

**MPA**  
**STUTT GART**

Forschen  
Prüfen  
Lehren  
Seit 1884

# Jahresbericht 2002



**Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart**

**Direktor: o. Professor Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos**

Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32  
70569 Stuttgart (Vaihingen)

Tel.: 0711 685-2604/-3059  
Fax: 0711 685-2635  
Internet: <http://www.mpa.uni-stuttgart.de>

# Inhalt

- 1 Wir über uns
- 2 Arbeitsgebiete und Einrichtungen
- 3 Lehre
- 4 Neue Versuchseinrichtungen
- 5 Berichte aus der Forschung der MPA Stuttgart
- 6 Veranstaltungen im Jahr 2002
- 7 Internationale Kooperationen in der Forschung
- 8 Mitarbeit der MPA Stuttgart in Arbeitskreisen und Ausschüssen
- 9 Ehrungen, Preise, Stipendien
- 10 Veröffentlichungen der MPA Stuttgart im Jahr 2002
- 11 Doktorarbeiten und Habilitationen an der MPA Stuttgart

# Die MPA Stuttgart

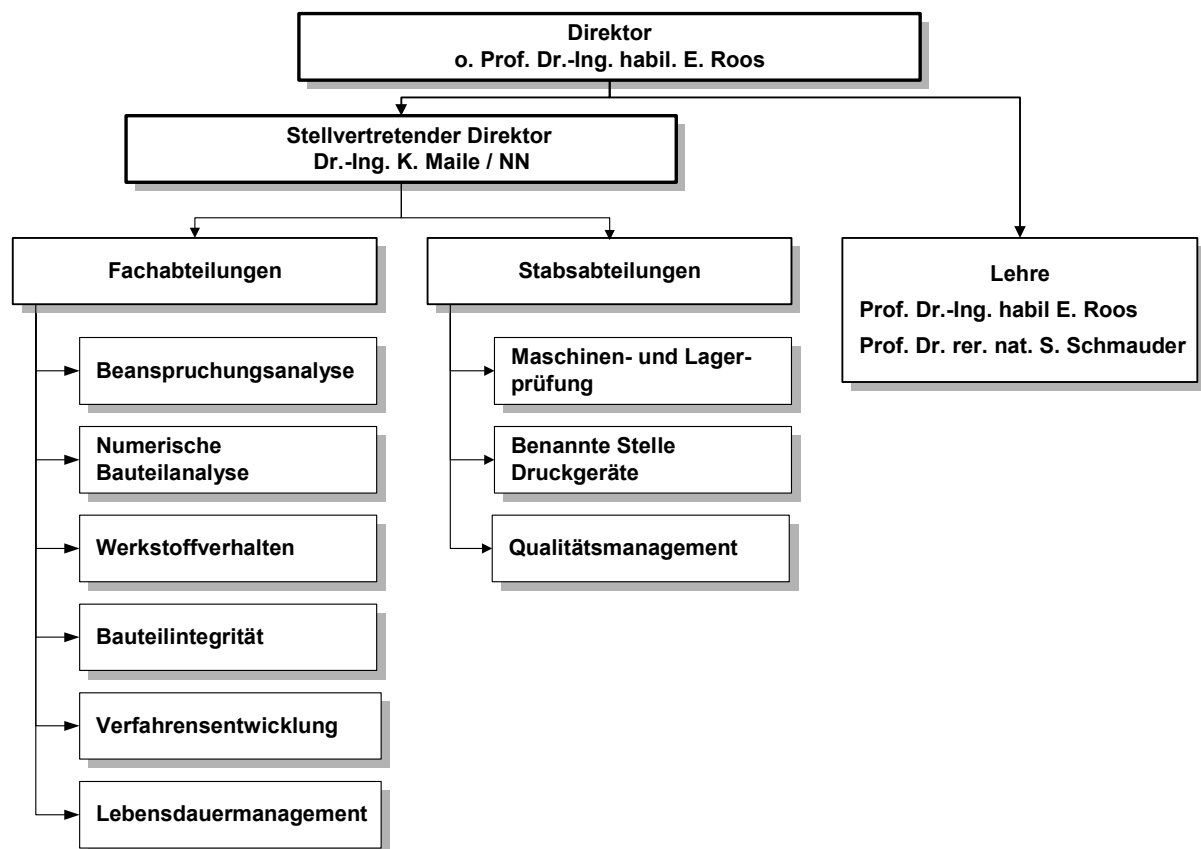
## 1 Wir über uns

Die Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart ist ein Institut der Universität Stuttgart und gehört zur Fakultät 7, Maschinenbau. Traditionsgemäß ist die MPA Stuttgart im Wesentlichen auf den Gebieten

- produktbezogene Forschung und Umsetzung von Forschungsergebnissen in die industrielle Anwendung,
- Grundlagenforschung zur Vertiefung des Verständnisses von Werkstoff- und Bauteilverhalten,
- Vermittlung des Wissens an Studenten, Doktoranden und Post-Doktoranden

tätig.

Im Vordergrund der Forschung stehen metallische Werkstoffe und seit ca. 20 Jahren auch keramische Werkstoffe sowie Verbundwerkstoffe wie z.B. Faserverbundkeramik. Die Vielschichtigkeit der Aufgabenstellungen hat iterativ zu einer Abteilungs- und Fachgruppenstruktur geführt, die einerseits Aufgabenbereiche "bündelt" aber andererseits auch geeignet ist, komplexe Aufgabenstellungen in Form von fachgruppen- und abteilungsübergreifenden Projekten zu bearbeiten.



**Fachabteilungen, Stabsabteilungen, Lehre**

Durch die Integration der MPA Stuttgart in die Universität Stuttgart des Landes Baden-Württemberg sind Rahmenbedingungen geschaffen, die es der MPA Stuttgart ermöglichen, als neutrales und unabhängiges Institut aufzutreten. Dies ist vor allem bei der Bewertung von Sicherheitsfragen, die im Vordergrund des öffentlichen Interesses stehen, bei der Erstellung von Gutachten sowie bei Arbeiten im Hinblick auf die Sicherstellung der Qualität von Produkten durch die Aufsicht und Beratung durch die MPA Stuttgart von Bedeutung.

Auf diese Arbeitsstrategie kann die 1884 gegründete MPA Stuttgart seit vielen Jahrzehnten zurückblicken und somit der Industrie und öffentlichen Institutionen eine Kooperation anbieten, in die die Erfahrung aus Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung einfließt.

Im Geschäftsjahr 2002 beschäftigte die MPA Stuttgart 222 Mitarbeiter, davon

- 112 wissenschaftliche Mitarbeiter,
- 73 technische Mitarbeiter,
- 37 Mitarbeiter in Verwaltung und für zentrale Dienste.

Die MPA Stuttgart verfügt über Prüfeinrichtungen und Laboratorien, die über die Aufgabenstellung der allgemeinen Werkstoffprüfung hinaus auf besondere Anforderungen ausgerichtet sind (Bauteilprüfungen) über lokale Rechner mit einer dezentralen Infrastruktur sowie über Software für Strukturanalysen und Datenbanken und nutzt für Hochleistungsnumerik den Anschluss an die zentrale Infrastruktur der Universität Stuttgart.

Um den in den letzten Jahren ständig gewachsenen Anforderungen an eine abgesicherte Produktqualität Rechnung zu tragen, wurde die MPA Stuttgart durch das Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH (DAP) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2000 akkreditiert, so dass die MPA Stuttgart als kompetenter Partner für die Industrie tätig sein kann.

# Die MPA Stuttgart als Kooperationspartner

## 2 Arbeitsgebiete und Einrichtungen

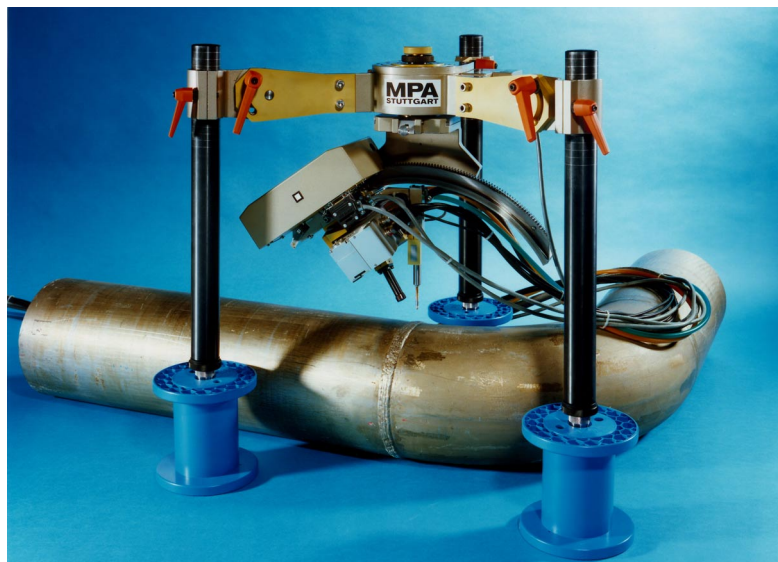
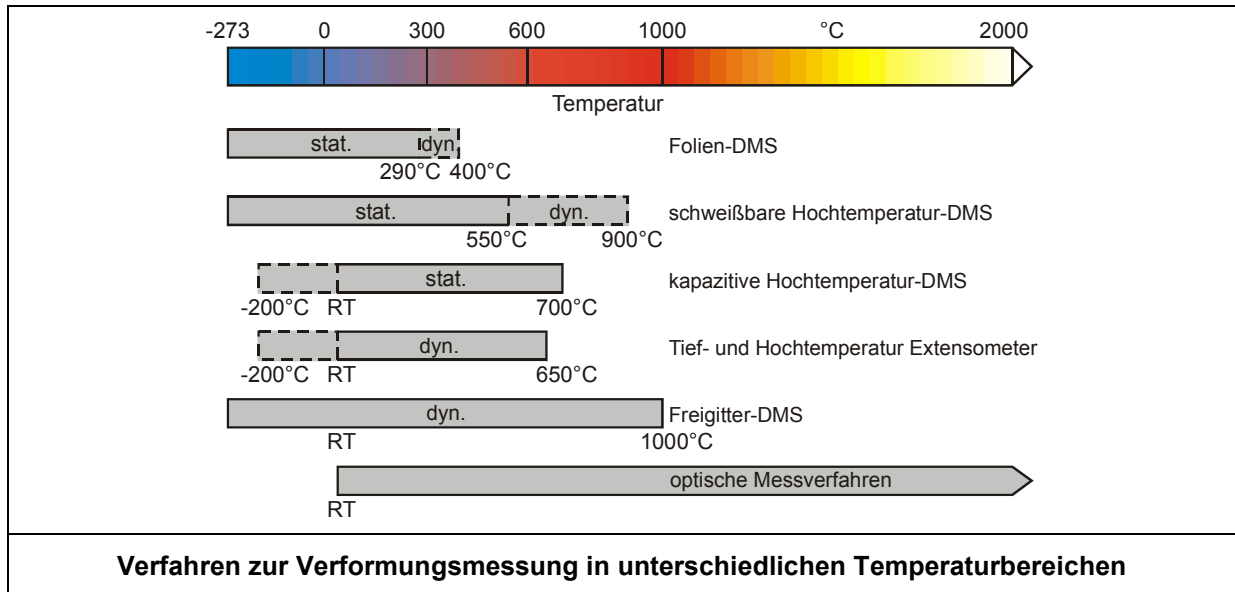
Um unseren Partnern aus Forschung und Industrie einen Überblick über die derzeitigen Arbeitsschwerpunkte zu geben, sind nachfolgend unsere Abteilungen und deren Fachgruppen mit Ansprechpartnern, die wichtigsten Aufgabenstellungen sowie kennzeichnende Einrichtungen bzw. Untersuchungsmethoden aufgeführt. Für weitere Einzelheiten empfehlen wir einen Besuch auf unserer Homepage [www.mpa.uni-stuttgart.de](http://www.mpa.uni-stuttgart.de) oder den direkten Kontakt zu unseren Abteilungs- und Fachgruppenleitern.

<b>Abteilung Beanspruchungsanalyse:</b>	Dr.-Ing. H. Kockelmann
Tel.: 0711 685-2578 <a href="mailto:hans.kockelmann@mpa.uni-stuttgart.de">hans.kockelmann@mpa.uni-stuttgart.de</a>	

<b>Fachgruppe Theoretische Spannungsanalyse:</b> Dr.-Ing. K.-H. Herter	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Festigkeitsberechnungen, Beanspruchungsanalysen, Lebensdauer- und Ermüdungsanalysen</li> <li>➤ Sicherheitsanalysen, Leck-vor-Bruch Analysen und Integritätsnachweise für Bauteile und Systeme unter komplexer Beanspruchung</li> <li>➤ Alterungsüberwachung</li> </ul>	<p>Analytische Berechnungsmethoden und –verfahren</p> <p>Regelwerk: Europäische Normen EN, ASME Code, AD-Merkblatt, TRD, KTA u.a.</p>

<b>Fachgruppe Experimentelle Spannungsanalyse:</b> Dipl.-Ing. S. Haas	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ermittlung von Beanspruchungen einschließlich komplexer Lastkollektive,</li> <li>➤ Überprüfung von Festigkeitsberechnungen</li> <li>➤ Ermittlung von Eigenspannungen</li> <li>➤ Anpassung und Weiterentwicklung von Messsystemen</li> </ul>	<p>Messung von Dehnungen, Verschiebungen, Kräften und Drücken (statisch, dynamisch, zyklisch, random)</p> <p>Eigenspannungsmessungen röntgenographisch und zerstörend (Bohrloch, Ring-Kern, Zerlegen, Ausdrehen)</p>

<b>Fachgruppe Dichtungstechnik:</b>	<i>Dipl.-Ing. R. Hahn</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Prüfung von Dichtungen und Packungen für Flanschverbindungen und Armaturen</li> <li>➤ Flansch- und Armaturberechnungen</li> </ul>	Dichtungs- und Packungsprüfstände Einrichtungen zur Ermittlung des Stauch-, Relaxations-, Reibungs- und Leckageverhaltens "TA-Luft-Prüfstand"



**Experimentelle Eigenspannungsanalyse mit mobilem Röntgendiffraktometer an der Rundnaht eines austenitischen Rohres**

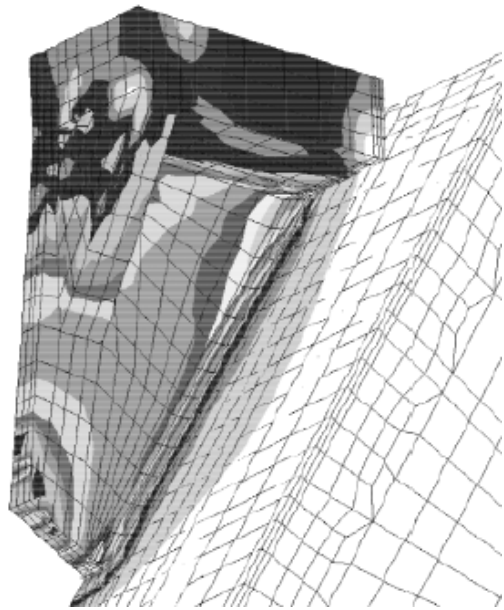
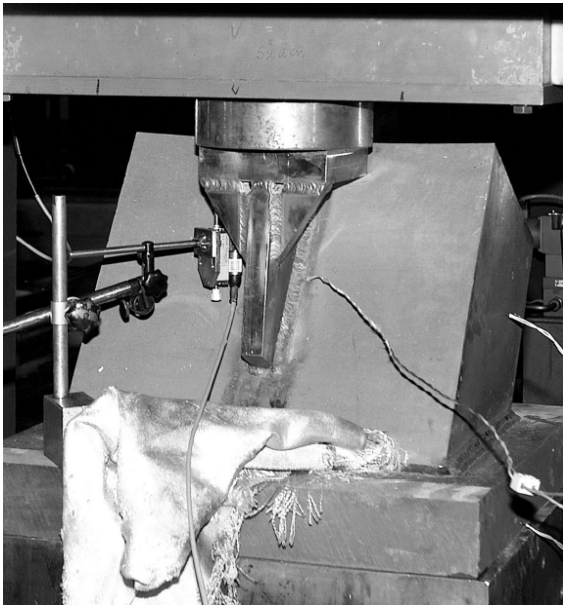
<b>Abteilung Numerische Bauteilanalyse:</b>	Dr.-Ing. L. Stumpfrock
Tel.: 0711 685-3041 <a href="mailto:ludwig.stumpfrock@mpa.uni-stuttgart.de">ludwig.stumpfrock@mpa.uni-stuttgart.de</a>	

<b>Fachgruppe Bauteilberechnung:</b>	<i>Dr.-Ing. L. Stumpfrock</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Strukturanalysen mit numerischen Methoden für komplexe Bauteile unter beliebiger Belastung</li> <li>➤ Bauteilbewertung hinsichtlich Sicherheit, Verfügbarkeit und Lebensdauer</li> <li>➤ Bewertung von Bauteilen bei auslegungsüberschreitenden Belastungen</li> <li>➤ Schadensanalysen mit Hilfe numerischer Simulation</li> </ul>	Simulationsprogramme: ANSYS, PATRAN, ROHR2, R6 Zugriff auf Höchstleistungsrechner an den Universitäten Stuttgart und Ulm

<b>Fachgruppe Schädigungsmodelle:</b>	<i>Dipl.-Ing. M. Seidenfuß</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Simulation des Versagensverhaltens von Bauteilen</li> </ul>	ADINA

<b>Fachgruppe Integritätsbewertung:</b>	<i>Dr.-Ing. U. Eisele</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte, Recherchen zu bruchmechanischen und mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften</li> <li>➤ Bruchmechanische Bauteilberechnung und -bewertung</li> <li>➤ Betrieb einer Datenbank mit allen an der MPA Stuttgart ermittelten bruchmechanischen Kennwerten</li> </ul>	Universalprüfmaschine zur Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte und Charakteristika unter quasistatischer Beanspruchung im Temperaturbereich -196°C bis +350°C an genormten Laborproben Prüf- und Meßprogramme zur Durchführung von bruchmechanischen Versuchen an Komponenten und Sonder-Probengeometrien Software zur Auswertung bruchmechanischer Versuche und analytischen bruchmechanischen Bauteilbewertung





**Traglastversuch an Konsole und begleitende numerische Analyse**

**Abteilung Werkstoffverhalten:**

Dr.-Ing. K. Maile

Tel.: 0711 685-3059  
[karl.maile@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:karl.maile@mpa.uni-stuttgart.de)

**Fachgruppe Schwingprüfung:**

Dr.-Ing. G. Schellenberg

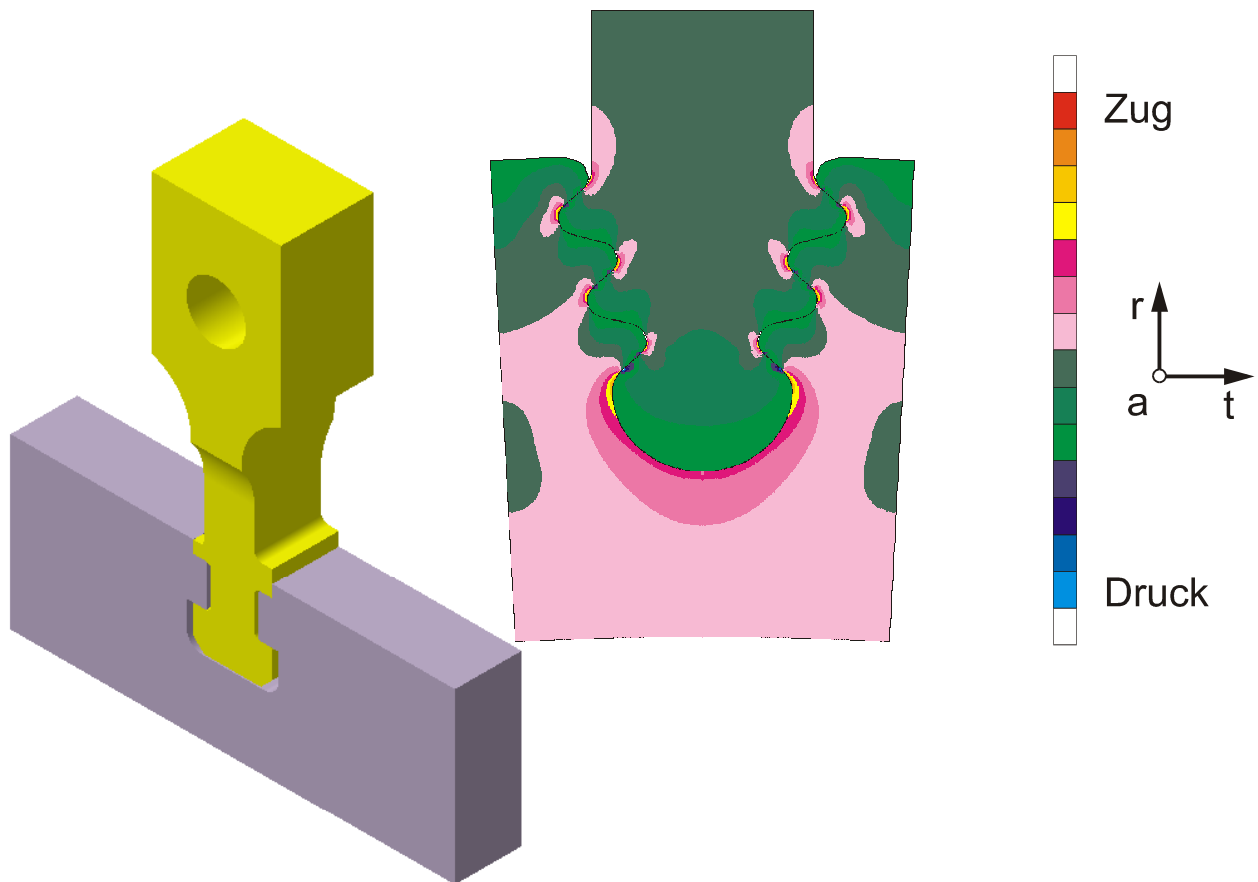
- Ermittlung des Festigkeits-, Verformungs-, Bruch- und Eigenschwingverhaltens von Bauteilen und komplexen Systemen unter betriebsähnlicher, ruhender, zügiger, schwingender und schlagartiger Einzelbelastung oder zusammengesetzter Beanspruchung
- Umweltsimulationsversuche
- Betriebsfestigkeitsuntersuchungen

Rechnergesteuerte Prüfmaschinen bzw. Versuchsstände  
 Elektrodynamische Schwingungserreger (Shaker)  
 Klimakammern  
 Aufspannplatte (Universalprüffeld)

<b>Fachgruppe Werkstoffprüfung:</b>		<i>NN</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Werkstoff- und Versagensverhalten von Proben und Bauteilen bei hohen Temperaturen bis 2400 °C in unterschiedlichen Medien</li> <li>➤ Ermittlung des Einflusses von Temperatur, Verformungs- und Spannungszustand, Bauteilgestalt /-größe sowie von Beanspruchungsgeschwindigkeit, Lastfolgen auf das Anriss-, Risswachstums- und Versagensverhalten</li> </ul>	<p>Rechnergesteuerte Prüfmaschinen bzw. Versuchsstände mit Vakuum- bzw. Schutzgaskammern und Beheizungs- vorrichtungen</p> <p>Einrichtungen zur Messung von lokalen und globalen (Kriech-)Dehnungen, Anrissbeginn und Rissfortschritt bei hohen Temperaturen</p> <p>Thermo-mechanische Prüfeinrichtung Typ Gleeble 2 000 A-A</p> <p>Einrichtung zur Messung des E-Moduls im Temperaturbereich bis 1 200 °C (Grindosonic)</p>	
<b>Fachgruppe Bauteilverhalten:</b>		<i>Dr.-Ing. W. Stadtmüller</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Innendruckversuche mit unterschiedlicher Versuchsdurchführung (ein- bzw. mehrstufig, random, statisch, zyklisch)</li> </ul>	<p>Prüfanlagen für statischen und schwellenden Innendruck bis 500 MPa</p> <p>Rechnergesteuerte Hochdruckpulsatoren für schwellende Innendruckbeanspruchungen bis 300 MPa und Frequenzen bis 8 Hz</p> <p>Kompressoren bis 300 MPa</p> <p>Sprengkammern</p>	
<b>Fachgruppe Oberflächentechnik:</b>		<i>Dr.-Ing. A. Gusko</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Qualifizierung und Bewertung von Schichtsystemen in Hinblick auf die praktische Einsatzfähigkeit</li> <li>➤ Entwicklung neuer Beschichtungssysteme und -verfahren</li> </ul>	<p>EB-PVD-Anlage zur ionenunterstützten Abscheidung, LP-CVD-Anlage, Röntgendiffraktometer</p> <p>Öfen für Korrosionsprüfungen unter besonderen Bedingungen (aggressive Gase und Asche, bis max. 1 400 °C)</p>	

<b>Fachgruppe Verkehrstechnik:</b>	<i>Dipl.-Phys. U. Mayer</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Zulassung von Bauteilen des Kfz-Sicherheitsbereichs</li> <li>➤ Optimierung und Qualitätssicherung von Bauteilen des Kfz-Sicherheitsbereichs</li> <li>➤ Untersuchung des Werkstoffverhaltens bei hoher Belastungsgeschwindigkeit</li> <li>➤ Weiterentwicklung der Prüfmethode bei hoher Belastungsgeschwindigkeit</li> </ul>	<p>Prüfeinrichtungen für die Zulassung von Kfz-Sicherheitseinrichtungen, Umweltsimulationsprüfung</p> <p>Crashbahn</p> <p>33 MJ Umlaufschlagwerk</p> <p>Servohydraulische Schnellzerreißmaschine, 20 m/s, 100 kN</p> <p>Optische Wegmesssysteme</p> <p>Hochgeschwindigkeits-Videokamera mit 4 500 Bilder/s (s/w) und 1 000 Bilder/s (farbig, crashfest)</p> <p>Analytische und numerische Berechnungsmethoden und –verfahren (FEM)</p>

<b>Fachgruppe Stoffgesetze:</b>	<i>Dr.-Ing. A. Klenk</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Optimierte Auslegung von Bauteilen unter Berücksichtigung der werkstoff- und beanspruchungsspezifischen Schädigungsmechanismen</li> <li>➤ Bessere Werkstoffausnutzung durch effektivere Berechnungsverfahren</li> <li>➤ Vermeidung von vorzeitigem Ausfall durch verbesserte Berechnungen zur Abschätzung des Lebensdauer- verbrauchs auf der Basis der realen Schädigungsmechanismen.</li> </ul>	<p>Analytische und numerische Berechnungsmethoden und –verfahren (FEM)</p> <p>Phänomenologische und konstitutive Werkstoffgesetze bzw. –modelle mit implementierten Schädigungshypothesen</p>



Simulation des Mehrflächenkontakts in einer Schaufel-Scheibe Verbindung einer Gasturbine

**Abteilung Bauteilintegrität:**

Tel.: 0711 685-2564  
[juergen.foehl@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:juergen.foehl@mpa.uni-stuttgart.de)

Dr.-Ing. J. Föhl

**Fachgruppe Zerstörungsfreie Prüfung:**

Dr.-Ing. H. Waidele

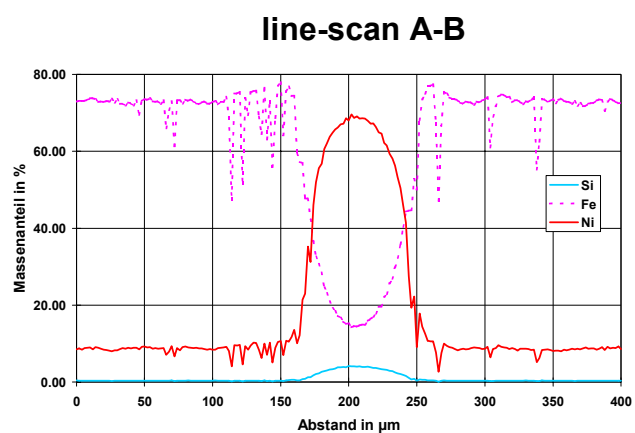
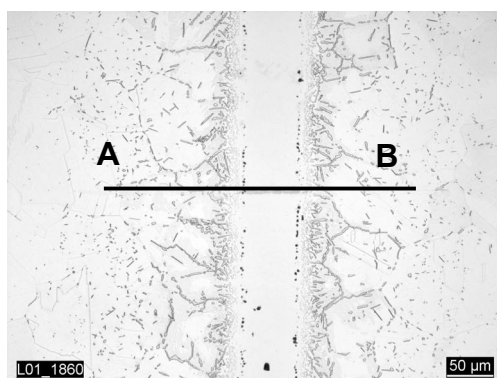
- Prüfung von Bauteilen, Komponenten und Schweißverbindungen
- Weiterentwicklung von Prüfverfahren
- Planung und Herstellung von Testkörpern
- Erstellung von Spezifikationen

Einrichtungen zur Prüfung mittels Ultraschall, Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlung sowie Wirbelstrom  
 Oberflächenrissprüfung (FE, MP)  
 Rissprüfung mittels Potenzialsonde  
 Schallemissionsmessungen

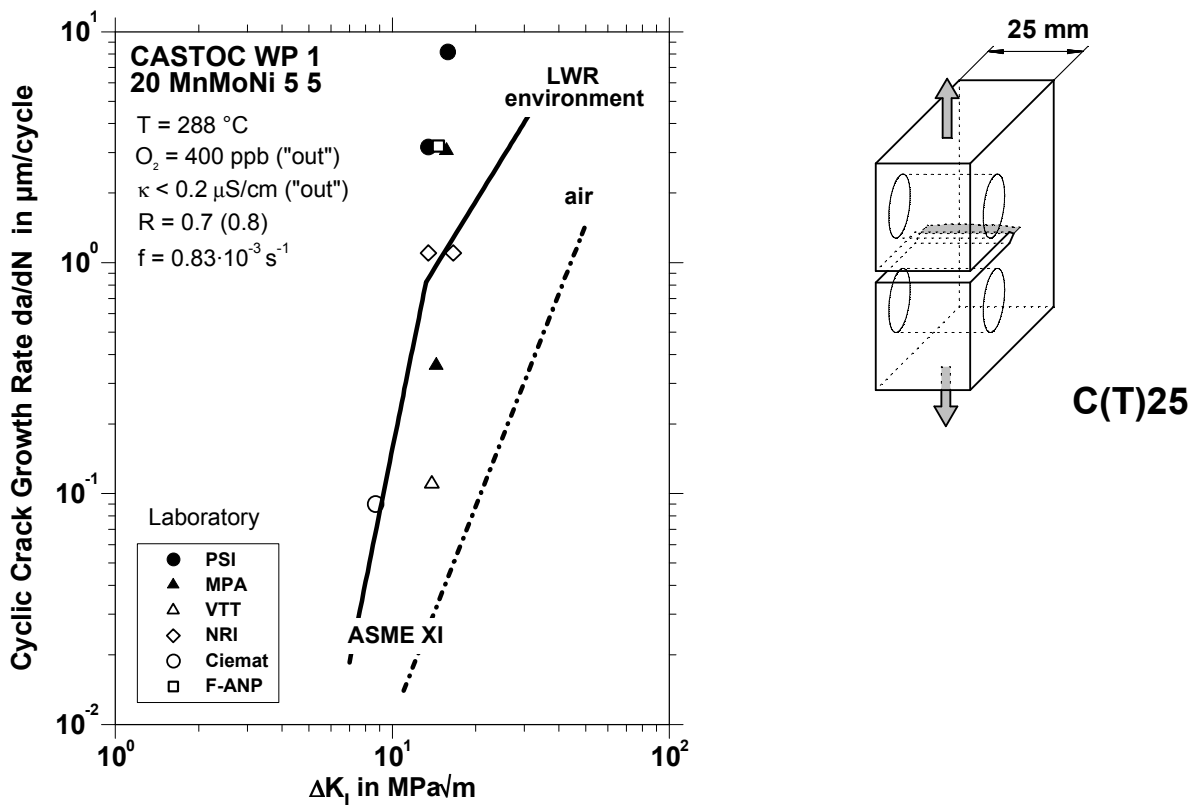
<b>Fachgruppe Mikrostruktur:</b>	<i>Dr. rer.nat. K.-H. Katerbau</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Beschreibung der Werkstoffstruktur (Metallographie, TEM) und Bruchstruktur (Fraktographie) sowie Ermittlung der chem. Zusammensetzung (integral, lokal)</li> <li>➤ quantitative Werkstoffbeschreibung mit Hilfe digitaler Bildanalyse</li> </ul>	Lichtmikroskopie und Härteprüfung Elektronenmikroskopie (REM, TEM) Optische Emissionsspektrometrie, Auger- und Mikrosondenanalysen Rasterkraftmikroskopie

<b>Fachgruppe Produktsicherheit:</b>	<i>Dipl.-Ing. P. Knoch</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ausstellen von Prüfzeugnissen,</li> <li>➤ Überprüfung der Produktqualität,</li> <li>➤ Überprüfung der Konformität mit Regelwerken und Normen</li> </ul>	Umsetzung und Überprüfung der Einhaltung von Regelwerken, Normen und Vorschriften

<b>Fachgruppe Umgebungseinfluss:</b>	<i>Dr.-Ing. J. Föhl</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Werkstoffverhalten in korrosiven Medien, insbesondere Rissinitiierung und Risswachstum</li> <li>➤ Werkstoffverhalten in flüssigem und gasförmigem Wasserstoff sowie in inerter Atmosphäre bei tiefen Temperaturen (bis 4 K)</li> <li>➤ Werkstoffuntersuchungen an radioaktiven Bauteilen</li> <li>➤ Tribologisches Verhalten von Werkstoffen</li> </ul>	Autoklaven für Heißwasser bis 300 °C Universalprüfmaschine für tiefe Temperaturen, auch in Wasserstoff Wasserstoffautoklav bis 300 °C und 90 bar "Radioaktiver Kontrollbereich" mit Metallographie- und Werkstoffprüfeinrichtungen Tribologische Prüfeinrichtungen



**Elementverteilung in einer Lötverbindung**



**Risswachstumsverhalten eines ferritischen Reaktordruckbehälterstahls unter Heißwasserbedingungen (simulierte Siedewasserreaktorbedingungen); Ergebnisse des EU-Kooperationsprojektes CASTOC**

**Abteilung Verfahrensentwicklung:**

Prof. Dr. rer. nat. S. Schmauder

Tel.: 0711 685-2556

[siegfried.schmauder@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:siegfried.schmauder@mpa.uni-stuttgart.de)

**Fachgruppe Fügechnik:**

*Dr.-Ing. M. Greitmann*

- Schweißbeignung von Werkstoffen
- Prozessanalyse (Thermographie, High-Speed-Measurement) und FE-Prozesssimulation zur Optimierung schweißtechnischer Fertigungsverfahren
- Online-Qualitätssicherung in der Fertigung
- Prüfung von Fügeverbindungen

Wärmebildkamera

Widerstandsschweißeinrichtungen für das Kleinteilschweißen (Kraftbereich 5 N bis 1 500 N)

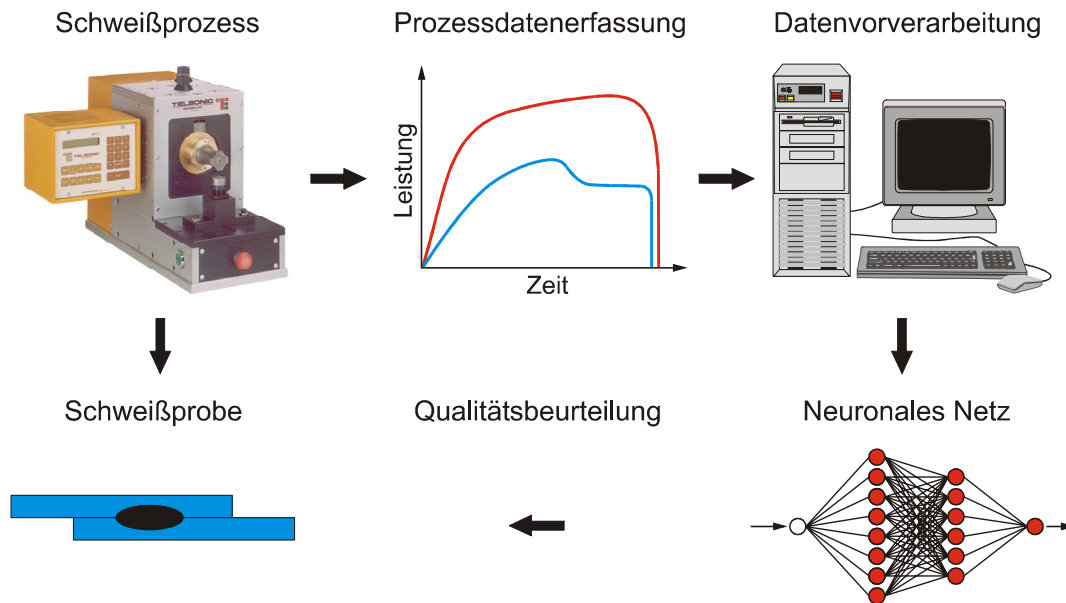
Widerstandsschweißeinrichtungen für das Punkt- und Buckelschweißen (Kraftbereich 1 000 bis 20 000N)

Ultraschallschweißanlagen für das Kunststoff- oder Metallschweißen (Linear- und Torsionsschwinger)

pw-Nd:YAG-Laserstrahlanlage (mittlere Leistung 300 W)

<b>Fachgruppe Mikrostrukturmechanik:</b>	<i>Dr.-Ing. E. Soppa</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ FE-Modellierung auf unterschiedlichen Längenskalen</li> <li>➤ Modellierung der Verformungsvorgänge in Realstrukturen</li> <li>➤ Modellierung der Schädigungsinitiierung und des Schädigungsverlaufs in MMCs, Turbinenwerkstoffen und Stählen - Ableitung von Schädigungskriterien</li> <li>➤ Modellierung phasenspezifischer Eigenspannungszustände</li> <li>➤ Modellierung der zyklischen Belastung (Ermüdungsprozesse)</li> <li>➤ Generierung künstlicher Mikrostrukturen und dreidimensionale Modellierung</li> <li>➤ Gefüge/Eigenschaften-Korrelation (Leichtbauwerkstoffe und Stahl)</li> <li>➤ Einfluss von Volumen, Anordnung und Form der Phasen sowie der Grenzflächenhaftung</li> </ul>	<p>Mikro-Meso-Makro-Kopplung  ARAMIS - Software zur Bestimmung von lokalen Dehnungen  Ableitung von spezifischen Versagenskriterien, Elementausfallmethode, Schädigungsparameter nach Rice und Tracey, Rousselier-Modell, Fraktale Analyse der Oberflächenrauheit (AFM)  Realstrukturmodell, Matrizitätsmodell  Modellierung der Entwicklung der plastischen Zone an der Riss Spitze  Gefügecharakterisierung und dreidimensionale Gefügerekonstruktion  Gefügebasierte Parameterstudien</p>

<b>Fachgruppe Nanosimulation:</b>	<i>Dr.rer.nat. P. Kizler</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Atomistische Simulation des mechanischen Verhaltens von Stahl und anderen Werkstoffen, von Eigenspannungen, der Bildung und des Wachstums von Ausscheidungen, der Diffusion von Kohlenstoff und Phosphor in Stahl</li> <li>➤ Simulation von plastischer Verformung durch Zug- und Schubbelastung oder durch Druck (Indentation)</li> <li>➤ Theoretisch-thermodynamische Simulation von diffusionsgesteuerten Phasenumwandlungen bzw. Festkörperreaktionen</li> </ul>	<p>Molekulardynamik-Programm  Monte-Carlo-Simulationsprogramm  Programme zur Erstellung atomistischer Modelle  Thermodynamik-Simulationsprogramme THERMOCALC und DICTRA</p>



**Qualitätssicherung beim Ultraschallmetallschweißen auf Basis neuronaler Netze**

**Abteilung Lebensdauermanagement:**

**Dr.-Ing. A. Jovanovic**

Tel.: 0711 685-3007  
[aleksandar.jovanovic@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:aleksandar.jovanovic@mpa.uni-stuttgart.de)

**Fachgruppe Datenbanken:**

**Dipl.-Ing. D. Balos**

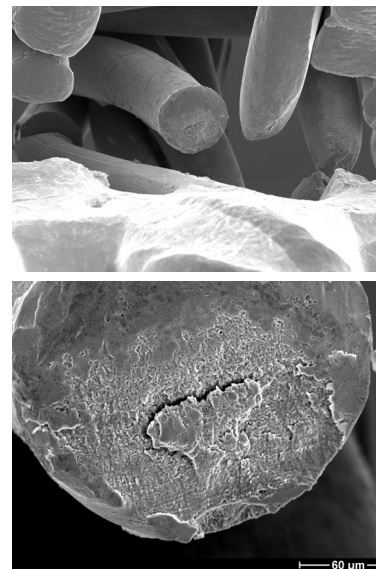
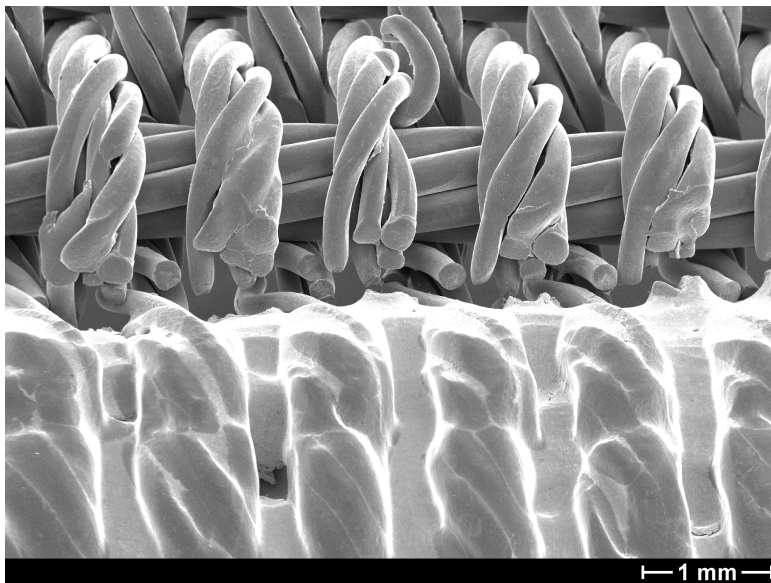
- Automatisierung von Berechnungsabläufen, Dokumentation und Archivierung
- Organisation von Hintergrundinformationen und deren Aufbereitung
- Entwicklung von Software mit intuitiver Benutzerführung

Datenorganisation und Informationsgewinnung im Bereich des Lebensdauermanagements (ISO 9001 zertifizierte Vorgehensweise zur Softwareentwicklung)



<b>Fachgruppe Softwaremodule:</b>	<i>Dipl.-Ing. G. Wagemann</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Standardisierte Softwarepakete ("Lösungspakete") zur Lebensdauer- bzw. Erschöpfungsberechnung, Überwachung und Schadensanalyse</li> <li>➤ Planung und Optimierung von Bauteilprüfungen und Instandhaltung</li> <li>➤ Erstellung von Verfügbarkeits- und Sicherheitsanalysen, Risikobetrachtungen</li> </ul>	<p>Umsetzung standardisierter und neu entwickelter Methoden zum Lebensdauer- und Risikomanagement in benutzerfreundliche Software</p> <p>Entwicklung der EU-Richtlinie "Risiko-basierte Instandhaltung" im EU-Vorhaben RIMAP</p>

<b>Fachgruppe Schadensanalyse:</b>	<i>Dr.-Ing. H. Diem</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Schadensuntersuchungen vorzugsweise an metallischen Bauteilen</li> <li>➤ Erstellung von Gutachten</li> <li>➤ Werkstoffprüfung nach Regelwerken, Produktnormen und Herstellspezifikationen an Proben und Konstruktionsteilen <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zug-, Druck-, Biegeversuch</li> <li>- Kerbschlagbiegeversuche</li> </ul> </li> </ul>	<p>Universalprüfmaschine (statisch, zügig) von 200 N bis 300 kN (Zug und Druck)</p> <p>Statische Pressen bis 5 000 kN</p> <p>Pendelschlagwerke (teilweise instrumentiert) von 0,4 bis 750 J</p>



**Ermüdungsschaden eines Metallgewebepandes aus nichtrostendem Stahl mit nachfolgendem Gewaltbruch**

**Stabsabteilung Maschinen- und Lagerprüfung: Dr.-Ing. A. Gerber**

Tel.: 0711 685-2560  
[armin.gerber@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:armin.gerber@mpa.uni-stuttgart.de)

**Fachgruppe Kalibrierlabor:***Dipl.-Ing. S. Gerber*

<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ vom <i>Deutschen Kalibrierdienst</i> (DKD) akkreditiertes Kalibrierlabor</li> <li>➤ Prüfung/Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen und Eindringkörpern</li> <li>➤ Kalibrierung von Kraftmessgeräten</li> <li>➤ Kalibrierung von Druckmessgeräten</li> <li>➤ Kalibrierung von elektrischen Messgeräten</li> <li>➤ Kalibrierung von Endmaßen</li> </ul>	<p>Mehrere Kraft-Bezugsnormalmeseinrichtungen</p> <p>80 Kraftmessgeräte von 5 N bis 10 MN und 170 sonstige Prüf- und Messmittel</p> <p>Drucknormal bis 5 000 bar</p> <p>Kalibrator für elektrische Messgrößen, Frequenzzähler (Zeitbasis GPS-Normal)</p>
---	--

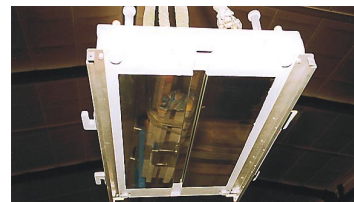
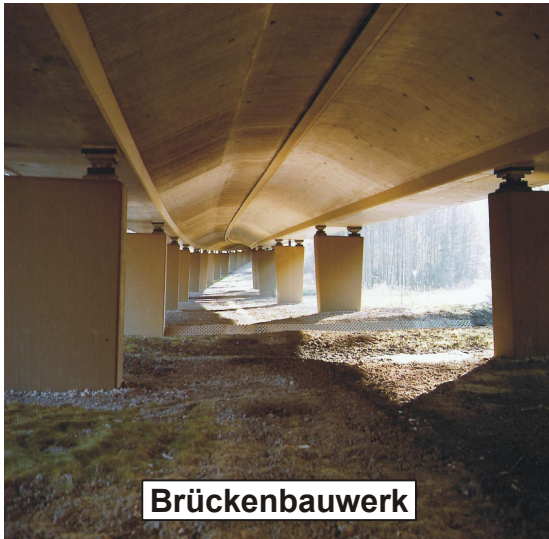
**Fachgruppe Lager im Bauwesen:***Dr.-Ing. A. Gerber*

<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Grundlagenuntersuchungen und Zulassungsprüfungen zum Nachweis der Brauchbarkeit von Gleitwerkstoffen und Schmierstoffen (Komponenten) für Brücken- und Hochbaulager</li> <li>➤ Abnahmeprüfung der Lagerkomponenten entsprechend den Zulassungsanforderungen und Normen auf nationaler und europäischer Ebene</li> <li>➤ Überwachung und Zertifizierung von Gleitlagern, Kalottenlagern, Topflagern, Rollenlagern, Festhaltekonstruktionen</li> <li>➤ Fertigungskontrolle und Konformitätsprüfungen an Hochbaulagern</li> <li>➤ Schulung von Fachkräften</li> </ul>	<p>Betriebsnahe Prüfeinrichtungen zur Untersuchung des Reibungs- und Verschleißverhaltens von Lagerkomponenten und Lagern bei Gleitbeanspruchung unter praxisrelevanten Bedingungen</p> <p>Prüfeinrichtungen für statische Belastungsversuche an Lagerkomponenten und allen Lagertypen</p> <p>Parameterbereich der Prüfeinrichtungen für tribologische Untersuchungen und statische Belastung:</p> <p style="padding-left: 20px;">Temperatur -40 bis +400 °C</p> <p style="padding-left: 20px;">Vertikale Auflast bis 6000 kN,</p> <p>Prüfgeräte zur Bestimmung und Dokumentation von genormten Oberflächenkenngrößen einschließlich Profiltraganteil sowie Formbestimmung</p>
---	--



Der Kalibrierbereich für Kraftmessgeräte der Klasse 00 erstreckt sich von 2 N bis 1 MN. Die von der PTB bestätigte Messunsicherheit beträgt 0,01 %. Mit dem gemeinsamen Erwerb einer weiteren Kraft-Bezugsnormalmesseinrichtung (1 MN) in Nürnberg seitens der MPA Stuttgart und der MPA Darmstadt ist nun ein Spektrum an Kalibriermöglichkeiten vorhanden, das einzigartig in Deutschland ist.

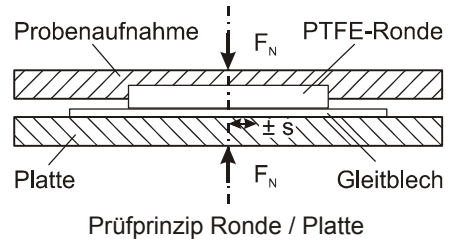
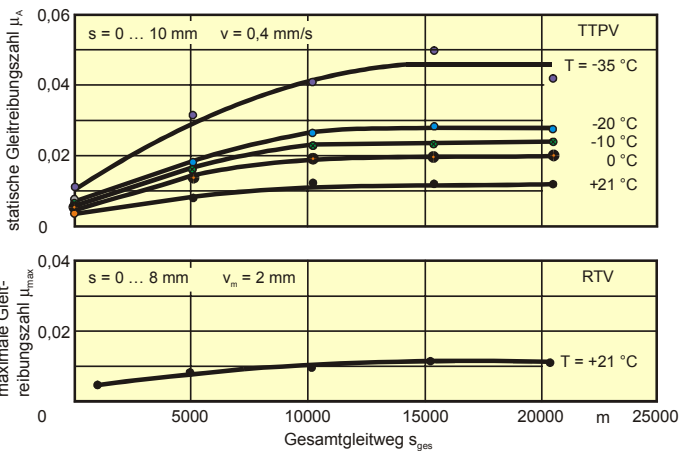
**messeinrichtung in Nürnberg**



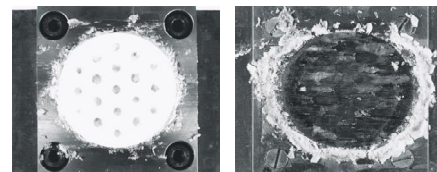
Gleit- und  
Kippteil



**Brückenlager**



**Prüflager**



**Abnahmeprüfung von Lagern sowie Nachweis der Brauchbarkeit von Komponenten entsprechend den Zulassungsanforderungen und Normen**

<b>Stabsabteilung Benannte Stelle Druckgeräte:</b>	Dr.-Ing. H. Kockelmann Dr.-Ing. K.-H. Herter
Tel.: 0711 685-2578/3050 <a href="mailto:hans.kockelmann@mpa.uni-stuttgart.de">hans.kockelmann@mpa.uni-stuttgart.de</a> <a href="mailto:karl-heinz.herter@mpa.uni-stuttgart.de">karl-heinz.herter@mpa.uni-stuttgart.de</a>	

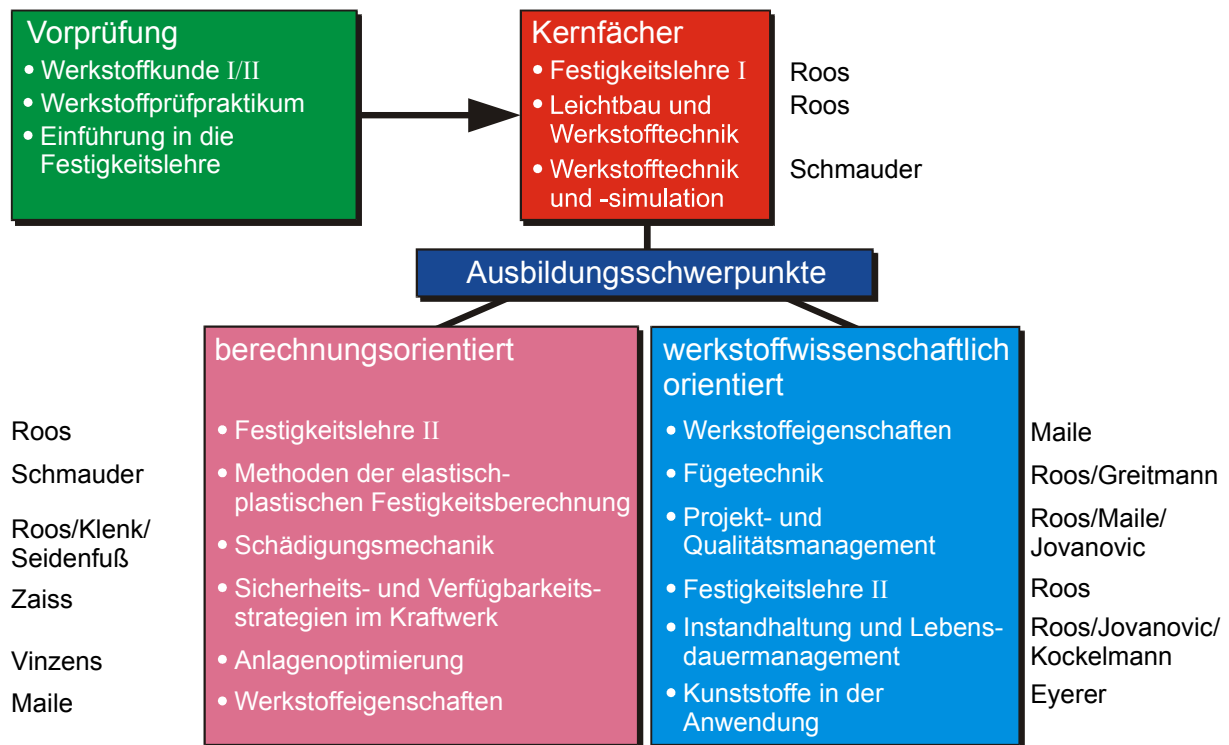
<b>Zertifizierungsstelle Druckgeräte:</b>	K.-H. Herter/H. Kockelmann
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Akkreditierung als Zertifizierungsstelle nach GSG im Geltungsbereich der EG-Richtlinie 97/23/EG beantrag bei der ZLS</li> </ul>	<p>Durchführung der Konformitätsbewertungsverfahren nach Anhang III der Richtlinie 97/23/EG :</p> <p>Überwachung der Abnahme (Modul A1), EG-Entwurfsprüfung (Modul B1), Prüfung der Produkte (Modul F), EG-Einzelprüfung (Modul G), Zulassung von Arbeitsverfahren für dauerhafte Verbindungen an Druckgeräten nach Anhang I Nr. 3.1.2 der Richtlinie 97/23/EG.</p> <p>Erteilung von europäischen Werkstoffzulassungen nach Art. 11 der Richtlinie 97/23/EG</p>

<b>Prüflabor Druckgeräte:</b>	H. Kockelmann/ K.-H. Herter
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Entsprechend den Bestimmungen des Akkreditierungsbescheides der ZLS Nr. II/ZLS/3930-1/60/99 vom 29.12.1999 akkreditiert nach § 9 Abs. 2 GSG im Geltungsbereich der EG-Richtlinie 97/23/EG als anerkannte unabhängige Prüfstelle</li> </ul>	<p>Prüfung von Druckgeräten und Baugruppen die in Art. 1 Abs.1 der Richtlinie 97/23/EG aufgeführt sind, ausgenommen Ausrüstungsteile mit Sicherheitsfunktion nach Art. 1 Abs. 2.1.3.</p> <p>Prüfungen zur Durchführung der Konformitätsbewertungsverfahren nach Anhang III der Richtlinie 97/23/EG: Überwachung der Abnahme (Modul A1), EG-Baumusterprüfung (Modul B), EG-Entwurfsprüfung (Modul B1), Konformität mit der Bauart (Modul C1), Prüfung der Produkte (Modul F), EG-Einzelprüfung (Modul G), Entwurfsprüfung (Modul H1).</p> <p>Prüfung von Arbeitsverfahren für dauerhafte Verbindungen an Druckgeräten nach Anhang I Nr. 3.1.2 der Richtlinie 97/23/EG.</p> <p>Prüfungen im Rahmen der europäischen Werkstoffzulassung.</p> <p>Prüfungen für Einzelgutachten zur Werkstoffzulassung.</p>

# Ausbildung

## 3 Lehre

Die Staatliche Materialprüfungsanstalt bietet als Institut der Universität Stuttgart über den in die MPA integrierten Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Festigkeitslehre und Materialprüfung ein breites Angebot an Vorlesungen für Studierende des Maschinenbaus und verwandter Studiengänge an.



### Vorlesungsangebot der MPA Stuttgart

Die Vorlesungen vermitteln im Vordiplom die Grundlagen der Werkstoffwissenschaften und der Festigkeitsberechnung, die in den Pflichtfächern des Hauptdiploms vertieft werden. Ein besonderer Schwerpunkt in der Ausbildung stellt die Verknüpfung von Berechnung und Werkstoffwissenschaft dar, die sich im Vorlesungsangebot mit den Ausbildungsschwerpunkten im Hauptfach widerspiegelt. Aufgrund der umfangreichen F&E-Aktivitäten der MPA Stuttgart werden besonders praxisnahe Inhalte vermittelt.

Die MPA Stuttgart bietet mit ihrem umfangreichen Prüffeld anwendungsnahe Praktika sowie Studien- und Diplomarbeiten für Studierende an. Ein eigener Arbeitsraum mit moderner Rechnerinfrastruktur steht den Studierenden zur Verfügung.

Die MPA-Stuttgart verfügt über zahlreiche nationale und internationale Beziehungen. Aus diesen Institutsbeziehungen sind wertvolle Austauschkontakte für Studierende gewachsen, wodurch den Studierenden, vor allem im Bereich Maschinenwesen, ein Auslandsstudium ermöglicht wird. Dies geschieht zum einen im Rahmen von ERASMUS-Programmen auf europäischer Ebene. Durch sehr enge Kontakte mit der George-Washington University in Washington, D.C., USA haben im Rahmen eines ISAP-Programms jährlich 3 Studierende die Möglichkeit, in den USA Vorlesungen und Praktika zu besuchen. Zum andern besteht die Möglichkeit eine Studienarbeit an unserem Partnerinstitut, dem National Crash Analysis Center (NCAC) anzufertigen und den Master Degree zu erwerben.

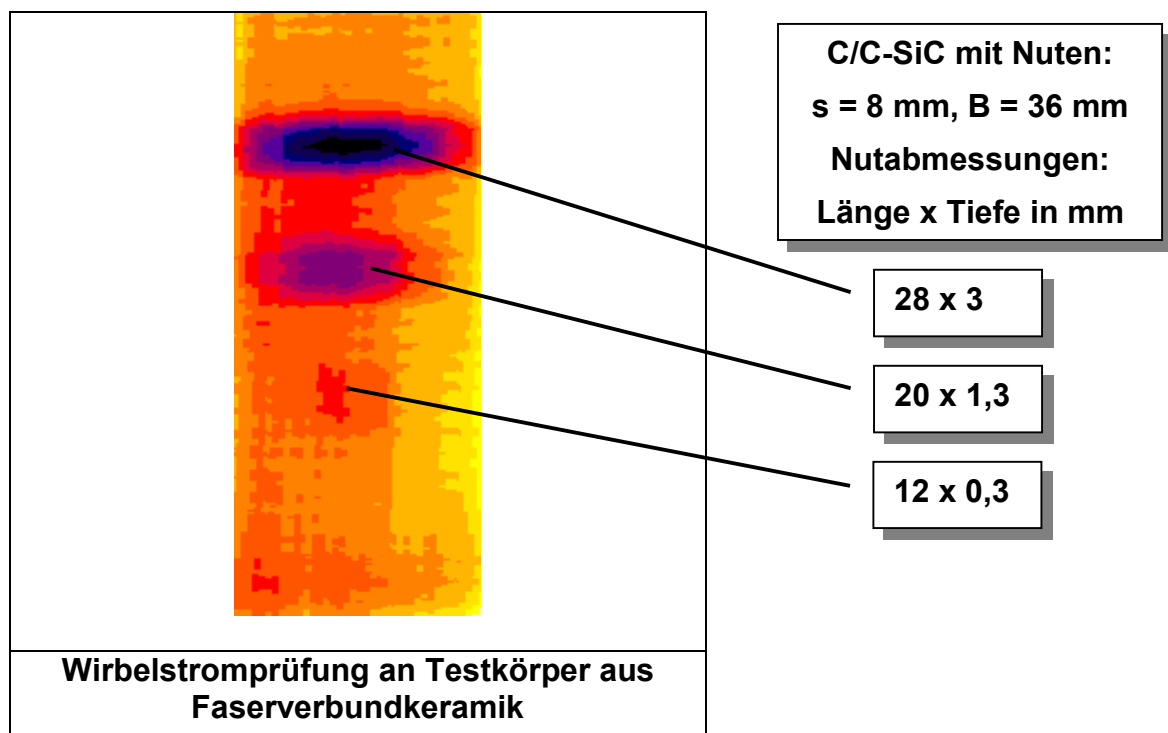
Außer den Studierenden werden an der MPA Stuttgart auch Werkstoffprüfer und Industriemechaniker ausgebildet.

## Versuchseinrichtungen

### 4 Neue Versuchseinrichtungen

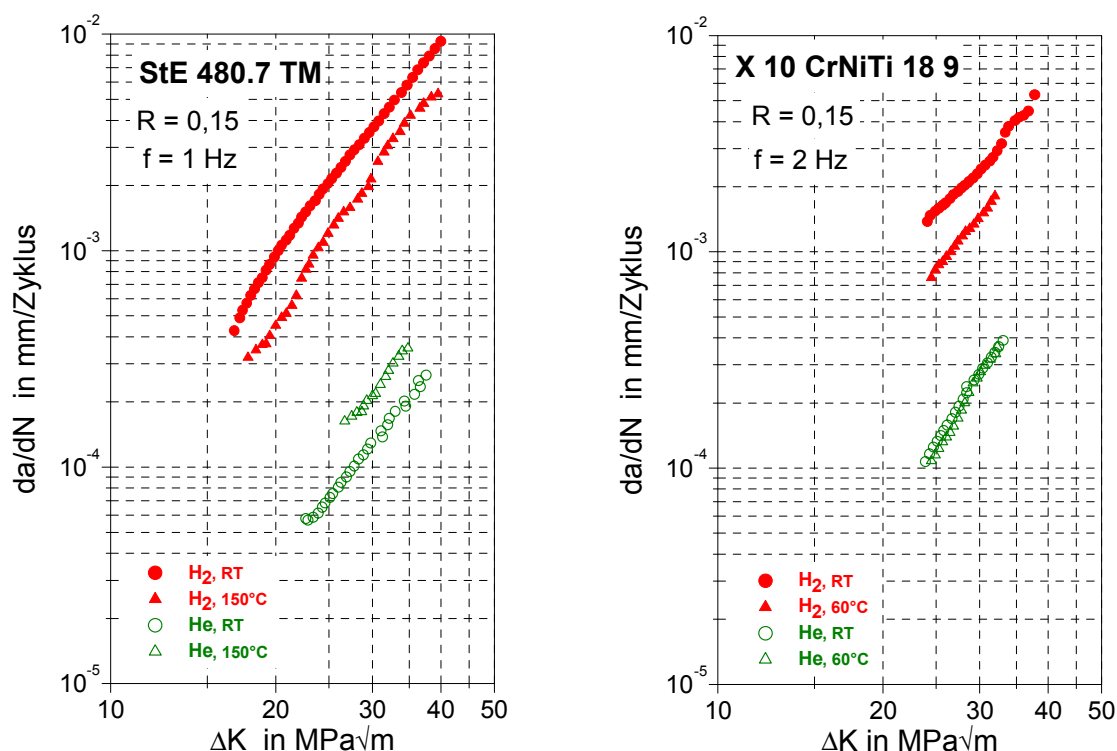
#### Wirbelstromprüfanlage

Der Fachgruppe Zerstörungsfreie Prüfung steht eine neue Mehrfrequenz-Wirbelstromprüfanlage zur Verfügung. Mit dieser Einrichtung sind Prüfungen im Frequenzbereich von 1 kHz bis 20 MHz möglich, wodurch ein breites Anwendungsspektrum eröffnet wird. Dieses reicht von der niederfrequenten Prüfung metallischer Werkstoffe bis zur Hochfrequenzprüfung elektrisch schlecht leitender Verbundwerkstoffe. Die Prüfungen können mittels eines x/y-Manipulators mechanisiert durchgeführt werden. Moderne Computertechnik, in Verbindung mit fortschrittlichen Algorithmen zur Signalverarbeitung, erlaubt eine optimierte, bildgebende Darstellung der gewünschten Messgrößen. Das Verfahren wird im Rahmen des Teilprojekts A4 des SFB 381 zur Detektierung und Beschreibung des Schädigungsverhaltens von kohlefaserverstärkter Keramik (C/C-SiC) eingesetzt.



## Wasserstoffautoklav

Die MPA Stuttgart verfügt über einen Wasserstoffautoklaven, in dem Werkstoffuntersuchungen in gasförmigem Wasserstoff von RT bis 300 °C bei Drücken bis 200 bar durchgeführt werden können. Die Belastungseinrichtung ist servohydraulisch. Es wurde eine neue Steuerungs- und Regeleinrichtung (MTS) mit einer Software beschafft, mit der Zugversuche, Bruchmechanikversuche nach der partiellen Entlastungsmethode und zyklische Risswachstumsversuche durchgeführt werden können. Die in der Software enthaltenen Algorithmen ermöglichen eine direkte Auswertung der Versuchsdaten gemäß den gängigen Normen auf diesem Gebiet. Der Wasserstoffautoklav ist bezüglich der Gasversorgung so umgerüstet worden, dass auch Versuche mit Mischgasen, die für die industrielle Anwendung von Interesse sind, durchgeführt werden können.



**Einfluss von Wasserstoff auf das Risswachstum eines ferritischen und eines austenitischen Stahls**

## Permeationsprüfstand

Bei der Korrosion von Metallen in wässrigen Medien entsteht Wasserstoff, der den Prozess der Rissbildung und des Rissfortschritts mit beeinflussen kann. In welchem Maße dies der Fall ist, ist derzeit Gegenstand von Forschungsarbeiten an der MPA Stuttgart. Wasserstoff kann in das Metallgitter eindringen und lokal die für Risseinleitung und Rissfortschritt erforderliche Energie herabsetzen.

Zur Klärung der Beteiligung von Wasserstoff an den Risskorrosionsprozessen wurde in der MPA Stuttgart ein Permeationsprüfstand aufgebaut, mit dem die durch Metall



diffundierende Menge an Wasserstoff, aber auch die von anderen diffusionsfähigen Gasen, quantitativ ermittelt werden kann. Der Permeationsprüfstand besteht aus einem hochempfindlichen Druckmesssystem (Baratron), einem Massenspektrometer (Quadrupol) und einem Turbopumpstand. Er wird derzeit in einem Forschungsvorhaben eingesetzt, in dem die Korrosionsrissbildung in Hochtemperaturwasser, wie es in der Kraftwerkstechnik gegeben ist, untersucht wird.

### **Widerstandsschweißmaschine**

Im Schweißlabor der MPA Stuttgart wurden die technischen Möglichkeiten auf dem Gebiet der Widerstandsschweißtechnik mit der Beschaffung einer modernen Widerstandsschweißmaschine mit servomotorischem Schweißkopfsystem (max. Elektrodenkraft 20 kN) und Invertergleichstromquelle (max. Schweißstrom 40 kA) erweitert. Diese Gerätetechnik eröffnete neue Möglichkeiten der Zusammenarbeit mit der Industrie mit Schwerpunkt Punkt- und Buckelschweißen an hoch- und höchstfesten Stahlblechwerkstoffen und deren Mischbauweisen mit konventionellen Blechwerkstoffen.

### **Pulvergetriebene 12 MN-Schnellzerreißmaschine**

Die pulvergetriebene Schnellzerreißmaschine ist umgebaut worden, so dass in ihr jetzt auch dynamische Stauchversuche durchgeführt werden können. Für dynamische Stauchversuche wird die Funktionsweise der Anlage so modifiziert, dass der Kolben mit einem Durchmesser von 1 200 mm und einer Masse von 15 t als dynamischer Stempel genutzt wird. Kolbengeschwindigkeiten zwischen 1 und 20 m/s können realisiert werden. Diese beinhalten kinetische Schlag- bzw. Stauchenergien von 10 bis 3 000 kJ. Für kleinere Energien steht weiterhin ein 12 kJ-Fallwerk zur Verfügung.

### **J-R Prüfstand**

Für die Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte wurde eine neue Universalprüfmaschine beschafft. Diese ist mit einer leistungsfähigen Regelung ausgestattet, so dass ein Engpass in der Prüfkapazität in diesem Arbeitsbereich beseitigt ist.

### **Elektromagnetischer Schwingerzeuger**

Zum Festigkeitsnachweis, für Schadensanalysen und zur Qualitätssicherung von Bauteilen, Baugruppen und Strukturen, die im Betrieb hohen Beschleunigungskräften und Schwingfrequenzen ausgesetzt sind, steht ein weiterer elektromagnetischer Schwingerzeuger (Shaker) der Fa. Ling Dynamic Systems mit folgendem Leistungsspektrum zur Verfügung:

Schwingprüfsystem mit 30,5 kN Sinuskraftvektor, über Schwenkgestell Prüfung in horizontaler Richtung möglich; Randomversuch (Breitbandrauschen von Amplitude und Frequenz zwischen 1 und 3 kHz); Schockversuch mit halbsinus-, dreieck- und trapezförmiger Beschleunigung (durch langen Schwingweg von 50 mm können Schocks mit größerer Beanspruchungsdauer realisiert werden); Dauerbeanspruchung mit gleitender Frequenz (Sweep); Resonanzsuch- und Resonanzverweiltest; pneumatischer Lastenausgleich zur Nullpunktkorrektur des Schwingweges.

### **Steuerung der Schlittenanlage für Insassen-Rückhaltesysteme**

Im Zuge der Modernisierung der seit 1975 installierten Crashbahn-Schlittenanlage löst die Automatisierungsplattform MELSEC System Q die bisher vorhandene, konventionelle Steuerung ab. Auf dieser Anlage werden u.a. Sicherheitsprüfungen an Kindersitzen und Sicherheitsgurten durchgeführt. Ausschlaggebend für den Einsatz von MELSEC System Q war die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit der Steuerung. Die Datenerfassung von Messwerten wie Drehzahlen, Wegstrecken und Beschleunigung, die Berechnung von Geschwindigkeiten und die Ableitung von Reaktionen erfolgt in einem Zeitintervall von nur einer Millisekunde.

### **Optische Messtechnik**

Das Programm ARAMIS kann in Verbindung mit der optischen Messtechnik lokale Verformungen auf der Werkstoffoberfläche bestimmen und daraus die Dehnungen berechnen. Dabei wird eine Zugprobe oder ein zu untersuchender Werkstoffbereich von einer Kamera (Nikon coolpix 995, 3.34 MegaPixels) während einer Belastungssequenz registriert. Eine auf die Probenoberfläche aufgebrachte Struktur in Form eines stochastischen Musters (schwarz: Presto Spraylack schwarz matt, weiß: Helling Entwickler weiß für Eindringprüfverfahren), die der Deformation folgt, wird bei den unterschiedlichen Lastzuständen aufgenommen. Die beobachteten Verformungen und die damit berechneten Dehnungen dienen zur Bewertung lokaler Verformungsinhomogenitäten an Proben und Bauteilen.

### **ADwin Pro Messwerterfassungsanlage**

Diese Messwerterfassungsanlage ist speziell zur schnellen, mehrkanaligen Erfassung und Verarbeitung von Messwerten dynamischer Bauteilversuche geeignet. Durch ein eigenes Prozessormodul besteht die Möglichkeit der Echtzeit-Datenerfassung von bis zu 8 Analog- und Digitaleingängen (beispielsweise gleichzeitige Abtastung von Kraft, Weg, Dehnung). Über PC erfolgt auf Basis einer grafischen Oberfläche die Online-Darstellung der Messwerte und Kurvenverläufe. Das Gerät ist mit Messverstärkern für Thermoelemente sowie mit digitalen Ein- und Ausgängen ausgerüstet, um sekundäre Beanspruchungen (Temperier- und Klimakammern, Belüftung, Umwälzpumpen etc.) in Abhängigkeit vom Verhalten des eigentlichen Schwingversuches ansteuern und überwachen zu können. Damit lassen sich kompliziertere Aufgabenstellungen bei der Verknüpfung von Umweltsimulation mit mechanischen Beanspruchungen realisieren. Optional besteht die Möglichkeit der Sollwertvorgabe, d.h. abhängig von einem zeitlichen Programmablauf oder vom Versuchsergebnis erfolgt durch das ADwin-System die Rückwirkung über den Servo-Controller auf die Prüfmaschine.

### **Simulation thermodynamischer Prozesse im Werkstoff mittels DICTRA**

Die mechanischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe hängen wesentlich von der Mikrostruktur, d.h. dem Zustand von Matrix und Ausscheidungen ab. Die Ausbildung der Mikrostruktur ist ihrerseits von der Zusammensetzung des Werkstoffs und der zeitlichen Temperaturführung bei der Wärmebehandlung abhängig. Mit dem Pro-

gramm DICTRA (Diffusion Controlled Transformation) der Firma Thermocalc AB, Stockholm, lassen sich instationäre Wärmebehandlungsprozesse berechnen.

Auf der Basis umfangreicher Datenbanken können metallurgische Phänomene, die auf Diffusion beruhen, in ihrer Zeit- und Temperaturabhängigkeit simuliert werden. Umfangreiche Empirische Daten zu Stählen sind verfügbar. Typische Beispiele sind Neubildung und Größenwachstum von Ausscheidungen oder ggf. deren Auflösung und somit Prozesse, wie sie bei Wärmebehandlungen oder auch beim Schweißen ablaufen. Diese Prozesse sind bisher nur mittels aufwendiger experimenteller Untersuchungen (z.B. Transmissions-Elektronenmikroskopie) zugänglich. Derartige Berechnungen, die in vielen Fällen bereits experimentell abgesichert wurden, sind geeignet, das Ausscheidungsverhalten besser zu verstehen. Eine Anwendung im Bereich der Qualitätssicherung ist z. B. die Ermittlung der Einflüsse möglicher Schwankungsbreiten von Wärmebehandlungsparametern. Auch Diffusionsprozesse wie Nitrieren oder Aufkohlen/Entkohlen in entsprechenden Gas-Atmosphären können berechnet werden.

Das Berechnungsprogramm ist im Bereich der Stähle erprobt, die Auswertung ist im Prinzip jedoch auch auf andere mehrphasige Legierungen möglich. Umfangreiche Datenbanken existieren z. B. auch für Aluminium-Legierungen.

## Berichte aus der Forschung

### 5 Berichte aus der Forschung der MPA Stuttgart

#### Hohes Bruchpotenzial in kraft- und formschlüssigen Verbindungen durch überlagerte Mikrogleitbewegungen (Fretting Fatigue)

J. Föhl, K. Hippelein, M. Rauch

Kraftübertragende Verbindungen wie z.B. Presssitze von Welle/Nabe-Verbindungen (Kraftschluss) oder Schaufel/Scheibe-Verbindungen bei Turbinen (Formschluss), **Bild 1**, beinhalten neben den mechanischen Beanspruchungen ein zusätzliches Potenzial für Anrissbildung und Bruch infolge einer überlagerten tribologischen Beanspruchung (Reibbeanspruchung). Die von außen aufgeprägten mechanischen Beanspruchungen mit meist hoher Frequenz führen zu elastischen Verformungen der Bauteile, was in den Kontaktflächen entsprechende, z.T. hohe oberflächenparallele Kraftanteile bewirkt. Abhängig von der Höhe dieser Kraftkomponente, der senkrecht auf die Oberfläche wirkenden Kraft und der Reibungszahl im Kontaktbereich kann es zu zyklischen Verschiebungen kommen, deren Wegamplitude sehr klein ist, in der Regel nur wenige Mikrometer beträgt, und die innerhalb der Kontaktfläche, z.T. auch nur lokal, wirksam sind. Daraus resultieren zwei wesentliche Wirkungen:



**Bild 1:** Fügestelle Schaufel/Scheibe einer Gasturbine (Quelle: ALSTOM Power AG)

- Die tribologische Beanspruchung führt zu Verschleiß in den Kontaktflächen, oftmals verbunden mit Oxidation der Oberfläche und der Verschleißpartikel, die eine hohe Verweilzeit innerhalb der Kontaktfläche haben und wegen der hohen Härte eine überlagerte Abrasivbeanspruchung bewirken.
- Die Grenzflächenenergie wird erniedrigt, es bilden sich Kerbstellen infolge von lokalem Verschleiß aus und die Einleitung eines Schwingbruchs wird begünstigt, **Bild 2**.

Diese komplexe tribologische Beanspruchung wird mit Schwingungverschleiß (Fretting) oder Reibkorrosion bzw. Passungsrostbildung, der Prozess, der schließlich zum Bruch des Bauteils führt, mit Reiberermüdung (Fretting Fatigue) bezeichnet.

Zahlreiche Schadensfälle, die einen Bruch des Bauteils zur Folge haben, stehen in Verbindung mit Fretting Fatigue. Beispiele hierfür sind auf Wellen aufgedrehte Naben oder Wälzlager, wenn die Passung nicht optimal ausgelegt ist, und formschlüssige Verbindungen wie z.B. die "tannenbaumförmig" ausgeführten Verbindungen von Schaufel und Scheibe in Dampf- oder Gasturbinen, siehe Bild 1.

Überlegungen zur vorbeugenden Schadensverhütung waren ausschlaggebend dafür, dass sich die MPA Stuttgart in den letzten Jahren intensiv mit dem Problem des Fretting Fatigue befasst hat. Im Mittelpunkt der Betrachtungen standen experimentelle Untersuchungen zur Simulation der Verhältnisse in einer Schaufel/Scheibe-Verbindung bei Gasturbinen sowie die experimentelle und numerische Simulation der Beanspruchung einer solchen Verbindung unter Berücksichtigung der Reibungsverhältnisse.

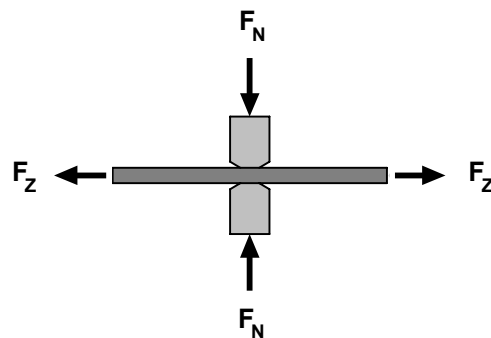
### Experimentelle Simulation

Um die Prozesse in einem solchen Fügekontakt nachzubilden, wurde ein vereinfachtes Modell realisiert, bei dem eine Zugprobe, an deren Oberfläche Reibklötze angepresst werden, schwellend beansprucht wird, **Bild 3**. Die Gleitamplitude ergibt sich dabei aus der Relativbewegung zwischen dem "feststehenden" Reibklötzchen und der unter der zyklischen Belastung sich ergebenden elastischen Längenänderung der Zugprobe ( $\Delta l = \frac{\sigma_a}{E} \cdot l_0$ ). Abhängig von der

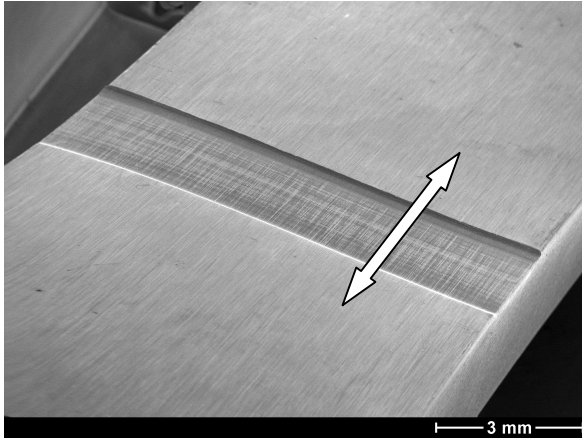
Spannungsamplitude  $\sigma_a$  im Zugstab, der Flächenpressung  $p$  sowie den stofflichen Eigenschaften, die die Reibungszahl bestimmen, kommt es zu lokalem Mikrogleiten innerhalb der Kontaktfläche bis hin zu globalen translatorischen Verschiebungen der Reibklötze auf der Zugprobe. In jedem Fall wirken aber hohe oberflächenparallele Kräfte (Reibkräfte), die bei der Berechnung der Spannungsfelder zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus laufen in der Grenzfläche Prozesse ab, die die Schwingfestigkeit des Werkstoffs herabsetzen. Neben einem makroskopischen Fretting-Verschleiß, **Bild 4**, wird auch die Mikrotopographie verändert, **Bild 5**.



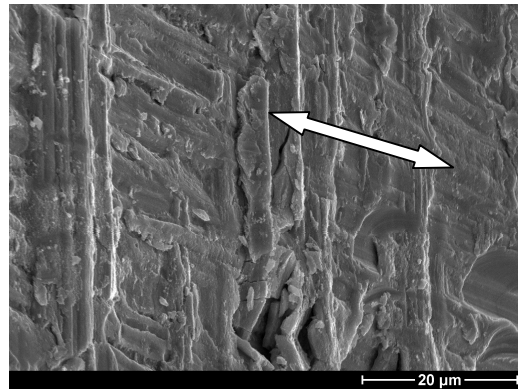
**Bild 2:** Bruch einer Welle, unterstützt durch Fretting



**Bild 3:** Schema der Anordnung für Fretting Fatigue-Versuche



**Bild 4:** Fretting-Verschleiß an der Zugprobe

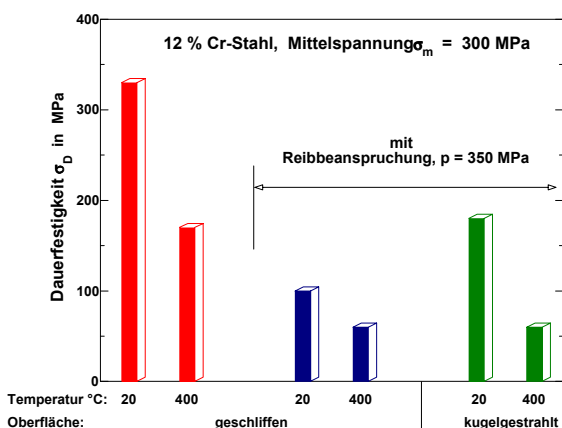


**Bild 5:** Mikropopographie im Fretting-Kontakt

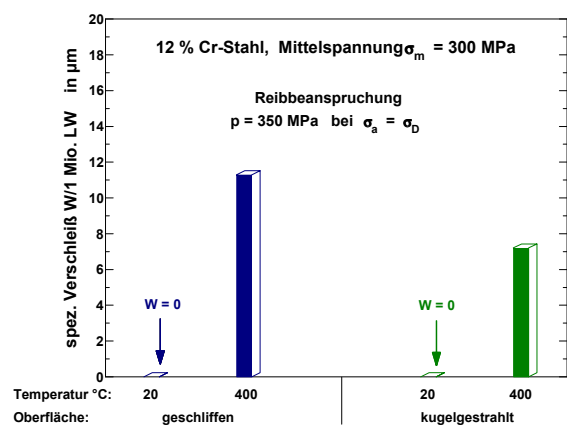
Experimentelle Untersuchungen an einem 12 % Chromstahl und einer Titanlegierung haben deutlich gemacht, mit welchen Abminderungsfaktoren

( $f = \frac{\sigma_D \text{ mit Reibbeanspruchung}}{\sigma_D \text{ ohne Reibbeanspruchung}}$ ) bei einer solchen Fretting Fatigue-Beanspruchung gegebenenfalls zu rechnen ist.

Im Fall des Chromstahls wurde der Abminderungsfaktor bei einer Flächenpressung von 350 MPa und einer Mittelspannung von 300 MPa zu rd.  $f = 0,3$  bei Raumtemperatur und zu rd.  $f = 0,37$  bei 400 °C ermittelt, **Bild 6**. Eine Oberflächenverfestigung, die auch zu Druckeigenstressungen führt, hat sich bei Raumtemperatur positiv ausgewirkt ( $f = 0,55$ ), wogegen bei 400 °C keine Verbesserung des Schwingfestigkeitsverhaltens festzustellen war. Dies hängt möglicherweise mit Relaxations- und Oxidationsvorgängen zusammen. Außerdem ist bei Raumtemperatur praktisch kein Frettingverschleiß festgestellt worden, während bei 400 °C Fretting-Verschleiß in Höhe von rd.  $8 \mu\text{m}/10^6$  Lastwechsel gemessen wurde, **Bild 7**, wodurch die verfestigte Zone sukzessive abgetragen wird.



**Bild 6:** Fretting Fatigue-Verhalten des 12% Cr-Stahls



**Bild 7:** Fretting-Verschleißverhalten des 12%-Cr-Stahls

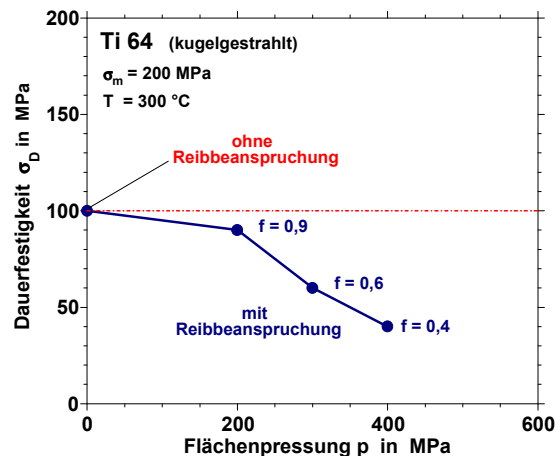
Die Titanlegierung Ti 64 wurde im kugelgestrahlten Zustand bei 300 °C untersucht. Die Versuche bei unterschiedlichen Flächenpressungen zeigen den starken Einfluss der Flächenpressung auf die Schwingfestigkeit, wobei sich Abminderungsfaktoren bis  $f = 0,4$  ergeben haben, **Bild 8**.

### Verifikation der numerischen Analyse

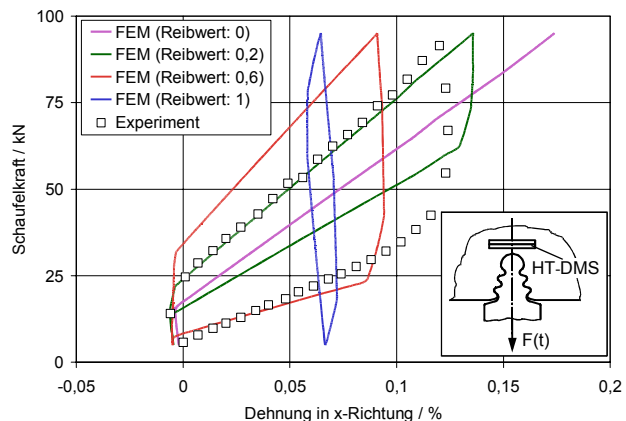
Im Hinblick auf die Verbindung Schaufel/Scheibe sind numerische Berechnungen mittels der Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt worden, die durch experimentelle Untersuchungen an einem Modellkörper verifiziert wurden. Im Bereich der "tannenbaumförmigen" Verbindungsstelle ist die Beanspruchung in der Scheibe mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen worden, **Bild 9**. Bei schwelender Kraffteinleitung über die Schaufel ergibt sich eine Hysterisis im Verlauf der Dehnung. Bei der FEM Berechnung wurde die Reibungszahl im Kontaktbereich als Parameter variiert. Dabei hat sich gezeigt, dass mit einer Reibungszahl von 0,2 der experimentell ermittelte Kraft-Dehnungsverlauf relativ gut abgebildet werden kann.

Die Untersuchungen, die im Rahmen von Forschungsvorhaben der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) durchgeführt wurden, haben zum einen das Verständnis über die in der Kontaktzone ablaufenden Prozesse vertieft. Zum anderen konnte gezeigt werden, dass bei Berücksichtigung der systembezogenen Reibungszahl die Bauteilbeanspruchung realitätsnah berechnet werden kann, was eine Voraussetzung für die sichere Bewertung einer solchen hochbeanspruchten Verbindungsstelle ist.

Die Wahrnehmung von Fretting Fatigue-Prozessen und deren Folgen ist oftmals eine wichtige Voraussetzung bei der Aufklärung von Schadensfällen bei einer Vielzahl von Maschinenelementen und kann dazu beitragen, die richtigen Maßnahmen zur Vermeidung künftiger Schäden zu treffen.



**Bild 8:** Abminderung der Dauerfestigkeit der Ti-Legierung infolge von Fretting



**Bild 9:** Belastungsverhalten einer "tannenbaumförmigen" Verbindung

**Forschungsvorhaben der MPA Stuttgart zum Thema:**

Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Ermittlung der Lebensdauer von Bauteilen mit Mehrflächenkontakten – AVIF Nr. A163

Entwicklung und experimentelle Überprüfung eines Verfahrens zur Lebensdauervorhersage für Schaufel-Scheibe-Verbindungen bei Gasturbinen – AiF Nr. 10781

Untersuchung des langzeitigen Werkstoffverhaltens bei bauteilrelevanten Belastungskombinationen aus niederzyklischer Zugschwell- und hochzyklischer Wechselverformung unter Berücksichtigung der Kerbwirkung

Untersuchung von Fretting Fatigue-Prozessen von metallischen Paarverbindungen – AiF-Nr. 10 530



## Beitrag der MPA Stuttgart zur Entwicklung von effizienten Kraftwerken

A. Klenk, K. Maile

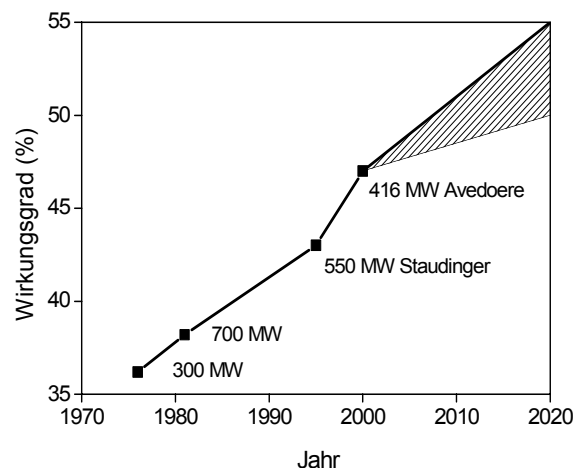
### Zukunftsperspektiven

In den nächsten 20 Jahren wird in Europa ein Bedarf für rd. 300 000 MW elektrischer Leistung entstehen, der in erster Linie durch den Ersatz alter Anlagen mit im Vergleich zu modernen Anlagen schlechtem Wirkungsgrad und Problemen hinsichtlich Umweltverträglichkeit verursacht ist. Dies bezieht sich vor allem auf kohlebefeuerte Dampfkraftwerke alter Technologie mit schlechtem Wirkungsgrad, die das Ende ihrer Betriebszeit erreicht haben.

Diese Lücke in der Energieerzeugung muss in erster Linie durch den Einsatz von hocheffizienten Gas- und Dampf-Kraftwerken geschlossen werden. Durch eine konsequente Anwendung neuer Technologien bei diesen Kraftwerken werden deutliche Fortschritte im Wirkungsgrad erreicht mit der Folge, dass durch den Ersatz alter Anlagen der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 20 % gesenkt werden kann.

### Europäische Zielvorgaben

Die Forschungsförderung der Europäischen Union gibt als langfristiges Ziel das "Zero Emission Dampfkraftwerk" an. Eine wesentliche Zwischenstufe zur Erreichung dieses Ziels ist die Realisierung des 700/720 °C- Kraftwerks. Damit wird ein Wirkungsgrad von >50 % erreicht, **Bild 1**.



**Bild 1:** Entwicklungspotential des 700/720 °C-Kraftwerkes

### Hohe Anforderungen an die Werkstoffe

Die Realisierung höchster Wirkungsgrade in Dampfkraftwerken ist abhängig von den Entwicklungen in der Werkstofftechnik. Bei der Anhebung der Dampfparameter auf Temperaturen bis 720 °C kommt dem Werkstoff eine zentrale Bedeutung zu. Diese müssen als Grundvoraussetzung über eine ausreichend hohe Zeitstandfestigkeit verfügen. Damit wird sichergestellt, dass die Bauteile eine nicht zu große Wandstärke aufweisen, die einerseits die thermische Flexibilität und eine günstige Beanspruchungssituation sicherstellen und andererseits eine wirtschaftliche Bauweise gestatten. Weitere Anforderungen sind eine gute Verarbeitbarkeit (z. B. Schweißen) und eine ausreichende Zähigkeit. Für Temperaturen unter 620 °C werden martensitische 9-12%Cr-Stähle eingesetzt. Sie stellen im 720 °C Kraftwerk auch weiterhin den Strukturwerkstoff in weiten Bereichen des Kessels bzw. allgemein des Kraftwerkes dar. Für Einsatztemperaturen > 600 °C müssen diese Stähle über eine ausreichende feuerseitige und wasserseitige Oxidationsbeständigkeit verfügen.

Die Möglichkeit des Einsatzes von ferritischen Stählen bei Temperaturen > 620 °C ist wegen des geringer werdenden Abstandes zum Umwandlungspunkt kritisch zu se-

hen. Hier kommen austenitische Stähle bzw. bei Temperaturen um 700 °C ausschließlich Nickelbasislegierungen zum Einsatz.

### F&E Arbeiten der MPA Stuttgart

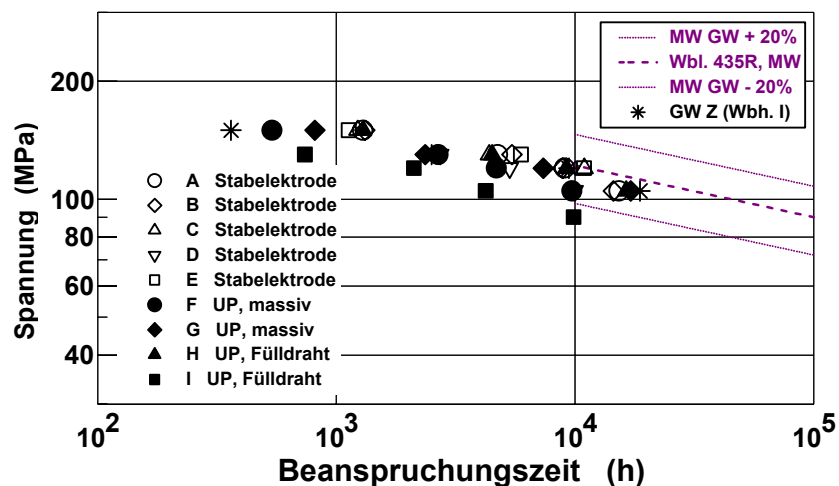
Vor diesem Hintergrund sind Forschung und Entwicklung besonders gefordert. Der Kompetenzbereich der MPA Stuttgart kann in diesem Gebiet besonders eingebracht werden:

- \* Die beanspruchungsgerechte *Qualifizierung und Optimierung von modernen Werkstoffen* ermöglicht die technische Einführung erhöhter Dampfparameter (Druck, Temperatur) und damit die effektive Anhebung des Wirkungsgrades
- \* Die *numerische Simulation* der spezifischen Bauteilbeanspruchungen ermöglicht die Ermittlung hochbeanspruchter Bauteilbereiche, die Optimierung des Designs und die Darstellung der Schädigungsentwicklung, der Versagenszeit und des Versagensortes.
- \* Darauf aufbauend ermöglichen *neue Monitoringkonzepte* eine Verbesserung von Instandhaltungskonzepten.

### Qualifizierung und Optimierung von modernen Werkstoffen

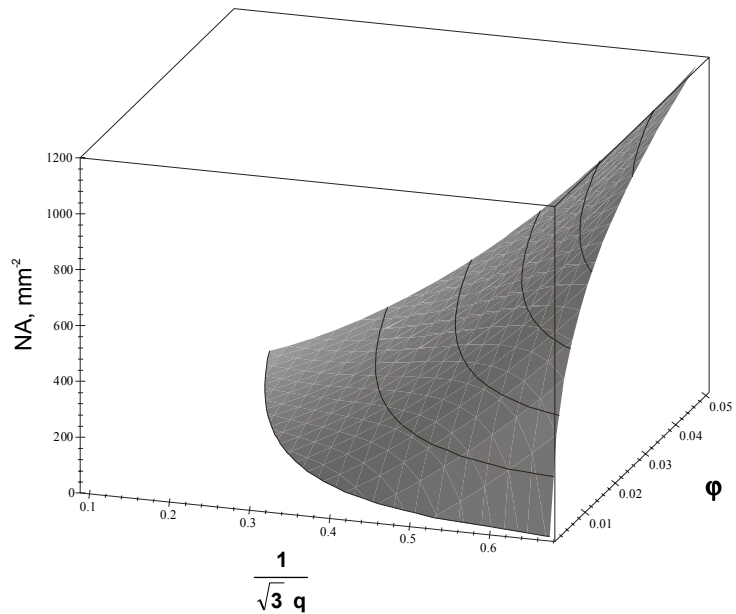
Ein traditionelles Arbeitsgebiet der MPA Stuttgart ist der Nachweis der Langzeitbewährung dieser Werkstoffe, um den Betreibern neuer Anlagen aus diesen Werkstoffen Möglichkeiten, Werkzeuge, und Daten an die Hand zu geben, ihre Anlagen sicher im Hinblick auf die Auslegung und wirtschaftlich im Hinblick auf Revisionen und Revisionsintervalle zu betreiben. Hierzu gehört die klassische Werkstoffprüfung zur Ermittlung entsprechender Werkstoffkennwerte, Beispiel **Bild 2**.

Ein immer größeres Gewicht gewinnt die beanspruchungsgerechte Charakterisierung: hier steht die Ermittlung des Einflusses der Mehrachsigkeit der Beanspruchung auf das Werkstoffverhalten (Verformung, Schädigungsentwicklung, Versagen) im Vordergrund. Hierzu werden Untersuchungen an bauteilnahen Proben bzw. Bauteilmodellen bis hin zu realen Bauteilen durchgeführt. Als Beispiel kann der in **Bild 3** gezeigte, experimentell ermittelte Zusammenhang zwischen der Entwicklung von Kriechporen, der Verformung und dem Mehrachsigkeitsquotienten  $h$  genannt werden. Dieser Zusammenhang wurde mittels Zeitstandversuchen an glatten und gekerbten, innendruckbelasteten Hohlzylindern mit und ohne zusätzliche Längsspannung bestimmt.

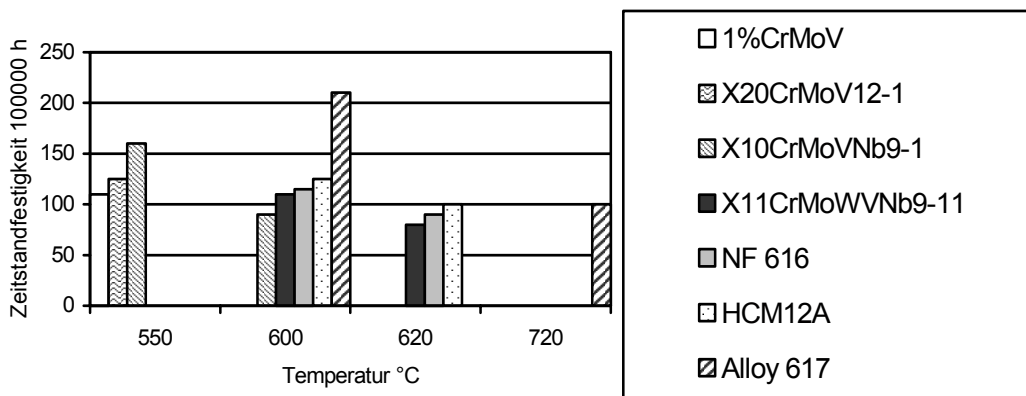


**Bild 2:** Vergleich der Zeitstandfestigkeit Grundwerkstoff (GW) X10CrMoVNb9-1 mit artgleichem Schweißgut bei 600 °C

**Bild 4** zeigt einen Vergleich der Zeitstandfestigkeit für 100 000 h bei unterschiedlichen Einsatztemperaturen von herkömmlichen bainitischen (1%CrMoV) und martensitischen 12%Cr-Stählen (X20CrMoV12-1) mit neuentwickelten martensitischen 9-11% Cr-Stählen sowie einer Nickelbasislegierung Alloy 617. Die martensitische Gefügestruktur weist gegenüber der bainitischen bzw. ferritischen Gefügestruktur ein höheres Potenzial an Zeitstandfestigkeit auf. Dies ist in der besonderen Ausbildung der Mikrostruktur begründet. Ein Optimum an Zeitstandfestigkeit mit gleichzeitiger Steigerung der Einsatztemperatur kann erreicht werden durch eine Optimierung der chemischen Zusammensetzung.



**Bild 3:** Zusammenhang zwischen der Porendichte NA, dem Spannungszustand (Mehrachsigkeitsquotienten) und der Kriechverformung  $\phi$ , Werkstoff 14MoV6-3,  $T = 550 \text{ °C}$

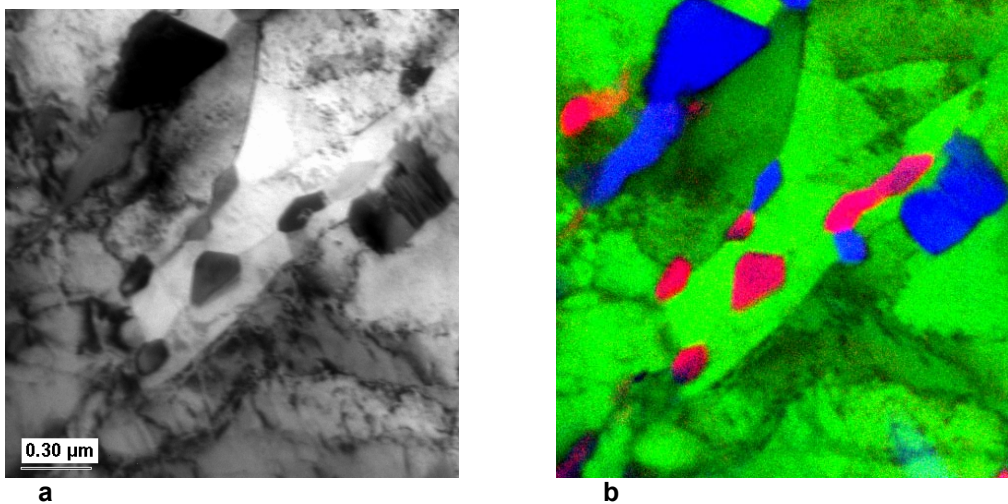


**Bild 4:** Vergleich der Zeitstandfestigkeit herkömmlicher Stähle mit neuen Werkstoffen

Moderne 9-11%Cr-Stähle weisen gegenüber dem herkömmlichen 12%Cr-Stahl (X20CrMoV12-1) eine Absenkung des Cr - Gehaltes auf 9 bis 11 % sowie die Zulegierung von rd. 0,05 % N, 0,05 % Nb und teilweise von bis zu 0,01 % B und bis zu 1 % W auf. Zusätzlich wurde eine Feinabstimmung der Anteile von Kohlenstoff, Chrom, Molybdän und Vanadium vorgenommen, um das Ausscheidungsgefüge zu optimieren. Kennzeichnend für diese Stähle ist die Mischkristallverfestigung durch die langsam diffundierenden Elemente Molybdän und Wolfram, die Ausscheidungsverfestigung durch Karbide des Typs  $M_{23}C_6$  und die während der Hochtemperaturbeanspruchung zunehmend auftretenden feindispers verteilten vanadin- und niobreichen

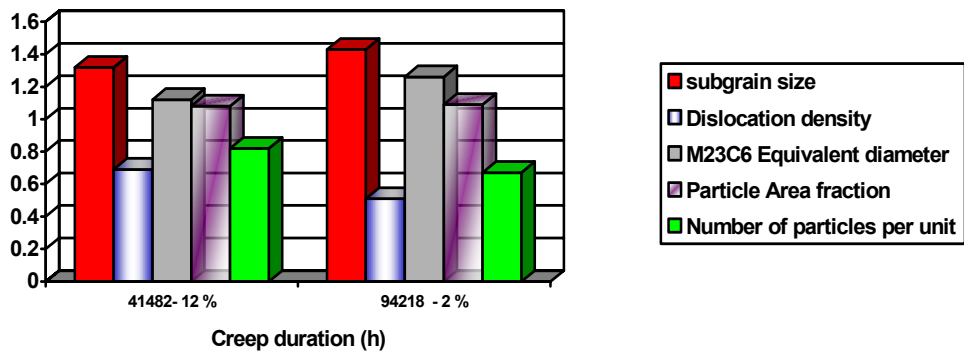
Karbonitride des Typs MX. Die Verfestigung durch Karbide und Nitride in Verbindung mit hoher Versetzungsdichte bzw. mit entsprechender Subkornstruktur bildet die Grundlage der verbesserten Zeitstandfestigkeit. Die genaue Charakterisierung der Mikrostruktur ist daher eine unabdingbare Voraussetzung zur Abschätzung des Potenzials hinsichtlich Zeitstandfestigkeit aber auch zur Beurteilung des möglichen Erschöpfungszustandes.

Hierzu können fortgeschrittene Methoden der Elektronenmikroskopie eingesetzt werden. **Bild 5a** zeigt ein TEM-Hellfeld-Bild eines 9% Chromstahls, wie es üblicherweise zur Charakterisierung des Ausscheidungszustandes verwendet wird. In **Bild 5b** ist die Methode der energiefilternden Elektronenmikroskopie (EFTEM) an der gleichen Stelle gegenübergestellt. Anhand überlagerter Elementverteilungsbilder von z. B. Chrom, Eisen und Molybdän können die verschiedenen Arten von Ausscheidungen –  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$  +Matrix, Laves-Phase – identifiziert werden und über eine Bildauswertung auch quantifiziert werden im Hinblick auf Häufigkeit und Größenverteilung. **Bild 6** zeigt die Veränderung von Mikrostrukturparametern, **Bild 7** die Abhängigkeit des Auftretens von Ausscheidungen in einem Bor-legierten 9%Cr-Stahl als Folge einer Kriechbelastung.

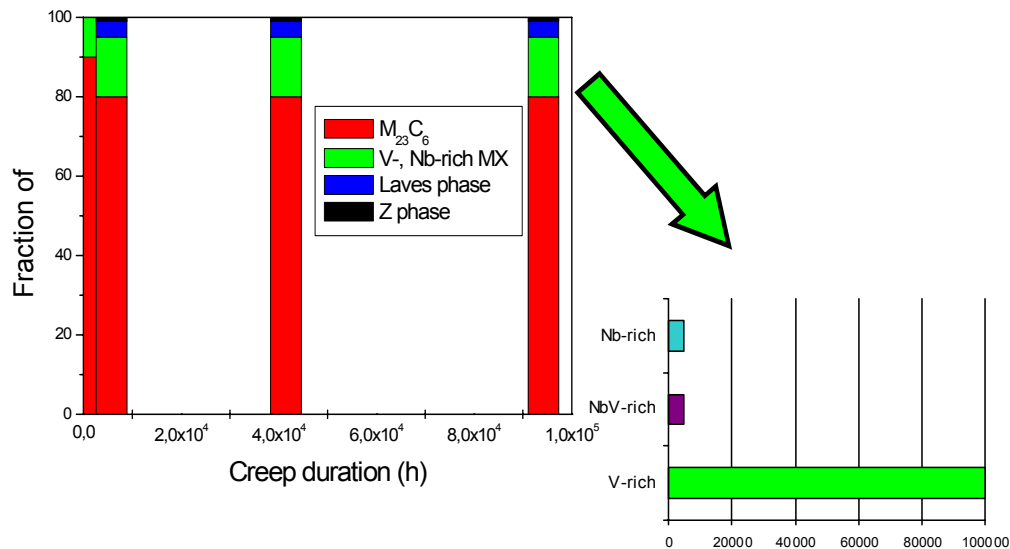


**Bild 5:** Mikrostruktur eines modernen 9%Cr-Stahles; a: TEM-Hellfeld-Bild, b: EFTEM Elementverteilungsbild

Diese Bilder machen deutlich, dass diese Stähle im Hinblick auf ihrer „Qualität nicht mehr ausschließlich über die lichtmikroskopische Erscheinung“ beurteilt werden können, sondern dass vertiefte Untersuchungen und ein weitergehendes Verständnis der metallkundlichen Vorgänge notwendig sind, um das Potenzial dieser Werkstoffe, auch bezüglich der möglichen Schädigungsentwicklung im Langzeitbereich, sicher beurteilen zu können.



**Bild 6:** Änderung der Subkorngröße, der Versetzungsdichte, der Größe von  $M_{23}C_6$  Ausscheidungen, der Anteils von Teilchen an der Fläche bzw. der Teilchenanzahl bezogen auf den Ausgangszustand nach unterschiedlicher Kriechzeit



**Bild 7:** Auftreten von Ausscheidungstypen in einem B-legierten 9%Cr-Stahl nach unterschiedlichen Kriechbelastungszeiten

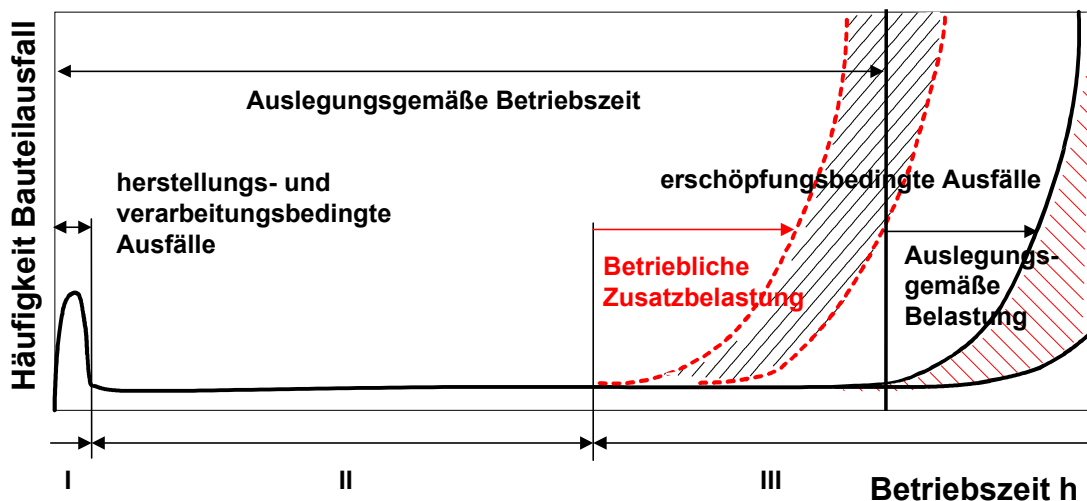
## Numerische Simulation der Bauteilbeanspruchung und der Schädigungsentwicklung

Die Anwendung analytischer Berechnungsmethoden stößt bei komplexen Beanspruchungssituationen, wie z. B. der Überlagerung von Kriechen und Ermüden oft an ihre Grenzen. Das Ziel der numerischen Simulation ist es, das temperatur- und zeitabhängige globale und lokale Bauteilverhalten exakt im Hinblick auf Spannungs- und Verformungszustände zu beschreiben sowie die Vorgänge der Spannungsumlagerung infolge der Lastumkehr, z. B. bei An- und Abfahrten zu simulieren und ihre Auswirkungen auf das Spannungsniveau während der anschließenden Phase statischer Beanspruchung zu ermitteln. Die Beschreibung des inelastischen Werkstoffverhaltens unter mehrachsiger Beanspruchung erfordert den Einsatz fortgeschrittener Werkstoffgesetze, welche die Wechselwirkung zwischen Kriechen und Ermüden erfassen können. Ein solches Modell ist das elastisch-viskoplastische Werk-

stoffmodell nach Chaboche-Nouailhas. Das Modell unterscheidet nicht explizit zwischen zeitunabhängigen Plastifizierungsvorgängen, die infolge von Laständerungen auftreten, und solchen, die durch zeitabhängiges viskoses Werkstoffverhalten (Kriechen, Relaxation) hervorgerufen werden, sondern beschreibt diese beiden Beiträge zur bleibenden (inelastischen) Verformung mit einer übergeordneten Formulierung. Zur besseren Abbildung des Werkstoffverhaltens wurde dieses Werkstoffmodell in mehreren Bereichen modifiziert bzw. weiterentwickelt. Damit wird es möglich, hochbeanspruchte Bauteilbereiche zu ermitteln und auf dieser Grundlage eine Optimierung des Design und die Darstellung der Schädigungsentwicklung, der Versagenszeit und des Versagensortes vorzunehmen.

### Monitoring-Konzepte

Bauteile des Kraftwerkbaus sind einer komplexen instationären Beanspruchung aus Primär- und Sekundärlasten im Bereich erhöhter und hoher Temperaturen ausgesetzt, die bei der Auslegung über idealisierte Belastungsannahmen (z. B. TRD: nur Innendruck), durch Verwendung von lower bound Werkstoffkennwerten (untere Streubandgrenze der Zeitstandfestigkeit), vereinfachten Werkstoffverhaltens (lineare Akkumulation von Kriechen und Ermüden) sowie einer Reihe von Sicherheitszuschlägen (z.B. Temperaturzuschlag) abgedeckt werden. Im Betrieb können Abweichungen von diesen Annahmen auftreten, die sowohl zu einer längeren Lebenszeit, verbunden mit einer unnötig häufigen Zahl von Revisionen, oder zur verkürzten Lebensdauer (z. B. bei Zusatzspannungen aus dem System) mit nicht angepassten Revisionsintervallen führen. Moderne Überwachungsmethoden unterstützen die geplanten Neuerungen im Bereich der Flexibilisierung von Revisions- und Prüfintervalen sinnvoll. **Bild 8** zeigt in verallgemeinerter Form, welchen Verlauf die Häufigkeit, dass ein Bauteil wegen Schadensbefunden auszutauschen ist, in Abhängigkeit von der Betriebszeit hat. Kurz nach Inbetriebnahme ist wegen Mängeln in der Herstellungs- und Verarbeitungsqualität mit einem Anstieg zu rechnen. Danach schließt sich



**Bild 8:** Schematische Darstellung der Ausfallhäufigkeit von Kraftwerksbauteilen

eine Phase mit geringer Häufigkeit an, dann steigt die Kurve wieder an, wobei die Ursache a) die betriebsbedingte werkstofftechnische Erschöpfung, oder b) eine in der Auslegung nicht berücksichtigte zusätzliche Betriebsbelastung oder eine geänderte Betriebsweise mit den damit verbundenen Belastungsverschiebungen sein kann. Überlagert wird der Anstieg vom Streuband des Werkstoffeinflusses, den Ungenau-

igkeiten der Größen, die in die Beanspruchungsermittlung eingehen (Temperatur, Druck, Bauteilgeometrie, Berechnungsalgorithmus). Im Fall a) sollte der Anstieg idealerweise mit  $e = 100\%$  rechnerischer Erschöpfung zusammenfallen, was natürlich für b) nicht zutreffen kann; hier setzt die Schädigung mehr oder weniger deutlich vor  $e = 100\%$  ein.

In den Bereichen I und III sind die Intervalle der Revisionen der Ausfallshäufigkeit anzupassen. Im Bereich II hingegen können sehr große Intervalle in Betracht bezogen werden. Entscheidend ist dabei das rechtzeitige Erkennen des Anstiegs der erschöpfungsbedingten Häufigkeit. Hierfür müssen folgende Voraussetzungen erfüllt werden:

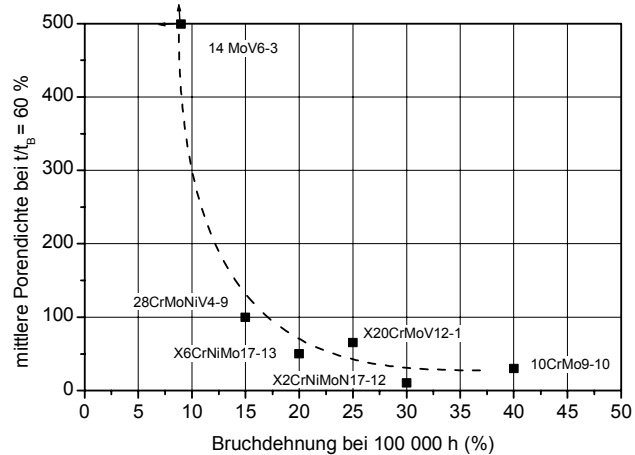
- \* Eine ausreichende betriebliche Instrumentierung muss die Grunddaten für eine rechnerische Ermittlung der Erschöpfung der (erkannten) relevanten Schädigungsmechanismen liefern.
- \* Die rechnerische Erschöpfung muss einen realistischen Bezug zu den Belastungsgrößen (z. B. Spannungen), den werkstofftechnischen bzw. physikalischen Schädigungsvorgängen aufweisen, insbesondere was den Eintritt des Versagens (oder der Funktionsunfähigkeit) des Bauteils sowie die Überlagerung verschiedener Schädigungsmechanismen betrifft.

Den ersten Schritt für die Erfüllung dieser Voraussetzungen stellen moderne Monitoringsysteme dar. Als Beispiel kann hier das zertifizierte System ALIAS der MPA Stuttgart genannt werden, das bereits in verschiedenen Kraftwerken zur Überwachung von Rohrleitungen installiert ist. Es stellt zunächst eine Weiterentwicklung von bereits bekannten Betriebsüberwachungssystemen dar, z. B. des Systems FACOS der EVT. Das System erfasst Daten von vorhandenen (oder nachgerüsteten) Betriebsmessstellen und rechnet bauteilbezogen die Erschöpfung nach TRD aus. Mit speziellen Programmelementen werden die Daten einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Ferner führt das System bei Ausfall der Betriebsmessstellen eine plausible Interpolation durch. Die Ergebnisse der Erschöpfungsberechnung können vom Anwender nachgeprüft werden, z. B. über den Verlauf der Messdaten. Die Ergebnisse von Revisionen können im System archiviert, d.h. den Ergebnissen der Erschöpfungsberechnung gegenübergestellt werden. Über die Anforderungen der TRD hinausgehend können über zusätzliche Instrumentierungen (Verschiebungsmessungen, Dehnungsmessungen) Zusatzkräfte, z. B. aus dem Rohrleitungssystem erfasst und spannungs- bzw. erschöpfungsmäßig bewertet werden.

Ein zweiter Schritt ist die realistische Ermittlung von Erschöpfungsgrößen mit werkstofftechnischem Schädigungsbezug. Hier kommen die werkstofftechnischen Kenntnisse der MPA Stuttgart – ein Resultat zahlreicher Forschungsvorhaben – zum Zuge. Da zwischen rechnerischer Erschöpfung und Schädigung kein direkter Zusammenhang besteht, ist es unbedingt erforderlich auf die werkstoff- und beanspruchungsabhängigen Besonderheiten einzugehen. **Bild 9** zeigt zum Beispiel, dass die Neigung zur Bildung von Kriechporen sehr stark vom Bruchverformungsverhalten im Zeitstandversuch beeinflusst wird.

Es ist daher plausibel, dass die Bewertung des Auftretens von Kriechporen in Bauteilen in Abhängigkeit von der Betriebsdauer bzw. rechnerischem Erschöpfungsgrad bei den modernen 9-11% Cr-Stählen anders zu erfolgen hat, als bei den herkömmlichen niedriglegierten warmfesten Stählen. Eine vergleichbar geringe Porenanzahl in diesen Stählen kann einen größeren Lebensdauerverbrauch aufzeigen, als in einem 1%CrMoV-Stahl. Ziel der laufenden Forschungsarbeiten an der MPA Stuttgart ist daher die Erweiterung des Kenntnisstandes über den zeitlichen Ablauf der Schädigung

infolge Kriechbeanspruchung in modernen 9%-Chromstählen. Basierend auf experimentellen Untersuchungen unter praxisnahen Beanspruchungsbedingungen sollen Methoden zur Überwachung und zur Vermeidung von Bauteilversagen infolge Kriechschädigung in Regelwerke umgesetzt werden.



**Bild 9:** Porendichte (Anzahl der Poren pro  $\text{mm}^2$ ) nach 60% der Bruchzeit in Abhängigkeit von der Bruchdehnung nach 100 000 h für verschiedene Werkstoffe

### Forschungsvorhaben der MPA Stuttgart zum Thema:

Nachweis der Langzeiteigenschaften von Schweißverbindungen moderner Stähle für den Einsatz in Dampferzeugern im Bereich bis  $620\text{ }^\circ\text{C}$  - AVIF Nr. 129

Qualifizierung des 12CrCoMo als neuen Werkstoff für den Druckbehälterbau – AVIF Nr. A180

Neue Rohrwerkstoffe für Dampferzeuger mit Wirkungsgraden über 50 % (MARCKODE2) – AVIF A130

Innendruckversuche an Rohrbogen aus warmfesten Stählen mit zusätzlich aufgebracht Biegemomenten bei Temperaturen im Kriechbereich – BMBF 1500727

Entwicklung und experimentelle Überprüfung eines Verfahrens zur Lebensdauer vorhersage für Schaufel-Scheibe-Verbindungen bei Gasturbinen – AiF Nr. 10781

Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Ermittlung der Lebensdauer von Bauteilen mit Mehrflächenkontakten – AVIF A163

Kriech- und Relaxationsverhalten von 9–10%Cr-Rohrleitungsflanschen für Dampferzeuger bis  $620\text{ }^\circ\text{C}$  – AVIF Nr. A111

Umsetzung vorhandener Methoden zur Lebensdauerermittlung und –vorhersage für mehrachsig beanspruchte Bauteile unter hohen Temperaturen in ein wissenschaftliches System – AVIF Nr. A122

Einfluss der Mehrachsigkeit der Belastung auf die Kriechporenbildung und die zeitliche Schädigungsentwicklung bei typischen Kraftwerksbaustählen – AVIF Nr. A105

Optimierung eines Konzeptes zur Modellierung des Kriech- bzw. Schädigungsverhaltens von Bauteilen aus warmfesten CrMoV-Stählen – AVIF Nr. A112

Beurteilung von Festigkeitshypothesen für mehrachsiale Spannungs-Dehnungszustände unter langzeitiger Kriechbeanspruchung – AiF Nr. 8107



Bewertung der Auswirkung von sekundären Lasten auf das Versagensverhalten von Bauteilen unter Kriechermüdungsbeanspruchung – AiF Nr. 11342N

Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von instationär beanspruchten Komponenten – AVIF Nr. A135

Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Komponenten im Kriechbereich unter An- und Abfahrbedingungen – AVIF Nr. A200

Untersuchung des langzeitigen Werkstoffverhaltens bei bauteilrelevanten Belastungskombinationen aus niederzyklischer Zugschwell- und hochzyklischer Wechselverformung unter Berücksichtigung der Kerbwirkung – AVIF Nr. 145

Verhalten von Fehlstellen im warmfesten Stahlguss bei betriebsähnlichen Belastungen – AiF Nr. 8338

Auswirkung eines dreiachsigen Spannungszustandes auf das Verformungsverhalten und das Rissinitiierungsverhalten von Gruppenfehlstellen – AVIF A143

Kriech- und Kriechermüdungsrisssverhalten moderner Kraftwerksstähle im Langzeitbereich – AVIF A178

Einfluss inerter Atmosphäre auf das Rissverhalten warmfester Stähle im Kriech- und Kriechermüdungsbereich – AiF 11722 N

Rissverhalten von Nickelbasislegierungen unter überlagerter Kriech- und Kriechermüdungsbeanspruchung – AiF Nr. 12 308/2 N

Anwendbarkeit von Bruchmechanikkonzepten auf Kriechrisseinleitung und Kriechrissswachstum von niedriglegiertem Stahlguss im praxisrelevanten Beanspruchungsbereich – AiF Nr. 12 687N

Berechnung von Risseinleitung und Rissfortschritt in Hochtemperaturbauteilen und im Druckbehälterbau – AVIF Nr. 141

Charakterisierung der Schädigungsentwicklung zur Lebensdauerbewertung von Rohrleitungskomponenten aus den neuen 9%Chromstählen – AVIF Nr. A152

## Neues Bruchmechanikkonzept und dessen Verifikation im Falle einer Thermochockbeanspruchung

U. Eisele, L. Stumpfrock

Die etablierten Ingenieurverfahren zur Ermittlung zulässiger Bauteilbelastungen gehen von der Grundbeziehung der Festigkeitsberechnung aus:

$$\text{Wirkende Beanspruchung} \leq \text{zulässige Beanspruchung}$$

Dabei wird die zulässige Beanspruchung in der Regel definiert als

$$\text{zulässige Beanspruchung} = \frac{\text{Werkstoffkennwert}}{\text{Sicherheitsbeiwert}}$$

Das klassische Beispiel hierfür im einfachsten Fall ist die statische Festigkeitsberechnung, wobei (für Stähle) als „Werkstoffkennwert“ je nach Werkstoffverhalten entweder die Streckgrenze oder die Zugfestigkeit verwendet wird. Der Sicherheitsbeiwert wird abhängig vom Gefährdungspotential im Versagensfall und dem verwendeten Werkstoffkennwert unterschiedlich gewählt. Erfolgt z.B. die Auslegung eines Bauteils aus duktilem, verformungsfähigem Werkstoff gegen Fließen ( $R_e$ =Kennwert), kann ein „kleiner“ Sicherheitsbeiwert gewählt werden, da selbst beim Erreichen der Fließgrenze noch inhärente, nicht quantifizierte Auslastungsreserven vorhanden sind. Sicherheitsbeiwerte bei Ansatz der Zugfestigkeit  $R_m$  sind entsprechend höher zu wählen. Häufig kommt eine kombinierte Betrachtung von Streckgrenze und Zugfestigkeit bei der Definition der zulässigen Beanspruchung zum Einsatz, wie z.B. bei der Definition des  $S_m$ -Wertes in kerntechnischen Regelwerken.

Diese Vorgehensweise ist sinngemäß ähnlich in allen Auslegungsvorschriften und Regelwerken verankert, wobei neben den explizit geforderten Sicherheitsbeiwerten weitere inhärente Sicherheiten vorliegen dadurch, dass als Werkstoffkennwert üblicherweise ein festgelegter Mindestwert (Gewährleistungswert) zu verwenden ist. Diese Gewährleistungswerte werden i. A. aus einer statistischen Auswertung einer Vielzahl repräsentativer Versuchsergebnisse ermittelt, wobei häufig als Maß der Wert bei „Mittelwert minus doppelte Standardabweichung (-2s)“ gewählt wird. Bruchmechanische Kennwerte werden, sofern überhaupt in Regelwerken berücksichtigt, in den meisten Fällen von dieser Vorgehensweise abweichend bewertet. Nachstehend wird der Stand der Technik dargestellt sowie ein Vorschlag zur Vereinheitlichung der Vorgehensweise erstellt.

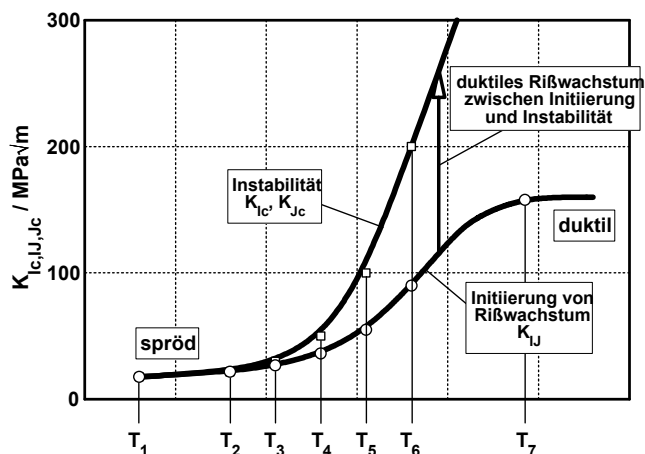
## Bruchmechanische Kennwerte und ihre Berücksichtigung in Sicherheitsanalysen

Im Bereich der Bruchmechanik werden entsprechend dem Verformungsverhalten der Werkstoffe und damit zusammenhängend entsprechend dem Versagensverhalten verschiedene Kennwerte verwendet.

Auch bei der Anwendung bruchmechanischer Bewertungsverfahren muss entschieden werden, gegen welchen Versagensmechanismus die Bewertung erfolgen soll. Dies kann im einfachsten Fall das vollständige Versagen des tragenden Bauteilquerschnitts sein, im Allgemeinen als „Bruch“ oder „Instabilität“ bezeichnet. Analog zum Zugversuch, bei dem für duktile Zustände dem Bruch ein mehr oder weniger ausgeprägter Fließ- und Verfestigungsbereich vorausgeht, dessen Beginn (Streckgrenze) ebenfalls als Bewertungsgröße verwendet wird, können bei bruchmechanischen Be-

trachtungen andere, der Instabilität vorausgehende Ereignisse betrachtet werden. Hierfür bietet sich die Belastung bei Risseinleitung an, die mittels geeigneter Parameter diejenige Beanspruchung charakterisiert, bei der ein bereits vorhandener Anriss zu wachsen beginnt. Der Risseinleitungskennwert hat sich in vielen Untersuchungen als übertragbarer, werkstoffspezifischer Kennwert erwiesen, wohingegen die Risswachstumsvorgänge und damit auch der nachfolgende Instabilitätspunkt stark von äußeren Randbedingungen wie z.B. Probengröße, Mehrachsigkeit des Spannungszustandes, Art der Versuchsdurchführung etc. beeinflusst werden.

Bei ferritischen Stählen ändert sich das Verformungsverhalten und damit auch das Bruchverhalten deutlich mit Änderung der Temperatur. Abhängig vom Zähigkeitsniveau des Werkstoffs ist im Hochlagenbereich der Zähigkeit nach Überschreiten des Risseinleitungskennwertes noch ein hohes Maß an Energieumsetzungsvermögen, ausgedrückt in Form stabilen Rissfortschritts, gewährleistet, bevor Instabilität eintritt (wenn überhaupt). In anderen Worten: Der Instabilitätswert ist deutlich größer als der Initiierungswert. Mit abnehmender Prüftemperatur ist zu beobachten, dass das Energieumsetzungsvermögen und/oder stabiles Risswachstum nach Überschreiten des Initiierungswertes und vor Erreichen der Instabilität geringer wird, d.h. die Differenz zwischen Initiierungs- und Instabilitätswert wird kleiner. Im Grenzfall sehr tiefer Temperaturen ist das Verformungsvermögen des Werkstoffs (im Rissspitzenbereich) so



**Bild 1:** Temperaturabhängigkeit von Initiierungs- und Instabilitätswerten

stark eingeschränkt, dass das stabile Risswachstum nahezu vollständig unterbunden wird und Instabilität unmittelbar auf Initiierung folgt, **Bild 1**. Gleiches Verhalten erhält man unabhängig von der Temperatur bei einer sehr hohen Mehrachsigkeit des Spannungszustandes.

Aus diesem Sachverhalt heraus lässt sich - auch in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Nutzung von Festigkeitskennwerten - ableiten, dass bei Verwendung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte in Sicherheitsanaly-

sen Sicherheitsbeiwerte unterschiedlicher Größe abhängig vom Kennwert angewandt werden sollten. Erfolgt die Bewertung gegen Instabilität, ist der Sicherheitsbeiwert größer zu wählen als bei Bewertung gegen Initiierung.

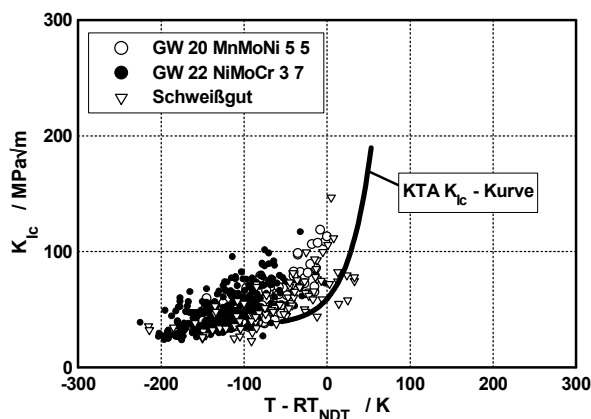
### Bewertung bruchmechanischer Kennwerte gemäß Regelwerk

Die Verwendung bruchmechanischer Kennwerte zur Bauteilbewertung in Regelwerken erfolgte erstmals im amerikanischen kerntechnischen Regelwerk zur Absicherung gegen Spröbruch unter Verwendung des  $K_{Ic}$ -Wertes zur Charakterisierung der Spröbruchinitiierung. Dabei wurde aus den damals bekannten  $K_{Ic}$ -Werten von typischen RDB-Werkstoffen empirisch eine einhüllende Grenzkurve definiert. Sicherheitsbeiwerte wurden je nach betrachtetem Lastfall entweder indirekt (über die konservative Berechnung der wirkenden Beanspruchung) oder direkt gefordert.

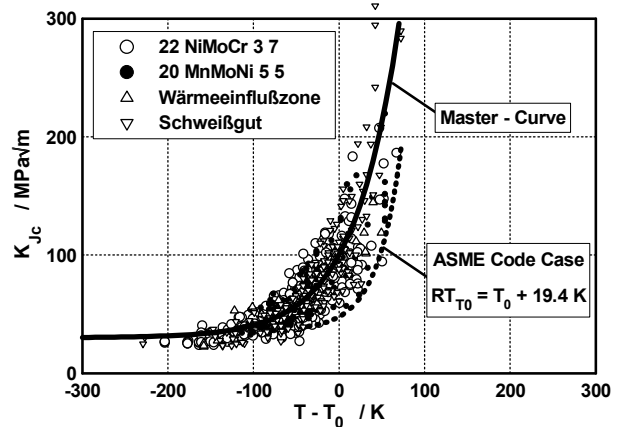
Diese Vorgehensweise ist bis heute nahezu unverändert in den kerntechnischen Regelwerken, z.B. KTA enthalten, auch wenn bekannt ist, dass einzelne (begründete) Datensätze nicht vollständig eingehüllt werden. Dabei wird die Form der Grenzkurve

als konstant angenommen, ihre Lage bezüglich der Temperaturachse wird werkstoffspezifisch mittels der „Referenztemperatur“  $RT_{NDT}$  festgelegt, **Bild 2**.

Neuere Entwicklungen im Bereich der kerntechnischen Regelwerke gehen dazu über, anstelle der bisher empirisch definierten Grenzkurve eine aus statistischen Betrachtungen resultierende Bewertungskurve zuzulassen. Der wesentliche Unterschied zur bisherigen Vorgehensweise besteht darin, dass die Bezugstemperatur  $RT_{NDT}$  durch eine Bezugstemperatur  $T_0$  ersetzt wird, welche aus einer statistischen Auswertung von bruchmechanischen Kennwerten gemäß der als „Master Curve“ (MC) bekannten Vorgehensweise ermittelt wird. Die Bewertungskurve, die bezüglich



**Bild 2:**  $K_{IC}$ -Grenzkurve im Vergleich zum MPA-Datensatz für  $K_{IC}$ -Werte



**Bild 3:** Master Curve und Grenzkurve nach ASME Code Case

der Form der früheren einhüllenden Grenzkurve entspricht, wird bei der neuen Referenztemperatur  $RT_{T_0} = T_0 + 19,4 \text{ K}$  justiert, **Bild 3**.

Bei der Ermittlung der Bezugstemperatur  $T_0$  werden im Gegensatz zur Festlegung der bisherigen Bezugstemperatur  $RT_{NDT}$  Bruchmechanikkennwerte bei Instabilität verwendet, die teilweise infolge beträchtlicher Plastifizierung und deutlichem Risswachstum schon erheblich oberhalb der Risseinleitungswerte liegen können. Diese Tatsache ist bedeutsam für weitere Überlegungen über anzusetzende Sicherheitsbeiwerte.

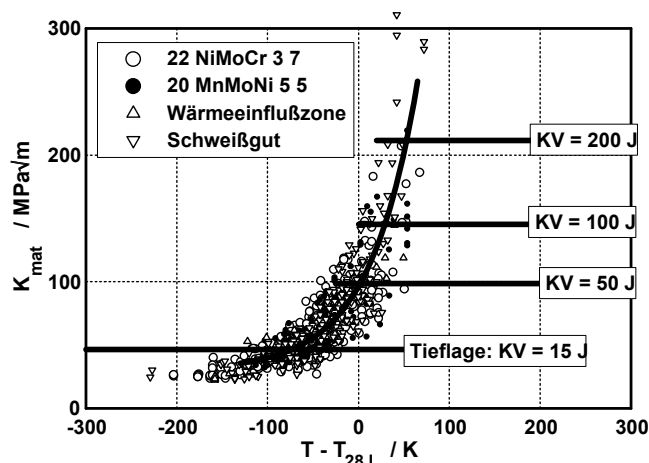
Auch in jüngeren Regelwerksentwicklungen außerhalb des kerntechnischen Regelwerks hat die bruchmechanische Bewertung Berücksichtigung gefunden.

Als Beispiel ist der so genannte Eurocode III (EC 3) aus dem Stahlbau zu nennen. Auch hier wurde die Vorgehensweise nach Master Curve als Ausgangsbasis für die bruchmechanischen Bauteilberechnungen gewählt, das heißt, es werden Instabilitätswerte beim Bruch der Proben betrachtet. Im Eurocode III wurde zur weiteren Vereinfachung der Anwendung die aus bruchmechanischen Versuchen zu ermittelnde Bezugstemperatur  $T_0$  ersetzt durch die aus dem Kerbschlagbiegeversuch einfach zu ermittelnde Temperatur  $T_{28J}$ . Hierbei wurde Gebrauch gemacht von einer statistischen Auswertung der Korrelation zwischen  $T_0$  und  $T_{28J}$ , die ebenfalls entsprechenden Streuungen unterliegt. Die verwendete Korrelation lautet dabei  $T_0 = T_{28J} - 18 \text{ K}$ . Für Anwendungen bietet dies einerseits den großen Vorteil, dass das Werkstoffverhalten auch mit bruchmechanischen Parametern quantifiziert werden kann, ohne aufwendige Bruchmechanikprüfungen durchführen zu müssen. Andererseits ist bei der Diskussion über anzusetzende Sicherheitsbeiwerte bei allgemeinen, über EC 3 hinausgehenden Anwendungen zu beachten, dass die Bezugstemperatur  $T_0$  aus In-

stabilitätswerten ermittelt ist und überdies weitere Ungenauigkeiten in der Korrelation zwischen  $T_0$  und  $T_{28J}$  begründet liegen.

Ein direkt vergleichbarer Weg zum Eurocode III wird bei der Definition bruchmechanischer Kennwerte in der europäischen Berechnungsvorschrift „SINTAP“ gegangen. Hier wird eine Kurve für die Bruchzähigkeit über dem gesamten relevanten Temperaturbereich angegeben, die aus zwei Bereichen zusammengesetzt wird. Im Tieflagen-/Übergangsbereich wird zur Charakterisierung der Kurvenverlauf des Master Curve - Konzepts (Instabilität) angegeben, justiert an der Bezugstemperatur  $T_{28J}$  ähnlich zu EC 3, wobei die hier benutzte Korrelation zwischen  $T_{28J}$  und  $T_0$  lautet:  $T_0 = T_{28J} + 3K$ .

Im Hochlagenbereich wird eine horizontale Gerade definiert in Abhängigkeit von der Hochlagenkerbschlagarbeit des Werkstoffs, die aus einer Korrelation zwischen dem „technischen Risseinleitungskennwert  $J_{0,2}$ “ und der Hochlagenkerbschlagarbeit gewonnen wurde, **Bild 4**. Für die Anwendung bedeutet dies ebenfalls den großen Vorteil, dass lediglich Ergebnisse aus dem Kerbschlagbiegeversuch bekannt sein müssen, um eine Aussage zum Verlauf der bruchmechanischen Eigenschaften ableiten zu können. Dies bedeutet letztendlich aber auch, dass die bruchmechanische „Werkstoffkurve“ im Tieflagen- / Übergangsbereich auf Instabilitätswerten beruht, im Hochlagenbereich dagegen auf „Initiierungswerten“. Diese Tatsache in Verbindung mit der Nutzung von streuungsbehafteten Korrelationen bedarf aber dringend der Beachtung bei der Definition von Sicherheitsbeiwerten. SINTAP lässt für die Bereiche Tieflage und Übergangsbereich die Nutzung von –nicht näher empfohlenen– Fraktile der MC zu. Für die Hochlage kann bei wenigen Daten eine Hüllkurve verwendet werden. Liegen genügend Daten für eine individuelle statistische Auswertung vor, wird die Nutzung der -1s-Kurve oder eine 20%-Fraktile empfohlen.



**Bild 4:** Bewertung nach SINTAP

### Vorschlag zur Ermittlung einer Bruchzähigkeitstemperatur-Kurve im gesamten relevanten Temperaturbereich

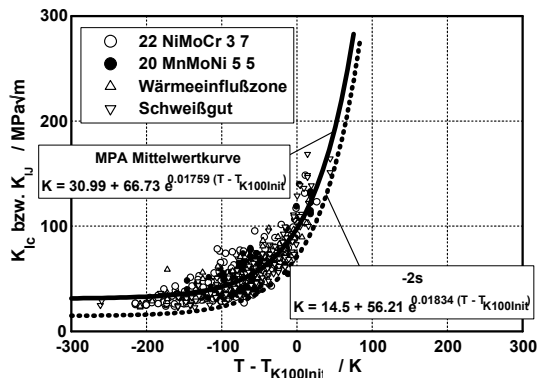
Ein an der MPA Stuttgart entwickeltes geschlossenes Bruchzähigkeitskonzept sieht eine mehrstufige Vorgehensweise vor. Grundsätzlich erfolgt dabei eine Bewertung des Initiierungspunktes im gesamten Temperaturbereich, was es erlaubt, die Sicherheitsbeiwerte gegenüber der Instabilitätsbetrachtung kleiner zu halten.

Die aufwendigste, aber auch am meisten belastbare Vorgehensweise (Stufe 1) sieht die experimentelle Ermittlung der Initiierungswerte im Bruchmechanikversuch sowohl im Übergangsbereich als auch in der Hochlage vor. Zu diesem Zweck können kleine Bruchmechanik-Laborproben verwendet werden, da die Initiierungswerte unabhängig von Probengröße und –geometrie sind.

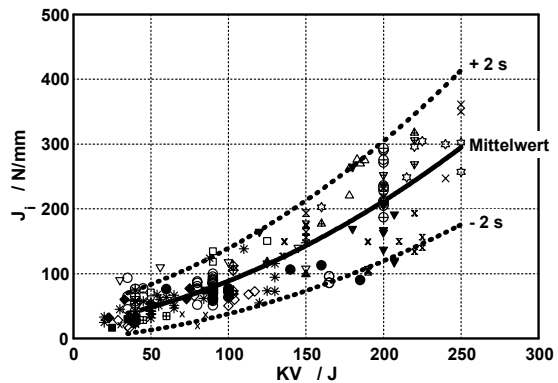
Nach dieser Vorgehensweise werden im Übergangsbereich der Zähigkeit mindestens 6 Bruchmechanikproben geprüft. Die hieraus mittels der stretched-zone-Methode ermittelten  $J_I$ -Werte werden formal in  $K_{IJ}$ -Werte umgerechnet (EDZ), weitere Risslän-

genkorrekturen wie bei der MC-Methode werden nicht angewandt. Unter sinngemäßer Anwendung einer MC-Kurvenanpassung wird die Temperatur ermittelt, bei welcher der  $K_{Ij}$ -Wert  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  beträgt. Diese Temperatur wird als  $T_{K100\text{Init}}$  bezeichnet.

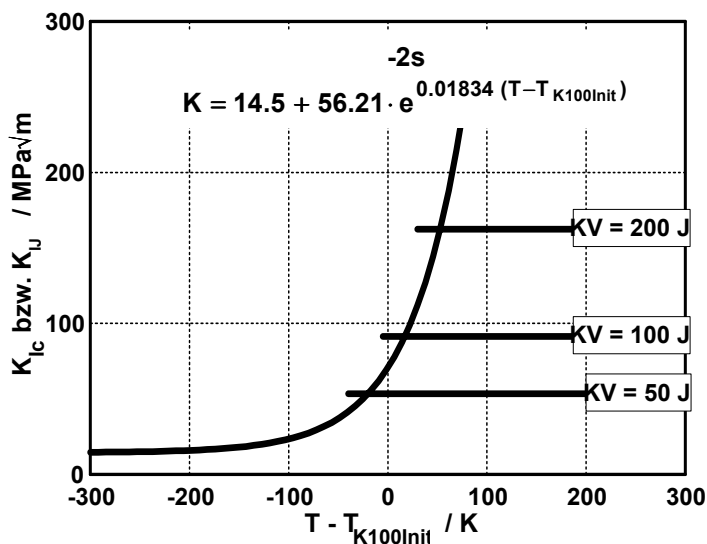
Werden Daten aus verschiedenen Werkstoffen jeweils auf diese Temperatur  $T_{K100\text{Init}}$  justiert und zusammengefasst, lässt sich, unter Annahme einer Gauß-Verteilung der Initiierungswerte, dieser Datensatz statistisch auswerten. Als Ergebnis können die Mittelwertkurve und Kurven für Standardabweichungen angegeben werden. **Bild 5** zeigt das Ergebnis einer solchen Vorgehensweise für eine Vielzahl von Schmelzen der Druckbehälterwerkstoffe 22NiMoCr3-7 und 20MnMoNi5-5 und deren Schweißverbindungen (SG und WEZ), sowohl für den unbestrahlten als auch den bestrahlten



**Bild 5:** Statistische Bewertung von Initiierungswerten in Tieflage und Übergang



**Bild 6:** Statistische Bewertung von Initiierungswerten in der Hochlage



**Bild 7:** Statistisch abgesicherte Bewertungskurven für Rissinitiierung, justiert an  $T_{K100\text{Init}}$

Werkstoffzustand. Wie dieser Datensatz zeigt, kann die -2s-Kurve mit guter Berechtigung zur Definition von „Bewertungskenngrößen“ herangezogen werden.

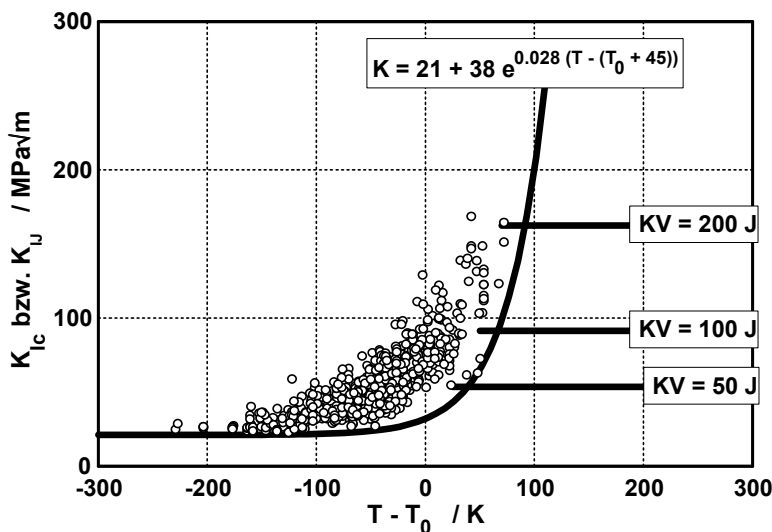
Diese Kurve zur Absicherung der Initiierung im Tieflagen- und Übergangsbereich lässt sich unter Nutzung einer ebenfalls statistischen Auswertung von experimentellen Ergebnissen einer Vielzahl von Stählen in das Hochlagegebiet erweitern. **Bild 6** zeigt die Korrelation von Initiierungswerten  $J_i$  mit dem der jeweiligen Prüftemperatur des Werkstoffs entsprechenden Mittelwert der

Kerbschlagarbeit. Auch hier ergibt eine statistische Auswertung eine Kurve der Initiierungswerte  $J_i$  bei -2s als Funktion der Kerbschlagarbeit.

Wird dieses Ergebnis für die Erstellung einer Bruchzähigkeits-Temperaturkurve verwendet, ergibt sich die Darstellung in **Bild 7**. Für praktische Anwendungen bedeutet dies, dass für einen zu bewertenden Werkstoffzustand aus der Prüfung von 6

Bruchmechanikproben im Übergangsbereich der Zähigkeit sowie aus der Ermittlung der Kerbschlagarbeit in der Hochlage eine vollständige Bruchzähigkeits-Temperaturkurve angegeben werden kann. Diese Kurve kann insgesamt aufgrund ihrer statistischen Absicherung (-2s-Kurve) und der inhärenten Sicherheit (Initiierungsbeurteilung mit Abstand gegen Instabilität, direkt übertragbare Kennwerte) direkt für Bauteilbewertungen herangezogen werden. Weitere Sicherheitsbeiwerte können, sofern noch erforderlich, klein gewählt werden. Als Nachteil dieser Methode gegenüber der MC-Vorgehensweise kann die aufwendigere Bestimmung der  $J_i$ -Werte gesehen werden. Dieser Nachteil kann umgangen werden, wenn anstelle der  $J_i$ -basierten Bezugstemperatur  $T_{K100Init}$  die aus der Instabilitätsberechnung gemäß MC gewonnene Bezugstemperatur  $T_0$  gewählt wird (**Stufe 2** des MPA-Bewertungskonzepts). Die Bestimmung dieser Bezugstemperatur gemäß MC erfordert zwar immer noch die Prüfung von mindestens 6 Bruchmechanikproben, die Versuchsdurchführung und Auswertung gestaltet sich jedoch aufgrund des Verzichts auf die Initiierungsbestimmung deutlich weniger aufwendig.

**Bild 8** zeigt den Gesamt-Datensatz aus Bild 5, wobei hier abweichend von Bild 5 die Initiierungswerte  $K_{IJ}$  auf die MC-Bezugstemperatur  $T_0$  der zugehörigen  $K_{Jc}$ -Instabilitätswerte bezogen sind. Eine aus diesem Datensatz ermittelte Bewertungskurve bietet den Vorteil, dass sie einerseits Initiierungswerte beschreibt, andererseits aber von den einfacher, gemäß MC zu ermittelnden Bezugstemperaturen  $T_0$  ausgeht. In Anlehnung an die Vorgehensweise des ASME Code Case N-629 kann anhand dieses Datensatzes eine „Hüllkurve“ definiert werden, die den bekannten Datensatz an



**Bild 8:** Statistisch abgesicherte Bewertungskurven für Rissinitiierung, justiert an  $T_0$

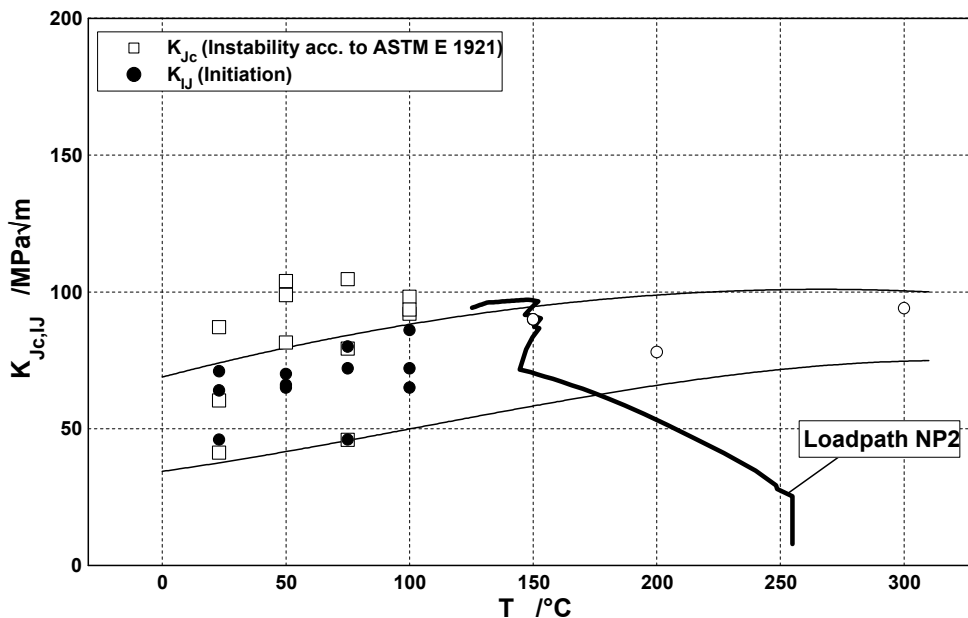
Initiierungswerten vollständig abdeckt. Die hierzu ermittelte Kurvenform entspricht (bezüglich der Steigung im Übergangsbereich) weitgehend der bekannten  $K_{Jc}$ -Grenzkurve. Außerdem liegt das Bruchzähigkeitsniveau bei der Bezugstemperatur entsprechend der KTA-/ASME-Grenzkurve auf  $59 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  und erlaubt somit den direkten, quantitativen Vergleich mit der Bezugstemperatur  $RT_{NDT}$ .

Eine nochmalige Vereinfachung lässt sich erreichen (**Stufe 3** des Bewertungskonzepts), wenn anstelle der experimentellen  $T_0$ -Ermittlung mittels Bruchmechanikproben die auch in EC 3 und SINTAP verwendete Korrelation zwischen  $T_{28J}$  und  $T_0$  genutzt wird. Im Gegensatz zu SINTAP, wo eine Mittelwertbetrachtung von Instabilitätswerten (Übergang) und technischen Risseinleitungswerten ( $J_{0,2}$ ) erfolgt, ist damit eine statistisch basierte Kurve mit dem Charakter abgesicherter Risseinleitungswerte verfügbar. Diese Kurve ist dann aufgrund der vereinfachten Betrachtungsweise für Anwendungszwecke mit einem gegenüber Bild 8 erhöhten Sicherheitsbeiwert zu bewerten, stellt aber für viele praktische Anwendungsfälle eine ausreichende Näherung dar.

## Anwendungsbeispiel

Im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben wurden an der MPA insgesamt zehn Thermoschockversuche an dickwandigen Hohlzylindern durchgeführt. Die Abmessungen der Zylinder waren  $D_a \times s = 800 \times 200 \text{ mm}^2$ , die Belastung erfolgte in allen Fällen durch Innendruck und eine thermische Transiente. Verschiedene Rissgeometrien, Werkstoffeigenschaften und Transienten wurden untersucht.

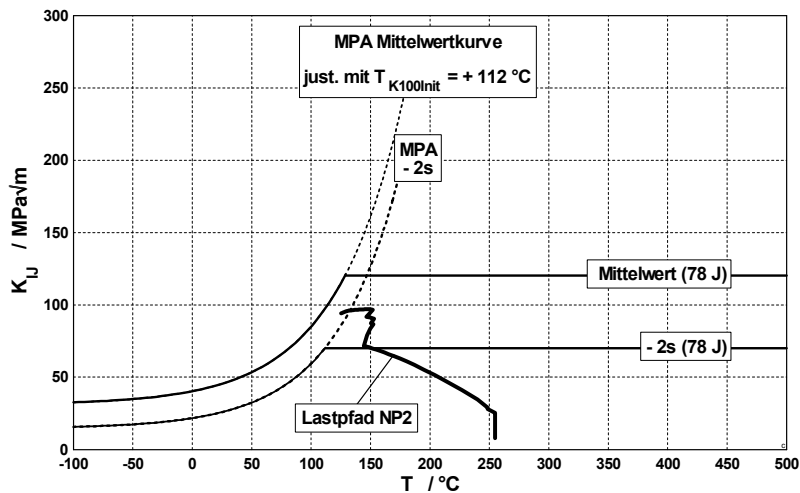
Im Zusammenhang mit obiger Diskussion ist besonders der Versuch NP2 von Interesse. Die Probe NP2 wurde aus einem modifizierten Werkstoff 17MoV8-4 hergestellt, der durch spezielle Wärmebehandlung in einen Zustand reduzierter Zähigkeit bei hoher Übergangstemperatur gebracht worden war. Die Versuchsbedingungen (Transiente, beginnend bei  $T = 260^\circ\text{C}$  und Fehlergröße / -position, Umfangsfehler  $a/t = 0,04$ , Lage unter der zweilagigen Plattierung) waren so festgelegt, dass Risseinleitung im oberen Übergangsbereich der Zähigkeit erfolgen sollte. Im Versuch kam es im ferritischen Werkstoffbereich ausgehend vom Ermüdungsanriss zur Initiierung von begrenztem Risswachstum, gefolgt von einem Rissstopp. Weitere Beanspruchungssteigerung führte zu mehreren Rissprung/Rissstopp-Ereignissen.



**Bild 9:** Lastpfad der Probe NP2 im direkten Vergleich mit den gemessenen Initiierungswerten ( $K_{IJ}$ ) und Instabilitätswerten ( $K_{Jc}$ )

Für die Anwendung der o.g. Methoden zur Integritätsbewertung ist das erste Risseinleitungsereignis von besonderem Interesse. **Bild 9** zeigt den Lastpfad der Probe NP2 gemeinsam mit den gemessenen Initiierungswerten ( $K_{IJ}$ ) und den gemäß ASTM E 1921 ermittelten Instabilitätswerten ( $K_{Jc}$ ), die hier an Bruchmechanikproben mit Standard-Risstiefe ( $a/W = 0,6$ ) sowie an Bruchmechanikproben mit kurzem Riss ( $a/W = 0,1$ ) ermittelt wurden. Die Risseinleitung der Probe NP2 erfolgte bei einer Beanspruchung im Streuband der gemessenen  $K_{IJ}$ -Werte und kann somit auf der Basis dieser Werte zuverlässig vorhergesagt werden.





**Bild 10:** Lastpfad Probe NP2 im Vergleich zu den Initiierungskurven auf Basis der Bezugstemperatur  $T_{K100init}$  (Übergang, Tieflage) und Kerbschlagarbeit (Hochlage)

Dies bestätigt sich in **Bild 10**. Die auf der Basis der  $K_{IJ}$ -Werte aus dem Übergangsbereich und der Kerbschlagarbeit in der Hochlage ermittelte  $-2s$ -Kurve der Bruchzähigkeit erlaubt eine zutreffende Vorhersage der Risseinleitungsbeanspruchung der Probe NP2.

### Zusammenfassung

Auswertungen bestehender Datensätze für bruchmechanische Kennwerte liefern statistisch abgesicherte Ergebnisse, die über einen weiten Temperaturbereich hinweg die Angabe von Berechnungskennwerten ermöglichen. Verschiedene vereinfachte Abschätzungsverfahren wurden vor dem Hintergrund erforderlicher Sicherheitsbeiwerte diskutiert. Es konnte dargestellt werden, dass bei der Definition von in der Berechnung anzusetzenden Sicherheitsbeiwerte als wesentlicher Parameter geklärt werden muss, ob die Bauteilbewertung gegen Rissinitiierung oder Instabilität erfolgen soll. Ein Vorschlag zur einheitlichen Beschreibung von bruchmechanischen Initiierungswerten über den Temperaturbereich von der Bruchzähigkeitstieflage bis zur Bruchzähigkeitshochlage wurde vorgestellt und die Verifikation anhand eines Bauteilversuchs aufgezeigt.

### Forschungsvorhaben der MPA Stuttgart zum Thema:

VOCALIST: Validation of constraint based assessment methodology in structural integrity – EC - FIKS-CT-2000-00090

SMILE: Structural margin improvements in aged-embrittled RPV with load history effects – EC - FIKS-CT-2001-00131

Kritische Überprüfung des Masterkurve-Ansatzes im Hinblick auf die Anwendung bei deutschen Kernkraftwerken – BMWA-FK 150 1240

Untersuchungen zu den physikalischen Abläufen bei duktiler Rissinitiierung und deren meßtechnische Erfassung sowie Interpretation – BMWA-FK 150 1243

ECOPRESS: Economical and safe design of pressure vessels applying new modern steels - EC – GRD1-1999-10640

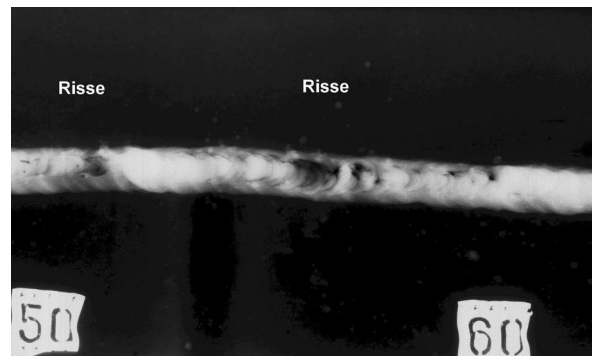
## Selektive Rohrleitungssanierung durch interdisziplinären Einsatz von Schadensanalyse, Finite Elemente Berechnung und Zerstörungsfreie Prüfung

H. Diem, H. Gertkemper

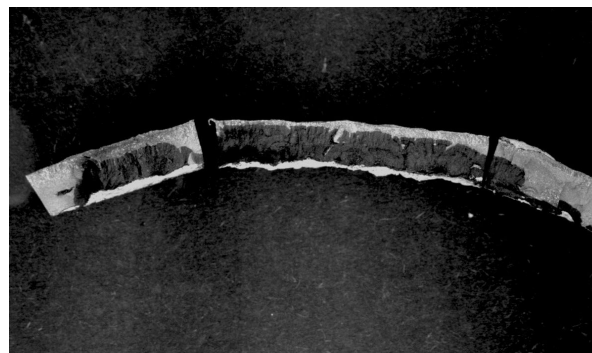
In einer im Jahr 1985 aus dem warmfesten Stahl St 35.8 von den Neckarwerken Stuttgart (NWS) von Stuttgart-Gaisburg nach Esslingen gebauten Fernwärmeleitung mit Nennweite DN 500 sind Leckagen an Rundschweißnähten aufgetreten. Die Leitung wird bei einem Innendruck von 6 bar und einer Temperatur von 125 °C betrieben. In jüngerer Zeit wird die Leitung in einem nahezu konstanten Dauerbetrieb gefahren; in früheren Jahren erfolgte jedoch ein An- und Abfahren jeweils am Wochenende. Zur aktuellen Wasserchemie des Fernwärmewassers sind ein Sauerstoffgehalt von 0,05 bis 0,09 ppm, ein pH-Wert von 9,4 bis 9,7 und eine Leitfähigkeit von 8,4 bis 9,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bekannt.

### Schadensuntersuchung

Die Schadensuntersuchung einer im Jahr 1998 entdeckten 30 mm langen und einer im Jahr 2001 aufgetretenen 10 mm langen Leckagestelle wies auf Dehnungsinduzierte Risskorrosion (DRK) als Schadensmechanismus hin. Eine Durchstrahlungsprüfung der im Jahr 2001 aus der Fernheizleitung herausgetrennten rissbehafteten Rundschweißnaht, **Bild 1**, zeigte, dass auch in anderen Bereichen der Naht erhebliche Rissbildungen in Nahtlängs- und -querrichtung sowie darüber hinaus zahlreiche Schweißfehler (Poren, Schlackeneinschlüsse, Hohlstellen, Wurzelfehler u. a.) vorlagen. Der größte entdeckte Innenumfangsrisse hatte eine Länge von 80 mm und war an der tiefsten Stelle rd. 80 % der Wanddicke tief. Die transkristallinen Risse gingen von Bindefehlern beidseitig der Wurzel aus. Die freigelegten Oberflächen eines der Risse aus dem Leckagebereich sowie des 80 mm langen Rissbereiches, **Bild 2**, wiesen einen Magnetitbelag auf. Als makroskopische Bruchmerkmale waren relativ schwach ausgeprägte, strahlenförmig sich von der Innenseite her ausbreitende Bruchlinien zu erkennen. Der transkristalline Rissverlauf, ausgehend von geometrischen Kerben, **Bild 3**, in Verbindung mit Korrosion an den Ausgangsstellen sowie auf den Rissoberflächen, ist typisch für den Schadensmechanismus DRK. Die herstellungsbedingten Schweißfehler (z.B. Bindefehler) haben dafür offensichtlich günstige Ausgangsbedingungen (Spannungskonzentrationen) geliefert.



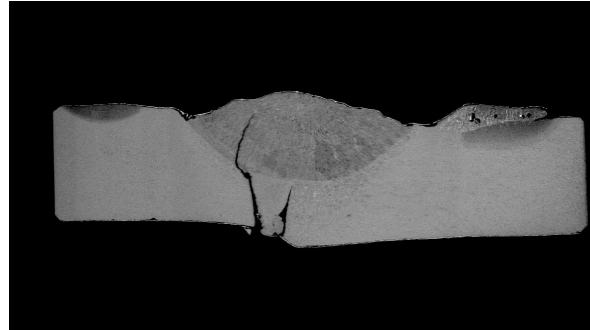
**Bild 1:** Photographische Reproduktion einer Durchstrahlungsaufnahme



**Bild 2:** Bruchfläche des mittels Durchstrahlungsprüfung entdeckten Risses

## Dehnungsinduzierte Risskorrosion

DRK kann eintreten, wenn es in wässrigen Medien infolge plastischer Dehnungen zum Aufreißen der schützenden Magnetitschichten kommt und die Metalloberfläche dadurch lokal ungeschützt der korrosiven Wirkung des Betriebsmediums ausgesetzt ist. Dabei liegt die kritische Dehngeschwindigkeit  $d\varepsilon/dt$  in einem Bereich von  $d\varepsilon/dt \sim 10^{-5}$  bis  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$ . Unterhalb dieses Bereichs kommt es zum Ausheilen der schützenden Magnetitschicht, bevor wachstumsfähige Risskeime entstehen. Bei höheren Dehngeschwindigkeiten reißt der Werkstoff duktil. DRK-Risse gehen häufig von Spannungskonzentratoren an der Oberfläche (z.B. von Korrosionsgrübchen) aus, haben gewöhnlich einen relativ geradlinigen Verlauf und zeigen häufig sogenannte Auskolkungen im Rissverlauf. Diese Auskolkungen entstehen durch Stillstandskorrosion, während das Risswachstum in Betriebsphasen mit kritischer Dehngeschwindigkeit abläuft. Deshalb ist nicht der stationäre Dauerbetrieb einer Anlage als kritisch hinsichtlich DRK anzusehen, sondern betriebliche Transienten wie An- und Abfahrvorgänge.

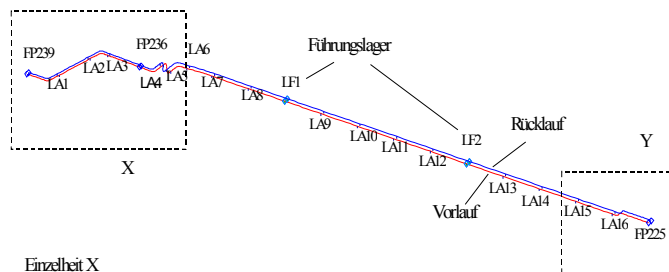


**Bild 3:** Metallographischer Querschliff in der Nähe der Leckagestelle

Die Vorlauf-Temperatur in der Fernwärmeleitung beträgt rd.  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ , die Rücklauf-Temperatur max.  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die sogenannte Schikorr-Reaktion, welche zur Magnetitbildung aus dem primären Korrosionsprodukt  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  und damit zur Schutzschichtbildung führt, läuft erst bei Temperaturen oberhalb  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  mit merklicher Geschwindigkeit ab. Um dennoch Oxidschichten mit hinreichender Schutzwirkung zu erhalten, wird das Betriebsmedium alkalisiert und somit die Löslichkeit der Korrosionsprodukte herabgesetzt. Hierfür ist ein pH-Wert-Bereich von 9 bis 10,5 optimal. Die untersuchte Fernwärmeleitung wurde in diesem Bereich betrieben.

## Numerische Berechnung

Von der INTECS Engineering Services GmbH, Stuttgart, durchgeführte Finite Elemente (FE) Berechnungen der Fernwärmeleitung beim An- und Abfahren ergaben, dass die im Vorlauf der Rohrleitung auftretenden Nenn-Axialspannungen auf einem relativ niedrigen Niveau liegen. Die größten Spannungen treten mit rd.  $90 \text{ MPa}$  im Bereich der Rohrbogen und den daran angrenzenden geraden Rohrabschnitten sowie einem Festpunkt auf, Beispiel **Bild 4 und 5**. Auf Basis der Schadensuntersuchungen und der zerstörungsfreien Prüfungen liegen in der Fernwärmeleitung im wesentlichen umfangsorientierte Risse vor. Für derartige Risse

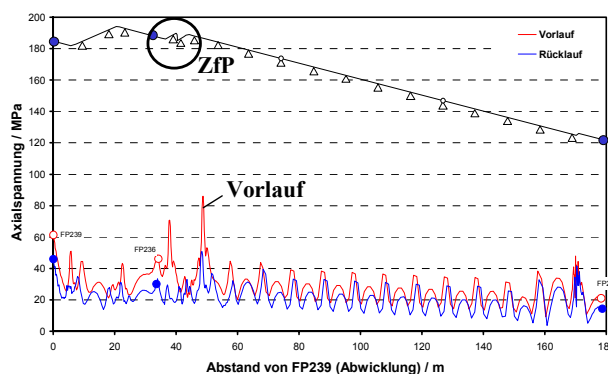


**Bild 4:** Ausschnitt aus der Rohrleitungsisometrie (Quelle: INTECS Engineering Services GmbH, Stuttgart)

sind die Axialspannungen die zu berücksichtigende Beanspruchungskomponente. Die Nennaxialspannungen in den als hoch beansprucht identifizierten Bereichen sind mit rd. 90 MPa vergleichsweise niedrig. Aufgrund der Kerbwirkung an den herstellungsbedingten Schweißfehlern (z.B. den vorhandenen Bindefehlern) ist allerdings davon auszugehen, dass an derartigen Spannungskonzentrationsstellen die Werkstoffdehngrenze von rd. 205 MPa erreicht wird. Bei der zur Dehngrenze korrespondierenden Dehnung und der Anfahrzeit bei Inbetriebnahme der Rohrleitung von rd. 3,5 h lässt sich eine Dehnrate von  $d\varepsilon/dt \sim 1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  abschätzen. Damit sind sowohl von der absoluten Beanspruchungshöhe als auch von der kritischen Dehnrate her die Belastungsbedingungen für DRK gegeben.

### Zerstörungsfreie Prüfung

An dem in einem unterirdischen Kanal verlegten Rohrleitungsabschnitt, der aufgrund von FE-Berechnung als vergleichsweise hoch beansprucht identifiziert wurde, wurden zerstörungsfreie Prüfungen mittels Röntgendurchstrahlungsprüfung durchgeführt. Dabei wurden an 6 von 7 Schweißnähten des Vorlaufstranges Anzeigen von Rissbildungen unterschiedlichen Ausmaßes festgestellt. Häufig, aber nicht immer, stehen diese Rissbildungen in Verbindung mit Schweißfehlern und herstellungsbedingten Unregelmäßigkeiten der Nähte. Eine aus dem ebenfalls hochbeanspruchten Bereich des Rücklaufstranges zerstörungsfrei untersuchte Schweißnaht ließ keine Rissbildungen erkennen.

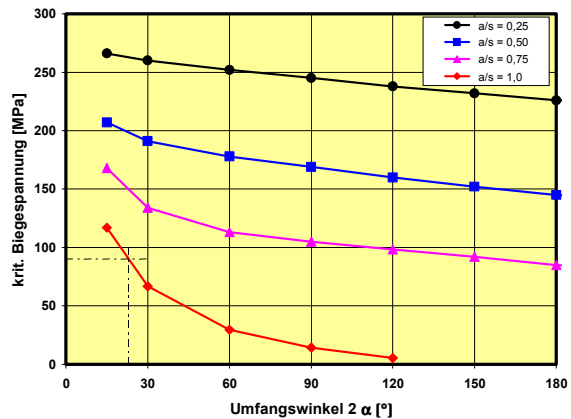


**Bild 5:** Nenn-Axialspannung in der Vor- und Rücklaufleitung beim Anfahren (Quelle: INTECS Engineering Services GmbH, Stuttgart)

Als Konsequenz der Ergebnisse dieser zerstörungsfreien Prüfungen wurden die geschädigten Rohrleitungsbereiche ausgetauscht, und während der Stillstandsphase der Fernwärmeleitung wurden weitere, mittels FE-Berechnung ebenfalls als vergleichsweise hoch beansprucht identifizierte Bereiche einer Röntgendurchstrahlungsprüfung unterzogen. Dabei wurden bei 6 Schweißnähten des Vorlaufstranges neben zahlreichen und ausgedehnten Schweißfehlern an drei Nähten auch Rissbildungen entdeckt, bei denen es sich vermutlich um betriebliche Risse handelt. Die sowohl in Längs- als auch in Querrichtung auftretenden Risse wiesen Längenausdehnungen von bis zu 10 mm auf, in einem Fall lag ein etwa 30 mm langer Riss mit Ausdehnung in den Grundwerkstoff des Rohres hinein vor. Die Häufigkeit und die Längen dieser Risse erreichten jedoch bei weitem nicht die Größenordnung wie in dem zuvor geprüften und anschließend ausgetauschten Leitungsbereich, so dass ein Austausch nicht unmittelbar zwingend erschien.

## Traglast-Betrachtung

Aus den Schadensuntersuchungen und den zerstörungsfreien Prüfungen ist bekannt, dass in der Fernwärmeleitung im wesentlichen umfangsorientierte Risse vorliegen. Zur Abschätzung von kritischen Rissgrößen bei vorgegebener Lasthöhe bzw. kritischer Lasthöhe bei vorgegebener Rissgröße wurde das Zwei-Kriterien-Verfahren (R6-Methode) angewandt. Bei 6 bar Innendruck und einer Nennaxialspannung von 90 MPa wird bei wanddurchdringenden Rissen mit Längen größer 100 mm ( $2\alpha \sim 23^\circ$ ) die Versagens-Grenzkurve, **Bild 6**, erreicht. Da aus den ZfP-Prüfungen keine Angaben über die Risstiefen gemacht werden können, müssen bei einer Sicherheitsbewertung aufgrund der Ergebnisse der Schadensanalyse wanddurchdringende Rissen unterstellt werden. Deshalb wird bei der Traglast-Betrachtung die Kurve für  $a/s = 1,0$  zur Bewertung herangezogen. Bei Zugrundelegung eines Sicherheitsbeiwerts von 2 zur Abdeckung von Unsicherheiten bei dem Ist-Werkstoffzustand sind demnach alle Rissbefunde mit Längen  $> 50$  mm als potenziell kritisch einzustufen.



**Bild 6:** Traglast Diagramm

## Fazit

Durch den interdisziplinären Einsatz von Schadensanalyse, Finite Elemente Berechnung und Zerstörungsfreie Prüfung konnte dem Auftraggeber ein zeit- und kostengünstiger selektiver Austausch kritischer Rohrleitungsbereiche vorgeschlagen werden. Als Konsequenz aus der traglast-Betrachtung werden in periodischen Abständen an ausgewählten Referenzstellen wiederkehrende Prüfungen als Maßnahme zur Aufrechterhaltung eines sicheren Betriebes durchgeführt.

## Veranstaltungen

### 6 Veranstaltungen im Jahr 2002

Datum	Veranstaltung
14.-18.01.	MPA-Schulung „Fachkraft für Lager im Bauwesen“
24.01.	DVS_Forschungsseminar
05./06.03.	17. Rohrleitungstechnische Tagung
14.03.	GESA AK 33 – Experimentelle Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen
13./14.06.	MPA/VGB – Workshop „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“
12.07.	2. MPA – Forum „Technik trifft Wissenschaft“
26.-29.08.	MPA-Schulung „Fachkraft für Lager im Bauwesen“
16./17.09.	Workshop on Computational Mechanics of Materials
18./19.09.	GRS / MPA : 2. Workshop „Kompetenzverbund Kerntechnik“
09.10.	UNCERT– AM Workshop “Codes of Practice for Management of Uncertainty in Mechanical Testing“
10./11.10.	28. MPA-Seminar „Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik“
10./11.10	Workshop „Development of New Creep Resistant Steels“ mit dem National Institute for Metal Science (NIMS), Japan
27./28.11.	Gemeinschaftskolloquium AG A2 „Fügen in Elektronik und Feinwerktechnik“ (FA10 „Mikroverbindungstechnik“)

#### MPA-Schulung „Fachkraft für Lager im Bauwesen“

In der Schulung werden Aufbau und Leistungsmerkmale heute zugelassener Lagertypen, wesentliche Inhalte gültiger Regelwerke, das Verständnis über deren Erfordernisse, die Konzeption der Qualitätssicherung sowie die erforderlichen Grundkenntnisse für den sachgerechten Transport und Einbau im Bauwerk in Theorie und Praxis vermittelt. Der erfolgreiche Abschluss mit Zertifikat (FLiB-Schein) bildet die Grundlage zur Beurteilung und Einbauüberwachung von Lagern im Bauwesen.

Zu den Schwerpunkten der Schulung gehören die Vermittlung von Grundkenntnissen zur Lagerung von Brückenbauwerken und zum heutigen Standard bei Brückenlagern, praktische Übungen sowie Versuchsdemonstrationen zum Verhalten von Lagerkomponenten unter betriebsrelevanten Beanspruchungsbedingungen.

Die in der Regel viertägige Schulung wird mit Unterstützung externer Fachleute in unregelmäßigen Abständen nach Eingang von Anmeldungen durchgeführt.

### **DVS-Forschungsseminar**

Am 24. Januar 2002 wurde in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS) das DVS-Forschungsseminar „Auslegung von gefügten metallischen Konstruktionen“ durchgeführt (ca. 100 Teilnehmer). Hierbei wurden Themenfelder der schweißtechnischen Forschung vorgestellt und der zukünftige Forschungsbedarf zusammen mit Vertretern des Projektträgers des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (seit Oktober 2002 Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit) für „Produktion und Fertigungstechnik“ (PFT) mit dem Ziel der Formulierung einer Forschungsstrategie diskutiert.

### **Treffen des GESA AK 33 "Experimentelle Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen"**

Am 14. März 2002 tagte der Arbeitskreis 33 „Experimentelle Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen“ der Gesellschaft für experimentelle Strukturanalyse (GESA) in die MPA Stuttgart. Übergeordnete Zielsetzung dieses Arbeitskreises ist die Entwicklung und Validierung experimenteller Verfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen, ihre theoretische Durchdringung und praktische Anwendung. Auf diesem Wege werden aktuelle Problemstellungen gelöst und neue Anwendungsbereiche erschlossen. Die behandelten Verfahren umfassen

- zerstörende mechanisch-elektrische Verfahren (Bohrlochmethode, Ring-Kern-Verfahren, Ausbohr- und Abdrehverfahren, Zerlege- und Abtrageverfahren u.a.)
- zerstörungsfreie Beugungsverfahren (Röntgenografie, Neutroneninterferometrie u.a.)
- Ultraschall- und magnetische Verfahren.

Im Rahmen dieser Veranstaltung wurde Dr.-Ing. Hans Kockelmann, MPA Stuttgart, als Leiter dieses Arbeitskreises verabschiedet, den er im Jahre 1987 mitgegründet und über 10 Jahre geführt hat. In diesen Zeitraum fiel auch die Durchführung eines Ringversuchs unter Beteiligung von ca. 50 Prüflaboratorien und industriellen Unternehmen aus Deutschland und Europa. Alle verfügbaren Eigenspannungsmessverfahren auf unterschiedlichster physikalischer Grundlage wurden einbezogen und vergleichend bewertet. Dies erlaubte eine fundierte Einordnung der unterschiedlichen Methoden hinsichtlich Messunsicherheit, Anwendungsbereich und -grenzen und Aussagekraft.

### **MPA/VGB-Workshop "Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren"**

Im Rahmen des Workshops wurden die Ergebnisse der Forschungsvorhaben vorgestellt, die die MPA Stuttgart im Auftrag der VGB PowerTech durchführte. Die Forschungsprojekte waren insbesondere auf Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren ausgerichtet. Die Vortragsveranstaltung hatte zum Ziel, diese Ergebnisse den Technischen Überwachungsvereinen und den Genehmigungsbehörden vorzustellen und mit diesen zu diskutieren. In vier Sitzungen wurden Themen zur

- Integrität des Reaktordruckbehälters
- Nachweis der Integrität von druckführenden Rohrleitungen

- Beanspruchungsanalyse druckführender Komponenten
- Korrosionsunterstütztes Risswachstum in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser

behandelt. Die Ergebnisse wurden teils von Mitarbeitern der MPA Stuttgart, teils von Mitgliedern der einzelnen von VGB PowerTech gebildeten Arbeitsgruppen, die die Forschungsarbeiten begleitet haben, vorgestellt.

## **2. MPA-Forum "Technik trifft Wissenschaft"**

### **Thema "Qualitätssicherung, Schadensbewertung und Schadensvermeidung: Darstellung der Methoden an praxisnahen Beispielen"**

Dieses 2. MPA-Forum "Technik trifft Wissenschaft" wurde am 12. Juli 2002 von der MPA Stuttgart und dem „Verein der ehemaligen Mitarbeiter der MPA-Stuttgart, Universität Stuttgart e.V.“ veranstaltet.

Die Veranstaltung war mit rd. 70 Teilnehmern wiederum sehr gut besucht und bestand aus sechs Vorträgen zum Leitthema. Dadurch, dass eine Hälfte der Vorträge von Mitarbeitern der MPA und die andere von Mitarbeitern aus der Industrie gehalten wurden, konnte die Synergie in der Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis eindrucksvoll aufgezeigt werden.

Den Abschluss der Veranstaltung bildete die Verleihung der von der MPA Stuttgart gestifteten Carl v. Bach-Medaille durch Prof. Dr.-Ing. E. Roos an Herrn Dr.-Ing. R. Sinz. Die Carl v. Bach-Medaille wird in unregelmäßigen Abständen von der MPA Stuttgart Persönlichkeiten verliehen, die Werkstofftechnik und Auslegung im Sinne der Bach'schen Philosophie ganzheitlich betrachten. Dies ist Herr Dr. Sinz, einem Absolventen der MPA und in leitender Funktion in der Industrie tätig, in hervorragender Weise gelungen.

Im Anschluss an die Veranstaltung bestand bei einem kleinen Imbiss die Möglichkeit zu weiterführenden Diskussionen und zur Vertiefung der Kontakte zwischen den ehemaligen und heutigen Mitarbeitern der MPA Stuttgart.



Übergabe der Carl v. Bach-Medaille,  
Dr.-Ing. R. Sinz (rechts), Prof. Dr.-Ing. E. Roos (links)



### **Workshop on Computational Mechanics of Materials**

Der 12. Internationale Workshop on Computational Mechanics of Materials, IWCM12, wurde von Prof. S. Schmauder (MPA Stuttgart) zusammen mit Prof. D. Groß (Universität Darmstadt) vom 16.-17. September 2002 in Darmstadt abgehalten. Mehr als 95 Wissenschaftler aus über 14 Ländern nahmen teil und präsentierten ihre Ergebnisse in 5 eingeladenen und 39 weiteren Vorträgen sowie in 40 Posterbeiträgen. Die Themen des Workshops deckten unterschiedliche Modelliermethoden auf verschiedenen Längenskalen und deren Anwendungen bei Verbundwerkstoffen einschließlich functionally graded materials, biologische Strukturen, poröse Werkstoffe und Smart Materials ab.

Die präsentierten Simulationsmethoden reichten von Kontinuumsmethoden, wie der Methode der Finiten Elemente über bewegliche zelluläre Automaten und Finite-Differenzen-Verfahren einschließlich inkrementeller Minimierungsmethoden über die Kristallplastizität bis hin zu atomistischen Simulationen und wurden angewendet auf Grenzflächen in Werkstoffen, Parameteridentifikationen von Werkstoffeigenschaften, dynamische Probleme, auf das Schweißen sowie in großem Umfang auf bruchmechanische und Multiskalenprobleme.

### **Kompetenzverbund Kerntechnik**

Für den Kompetenzverbund Kerntechnik führten die Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH (GRS) und die MPA Stuttgart gemeinsam den 2. Workshop mit dem Thema "Komponentensicherheit und Integritätsbewertung" in Köln durch. Der Workshop diente im Wesentlichen dem Austausch von Forschungsergebnissen der verschiedenen Forschungsstellen. Dabei sollte gleichzeitig der Fortschritt auf dem Gebiet der Komponentenintegrität gegenüber Vertretern des BMWi (BMWV) und des BMU dokumentiert werden. In den Beiträgen wurden Fragen zur bruchmechanischen Integritätsbewertung und der numerischen Bauteilanalyse mit fortgeschrittenen Werkstoffgesetzen sowie deren Verifikation behandelt. Darüber hinaus wurden die Bestimmung von Fehler- und Werkstoffzuständen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren, Bewertung des Verhaltens von Armaturen und Stellantrieben und das Verhalten von Werkstoffen unter Einwirkung von Temperatur, plastischer Wechselverformung und Neutronenbestrahlung vorgestellt und diskutiert.

### **UNCERT- AM Workshop "Codes of Practice for Management of Uncertainty in Mechanical Testing"**

Der Workshop wurde im Rahmen des Projektes „UNCERT-AM“ (G6MA-CT-2001-04005) des 5. Rahmenprogramms der EU durchgeführt und von EPERC (European Pressure Equipment Research Council) sowie DIN unterstützt. Die Beiträge befassten sich mit den Schwerpunkten:

- Allgemeine Anforderung an "Management of Uncertainties in Material Testing"
- Umsetzung bei den Versuchen: Zug, Kriechen, Härte, Kerbschlag, dynamischer E-Modul, Ramberg-Osgood Parameter, Bruchzähigkeit, CTOD, Druck, Biegung, Zeitstandfestigkeit, Doppelscherprüfung, Poissonzahl, Eigenspannung, Ermüdungsrisswachstum, LCF und HCF
- Ermittlung von Unsicherheiten beim Ermüdungsversuch, Zugversuch und Kriechversuch
- Diskussion und Vorführung der hierzu entwickelten Software

Im Rahmen des Workshops wurde der derzeit erreichte Stand dargestellt und die Möglichkeit geboten, mit den Autoren die Arbeiten zu diskutieren. Das Thema ist von besonderer Bedeutung, weil Prüflabors nach ISO 17 025 eine Abschätzung von Messunsicherheiten bei Werkstoffprüfungen durchführen müssen.

## **28. MPA-Seminar / MPA-NIMS Workshop**

Am 10. und 11. Oktober 2002 wurden die jährlich stattfindenden Seminare der MPA Stuttgart mit der 28. Veranstaltung dieser Art fortgeführt. 52 Vortragende aus 12 Ländern vermittelten den 190 internationalen Teilnehmern neueste Erkenntnisse zum Themenschwerpunkt „Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik“. Die Fachvorträge wurden in den Sitzungen Integritätsnachweise und Zuverlässigkeitsanalysen, Überwachungsmaßnahmen und zerstörungsfreie Prüfungen, Dichtungen, High Temperature Steels Characterisation sowie Modern 9-12%Cr Steels Development zusammengefasst.

Das Seminar stand in Verbindung mit einem Workshop zur Neuentwicklung von warmfesten Kraftwerksbaustählen, der in Kooperation mit dem National Institute for Metal Science (NIMS), Japan, durchgeführt wurde.

Durch die Präsentation und offene Diskussion von internationalen Forschungs- und Entwicklungsprojekten konnten der Gedanken- und Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet der Sicherheitstechnik gefördert, die Zusammenarbeit vertieft und die persönlichen Kontakte gepflegt werden.

## **Gemeinschaftskolloquium AG A2 "Fügen in Elektronik und Feinwerktechnik" (FA10 "Mikroverbindungstechnik")**

In Zusammenarbeit zwischen der DVS-Arbeitsgruppe A2 "Fügen in der Elektronik und Feinwerktechnik" und der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. Fachausschuss FA10 "Mikroverbindungstechnik" wurden im Rahmen eines Gemeinschaftskolloquiums Ergebnisse aktueller Forschungsarbeiten vorgestellt. Die Referate behandelten Themen aus den Bereichen der Entwicklung von lösbaaren, formschlüssigen Mikrofügeverfahren auf Basis lasergestützter Modellierung von PVD-abgeschiedenen Bimetallstrukturen, das Dosieren und Aufbringen elektrisch leitfähiger Klebstoffe im Nanoliter-Bereich, Präzisions-Hartlötverfahren für die MEMS-Technik sowie das Bonden von Cu-Drähten in der Leistungselektronik. Folgender Forschungsbedarf wurde für den Bereich der Mikrofügetechnologien definiert:

- Weiterentwicklung von Prüfverfahren an Mikroverbindungen,
- Qualifizierung von Silber als funktionelle Oberfläche bei Systemträgern,
- Kontaktierung zunehmend miniaturisierter Verbindungselemente (Löten, Schweißen, Kleben, eutektisches Bonden),
- Weiterentwicklung der Gerätetechnik zur Gewährleistung eines intelligenten Fügeprozesses,
- Entwicklung neuer fertigungstauglicher Niedertemperaturbondverfahren.

## MPA Stuttgart und ihre Partner

### 7 Internationale Kooperationen in der Forschung

Die MPA Stuttgart führt F&E-Arbeiten für zahlreiche Klein- und Mittelständische Unternehmen, für Großkonzerne, Forschungsvereinigungen, sowie im Auftrag von Bund und Ländern durch. Durch die Globalisierung auch im Bereich der Forschung und Entwicklung erstrecken sich die Aktivitäten immer mehr auf Kooperationen mit Europäischen Forschungsstellen und Industriepartnern, wodurch die MPA Stuttgart intensiv auch in die Programme der Europäischen Gemeinschaft eingebunden ist. Darüber hinaus wurden die seit Jahren bestehenden Kontakte zu außereuropäischen Institutionen weiter vertieft. Die Kompetenz der MPA Stuttgart auf ihren Arbeitsgebieten wird dabei international geschätzt.

#### **The Japan Research and Development Center for Metals (JRCM)**

Im Auftrag des JRCM führte die MPA Stuttgart Werkstoffprüfungen an metallischen Strukturmaterialien bei tiefen Temperaturen im inerten Medium sowie in Flüssigwasserstoff durch. Ziel dieser Prüfungen ist die Ermittlung des Flüssigwasserstoffeinflusses auf das Werkstoffverhalten.

#### **The National Institute for Metal Science (NIMS), Japan**

Das NIMS ist ein bedeutendes staatliches japanisches Forschungsinstitut (vormals NRIM), das sich seit über 50 Jahren mit der Entwicklung von innovativen Stählen und Legierungen sowie deren Charakterisierung befasst. Mit dem NIMS besteht schon über viele Jahre ein reger Austausch auf dem Bereich der Werkstoffentwicklung und Werkstoffcharakterisierung. Hierzu finden regelmäßige Workshops statt, bei denen in Form von Fachvorträgen und Diskussionen ein wissenschaftlicher Informationsaustausch erfolgt. Nachdem die letzte Veranstaltung dieser Art in Japan stattgefunden hat, wurde die diesjährige am 10./11.10 im Zusammenhang mit dem MPA Seminar organisiert. Bei diesem Anlass wurde das bereits bestehende Memorandum of Understanding (MOU) erneuert.

#### **Bhabha Atomic Research Centre, Bombay und Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam**

Diese Forschungszentren befassen sich u.a. mit Fragen der Integritätsbewertung von Komponenten sowohl in Anlagen zur Energiewandlung als auch der Verfahrenstechnik. Die Bundesrepublik Deutschland unterstützt über den Projektträger DLR diese Zentren durch den Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet des Werkstoffverhaltens im üblichen und im hohen Temperaturbereich, der bruchmechanischen Bewertung von Bauteilen und Komponenten sowie der Erstellung von Integritäts- und Instandhaltungskonzepten. Die gemeinsamen Projekte umfassen sowohl experimentelle Untersuchungen als auch numerische Analysen und deren Verifikation. Der im Rahmen

dieser Projekte stattfindende Erfahrungsaustausch, beinhaltet auch einen regen Austausch von Wissenschaftlern. Aus dieser direkten Kooperation haben sich weitere Kontakte zu Universitäten in Indien (z.B. IIT Madras, IIT Bombay, IIT Kaharagpur und Banaras Hindu University) und anderen Forschungseinrichtungen (z.B. National Metallurgical Laboratory in Jamshedpur) ergeben, die zu einer für beide Seiten fruchtbaren Zusammenarbeit geführt haben.

### **Deutsch-Japanische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Kraftwerkstechnik**

Die MPA Stuttgart ist im Auftrag der Bundesregierung federführend für den bilateralen Informationsaustausch auf dem Gebiet der Integritätsbewertung und des Lebensdauermanagement von Komponenten der Kraftwerkstechnik tätig. In diesem Zusammenhang werden in regelmäßigen Abständen gemeinsame Seminare durchgeführt. Themen dieser Seminare befassen sich mit bruchmechanischen Analysen, Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und deren Weiterentwicklung, sowie Fragen der Werkstoffermüdung und des Kriechens. Die gemeinsamen Seminare und die sich daraus ergebenden individuellen Kontakte leisten einen wichtigen Beitrag zur Abstimmung von generischen Sicherheitsstrategien, laufenden Werkstoffentwicklungen sowie mittel- und langfristig angelegten Forschungsaktivitäten.

### **Safety and Structural Integrity Research Center Korea (SAFE)**

Die MPA Stuttgart steht seit Kurzem in einem Erfahrungsaustausch mit SAFE in Südkorea auf dem Gebiet der Integrität von Komponenten in der Kraftwerkstechnik. Zu den Arbeitsfeldern, die Gegenstand des Erfahrungsaustausches sind, gehören Integritätskonzepte, die bruchmechanische Charakterisierung von Werkstoffen, Bauteilen und Komponenten, die Betriebsüberwachung, die zerstörungsfreie Prüfung, die Wartung von Komponenten sowie zuverlässige Kriterien zur Bewertung der Restlebensdauer von Komponenten auch im Kriechbereich. Es ist beabsichtigt, in diesen Themenbereichen auch einen Austausch von Studenten und Gastwissenschaftler durchzuführen.

## Arbeitskreise

### 8 Mitarbeit der MPA Stuttgart in Arbeitskreisen und Ausschüssen

DECHEMA (Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V.; verschiedene Fachausschüsse)

DGM Deutsche Gesellschaft für Materialprüfung

DGZfP (Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung; verschiedene Fachausschüsse)

DIN (Deutsches Institut für Normung; verschiedene Fachausschüsse)

DKD (Deutscher Kalibrierdienst)

DVM (Deutscher Verband für Materialprüfung; verschiedene Fachausschüsse)

DVS (Deutscher Verband für Schweißtechnik; verschiedene Fachausschüsse)

EPERC (European Pressure Research Council, verschiedene Technical Task Forces)

GESA (Gesellschaft für Experimentelle Strukturanalyse)

IAEA (International Atomic Energy Agency, International Working Group "Nuclear Power Plant Life Management")

ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik)

KTA (Kerntechnischer Ausschuss)

VDEh (Verein Deutscher Eisenhüttenleute)

VDI (Verein Deutscher Ingenieure; verschiedene Fachausschüsse)

VdTÜV EK 6 "Druckgeräte"

# Ehrungen

## 9 Ehrungen, Preise, Stipendien

### European Talent Award for Innovative Energy Systems

Herr Dr. Stefan Issler, ehemaliger Mitarbeiter der MPA Stuttgart, war unter den diesjährigen Gewinnern des von der European Foundation of Power Engineering ausgeschriebenen European Talent Award for Innovative Energy Systems. Die Dissertation von Herrn Dr. Issler mit dem Thema "Entwicklung eines Verfahrens zur Lebensdauer vorhersage für Schaufel-Scheibe-Verbindungen bei Gasturbinen" wurde mit dem 4. Platz belohnt.

Die Jury befand, dass die Arbeit den geforderten Kriterien - wie z. B. das Voranbringen innovativer ingenieur-wissenschaftlicher Ideen und die Realisierungschancen dieser Ideen in hervorragender Weise gerecht wurde.

Herzlichen Glückwunsch an Herrn Dr. Issler.

### MPA gewinnt 100-online Award 2002

Das Programm 100-online steht für die e-learning Aktivitäten der Universität Stuttgart. Seit April 2001 wird im Rahmen von 100-online der Einsatz der Neuen Medien in der Präsenzlehre gefördert. Die Dozenten der Universität haben das Programm mit großer Offenheit angenommen. Es sind statt der geplanten 100 am Ende 230 Projekte an der Universität entstanden.

Auch die MPA hat an diesem Programm mit 3 Projekten teilgenommen:

- EFL-Online / A-197
- Neue Medien in der Werkstoffkunde / A-198
- e-Praktikum / A-199

Am Ende des 100-online Programms wurde der mit 10.000 Euro dotierte 100-online Award 2002 für das beste Projekt ausgeschrieben. Von den 230 Projekten haben sich 37 Projekte für den Award beworben. Die Projekte wurden nach folgenden Kriterien von einer Jury beurteilt:

- allgemeiner, subjektiver Eindruck
- Medienvielfalt
- Interaktivität
- innovativer Ansatz
- didaktische Aufbereitung

Die Jury nominierte fünf Projekte für die Preisvergabe, die im Rahmen der Veranstaltung "Universität Stuttgart multimedial" am 11. Juli 2002 erfolgte. Bei der öffentlichen Veranstaltung wählte das Publikum aus den nominierten fünf Projekten das Projekt e-Praktikum der MPA Stuttgart mit großer Mehrheit zum Sieger. Der Rektor der Universität, Herr Prof. Fritsch, überreichte den 100-online Award in Form eines Pokals

und einer Urkunde Herrn Dr. Seidenfuß, der das Projekt vorgestellt hatte. Herr Dr. Seidenfuß nahm den Pokal stellvertretend für den Projektleiter Prof. Roos sowie für die Bearbeiter (Herr Dr. Seidenfuß, Herr Ziermann und Herr Grüninger) in Empfang.

### **Heisenberg Stipendium**

Herrn Dr.-Ing. Leon Mishnaevski (MPA, Abteilung Verfahrensentwicklung) wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ein Heisenberg-Stipendium verliehen. Das Stipendium, das als eine der höchsten wissenschaftlichen Auszeichnungen in Deutschland gilt, ist für deutsche Nachwuchswissenschaftler bestimmt, die habilitiert sind oder ihre Qualifikation durch habilitationsäquivalente Leistungen nachgewiesen haben, und sich darüber hinaus durch besonders herausragende wissenschaftliche Leistungen auszeichnen. Das Ziel des Stipendiums ist es, den Wissenschaftlern zu ermöglichen, sich auf eine wissenschaftliche Leitungsposition vorzubereiten, wobei Stipendiaten eine eigene Arbeitsgruppe aufbauen sollen. Die Laufzeit des Stipendiums beträgt insgesamt fünf Jahre. Während dieser Zeit wird Herr Mishnaevski an der Entwicklung der Konzepte und Methoden der Optimierung metallischer und keramischer Werkzeugmaterialien auf der Grundlage numerischer Untersuchungen und unter Berücksichtigung von Effekten heterogener, komplexer und hierarchischer Phasenarrangierungen auf das Werkstoffverhalten arbeiten.

# Veröffentlichungen

## 10 Veröffentlichungen der MPA Stuttgart im Jahr 2002

2002/1

**Issler, S.:** Entwicklung eines Verfahrens zur Lebensdauervorhersage für Schaufel-Scheibe-Verbindungen bei Gasturbinen. Techn.-wiss. Bericht MPA Stuttgart (2002), H. 02-01.

2002/2

**Roos, E., U. Eisele, H. Silcher, J. Schiedermaier und F. Otremba:** Bruchmechanikkonzept zur Bauteilbewertung im gesamten Temperaturbereich der Bruchzähigkeit. 34. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge. Themenschwerpunkt: „Fortschritte der Bruch- und Schädigungsmechanik“ am 19. und 20. Februar 2002 in Freiberg, S. 169-178.

2002/3

**Roos, E., L. Stumpfrock, G. Merkert und M. Seidenfuß:** Bruch- und Schädigungsmechanische Untersuchungen eines Thermoschocksexperiments. 34. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge. Themenschwerpunkt: „Fortschritte der Bruch- und Schädigungsmechanik“ am 19. und 20. Februar 2002 in Freiberg, S. 245-254.

2002/4

**Maile, K., A. Jovanovic, L. Stumpfrock und A. Klenk:** Praktische Anwendung bruchmechanischer Verfahren zur Bestimmung von kritischer Risttiefe sowie Ermüdungs- und Kriechrischwachstum auf einen Rohrleitungsstutzen nach langzeitiger Betriebsbeanspruchung. 34. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge. Themenschwerpunkt: „Fortschritte der Bruch- und Schädigungsmechanik“ am 19. und 20. Februar 2002 in Freiberg, S. 255-262.

2002/5

**Klenk, A. und T. Gengenbach:** Rohrbiegungen im Zeitstandbereich – Erste Ergebnisse des FDBR/VGB gemeinschaftsforschungsvorhabens. Teil 1: Entwicklung von Stoffgesetzen. 17. Rohrleitungstechnische Tagung „Rohrleitungen in Kraftwerken und chemischen Anlagen – Rohrfernleitungen am 5. und 6. März 2002 in Stuttgart.

2002/6

**Roos, E., K. Maile, A. Lyutovich, A. Gusko and A. Udoh:** (Cr-Al) bi-layer Coatings Obtained by ion Assisted EB PVD on C/C-SiC Composites and Ni-Based Alloys. Surface and Coatings Technology 151-152 (2002), pp. 429-433.

2002/7

**Roos, E., H. Kockelmann and R. Hahn:** Gasket Characteristics for the Design of Bolted Flange Connections of Metal-to Metal Contact Type. Int. Journ. of Press. Vess. and Piping 79 (2002), pp. 45-52.

2002/8

**Roos, E.:** German Break Preclusion Criteria and Evaluation of LBB. Proceedings of the Indo-German Theme Meeting on Fatigue and Fracture Assessment of Pressure Retaining Components (Lecture Notes), Section II, February 25 - March 1 (2002), Bhabha Atomic Research Centre, India.

2002/9

**Roos, E. and U. Eisele:** Ductile Fracture Mechanics Evaluation Methods for Pressure Retaining Components. Proceedings of the Indo-German Theme Meeting on Fatigue and Fracture Assessment of Pressure Retaining Components (Lecture Notes), Section IV, February 25 - March 1 (2002), Bhabha Atomic Research Centre, India.



2002/10

**Roos, E. and U. Eisele:** Determination of Master Curve for Lower, Transition, and Upper Shelf Temperature Ranges. .Proceedings of the Indo-German Theme Meeting on Fatigue and Fracture Assessment of Pressure Retaining Components (Lecture Notes), Section IV, February 25 - March 1 (2002), Bhabha Atomic Research Centre, India.

2002/11

**Roos, E.:** Ageing Management Philosophy of Fossil Power Plant Components. Proceedings of the Indo-German Theme Meeting on Fatigue and Fracture Assessment of Pressure Retaining Components (Lecture Notes), Section V, February 25 - March 1 (2002), Bhabha Atomic Research Centre, India.

2002/12

**Schüle, M.:** Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Verhalten von Stählen unter schlagartiger Beanspruchung. Techn.-wiss. Bericht MPA Stuttgart (2002), H. 02-02.

2002/13

**Lyutovich, A., K. Maile, A. Gusko, Kh. Ashurov and S. Morozov:** Characterisation of the Generation of Ions in Electron Beam Evaporator for the Control of Metal Deposition Processes. Surface and Coatings Technology 151-152, (2002), pp. 105-109.

2002/14

**Schmauder, S., S. Lauf and H.-P. Maier:** Strength Behaviour of a Gas Pressure Sintered Siliconnitride (GPSSN) under Static and Cyclostatic Loading at 1250° C in Air. Fracture Mechanics of Ceramics 13 (2002), pp. 329-334.

2002/15

**Roos, E. und M. Rauch:** Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Ermittlung der Lebensdauer von Bauteilen mit Mehrflächenkontakten. Informationstagung Turbinen der FVV am 11. April 2002 in Frankfurt/Mörfelden, S. 35-48.

2002/16

**Roos, E., B. Petrovski, J. Hädrich und A. Klenk:** Rissverhalten von Nickelbasiswerkstoffen unter überlagerter Kriech- und Kriechermüdungsbeanspruchung. Informationstagung Turbinen der FVV am 11. April 2002 in Frankfurt/Mörfelden, S.75-87.

2002/17

**Roos, E. und C. Weichert:** Auswirkung eines dreiachsigen Spannungszustandes auf das Verformungsverhalten und das Rissinitiierungsverhalten von Gruppenfehlstellen. Informationstagung Turbinen der FVV am 11. April 2002 in Frankfurt/Mörfelden, S. 141-155.

2002/18

**Neundorf, B., H.-J. Maier, U. Mletzko and T. Just:** Results of a Round Robin Test on NDT Methods for Austenitic Pipe Welds. VGB PowerTech 82 (2002), No. 2, pp. 78-80.

2002/19

**Roos, E. und S. Issler:** Bewertungsansätze bei komplexer mehrachsiger Schwingbeanspruchung und Vergleich mit experimentellen Untersuchungen. VGB Powertech 82, (2002), H. 6, S. 78-87.

2002/20

**Roos, E. und U. Mayer:** Fließkurven an Blechen bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten. Materialprüfung 44 (2002), H. 5, S. 176-178.

2002/21

**Udoh, A., K. Eberle, R. Aoki, S. Lütze und K. Maile:** Schäden in langfaserverstärkter Keramik C/C-SiC. Materialprüfung 44 (2002), Heft 5, S. 186-193.

2002/22

**Eisele, U., R. Bartsch, G. König und G. Nagel:** Bruchmechanische Kennwerte für RDB-Werkstoffe. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/23

**Roos, E., X. Schuler, G. König und G. Nagel:** Bruchmechanische Bewertung unter Berücksichtigung des Eigenspannungszustandes. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/24

**Bartonicek, J., W. Kohlpaintner, M. Widera und E. Roos:** Gesamtkonzept zum Integritätsnachweis. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/25

**K.-H. Herter, J. Bartonicek, W. Kohlpaintner und M. Widera:** Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Tragverhalten von Rohren Nennweite  $\leq$  DN300. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/26

**Neundorf, B., W. Mayinger und U. Mletzko:** Zerstörungsfreie Prüfung von austenitischen Schweißverbindungen in SWR-Anlagen. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/27

**Ilg, U., G. König, K. Küster und H. Kockelmann:** Temperatur und Eigenspannungsfelder in einer Austenitischen Rohrrundnaht bei Anwendung der Orbitalschweißtechnik. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/28

**Diem, H., J. Bartonicek und K.-J. Metzner:** Bewertung des Ermüdungsverhaltens von Bauteilen bei thermisch wechselnder Belastung. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/29

**Kockelmann, H., J. Bartonicek, E.G. Meyer und M. Trobitz:** Festigkeits- und Dichtheitsnachweis für Flanschverbindungen mit der Dichtung im Krafthaupt- und Kraftnebenschluss. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/30

**Hüttner, F., H. Hoffmann und K. Küster:** Korrosionsgestütztes Rißwachstum in Ferritischen Stählen in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/31

**Hoffmann, H., G. Brümmer, U. Ilg und F. Hüttner:** Bestrahlungseinfluss. Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren“ am 13.-14. Juni 2002 in Stuttgart.

2002/32

**Nedelcu, S. and P. Kizler:** Molecular Dynamics Simulation of Hydrogen-Edge Dislocation Interaction in BCC Iron. Phys. Stat. Sol. (A), 193 (2002), No. 1, pp. 26-34.

2002/33

**Purper, H.:** Experimentelle und numerische Untersuchung des Relaxationsverhaltens von Rohrflanschverbindungen. Techn.-wiss. Bericht MPA Stuttgart (2002), H. 02-03.

2002/34

**Bareiß, J.:** Verhalten herstellungsbedingter Fehlstellen im warmfesten 1% CrMoV-Gußstahl. Techn.-wiss. Bericht MPA Stuttgart (2002), H. 02-04.

2002/35

**Schmauder, S. and P. Binkele:** Atomistic Computer Simulation of the Formation of Cu-Precipitates in Steels. Computational Materials Science 24 (2002), pp. 42-53.

2002/36

**Schmauder, S.:** Crack Growth in Multiphase Materials. Encyclopedia of Materials: Science and Technology (2002), pp. 1735-1741.

2002/37

**Roos, E., F. Otremba, J. Föhl, U. Eisele und F. Hüttner:** Integritätsbewertung von Reaktordruckbehältern unter Nutzung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens Komponentensicherheit (FKS). 2. Workshop Kompetenzverbund Kerntechnik „Komponentensicherheit und Integritätsbewertung“ am 18.-19. September 2002 in Köln.

2002/38

**Roos, E., F. Otremba, K.-H. Herter und W. Stadtmüller:** Leck – vor – Bruchkonzept auf der Basis von Versuchen an austenitischen und ferritischen Röhren. 2. Workshop Kompetenzverbund Kerntechnik „Komponentensicherheit und Integritätsbewertung“ am 18.-19. September 2002 in Köln.

2002/39

**Roos, E. und L. Stumpfrock:** Komponentenverhalten bei transienten thermischen Belastungen. 2. Workshop Kompetenzverbund Kerntechnik „Komponentensicherheit und Integritätsbewertung“ am 18.-19. September 2002 in Köln.

2002/40

**Roos, E., J. Föhl, K.-H. Katerbau, D. Willer, P. Binkele, P. Kizler und S. Schmauder:** Untersuchungen zur Bildung und Auflösung von Kupferausscheidungen im Werkstoff 15NiCuMoNb5 (WB 36). Folgen für die sicherheitstechnische Bewertung. 2. Workshop Kompetenzverbund Kerntechnik „Komponentensicherheit und Integritätsbewertung“ am 18.-19. September 2002 in Köln.

2001/41

**Schreiber, J., M. Buron und K. Bothe:** Charakterisierung der Materialschädigung anhand des fraktalen räumlich-zeitlichen Response-Verhaltens und Möglichkeiten der Lebensdauervorhersage. 2. Workshop Kompetenzverbund Kerntechnik „Komponentensicherheit und Integritätsbewertung“ am 18.-19. September 2002 in Köln.

2002/42

**Klenk, A.:** Short Summary of Objectives and Current State of the Research Initiative – Integrity of Repair Welds in High Temperature Plant. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International HIDA and Integrity Conference „Integrity of High Temperature Repair Welds“, September 16-18 (2002), Oeiras – Lisbon, Portugal, pp. 1-5.

2002/43

**Klenk, A., J. Schemmel and K. Maile:** Numerical Modelling of Ferritic Welds and Repair Weld in P22 and P91. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International HIDA and Integrity Conference „Integrity of High Temperature Repair Welds“, September 16-18 (2002), Oeiras – Lisbon, Portugal, pp. 45-55.

2002/44

**Maile, K., A. Klenk, H. Theofel, J. Schemmel, R.-U. Husemann and A. Helmrich:** Behaviour of Similar Welds in T24-Tubes and E911-Pipes. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International HIDA and Integrity Conference „Integrity of High Temperature Repair Welds“, September 16-18 (2002), Oeiras – Lisbon, Portugal, pp. 69-80.

2002/45

**Issler, S., I.A. Shibli and J.A. Williams:** Some Characteristics of Weld Repair for Creep Applications. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International HIDA and Integrity Conference „Integrity of High Temperature Repair Welds“, September 16-18 (2002), Oeiras – Lisbon, Portugal, pp. 81-111.

2002/46

**Merkert, G.:** Anwendung und Weiterentwicklung von schädigungsmechanischen Ansätzen zur Simulation des Versagensverhaltens von Thermoschockproben. Techn.-wiss. Bericht MPA Stuttgart (2002), H. 02-05.

2002/47

**Jovanovic, A., G. M. Schellenberg, M. Perunicic, K. Summer, M. Weiss and J. Seichter:** New Approach to Defining Component Fatigue Curves Based on Interactive Combination of Specimen Testing Data, Design Curves and Component Testing Data. 28. MPA-Seminar am 10. u. 11. Oktober 2002 in Stuttgart. Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik (Bd. 1). Staatliche Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2002.

2002/48

**Bartonicek, J., H. Kockelmann, E. Roos und F. Schöckle:** „Dicht“ – was ist das? 28. MPA-Seminar am 10. u. 11. Oktober 2002 in Stuttgart. Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik (Bd. 1). Staatliche Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2002.

2002/49

**Schöckle, F., J. Bartonicek, R. Hahn und H. Kockelmann:** Abdichteigenschaften von Dichtungen für Flanschverbindungen. 28. MPA-Seminar am 10. u. 11. Oktober 2002 in Stuttgart. Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik (Bd. 2). Staatliche Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2002.

2002/50

**Maile, K. and A. Klenk:** Behaviour of Welds and Repair Welds in 9 Cr-Steel Components – Experimental Evaluation and Numerical Simulation. 28. MPA-Seminar am 10. u. 11. Oktober 2002 in Stuttgart. Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik (Bd. 2). Staatliche Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2002.

2002/51

**Schemmel, J., A. Klenk, K. Maile and E. Roos:** Deformation and Damage of 1 Cr- and 10 Cr-Steels under Multiaxial Creep and Creep-Fatigue Loading. 28. MPA-Seminar am 10. u. 11. Oktober 2002 in Stuttgart. Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik (Bd. 2). Staatliche Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2002.

2002/52

**Zies, G., K. Maile, K.-H. Mayer and S. Straub:** Phase Characterization of Advanced 9-12% Cr Steels with Different Creep Behaviour. 28. MPA-Seminar am 10. u. 11. Oktober 2002 in Stuttgart. Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik (Bd. 2). Staatliche Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2002.

2002/53

**Maile, K. und R. Scheck:** Einfluß der metallographischen Präparationstechnik auf die Ermittlung der Zeitstandschädigung von 10% Chrom-Stählen. 11. Internationale Metallographietagung am 11.-13. September 2002 in Leoben.

2002/54

**Schmauder, S.:** Computational Mechanics. Ann. Rev. Mat. Res. 2002, pp. 437-469.

2002/55

**Sturel, T., N. Cardinal, A.J. Horn, A.D. Karstensen, M.R. Goldthorpe, E. Sattler, H. Pohl, R. Kaspar and K.E. Hagedorn:** Fracture Toughness Predictions for Modern Low-Carbon, High-Strength Steels Based on Microstructural and Micromechanistic Approaches. Final Report. European Commission (EC), Report Nr. EUR 20093 EN (2002).

2002/56

**Roos, E. und K. Bothe :** Kriechratcheting. Abschlußbericht. Vorhaben Nr. 695, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), H.734, (2002).

2002/57

**Roos, E. und J. Schemmel:** Kriechermüdung Mehraxial II. Abschlußbericht. Vorhaben Nr. 233, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), Heft 742, (2002).

2002/58

**Roos, E. und Th. Gengenbach:** 9% Cr-Rohrleitungsflansch. Abschlußbericht. Vorhaben Nr. 217, Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM), Heft 267, (2002).

2002/59

**Berger, C., A. Scholz, J. Granacher, F. Müller, E. Roos, K. Maile und W. Stadtmüller:** Hochtemperaturrißverhalten. Abschlußbericht. Vorhaben Nr. 221, Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM), Heft 270, (2002).

2002/60

**Bonn, R., K. Metzner, H. Kockelmann, E. Roos and L. Stumpfrock:** Temperature and Residual Stress Fields in an Austenitic Circumferential Pipe Weld. Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 434, August 5-9 (2002), Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 55-62.

2002/61

**Hahn, R., H. Kockelmann, H. Zerres and Y. Guéroul:** Advanced Gasket Testing Methodology – The New Situation in the European Standardization. Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 433 August 5-9 (2002) Vancouver, Canada, pp. 1-8.

2002/62

**Roos, E., K.-H. Herter and F. Otremba:** Detailed Assessment of Fatigue Life: A Critical Review. Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 443-1, August 5-9 (2002) Vancouver, Canada, pp. 39-46.

2002/63

**Roos, E., F. Otremba and F. Hüttner:** A Contribution to Proof the Component Integrity Taking into Account the Corrosion-Assisted Crack Growth. Proceeding of the 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 443-1, August 5-9 (2002), Vancouver, Canada, pp. 47-50.

2002/64

**Lidbury, D., R. Bass, E. Keim, S. Bhandari, D. Connors, U. Eisele and K.-F. Nilsson:** Validation of Constraint Based Methodology in Structural Integrity – Vocalist: Project Overview. Proceeding of the 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 437, August 5-9 (2002), Vancouver, Canada, pp. 61-70.

2002/65

**Bass, R., U. Eisele, E. Keim, H. Keinanen, S. Marie and A. Sherry:** Validation of Constraint Based Methodology in Structural Integrity – Vocalist: Experimental Programme. Proceeding of the 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 437, August 5-9 (2002), Vancouver, Canada, pp. 81-88.

2002/66

**Keim, E., R. Bass, W. McAfee, S. Bhandari, P. Gilles, S. Marie, Y. Wadier, D. Lidbury, A. Sherry, U. Eisele, H. Keinanen and K. Wallin:** Validation of Constraint Based Methodology in Structural Integrity – Vocalist: Analytical Programme. Proceeding of the 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 437, August 5-9 (2002), Vancouver, Canada, pp. 89-96.

2002/67

**Kockelmann, H.:** Flanges. Proceedings of the cen-Conference „Pressure Equipment in Europe Un-fired Pressure Vessels – The new Standards“, November 19-20 (2002), Brüssel, Belgien.

2002/68

**Roos, E.:** German Break Preclusion Criteria for High Energy Piping. Proceedings of the First National Conference on Nuclear Reactor Technology (NRT-1), November 25-27 (2002), Bhabha Atomic Research Centre, India.

2002/69

**Roos, E.:** General Concept for the Integrity of Piping Components. Part I: Requirements for Materials Characteristics. CEP Workshop , November 25-26 (2002), Bombay, India.

2002/70

**Roos, E.:** General Concept for the Integrity of Piping Components. Part II: German Break Preclusion Criteria for High Energy Piping. CEP Workshop, November 25-26 (2002), Bombay, India.

2002/71

**E. Roos und K. Maile:** Werkstoffe für Ingenieure – Grundlagen, Anwendung, Prüfung. Springer Verlag 2002, 394 S.

2002/72

**Greitmann, M.J. und P. Wiesner:** Anwenden der Sonderschweißverfahren. Aus dem Fachausschuß "Sonderschweißverfahren" (Teil 1: Reibschweißen). Der Praktiker (2002), Heft 7, S. 228-230.

2002/73

**Greitmann, M.J. und P. Wiesner:** Anwenden der Sonderschweißverfahren. Aus dem Fachausschuß "Sonderschweißverfahren." (Teil 2: Diffusionsschweißen). Der Praktiker (2002), Heft 9, S. 314-315.

2002/74

**Greitmann, M.J. und P. Wiesner:** Anwenden der Sonderschweißverfahren. Aus dem Fachausschuß "Sonderschweißverfahren." (Teil 3: Ultraschallschweißen). Der Praktiker (2002), Heft 11, S. 388-392.

2002/75

**Alsmann, U.:** Werkstoffmechanische Untersuchungen zu den Mechanismen des Vorbelastungseffekts. Techn.-wiss. Bericht MPA Stuttgart (2002), H. 02-06.

2002/76

**Roos, E. und U. Mayer:** Schnellzerreiversuche an punktgeschweißten Blechen unterschiedlicher Festigkeit. Tagungsband Werkstoffprüfung 2002 "Kennwertermittlung für die Praxis", S. 105-110.

2002/77

**Jovanovic, A. and D. Balos:** Advanced Modules. Proceedings of the German Workshop on Codes of Practice for Management of Uncertainty in Mechanical Testing, October 9 (2002), Stuttgart, Germany.

2002/78

**Wagemann, G. and A. Jovanovic:** CoP and WWW. Proceedings of the German Workshop on Codes of Practice for Management of Uncertainty in Mechanical Testing, October 9 (2002), Stuttgart, Germany.

2002/79

**Klenk, A., H. Theofel, A. Helmrich und R.-U. Husemann:** Langzeitiges Verhalten von artgleichen Schweißverbindungen aus T24 (7CrMoVTiB10-10). 25. Vortragsveranstaltung für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe "Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe", 22. November 2002, Düsseldorf, S. 25-40.

2002/80

**Rauch, M., B. Hahn, K. Maile, A. Reuter und P. Seliger:** Schädigungsentwicklung in kriechbeanspruchtem X10CrMoVNb9-1. Vortragsveranstaltung für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe "Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe", 22. November 2002, Düsseldorf, S. 41-114.

2002/81

**Bothe, K., A. Klenk und K.H. Mayer:** Bewertung der Auswirkung von sekundären Lasten auf das Versagensverhalten von Bauteilen unter Kriechermüdnungsbeanspruchung. Vortragsveranstaltung für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe "Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe", 22. November 2002, Düsseldorf, S. 103-114.

2002/82

**Weichert, C., A. Klenk, K. Maile, J. Ewald, C. Gerdes, T.-U. Kern und K.H. Mayer:** Bruchmechanische Bewertung von Fehlstellen in 1%CrMoV Wellenstählen. Vortragsveranstaltung für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe "Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe", 22. November 2002, Düsseldorf, S. 115-130.

2002/83

**Müller, F., T.S. Mao, A. Scholz, A. Klenk, A. Jovanovic und J. Ewald:** Berechnungsmethoden für Risseinleitung und Rissfortschritt zur Beurteilung kritischer Bauteilstellen unter komplexer Beanspruchung. Vortragsveranstaltung für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe "Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe", 22. November 2002, Düsseldorf, S. 131-148.

2002/84

**Maile, K. und J. Schemmel:** Beschreibung des Verformungs- und Festigkeitsverhaltens von Komponenten im Kriechbereich unter instationärer Beanspruchung. Informationstagung Turbinen, Herbst 2002, Nürnberg, Heft R 518, S. 3-22.

# Doktorarbeiten

## 11 Doktorarbeiten und Habilitationen an der MPA Stuttgart

### Doktorarbeiten 2002

#### Harald Purper

Experimentelle und numerische Untersuchung des Relaxationsverhaltens von Rohrflanschverbindungen

#### Ulrich Alsmann

Werkstoffmechanische Untersuchungen zu den Mechanismen des Vorbelastungseffekts

#### Geert Schellenberg

Beschreibung des Risseinleitungsverhalten von warmfesten Stählen unter Kriechermüdungsbeanspruchungen

#### Gerhard Merkert

Anwendung und Weiterentwicklung von schädigungsmechanischen Ansätzen zur Simulation des Versagensverhaltens von Thermoschockproben

### Habilitationen 2002

#### Jürgen Sievers

Simulation des bruchmechanischen Verhaltens von Reaktordruckbehältern unter transienten Druck- und Temperaturbelastungen



