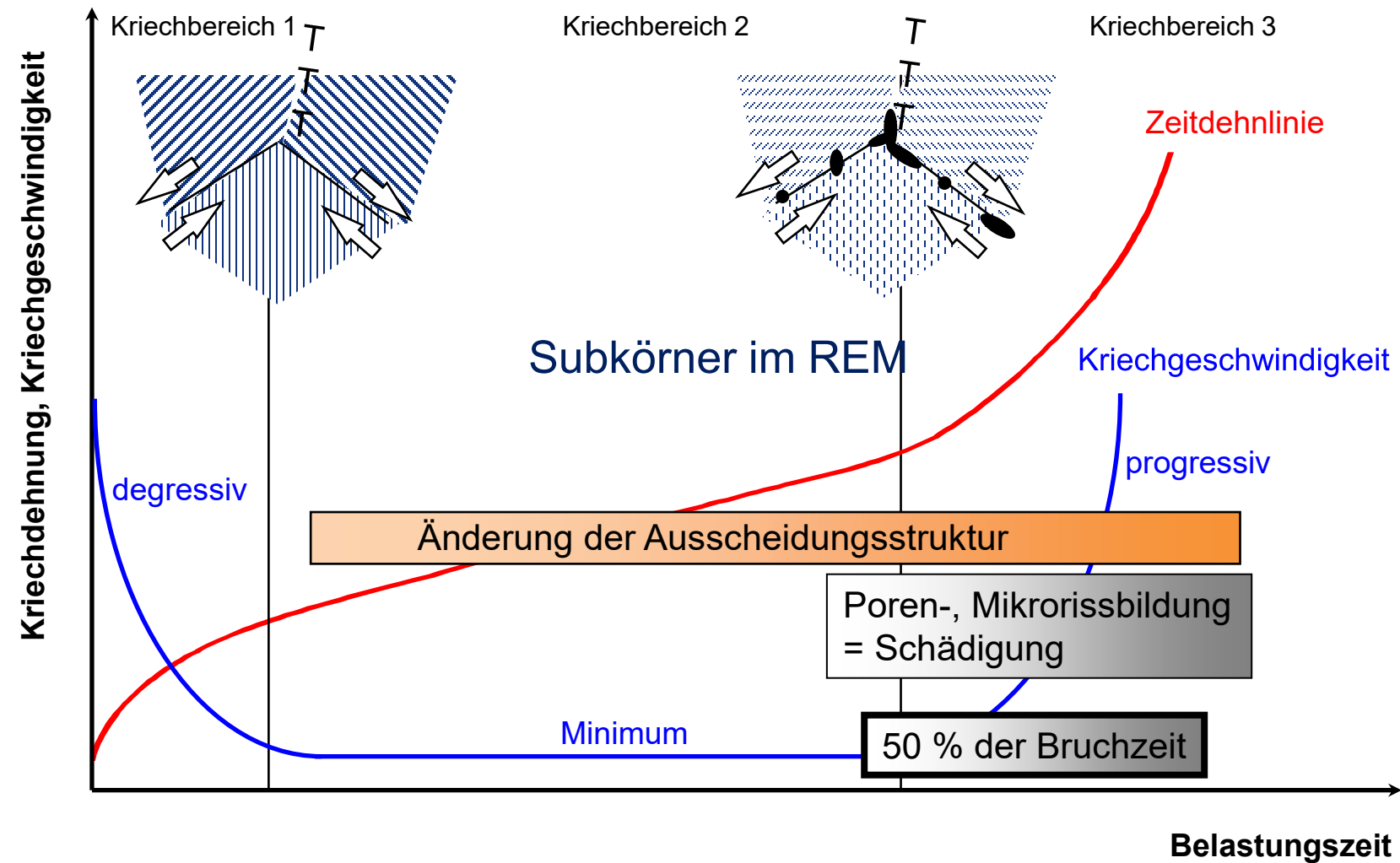
*IGF: Industrielle Gemeinschafts-Forschung

Japan (NIMS):
Geändertes Extrapolationsverfahren nach Bauteilschaden entwickelt (2 Bereiche)



Quelle: K. Kimura, K. Sawada, Y. Toda, H. Kushima: Creep Strength Assessment of High Chromium Ferritic Creep Resistant Steels, Materials Science Forum Vols. 539-543 (2007)

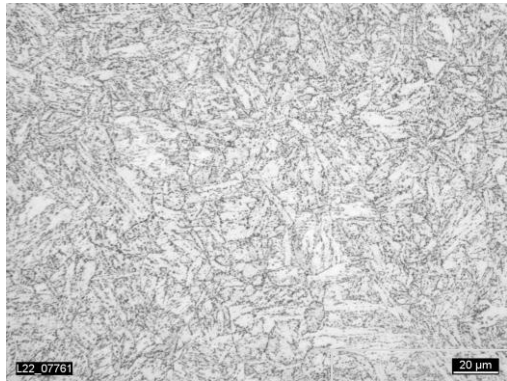
Langzeitprüfung: Gefüge, Mikrostruktur



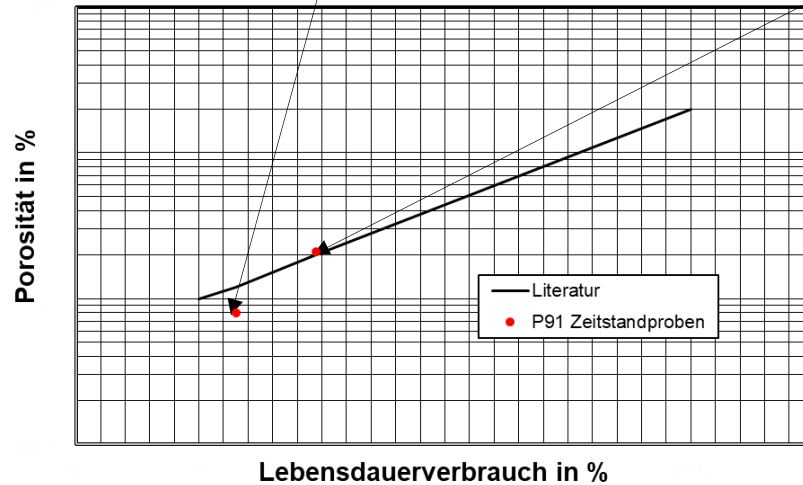
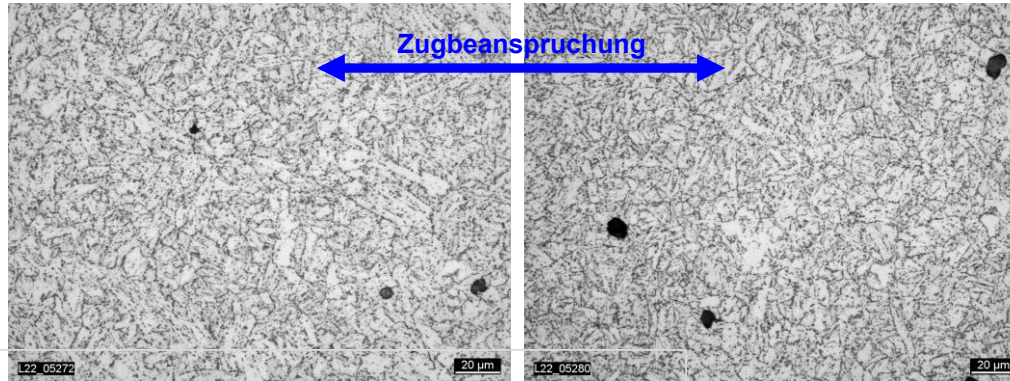
Langzeitprüfung: Gefüge, Mikrostruktur

Porenbildung während der Zeitstandsbeanspruchung

P91* Ausgangszustand

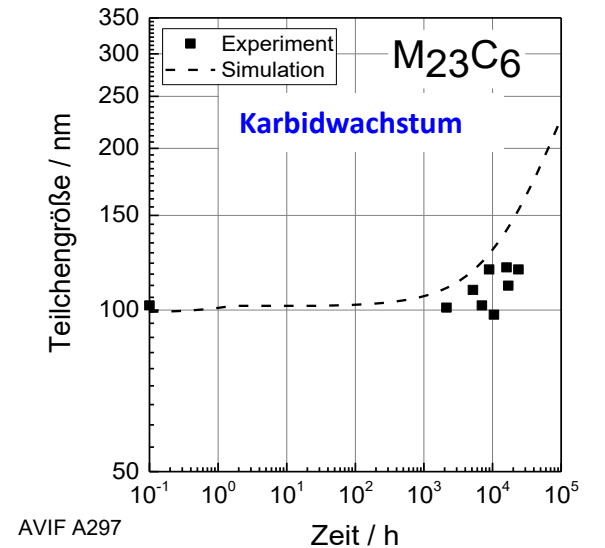
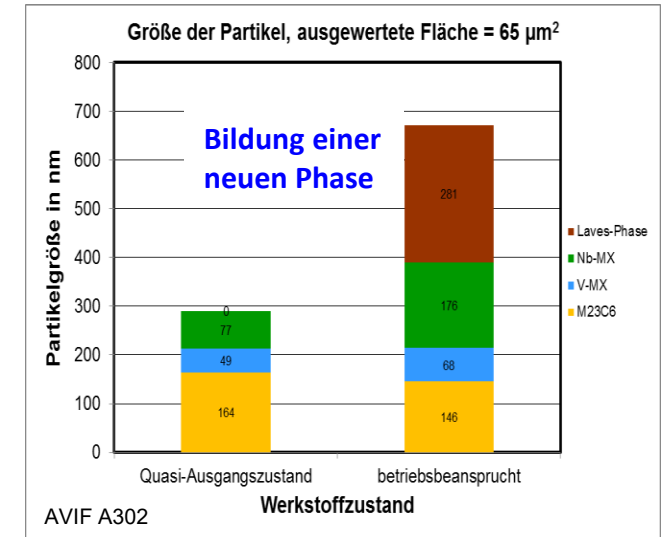


P91“ nach Zeitstandsbeanspruchung
ca. 200 Th (23 Jahre), ca. 1 % Dehnung



* P91:
9%CrMoV-
Rohrleitungswerkstoff,
Martensit

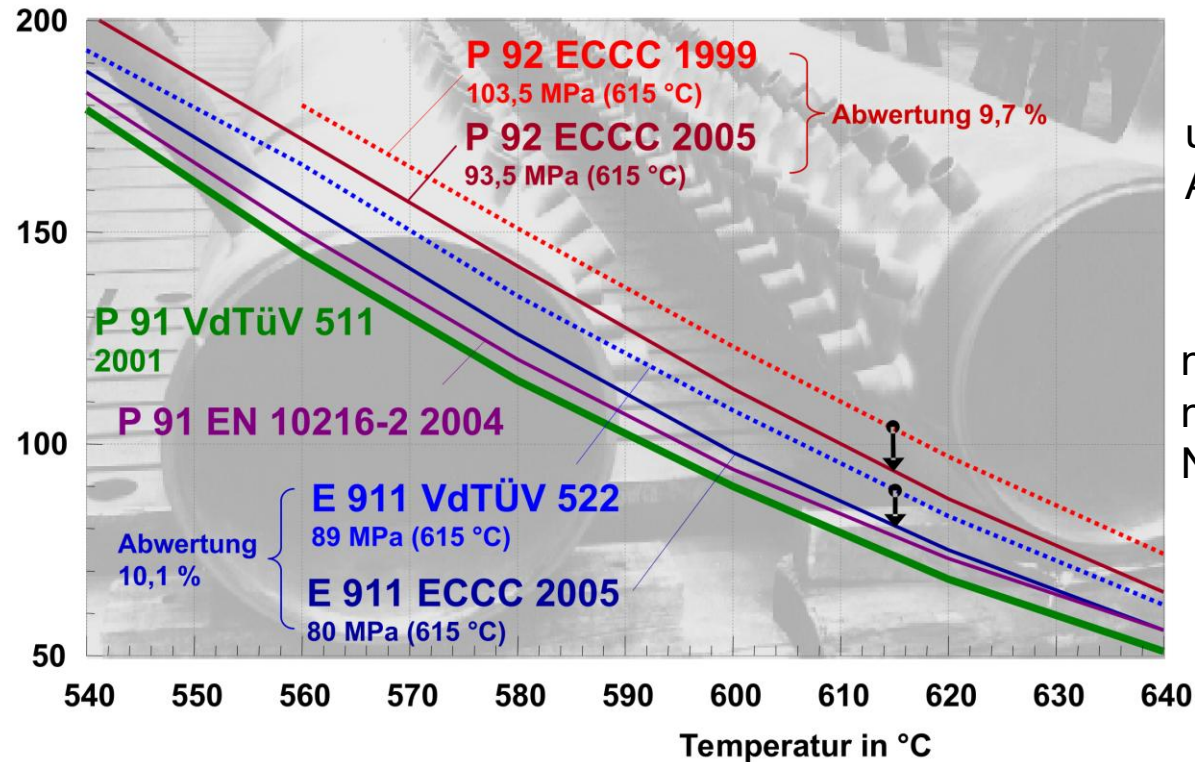
Änderung der Ausscheidungsstruktur



Beispiel: Abwertung von Zeitstandfestigkeiten in Normen und Regelwerken

Abwertung nach ca. 50.000 h weiterer Zeitstandprüfung

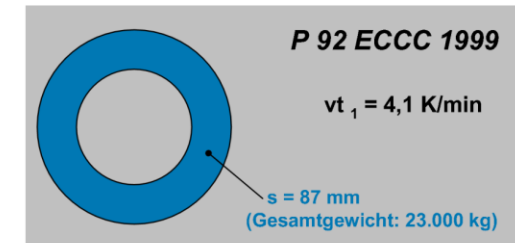
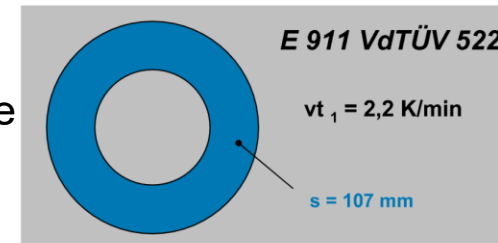
10^5 h Mittelwert in MPa



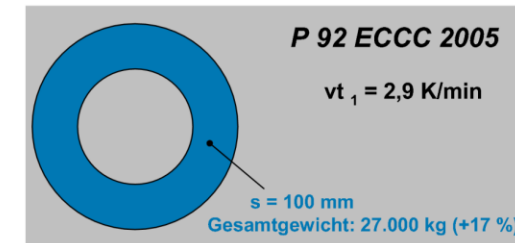
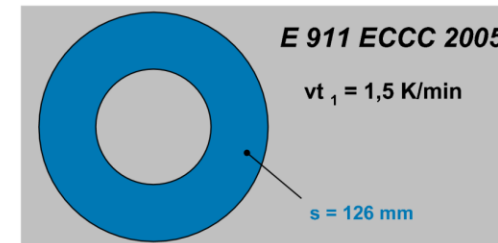
Auswirkung auf Kraftwerksneubau:

$P_B = 295$ bar, Innendurchmesser 255 mm, $\vartheta_B = 615$ °C

ursprüngliche Auslegung:



notwendig nach neuen Normwerten:



Kesselanlage musste neu ausgelegt werden:

- erhöhte Wanddicke
- geringere Wärmeleitung
- höheres Gewicht

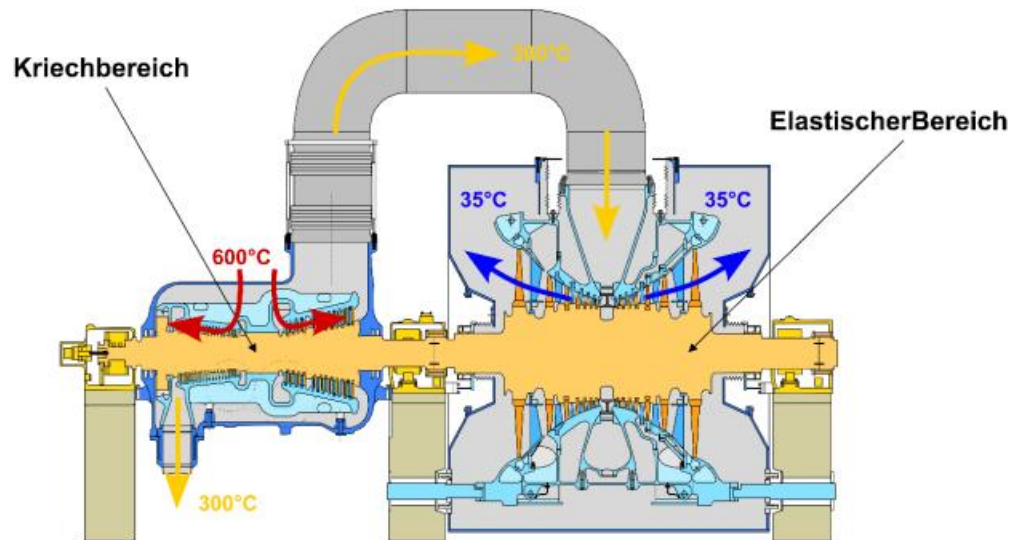
Quelle: Hettkamp, Husemann: Kraftwerk Neurath, Auswirkungen der hohen Dampftemperatur, Workshop "600°C-Kraftwerk", 8. März 2006, Gelsenkirchen

Industrielle Anwendung

■ Bauteilauslegung

Turbinenauslegung gegen

- Zeitstand (Kriechen),
- Kriech-Ermüdung (CF),
- Kriech(ermüdungs)rissverhalten

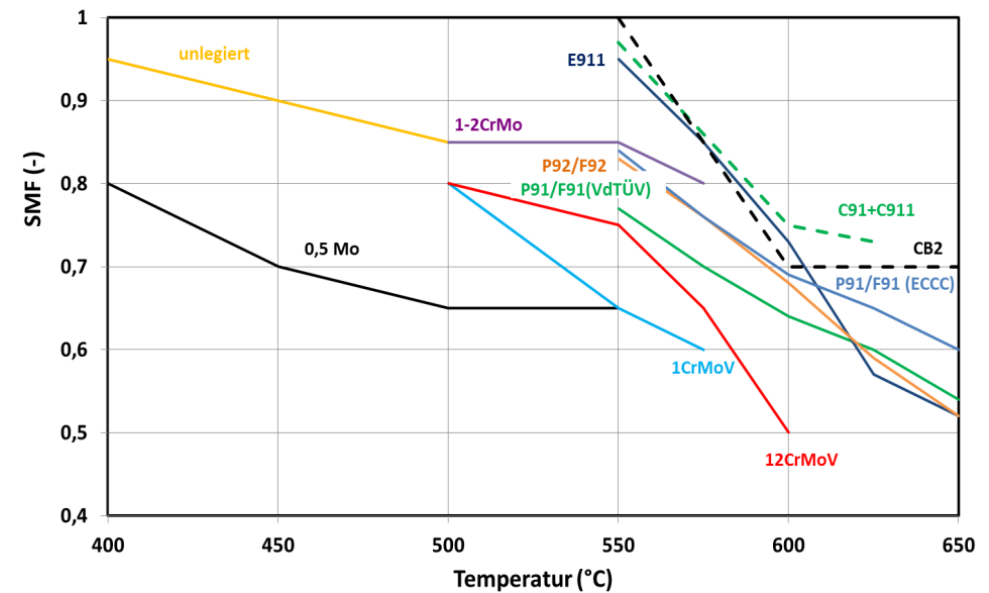


Längsschnitt einer Dampfturbine mit typischen Dampfparametern

Rohrleitungsauslegung

gegen Zeitstand (Kriechen) 100.000h für

- Grundwerkstoff
- Schweißverbindung artgleich
- Schweißverbindung ungleichartig

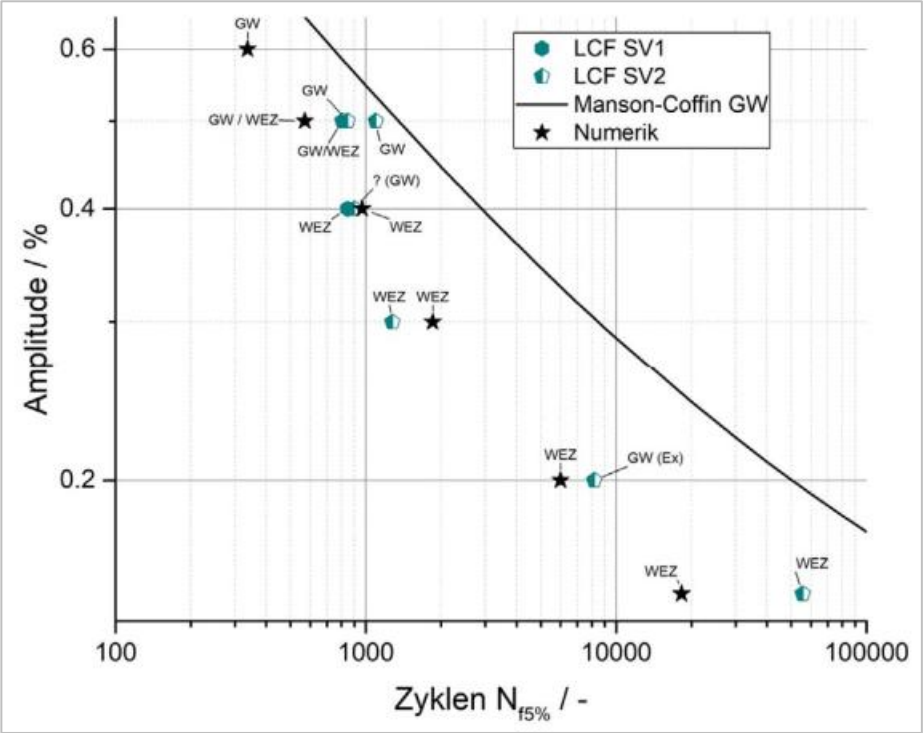


Schweißminderungsfaktoren der 105h-Zeitstandfestigkeit quer zur Naht von warmfesten Stählen und Stahlgussorten

Industrielle Anwendung

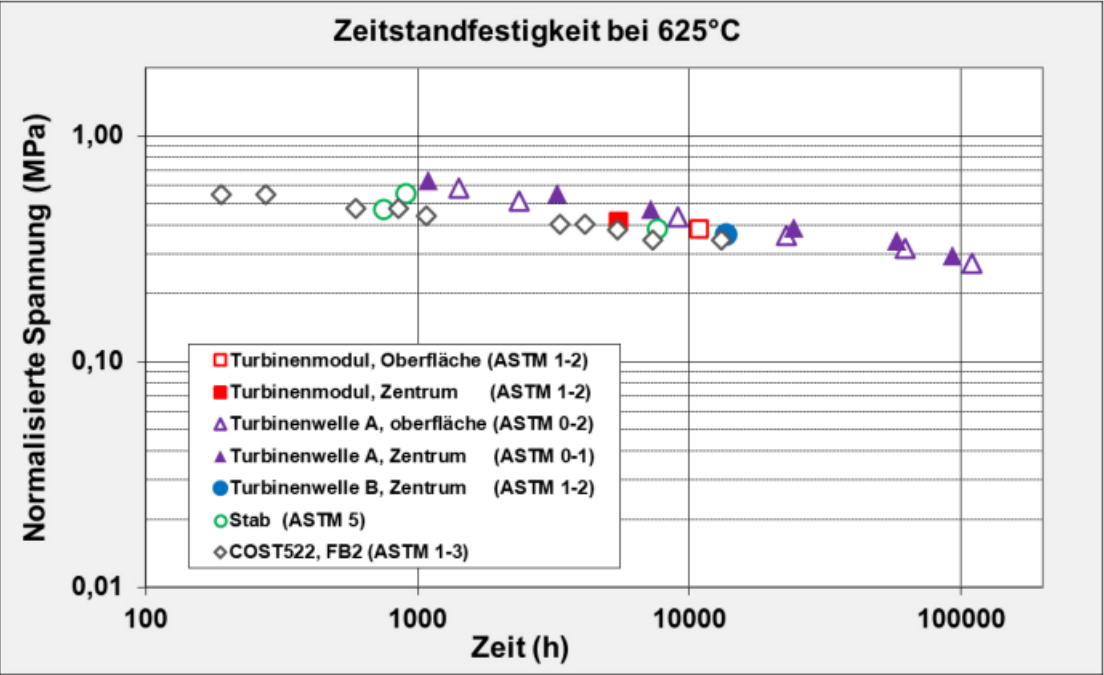
- Bauteilauslegung

Schwingungs-Anrissverhalten (LCF) für Schweißverbindungen (SV1, SV2), gemessen und modelliert, im Vergleich zum Grundwerkstoff (GW)



Vergleich numerischer Ergebnisse mit Schweißverbindungs-Versuchen

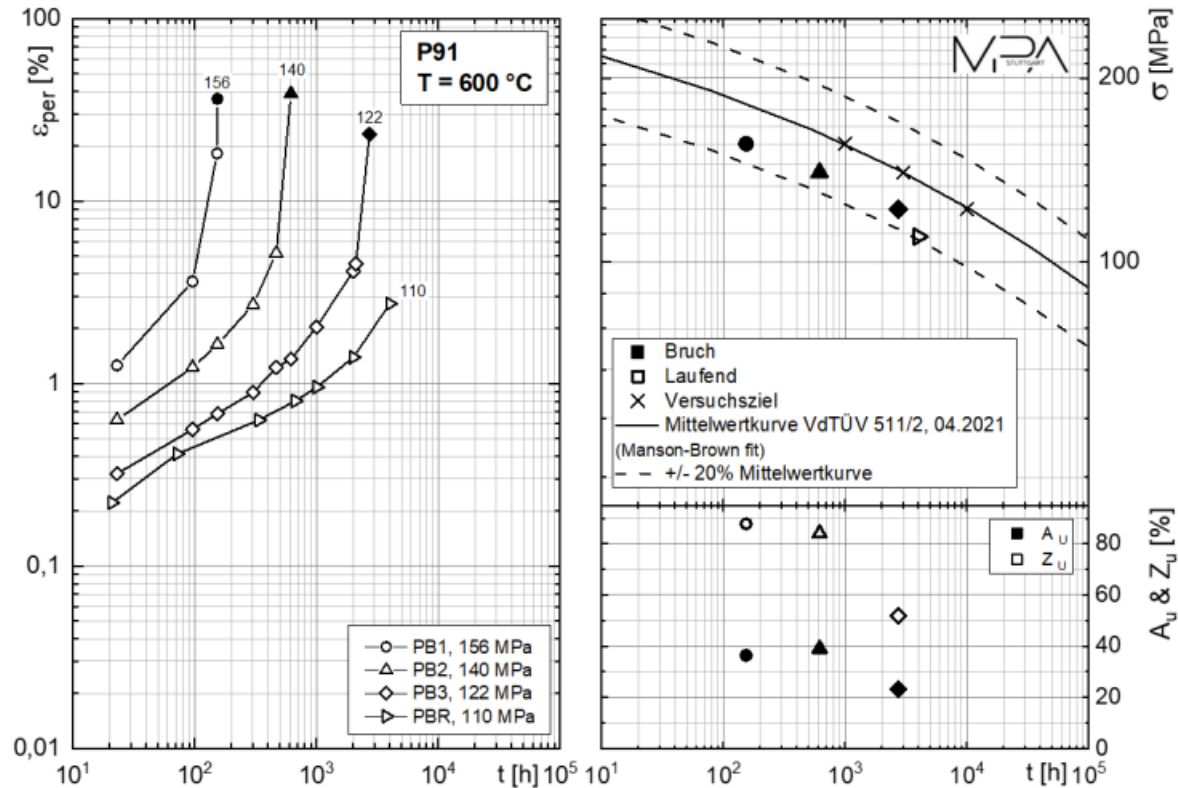
Einfluss der Austenitkorngröße auf das Langzeitverhalten eines 625°C-Stahles



Zeitstandfestigkeit der 9CrMoCoBN Bauteile bei 625°C mit unterschiedlichen Austenitkorngrößen

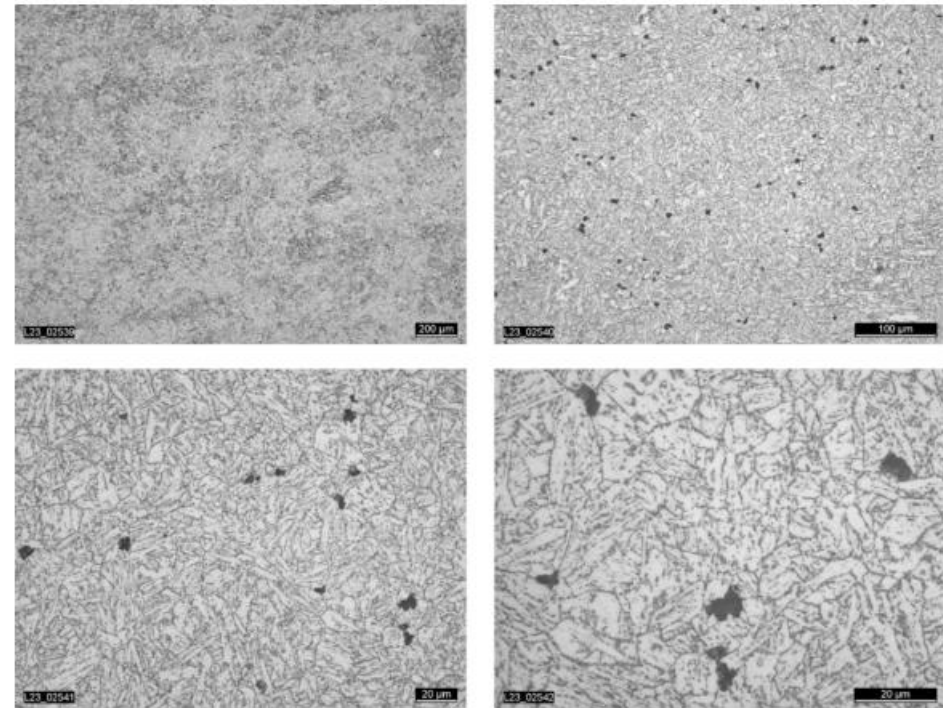
Industrielle Anwendung

■ Bewertung der Restlebensdauer



Ergebnisse von Zeitstandversuchen an einem betriebsbeanspruchten P91-Kesselanschlussteil bei 600 °C

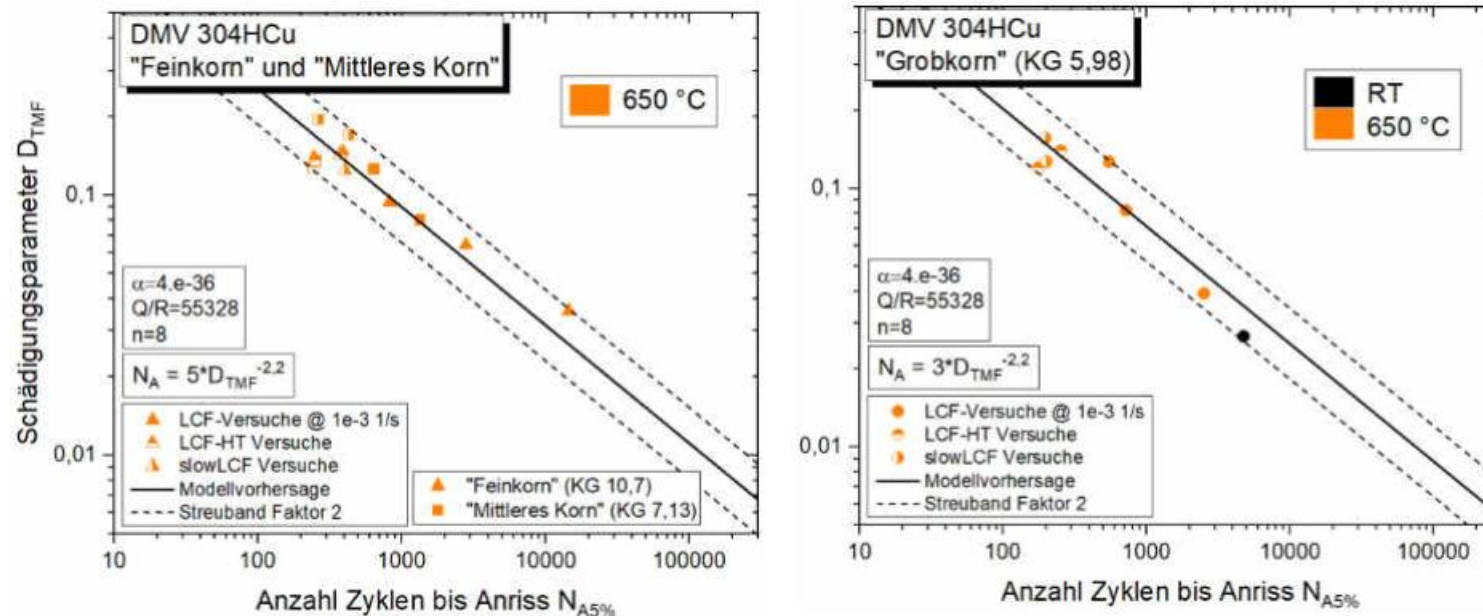
Zeitstandversuche zur Streubandeinordnung und Ermittlung des Einflusses der Mikrostruktur-Schädigung



Lichtoptische Aufnahmen einer P92-Zeitstandprobe mit Kriech-Poren

Industrielle Anwendung

■ Bauteilauslegung und Bewertung der Restlebensdauer



Lebensdauermodellierung mit dem DTMF-Modell für DMV 304HCu in den Zuständen „Feinkorn“ und „mittleres Korn“ (links) sowie „Grobkorn“ (rechts)

Modellierung:
Einfluss der ASTM
Austenitkorngröße auf das
Anriss-Schwingverhalten (LCF),
und Anwendung des
Schädigungsparameters D_{TMF}

Vortragsveranstaltung der FVWHT

- Vortragsveranstaltung „Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe“ (jährlich jeweils letzter Freitag im November in Düsseldorf)
- Sie sind herzlich eingeladen, ihre aktuellen Forschungsergebnisse, innovative Lösungsansätze und praxisnahe Erfahrungen im Bereich des Langzeitverhaltens von Grundwerkstoffen und Schweißverbindungen bei erhöhten und hohen Temperaturen einzureichen.
- Themenbereiche umfassen unter anderem:
 - Mechanische Eigenschaften und Versagensmechanismen bei Langzeiteinwirkung
 - Neue Werkstoffentwicklungen und -optimierungen
 - Schweißtechnologien und -qualität bei Hochtemperaturwerkstoffen
 - Lebensdauerabschätzungen und Lebensdauervorhersagen
 - Prüfmethoden und Charakterisierungstechniken
 - Anwendungsbeispiele aus der Praxis

Gemeinschaftsforschung bei der Hochtemperatur-Werkstoffcharakterisierung

- Zusammenfassung
- Die vorwettbewerbliche Zusammenarbeit und Gemeinschaftsforschung spielt eine wichtige Rolle für einen optimierten Ressourcen- und Finanzmitteleinsatz in den verschiedenen Bereichen der Industrie.
- Die **Forschungs-Vereinigung für Warmfeste und Hochtemperatur-Werkstoffe (FVWHT)** ermöglicht im Bereich der Langzeitcharakterisierung von Werkstoffen aufgrund ihrer Struktur, Mitglieder, und Vernetzung mit anderen Institutionen und Fördergebern, einen engen Wissensaustausch von Fachleuten verschiedener Bereiche und liefert Ergebnisse, die ihren Eingang in technische Lösungen finden.
- Die jährliche Vortragsveranstaltung der FVWHT bietet die Möglichkeit, Fachvorträge zu hören und zu diskutieren, Fachleute zu treffen, und das eigene Netzwerk weiter auszubauen. Durch die Mischung von Beiträgen aus der Industrie und den verschiedenen Instituten und Forschungseinrichtungen zu aktuellen Projekten wird ein Wissenstransfer ermöglicht, der auch dem industriellen und wissenschaftlichen Nachwuchs einen schnellen Einstieg ermöglicht.



43. Vortrags- und Diskussionstagung

Werkstoffprüfung 2025

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr.-Ing. Paul Hahn

Dr.-Ing. Torsten-Ulf Kern, Dr.-Ing. Annett Udoh,

Dr.-Ing. Michael Schwienheer, Dr.-Ing. Stefanie Brockmann

Dresden & online, 27.11.2025