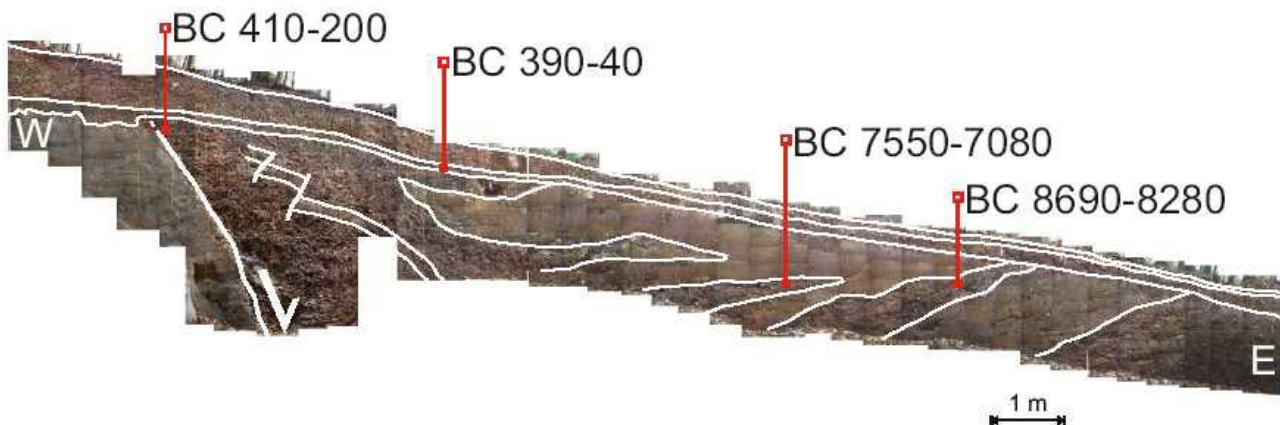


Jahresbericht 2002 der regulatorischen Sicherheitsforschung

Excerpt of Trench 3 photomosaic
Ferry, M. and Giardini, D., ETH-Zürich



Projekt PALEOSEIS
Photomosaik des Untersuchungsgrabens Basel



Bundesamt für Energie (Schweiz)
Office fédéral de l'énergie (Suisse)
Ufficio federale dell'energia (Svizzera)
Federal Office of Energy (Switzerland)

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires
Divisione principale della Sicurezza degli Impianti Nucleari
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate

5232 Villigen-HSK

Tel.: 056 / 310 38 11

Fax: 056 / 310 39 07

Datum

24. Februar 2003

AN-Nummer

HSK-AN-4630
KSA-AN-2197

Typ/Charakter

Bericht

Aktenzeichen

00FBX.FORG

Klassifikation

Bearbeiter

Marianne Zünd

Visum
Sachbearbeiter:

Vorgesetzter:

Projekt, Thema, Gegenstand (Schlagwörter)

Regulatorische Sicherheitsforschung, Jahresbericht 2002

Seiten

198

Beilagen

Zeichnungen

Jahresbericht 2002 der Regulatorischen Sicherheitsforschung

Autoren

Projektbegleiterberichte der HSK:

P. Bitterli

F. Cartier

B. Faust

D. Loy

C. Maeder

P. Meyer

W. Pauli

R. Scheidegger

G. Schoen

S. Schulz

G. Schwarz

M. Zünd

Berichte zu den Forschungsprojekten:

Paul Scherrer Institut:

H.P. Seifert, S. Ritter, U. Ineichen, U. Tschanz, B. Gerodetti
D. Kalkhof, M. Grosse, M. Niffenegger, B. Tirbonod
V.N. Dang

Ch. Schuler, M. Boschung, G. Butterweck, C. Wernli

S. Bajo, J. Eikenberg

B. Bucher, Ch. Wernli

Z. Kopajtic, D. Gavillet, J. Birchley, S. Guentay

ETH Zürich:

A. Becker, D. Giardini

Institut für medizinische Radio-
biologie der Uni ZH und des PSI:

A. Anstett, C. Chastel, K. Ballmer, J. Jiricny, R. Jaussi

OECD Halden Reactor Project:

W. Wiesenack, F. Øvre

US NRC:

Andrew J. Szukiewicz

Verteiler

BFE: G. Schriber, Ch. de Reyff

UAK: H. Achermann

PSI: W. Kröger, K. Foskolos, R. Andres, R. Jaussi, P. Hosemann, K. Ballmer

KSA: alle Mitglieder

HSK: EFoKo, SFI

Projektbegleiter: P. Bitterli, F. Cartier, B. Faust, D. Loy, C. Maeder, P. Meyer, W. Neumann, W. Pauli, R. Scheidegger,
G. Schoen, S. Schulz, G. Schwarz, M. Zünd

INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG.....	4
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 RIKORR	6
RIKORR	8
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 FEVER	54
FEVER	56
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 STARS-IV.....	103
STARS	106
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 PALEOSEIS	119
PALEOSEIS	121
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 HRA.....	125
HRA - HUMAN RELIABILITY ANALYSIS	127
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität	135
MOLEKULARBIOL. UNTERSUCHUNGEN ZUR ZELLULÄREN RADIOSENSITIVITÄT	137
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Zusammenarbeit in der Dosimetrie.....	142
ZUSAMMENARBEIT IN DER DOSIMETRIE	144
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Zusammenarbeit in der Radioanalytik	149
RADIOANALYTIQUE	151
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Aeroradiometrie 2.....	156
AERORADIOMETRIE 2	157
Internationale Projekte	161
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Phebus FP.....	162
PHEBUS FISSION PRODUCT PROGRAMM SCHWEIZER IN-KIND BEITRÄGE	164
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 OECD Halden Reactor Projekt	178
OECD HALDEN REACTOR PROJECT.....	180
Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Co-operative Research Activities US-NRC & HSK.....	185
CO-OPERATIVE RESEARCH ACTIVITIES US-NRC & HSK	188
Begutachtung zum Projektverlauf 2002 OECD CABRI-Wasserloop Project.....	192
Begutachtung zum Projektverlauf 2002 OECD-FIRE	194
Begutachtung zum Projektverlauf 2002 OECD-MCCI	195
Begutachtung zum Projektverlauf 2002 OECD-OPDE	197

EINLEITUNG

Damit die bestehenden Kernanlagen während ihrer verbleibenden Betriebslaufzeiten weiterhin unter Gewährleistung höchster Sicherheitsstandards betrieben werden können, müssen Sicherheitstechnik und Sicherheitskultur, aber auch die behördlichen Aufsichtsmethoden entsprechend dem Fortschritt von Wissenschaft und Technik weiterentwickelt werden. Mit ihren unabhängigen Forschungsvorhaben im Rahmen der Regulatorischen Sicherheitsforschung, verschafft sich die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) wissenschaftlich fundierte Grundlagen für ihre Überprüfungen und Entscheide. So tragen die gewonnenen Erkenntnisse dazu bei, Verfahren und Richtlinien zu verbessern, potentielle sicherheitstechnische Probleme frühzeitig zu erkennen und technologische Innovationen in die Praxis umzusetzen.

Angesichts des begrenzten Budgets für die Regulatorische Sicherheitsforschung ist eine sorgfältige und vorausschauende Priorisierung der nationalen Forschungsthemen unumgänglich. Als kleines Land nutzt die Schweiz zudem die Vorteile von internationalen Forschungs-Kooperationen. Diese tragen zur Konsolidierung und Verbreiterung der Wissensbasis bei, ermöglichen die Abstimmung von Forschungsprioritäten und die einvernehmliche Interpretation von Resultaten. Die ausführlichen Projektberichte der in diesem Jahresbericht enthaltenen internationalen Projekte, können bei den zuständigen Projektbegleitern eingesehen werden.

Die Regulatorische Sicherheitsforschung konzentrierte sich im Jahr 2002 auf Projekte in den folgenden Bereichen:

Materialforschung: Das Alterungsverhalten von Werkstoffen und die damit verbundene Beeinträchtigung der Strukturintegrität von Komponenten und Systemen gewinnen mit zunehmender Betriebsdauer der Anlagen an Bedeutung. Zerstörungsfreie Diagnose- und Analyseverfahren spielen bei der kontinuierlichen Überwachung des Materialzustandes eine wichtige Rolle und erlauben, präventive Massnahmen zur Erhöhung der Anlagensicherheit zu ergreifen. Weiterführende Kenntnisse zu den verschiedenen Faktoren, welche die Materialermüdung beeinflussen (mechanische, thermische, chemische Belastungen sowie Strahlenbelastungen) sind unumgänglich für die Erweiterung der technischen Basis für regulatorische Entscheide.

Stör- und Unfallforschung: Für die sicherheitstechnische Überprüfung und die weitere Verbesserung der Prävention, sind sowohl Grundlagenwissen als auch entsprechende Simulationsprogramme zum Verhalten des Reaktorkerns und der Kühlkreisläufe bei Stör- und Unfällen erforderlich. Dabei müssen neue Entwicklungen im Bereich der Anlagentechnik und der Brennstoffe sowie die verschiedenen Betriebsfahrweisen berücksichtigt werden (z.B. Hochabbrand, Verhalten von Mischoxid- und Inertmatrixbrennstoff, thermohydraulisches Verhalten bei Transienten, digitale Leitsysteme, etc.). Die wissenschaftliche Untersuchung der Abläufe und Phänomene von Stör- und Unfällen bilden die Voraussetzung für die Bewertung der Wirksamkeit von Sicherheitsreserven und Präventionsmassnahmen und ermöglichen, die Auswirkungen von Stör- und Unfällen zu vermindern.

Human Factors: Die Human Factors Forschung stellt den Menschen in den Mittelpunkt und untersucht seine Interaktionen mit Systemen und mit seiner Arbeitsumgebung. Die Forschungsergebnisse bilden die wissenschaftliche Basis für die Beurteilung von Betriebsabläufen, der Notfallorganisation und der Methoden der Aus- und Weiterbildung in den Werken oder der Auswirkungen des Automationsgrads auf die Operateure. Ziel ist, den Beitrag der menschlichen Leistung im Normalbetrieb und bei Ereignissen bewerten zu können und menschliche Fehlhandlungen zu verhindern bzw. deren Auswirkungen zu minimieren.

Strahlenschutz- und Notfallschutzforschung: Dieser Forschungsbereich befasst sich mit der Messung und Analyse der Strahlenexposition des Menschen, mit biologischen und medizinischen Strahlenauswirkungen sowie mit der Strahlenschutztechnik. In den Projekten werden Verfahren entwickelt, welche die Präzision von Aktivitätsmessungen in Luft, Wasser, Boden, Körperflüssigkeiten und -ausscheidungen verbessern und die sichere messtechnische Erfassung von radioaktiven Kontaminationen von Oberflächen ermöglichen. Damit können die Aussagen zu Exposition und Ausbreitung verfeinert und die entsprechenden Notschutzmassnahmen weiterentwickelt werden.



Datum: 31. Januar 2003

Von: Werner Pauli

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 RIKORR

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Der Vertrag zwischen der Schweizerischen Eidgenossenschaft, vertreten durch die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK, und dem Paul Scherrer Institut PSI, betreffend die Risskorrosion in druckführenden Komponenten des Primärkreislaufes von SWR (RIKORR) endete am 31. Dezember 2002.

Ziel des Forschungsprojektes war die quantitative Charakterisierung der Risskorrosion in ferritischen druckführenden Komponenten des Primärkreislaufes von SWR unter transienten und unter stationären Normalbetriebsbedingungen.

Die HSK erwartete von diesem Forschungsprojekt insbesondere eine vertiefte Bewertung zu verschiedenen Einflussparametern der Spannungsrissskorrosion von Reaktorbehälterstahl bei Siedewasserreaktoren. Insbesondere interessiert sie dabei der Einfluss von langsamen Lasttransienten auf das Korrosionsverhalten solcher Stähle.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Die für das Jahr 2002 gesetzten Projektziele wurden im Jahresbericht 2001, Kapitel 5.4 festgelegt.

Die Zielsetzungen für das Jahr 2002 wurden vollumfänglich erreicht. Das Gesamtprojekt konnte per Ende 2002, unter Einhaltung des finanziellen Rahmens, abgeschlossen werden. Der Schlussbericht ist für das 1. Quartal 2003 geplant.

Aus den Versuchsergebnissen und Untersuchungen können die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- Das Risswachstumsverhalten (Environmentally-Assisted Cracking EAC) kann durch eine Kombination und Überlagerung von drei Mechanismen verstanden werden; nämlich Oxidfilmbruch/anodische Auflösung, Wasserstoffinduzierte Risskorrosion und Dynamische Reckalterung. Die relevanten Einflussparameter auf das EAC-Risswachstum wie Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit, Kühlmitelegenschaften, Werkstoffzusammensetzung sind identifiziert und bewertet worden.
- Die Beurteilung der Konservativität der Regelwerke, insbesondere die ASME-XI Ermüdungsrissswachstums-Grenzkurven und die BWR VIP 60 Spannungsrissskorrosions-Grenzkurven führte zum Resultat, dass bei spezifischen Lastbedingungen die heutigen Kurven nicht konservativ sind.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Die Fragestellung des Projektes ist unverändert aktuell. Das Projekt ist gut mit dem 5. EU-Rahmenprogramm abgestimmt und die internationale Zusammenarbeit des PSI ist vorbildlich. Die Resultate im Zusammenhang mit der Konservativität der Regelwerke sind für die HSK-Aufsicht von besonderer Wichtigkeit.

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Auf der Basis der erreichten Erkenntnisse ist ein Programm für die Weiterführung der Forschung auf dem Gebiet der Risskorrosion, unter der Verwendung der Resultate aus RIKORR definiert worden. Das Programm soll über drei Jahre bis 2005 laufen. Es beinhaltet die folgenden Schwerpunkte:

- Erweiterung der SpRK-, DRK- und SwRK-Risswachstumsdatenbasis unter SWR/NWC-Bedingungen, insbesondere für RDB-Schweißnähte und ihre WEZ sowie bei deutlich tieferen Belastungen mit einer möglichst genauen Anpassung der Systembedingungen an reale SWR-Transienten.
- Bewertung der Schutzwirkung der HWC-Fahrweise bezüglich der Risskorrosion in RDB-Stählen bei Systembedingungen (Temperatur/Belastung/Werkstoff) unter denen bei der NWC-Fahrweise die ASME XI SwRK- und die BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurven als nicht konservativ befunden wurden.
- Untersuchung zum Einfluss des Korrosionspotentials auf das SwRK-Risswachstum.
- Teilnahme am internationalen ICG-EAC-Ringversuch zur Risskorrosion in Nickel-Basis-Legierungen (Alloy 600/Inconel 182) unter SWR- und DWR-Bedingungen (2003-2005, 22 Institutionen aus USA, Europa und Asien)

Die ersten Punkte stellen eine Vertiefung der bisherigen Erkenntnisse dar und sind aus der Sicht der HSK relevant für die Beurteilung des Zustandes von nicht austauschbaren Komponenten des Primärkreises im Bereich der Auslegungsbasis oder Auslegungsbasis überschreitend. Ein Schweizer Kernkraftwerk betreibt seit 2 Jahren eine HWC-Fahrweise, kombiniert mit der Einspeisung von Edelmetallen. Ein zweites Kernkraftwerk ist in der Phase der Evaluation. Der Einfluss dieser Fahrweise auf die Integrität der ferritischen Bauteile ist noch wenig abgeklärt.

Die Teilnahme am internationalen ICG-EAC-Ringversuch ist für die HSK im Zusammenhang mit den verschiedenen aufgetretenen Schadensfällen an Primärkomponenten von hoher Wichtigkeit. Insbesondere im Bereich der Mischnähte an den RDB-Stützen mit Nickelbasislegierungen (Alloy 600 / Inconel 182) und an den Durchführungen im Deckel der Druckgefäße. Mit diesem Programm kann sichergestellt werden, dass die internationale Erfahrung und damit der Stand von Wissenschaft und Technik der HSK zugänglich und bekannt sind.

RIKORR

RISSKORROSION IN DRUCKFÜHRENDEN FERRITISCHEN KOMPONENTEN DES PRIMÄRKREISLAUFES VON SWR

Autor und Koautoren	H.P. Seifert, S. Ritter, U. Ineichen, U. Tschanz, B. Gerodetti
beauftragte Institution	Paul Scherrer Institut
Adresse	Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 310 44 02, hans-peter.seifert@psi.ch , www.psi.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	37689 / 77428
Dauer des Projekts (von – bis)	01.01. 2000 bis 31.12. 2002

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wird das Risskorrosionsverhalten von ferritischen Reaktordruckbehälter(RDB)-Stählen (unbeeinflusster Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszonen (WEZ)) und von RDB-Schweissgutwerkstoffen unter transienten und stationären Siedewasserreaktor(SWR)-Betriebsbedingungen experimentell untersucht. Die Versuche unter konstanter Last und monoton ansteigender Last mit konstanter Lastrate sowie bei niederfrequenter zyklischer Belastung mit Bruchmechanikproben in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei Temperaturen zwischen 150 und 288 °C lieferten folgende Ergebnisse:

Dehnungsinduzierte Risskorrosion (DRK) und Schwingrisskorrosion (SwRK): Als wesentliche Einflussparameter wurden das Korrosionspotential (ECP), der Sulfat-Gehalt und die Temperatur der Umgebung, der Schwefel-Gehalt des Stahls sowie die Belastungsgeschwindigkeit und –höhe identifiziert. Die DRK-Anfälligkeit nimmt mit ansteigendem ECP, Sulfat-Gehalt der Umgebung und Schwefel-Gehalt des Stahls zu. Unter stark oxidierenden Bedingungen (ECP > 100 mV_{SWE}) wurde in allen Werkstoffen (RDB-Grundwerkstoff und Schweissgut) ein Maximum der DRK-Anfälligkeit bei mittleren Temperaturen ($\approx 200 - 250^\circ\text{C}$) und sehr niedrigen Dehnraten ($10^{-6} - 5 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$) beobachtet. Die DRK-Risswachstumsraten waren für alle Werkstoffe sehr ähnlich und nahmen mit ansteigender Dehnrates und ansteigender Temperatur bis zu einem Maximum bei 250 °C zu. Das Maximum der DRK-Anfälligkeit bei mittleren Temperaturen wird auf die Dynamische Reckalterung (Dynamic Strain Ageing, DSA) dieser Stähle zurückgeführt. Das DSA-Verhalten und der Gehalt an interstitiell gelöstem Stickstoff und Kohlenstoff können demnach ebenso wichtig sein wie der Schwefel-Gehalt dieser Stähle. In zyklischen Versuchen wurde unter stark oxidierenden Bedingungen (ECP > 100 mV_{SWE}) für alle Temperaturen und Werkstoffe eine Zunahme des SwRK-Rissfortschritts pro Zyklus mit abnehmender Belastungsfrequenz beobachtet. Stabiles, stationäres SwRK-Risswachstum wurde bis hinab zu sehr niedrigen Frequenzen von 10^{-5} Hz festgestellt. Die SwRK-Risswachstumsraten waren für alle Werkstoffe sehr ähnlich und nahmen mit ansteigender Temperatur bis zu einem Maximum bei 250 C zu.

Konservativität der Regelwerke: Die ASME XI Ermüdungsrisswachstums-Grenzkurven des ASME BPV Regelwerks können bei niederfrequenter, zyklischer Belastung ($< 10^{-2}$ Hz) unter simulierten SWR-Bedingungen sowohl in RDB-Grund- als auch Schweissgutwerkstoffen deutlich überschritten werden und sind deshalb im Gegensatz zu hohen Belastungsfrequenzen nicht konservativ. Diese niederfrequenten Belastungen sind charakteristisch für Anfahr- und Abfahrvorgänge sowie für spezielle Betriebszustände mit Temperaturschichtungsphänomenen. Für eine bessere Bewertung sind weitere Experimente bei niedrigerer Belastungshöhe und insbesondere genauere Informationen zu den wasserchemischen und lokalen thermomechanischen Randbedingungen unter diesen Betriebsbedingungen notwendig. Die BWR VIP 60 Spannungsrisskorrosions(SpRK)-Grenzkurven für das SpRK-Risswachstum unter stationären SWR-Bedingungen können sowohl bei kleinen Lastfluktuationen („Ripple Loading“) als auch bei mittleren Temperaturen (200 – 250°C) für RDB-Stähle, die eine ausgeprägte DSA-Anfälligkeit zeigen, überschritten werden. Die Grenzkurven sind deshalb auf ihre Gültigkeit für RDB-Schweissnähte und WEZ und insbesondere für den Speisewasserstutzen ($T \approx 220 - 270^\circ\text{C}$, kleine Lastfluktuationen nicht ausschliessbar) zu überprüfen. Für den RDB-Grundwerkstoff im stationären SWR-Leistungsbetrieb ($T \approx 270 - 290^\circ\text{C}$, \approx statische Belastung) sind die SpRK-Grenzkurven durch umfassende Laborexperimente bestätigt.

1. Projektziele

1.1 Technischer Hintergrund

Sicherheit und Lebensdauer von Leichtwasserreaktoren (LWR) werden massgeblich durch die Strukturintegrität des Reaktordruckbehälters (RDB) bestimmt. Neben Ermüdung und Strahlenversprödung ist auch die Risskorrosion als relevanter Alterungsmechanismus für den RDB zu betrachten. Die Gewährleistung eines sicheren Anlagenbetriebes setzt eine genaue Kenntnis der Systembedingungen voraus, die zur Risskorrosion führen können. Zuverlässige quantitative Daten zur Initiierung und zum Wachstum von Korrosionsrissen sowie ein genaues Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen sind wesentlich für eine genaue Bewertung der möglichen Auswirkungen der Risskorrosion auf die RDB-Strukturintegrität und für die Definition von gezielten Abhilfe- und Gegenmassnahmen.

Basierend auf der äusseren mechanischen Belastung lassen sich drei Grundtypen des korrosionsgestützten Risswachstums (EAC) unterscheiden, die sich nach Tabelle 1 den verschiedenen LWR-Betriebsbedingungen zuordnen lassen [1].

Korrosionsgestütztes Risswachstum (EAC)			
Mechanismus	SpRK Spannungsrissskorrosion	DRK Dehnungsinduzierte Rissskorrosion	SwRK Schwingungsrissskorrosion
Belastungsart	statisch	dynamisch (monoton ansteigend oder sehr niederzyklisch)	zyklisch (nieder- oder hochzyklisch)
LWR Betriebsbedingungen	stationärer Leistungsbetrieb	Anfahr-/Abfahrvorgänge Temperaturschichtung	thermische Ermüdung Temperaturschichtung
Quantitative Charakterisierung	BWR VIP 60 Disposition Lines	weitgehend ausstehend	ASME III und XI
Projekte am PSI	SpRK II CASTOC	RIKORR CASTOC	CASTOC

Tabelle 1: Rissskorrosionsarten in niedriglegierten Stählen unter SWR-Bedingungen.

Fälle von betrieblichen Rissbildungen durch korrosionsgestütztes Risswachstum in druckführenden ferritischen Komponenten waren in der Vergangenheit relativ selten. Die Schadensfälle traten meist in Siedewasserreaktoren (SWR) und nur sehr selten in Druckwasserreaktoren (DWR) auf [2]. Am häufigsten betroffen waren Rohrleitungen, selten Druckbehälter und extrem selten Reaktordruckbehälter [2]. In den meisten dieser Fälle waren sowohl dynamische mechanische Zusatzbeanspruchungen (z. B. durch Temperaturschichtungsphänomene, Temperatur- und Druckzyklen während transienter Betriebsbedingungen, z.B. Anfahr-/Abfahrvorgänge) als auch oxidierende Umgebungsbedingungen involviert [2]. Die aufgetretenen Fälle werden der DRK oder der niederzyklischen SwRK zugeordnet [1, 3]. Unter stationären SWR-Normalbetriebsbedingungen, d. h. bei vorwiegend statischer mechanischer Belastung von Behältern und Rohrleitungen und hoher Reinheit des Speise- und Reaktorwassers, wurde bislang kein Korrosionsrissswachstum beobachtet [1 - 3].

Umgebungseffekte sind in den für die Ermüdungsauslegung und -überwachung geltenden und angewandten kerntechnischen Regelwerken bisher nicht direkt (ASME-Code III zur Rissinitiierung) oder nur zum Teil (ASME Code XI zum Risswachstum) berücksichtigt. Neuere Untersuchungen zeigen aber, dass unter gewissen betriebsrelevanten Kombinationen aus Umgebung, Belastung und Werkstoff die Grenzkurven in den entsprechenden Regelwerken nicht immer konservativ sind [4 - 11]. Dennoch decken die Regelwerke die meisten Betriebszustände auch bei Berücksichtigung möglicher Umgebungseffekte konservativ ab und waren in der Vergangenheit auch recht erfolgreich im Vermeiden von Ermüdungsschäden. Sowohl die Betriebserfahrung [12] als auch neuere Laboruntersuchungen [13] deuten darauf hin, dass zumindest

Anlagenzustände, bei denen es zu Temperaturschichtungsphänomenen in Behälterstutzen und den angrenzenden Rohrleitungen kommen kann, sowie gewisse Änderungen von Betriebszuständen (wie z. B. das Anfahren und Abfahren einer Anlage) durch die Regelwerke nicht immer konservativ abgedeckt sind.

Bei den für diese Betriebszustände charakteristischen mittleren Temperaturen (120 - 290 °C), niedrigen Belastungsfrequenzen ($< 10^{-3}$ Hz) und für den SWR charakteristischen hohen Korrosionspotentialen liegen zur Zeit keine oder nur stichprobenhafte DRK- und SwRK-Risswachstumsdaten vor. Aufgrund der in diesem Temperatur-/Belastungsgeschwindigkeitsbereich in diesen Stählen beobachteten Dynamischen Reckalterung (DSA) kann eine im Vergleich mit dem RDB-Grundwerkstoff erhöhte Anfälligkeit von Schweissnähten und ihrer Wärmeeinflusszonen gegenüber DRK und SwRK nicht ausgeschlossen werden [14 - 16]. Am PSI wurde deshalb ein neues Risskorrosionsprojekt gestartet, um diese bestehenden Wissenslücken und Unsicherheiten zu beseitigen und die tatsächlich vorhandenen Sicherheitsmargen besser abschätzen zu können.

1.2 Zielsetzungen und Arbeitsprogramm des Forschungsvorhaben

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wird das Risskorrosionsverhalten von ferritischen RDB-Stählen unter transienten SWR-Betriebsbedingungen experimentell untersucht. Im Vordergrund steht die Ermittlung belastbarer DRK-Risswachstumsraten, die für Sicherheits- und Strukturintegritätsbewertungen verwendet werden können. Neben verschiedenen RDB-Stählen mit unterschiedlichen Schwefel- und Aluminium-Gehalten wird insbesondere das Risskorrosionsverhalten der Umfangsschweissnaht eines nicht eingesetzten RDB (Biblis C, PWR, 1200 MWe, Fertigung 1976) und ihrer Wärmeeinflusszone (WEZ) untersucht. Die hinsichtlich der DRK besonders kritischen Korrosionssystembedingungen werden mittels einer Parametersensitivitätsstudie identifiziert. Dies ermöglicht es, kritische Komponenten und Betriebszustände herauszufinden, die nicht durch die geltenden Regelwerke zur Ermüdungsauslegung und -überwachung konservativ abgedeckt sind.

In einem zweiten Teil ist vorgesehen, die offenen Fragen zur SpRK abzuklären. Im Vordergrund steht dabei die SpRK-Anfälligkeit von RDB-Schweissnaht und WEZ im transientenfreien SWR-Dauerbetrieb. Abschliessend werden der Einfluss der Temperatur und die möglichen Auswirkungen von kleinen Lastfluktuationen infolge Druck- und Temperaturschwankungen auf das SpRK-Risswachstum bei überwiegend statischer Belastung („Ripple Loading“) untersucht.

1.3 Zielsetzungen und Arbeitsprogramm für 2002

Die wesentlichen Zielsetzungen und geplanten Arbeiten für das Jahr 2002 umfassten [17 – 19]:

- Abschluss der Parametersensitivitätsstudie zum Einfluss von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit auf das EAC-Risswachstumsverhalten mit Proben der Wärmeeinflusszone (WEZ) der Biblis C Umfangsschweissnaht (Kap. 2.1.4 und 2.1.5).
- - Charakterisierung der SpRK-Anfälligkeit der WEZ bei verschiedenen Temperaturen (Kap 2.1.6).
- SpRK-Versuche unter konstanter Last und mit kleinen Lastfluktuationen („Ripple Loading“) bei verschiedenen K_I -Werten im Temperatur-Bereich maximaler SpRK-Anfälligkeit unter realitätsnahen wasserchemischen Bedingungen (Kap. 2.1.6)
- Identifikation der für die Risskorrosion relevanten, transienten SWR-Betriebszustände und kritischen Komponentenbereiche und Ausarbeitung von Schlussfolgerungen und Empfehlungen bezüglich Regelwerken und Kraftwerksbetrieb (siehe Abschlussbericht [20]).
- Konferenzbeiträge:
 - ICG-EAC 2002 (April 2002, Lyon, Frankreich) [21, 22].
 - NACE Corrosion 2002 (April 2002, Denver, USA) [23].
 - ICC 2002 (September 2002, Granada, Spanien) [24].

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

2.1 Experimentelle Parameterstudie zur Risskorrosion

2.1.1 Untersuchte Werkstoffe

In den Experimenten wurden fünf verschiedene niedriglegierte RDB-Stähle sowie eine Schweissnaht von einem nicht in Betrieb gesetzten RDB (Biblis C, DWR, 1200 MWe, 1976) untersucht (Tabelle 2 - 4). Diese Stähle werden weltweit und in schweizerischen Kernkraftwerken in druckumschliessenden Komponenten eingesetzt.

Werkstoff	Bez.	Norm	S-Gehalt [Gew. %]	Wärmebehandlung
20 MnMoNi 5 5 = SA 508 Class 3	a	KTA 3201.1	0.004	Härtung: 910 - 920 °C / 6 h / WQ Anlassen: 640 - 650 °C / 9.5 h / OK
SA 508 Class 2 = 22 NiMoCr 3 7	b	ASME	0.004	Härtung: 900° C / 8 h / WQ Anlassen: 600 °C / 9 h / Luft
SA 533 B Class 1 = 20 MnMoNi 5 5	c	ASME	0.018	Normalisierung: 915°C / 12 h / Luft Härtung: 860 °C / 12 h / WQ Anlassen: 660 °C / 12 h / OK Spannungsarmglühung: 610°C/40h/OK 550°C/12h/OK 550°C/12h/OK
22 NiMoCr 3 7 = SA 508 Class 2	d	KTA 3201.1	0.007	Härtung: 890 - 900 °C / 6.83 h / WQ Anlassen: 640 - 650 °C / 17.25 h / Luft Spannungsarmglühung*
RDB-Schweissnaht S3 NiMo 1	e	KTA 3201.1	0.007	*Spannungsarmglühung: 540 - 555 °C / 59 h / 465 °C / 590 - 610 °C / 21 h / 465 °C / 590 - 605 °C / 11.25 h / Luft
20 MnMoNi 5 5 = SA 508 Class 3	f	KTA 3201.1	0.015	Härtung: 900°C / 9 h / WQ Anlassen: 650 °C / 34 h / Luft / 660 °C / 14 h / Luft Spannungsarmglühung: 550°C / 46.5 h / 600 °C / 8 h / Luft
WEZ der RDB-Schweissnaht 22 NiMoCr 3 7	g	KTA 3201.1	0.007	Spannungsarmglühung: 540 - 555 °C / 59 h / 465 °C / 590 - 610 °C / 21 h / 465 °C / 590 - 605 °C / 11.25 h / Luft

WQ: abgeschreckt in Wasser OK: abgekühlt im Ofen

Tabelle 2: Verwendete Werkstoffe.

Die chemische Zusammensetzung, Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften der untersuchten Stähle erfüllen die Anforderungen der entsprechenden kerntechnischen Regelwerke und Normen (KTA, ASME-BPV) für die druckführenden Komponenten des Primärkreislaufes von LWR [1]. Im wesentlichen unterscheiden sich die untersuchten Stähle in ihren Aluminium- und Schwefelgehalten bzw. in ihrer DSA-Anfälligkeit und ihrem Gehalt an MnS-Einschlüssen, die das Risskorrosionsverhalten massgeblich beeinflussen können [14, 25, 26].

Werkstoff		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu
20 MnMoNi 5 5	a	0.21	0.25	1.26	0.004	0.004	0.15	0.5	0.77	0.008	0.013	0.06
SA 508 Cl. 2	b	0.21	0.27	0.69	0.005	0.004	0.38	0.63	0.78	0.006	0.015	0.16
SA 533 B Cl. 1	c	0.25	0.24	1.42	0.006	0.018	0.12	0.54	0.62	0.007	0.03	0.15
22 NiMoCr 3 7	d	0.215	0.20	0.91	0.008	0.007	0.42	0.53	0.88	0.007	0.018	0.04
Schweissnaht	e	0.054	0.17	1.19	0.013	0.007	0.04	0.55	0.94	0.006	0.0053	0.06
20 MnMoNi 5 5	f	0.26	0.32	1.44	0.016	0.015	0.15	0.61	0.63	0.02	0.029	0.17
WEZ	g	0.215	0.20	0.91	0.008	0.007	0.42	0.53	0.88	0.007	0.018	0.04

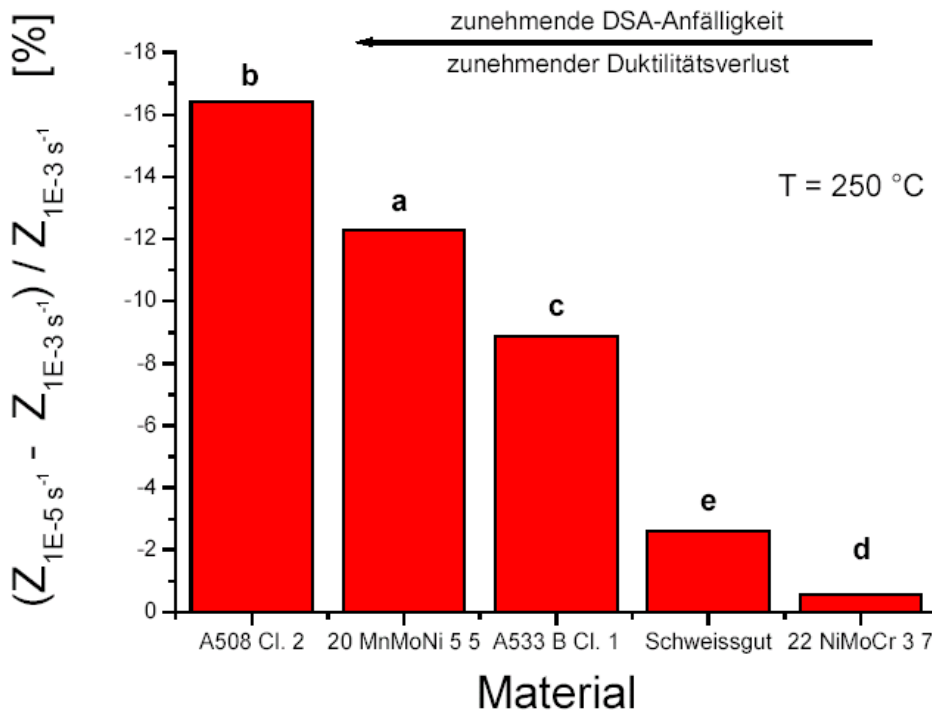
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung (in Gew.%).

Werkstoff		Raumtemperatur				288 °C
		R _{P0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	R _{P0.2} [MPa]
20 MnMoNi 5 5	a	485	648	19.3	72.1	418
SA 508 Cl. 2	b	448	611	17.9	71.0	396
SA 533 B Cl. 1	c	456	605	23.4	59.9	412
22 NiMoCr 3 7	d	467	600	17.3	71.9	400
Schweissnaht	e	492	592	17.4	73.3	430
20 MnMoNi 5 5	f	508	664	20	61	439
WEZ	g	-	-	-	-	640*

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften (Zugversuch DIN 50145, B5X50 Proben). Mittelwerte von Zugproben in T- und L-Richtung und ¼ T bis ¾ T-Lage. (R_{P0.2}: Streckgrenze, R_m: Zugfestigkeit, A₅: Bruchdehnung, Z: Einschnürung, *: mit instrumentierter Härte-messung in der Mitte der WEZ).

DSA-Verhalten der RDB-Stähle:

Das DSA-Verhalten der eingesetzten RDB-Stähle wurde mittels langsamen Zugversuchen bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten sowie durch Messung der inneren Reibung eingehend charakterisiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und der Zusammenhang zwischen der DSA- und Risskorrosionsanfälligkeit sind in einem PSI-Bericht [27] detailliert diskutiert. Eine ausgeprägte DSA-Anfälligkeit kann insbesondere bei mittleren Temperaturen (180 – 270 °C) und langsamen Dehnraten/niedrigen Belastungsfrequenzen zu einer Erhöhung der Risskorrosions-Anfälligkeit führen. Alle untersuchten Stähle zeigten charakteristische Merkmale der DSA, wenn auch in unterschiedlichem Ausmass. Die in Zugversuchen beobachtete DSA-Anfälligkeit nahm dabei in folgender Reihenfolge der Materialien zu: d, e, c, a, b. Figur 1 zeigt, wie die Brucheinschnürung Z in Zugversuchen (als Mass für die Duktilität) im DSA-Bereich bei 250 °C bei einer Reduktion der Dehnrates von 10⁻³ auf 10⁻⁵ s⁻¹ für alle Werkstoffe deutlich, aber unterschiedlich stark abnahm (negative Dehnratenabhängigkeit). Die relative Abnahme der Brucheinschnürung ist ein direktes Mass für die DSA-Anfälligkeit und den Duktilitätsverlust infolge DSA der untersuchten Werkstoffe.



Figur 1: Vergleich der DSA-Anfälligkeit der eingesetzten RDB-Stähle. Die relative Abnahme der Brucheinschnürung Z in Zugversuchen bei 250 °C bei einer Reduktion der Dehnrates von 10^{-3} auf 10^{-5} s $^{-1}$ ist ein gutes Mass für die DSA-Anfälligkeit der Werkstoffe.

Mikrostruktur der RDB-Stähle (Grundwerkstoff):

Die RDB-Stähle a, c, d und f besitzen eine granulare bainitische Mikrostruktur mit einer mittleren Korngrösse (ehemalige Austenitkörner) von 10 bis 20 μm . Legierung b besitzt eine gemischte bainitisch/ferritisch-perlitische Mikrostruktur mit einer mittleren Korngrösse von 20 μm . Die räumliche Verteilung der Mangansulfideinschlüsse ist bis auf Legierung f in allen Grundwerkstoffen homogen. Der RDB-Stahl f hingegen zeigt sowohl ausgeprägte, bänderförmige Schwefel-Segregationszonen sowie viele lokale Stellen mit Clustern von MnS-Einschlüssen. Der lokale Schwefel-Gehalt variiert in diesem Material dementsprechend sehr stark zwischen 0.003 und 0.053 Gew.% S. Eine solch inhomogene Schwefelverteilung ist durchaus charakteristisch für ältere RDB (< 1970), insbesondere in sehr dickwandigen Komponentenbereichen.

Mikrostruktur von Schweissnähten und Wärmeeinflusszone der Biblis C Schweissnaht:

Die Schweissnaht, der RDB-Grundwerkstoff sowie dessen Wärmeeinflusszone wurden am PSI eingehend metallographisch und metallurgisch charakterisiert. Die Ergebnisse der chemischen Analysen, der metallographischen Untersuchungen (Schwefelabdrücke, Gefügeanalysen mittels Lichtmikroskopie und REM, Mikrohärtmessungen), der Werkstoffprüfungen (Zugversuche, Härteprüfung, Kerbschlagversuche) und der Eigenspannungsmessungen (Neutronen- und Röntgendiffraktometrie) sind in einem PSI-Bericht [25] zusammengestellt. In Tabelle 5 sind die wichtigsten Merkmale von Schweissgut, WEZ und RDB-Grundwerkstoff miteinander verglichen.

Aufgrund der für Schweissnähte typischen extrem feinen Verteilung von sehr kleinen, kugelförmigen MnS-Einschlüssen wurden in der Vergangenheit den RDB-Schweissnähten ein besseres Risskorrosionsverhalten als dem RDB-Grundwerkstoff zugeordnet. Der tiefe Aluminium-Gehalt im Schweissgut (hier 0.0053 Gew.% Al) führt aber zu einem erhöhten Gehalt an interstitiell, d. h. auf Zwischengitterplätzen, gelöstem, „freiem“ Stickstoff, der nicht in Form von Aluminiumnitriden oder Carbonitriden gebunden ist und somit auch zu einer ausgeprägteren DSA-Anfälligkeit. Ebenso können in gewissen Bereichen der Schmelzlinie/WEZ, abhängig von der thermischen Geschichte und Wärmebehandlung, eine erhöhte Konzentrationen an freiem Kohlenstoff und

Stickstoff auftreten. Als Folge kann zumindest bei gewissen Kombinationen von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit eine gegenüber dem Grundwerkstoff deutlich erhöhte EAC-Anfälligkeit der Schweißnaht und der WEZ nicht ausgeschlossen werden [3, 26, 27]. Zudem besteht für den aufgehärteten Bereich der Grobkornzone der WEZ die Möglichkeit für eine Anfälligkeit auf trans- oder interkristalline, wasserstoffinduzierte SpRK bei Temperaturen unterhalb von 200 °C [27, 33].

Die Vielzahl beobachteter Gefügevarianten und der starke Gefügegradient im Bereich der Schmelzlinie/WEZ erfordern das Testen einer Vielzahl verschiedener Probenlagen und -orientierungen aus unterschiedlichen Regionen der Schweißlinie/WEZ. Die geringe Ausdehnung von gewissen kritischen Regionen im Bereich der Schmelzlinie/WEZ macht zusätzlich die Verwendung spezieller Probenformen mit Rundkerben notwendig.

Parameter	Schweissgut	Schmelzlinie / WEZ	Grundwerkstoff
Material	S3 NiMo 1		22 NiMoCr 3 7
S	0.007 Gew.%		0.007 Gew.%
Al	0.0053 Gew.%		0.018 Gew.%
C	0.054 Gew.%		0.215 Gew.%
Nfrei	16 ppm		3 ppm
Mikrostruktur	ferritisch	Weiter Bereich von Mikrostrukturen: CGWEZ, ICWEZ, ...	bainitisch
Korngrösse	< 6 µm		10 – 20 µm
MnS-Einschlüsse	Sehr klein, feindispers, sphärisch		Klein, sphärisch – gross, länglich
Rp (288 °C) T-Orientierung	470 MPa	640 MPa (Mitte der WEZ)	400 MPa
Härte	210 – 280 HV 0.05 210 – 240 HV 1	240 – 350 HV 0.05 190 – 320 HV 1	200 – 250 HV 0.05 170 – 200 HV 1
DSA	Ja, schwach	?	Ja, schwach
Bemerkung		Ausdehnung: 2 – 4 mm Eigenspannung < 40 MPa	

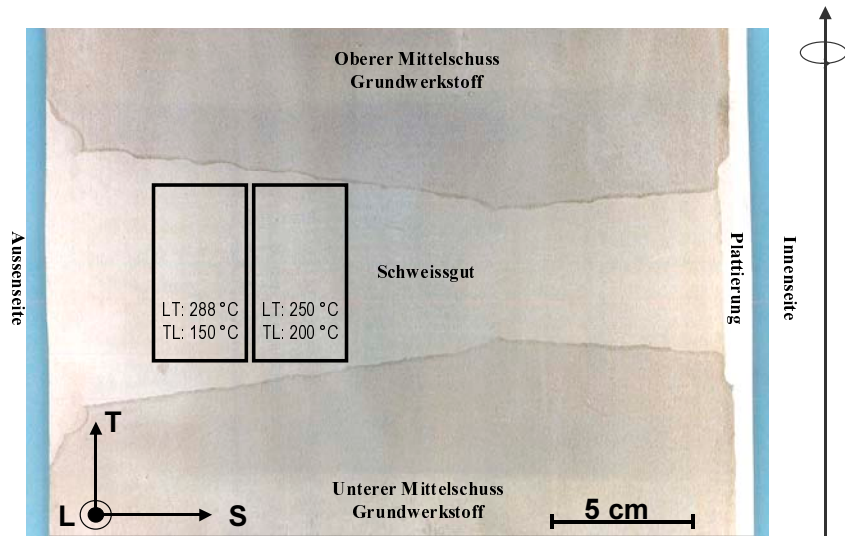
Tabelle 5: Vergleich der wichtigsten Merkmale von Schweissgut, Wärmeeinflusszone und Grundwerkstoff der Biblis C Umfangsschweißnaht.

Die gemessenen Eigenspannungen sind aufgrund der langen Spannungsarmglühung knapp unterhalb der Anlasstemperatur sehr klein. Die maximal gemessene Normalspannung betrug 40 MPa und liegt damit um eine Größenordnung unterhalb der durch die äussere Belastung in den Versuchen hervorgerufenen Nennspannung im Probenligament. Ein dominanter Einfluss der Eigenspannungen auf das Korrosionsrisswachstum wird deshalb bei diesen hohen Belastungen nicht erwartet und auf eine Berücksichtigung der Eigenspannung kann deshalb verzichtet werden.

2.1.2 Lage und Orientierung der WEZ- und Schweissgutproben

Die Lage und Orientierung der Schweissgut- und Wärmeeinflusszonenproben sind in Figur 2 und 3 dargestellt. Beim Schweissgut kamen Proben mit der Orientierung TL (Risswachstumsrichtung in Umfangsrichtung) und LT (Risswachstumsrichtung in axialer Richtung) zum Einsatz. Die Rissfläche und –länge erstreckte sich dabei über mehrere Schweissraupen und umfasste deshalb an einigen wenigen Lokalitäten auch den rekristallisierten Grenzbereich zwischen zwei Raupenlagen. Bei der TS- und TL-Orientierung der WEZ-Proben verläuft der Riss entlang der WEZ in Dicken- bzw. Umfangsrichtung. Es wurde versucht, den Schwingriss an Luft möglichst in die Nähe der Härtespitze im Bereich der Grobkornzone der WEZ zu legen. Da die WEZ/Schmelzlinie aufgrund der einzelnen Schweissraupen und dem leichten Einbrand einen wellenförmigen

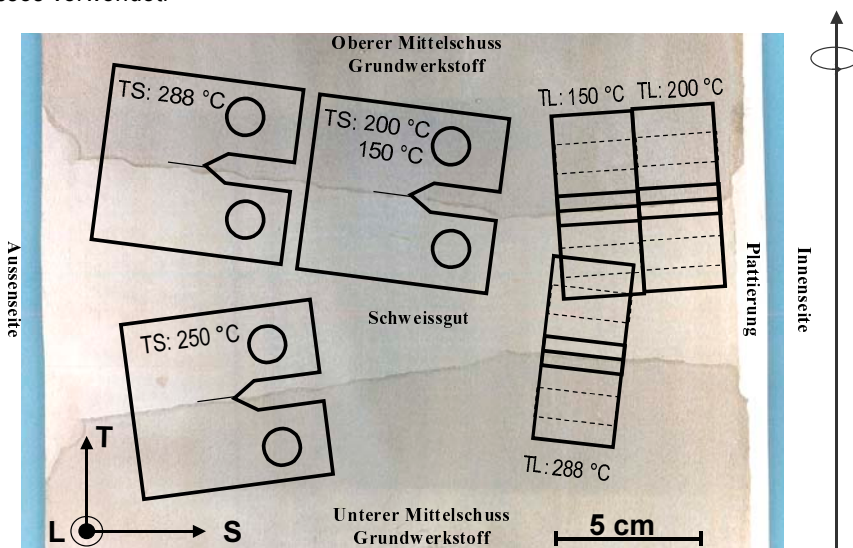
Verlauf zeigt, lag der Schwingriss nicht in jedem Fall vollständig über die ganze Probenbreite und die ganze Risslänge in der Mitte der WEZ. In gewissen Bereichen lagen Teile des Risses auch in der Schmelzlinie oder am Rand der WEZ im subkritischen Bereich (maximale Temperatur beim Schweißen $T_{max} < A_{c1}$).



Figur 2: Lage und Orientierung der Schweißgutproben.

2.1.3 Versuchsdurchführung

Da die Versuchsdurchführung und –auswertung sowie der Messaufbau im Rahmen des BFE-Jahresberichtes 2000 [28] und in einem PSI-Bericht [29] detailliert beschrieben sind, werden im folgenden nur die wesentlichsten Aspekte kurz beschrieben. Das Risskorrosionsverhalten der verschiedenen Stähle wurde in Versuchen unter konstanter Last (SpRK) und in Versuchen mit langsam monoton ansteigender oder niederzyklischer Last (DRK, SwRK) in modernen Heisswasserkreisläufen unter simulierten SWR/NWC-Bedingungen in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei einer Temperatur von 150 bis 288 °C experimentell untersucht. Belastungsbedingungen und Wasserchemie (Sulfat- und Sauerstoffgehalt) wurden hierbei gezielt variiert. Die Untersuchungen wurden mit 25 mm dicken bruchmechanischen Kompaktzugproben (1T-C(T)) durchgeführt, die hauptsächlich in T-L- oder L-T-Richtung (entsprechend ASTM E 399) gefertigt wurden. Vor dem Versuchsbeginn wurden die Proben bei Raumtemperatur in Laborluft mit einem Schwingriss definierter Länge versehen. Alternativ wurden für WEZ-Proben auch Kompaktzugproben mit Rundkerben [30] anstelle des Schwingrisses verwendet.



Figur 3: Lage und Orientierung der WEZ-Proben.

Die Heisswasserkreisläufe mit Autoklaven mit integrierten elektromechanischen Zugmaschinen erlaubten es, die im Betrieb auftretenden mechanischen, thermischen und wasserchemischen Bedingungen realitätsnah zu simulieren. Das Autoklavenvolumen von 10 Liter wurde 3 bis 4-mal pro Stunde ausgetauscht. Dies ist zur Aufrechterhaltung konstanter wasser- und elektrochemischer Bedingungen ausreichend. Im Bereich der Probe betrug die Strömungsgeschwindigkeit einige mm/s. Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit, Durchfluss, Druck und Temperatur wurden im Vorlauf- und Rücklauf des Niederdruck-/temperaturkreislaufs kontinuierlich gemessen. Zusätzlich wurde im Hochdruck-/temperaturbereich Last, Temperatur, Druck, Korrosions- und Redoxpotential erfasst.

Der gewünschte Sauerstoffgehalt und die Leitfähigkeit wurden über die Messwerte im Vorlaufwasser durch abwechselndes Einblasen von Argon und eines Argon/Sauerstoff-Gemisches bzw. durch die Zudosierung von 0.02 molarer wässriger Na_2SO_4 -Lösung zum hochreinen Heisswasser ($< 0.06 \mu\text{S/cm}$) eingestellt. Die Sulfatkonzentration betrug zwischen $< 1 \text{ ppb}$ ($\kappa \leq 0.06 \mu\text{S/cm}$) und 365 ppb ($\kappa = 1.0 \mu\text{S/cm}$). Das Korrosionspotential wurde durch die Konzentration an gelöstem Sauerstoff eingestellt. Das Korrosionspotential der Proben und das Redox-Potential der Umgebung (Pt-Elektrode) wurden kontinuierlich mit einer externen Ag/AgCl-Referenzelektrode mit einem digitalen Multimeter mit hoher Eingangsimpedanz ($> 10^{14} \Omega$) gemessen [31].

Das Risswachstum während des Versuches wurde mit der Gleichstrompotentialsonde (DCPD) verfolgt. Für die Gleichstrompotentialsonde wurde experimentell eine Auflösungsgrenze von $5 \mu\text{m}$ ermittelt [29]. Nach dem Versuch wird das Risswachstum fraktographisch mit dem Rasterelektronenmikroskop ausgemessen und die kontinuierlichen Messungen, falls notwendig, mit Hilfe der fraktographischen Ergebnisse korrigiert [29]. Bei gleichmäßigem Risswachstum über die gesamte Probenbreite unterschieden sich die Ergebnisse der DCPD und der Fraktographie um weniger als 5 %.

2.1.4 Dehnungsinduzierte Risskorrosion (DRK)

Der Einfluss von Beanspruchungsgeschwindigkeit, Umgebung (ECP, Sulfat, Temperatur) und Werkstoff (Schwefel-Gehalt, Mikrostruktur) auf die DRK-Rissinitiierung und das DRK-Risswachstum wurde im Rahmen einer Parameterstudie in Versuchen mit langsam, monoton ansteigender Last mit konstanter Lastrate („Slow Rising Load“ (SRL) Tests) untersucht. Im BFE-Jahresbericht 2000 [28] wurde eingehend diskutiert, wie die DRK-Anfälligkeit und das DRK-Risswachstum niedriglegierter RDB-Stähle in sauerstoffhaltigem Heisswasser durch das synergistische Zusammenwirken von Beanspruchungsgeschwindigkeit, Umgebung (ECP, Sulfat) und des Schwefel-Gehaltes des Stahls kontrolliert werden. Der Einfluss der Temperatur und der DSA wurde im BFE-Jahresbericht 2001 [32] vertieft behandelt. Im folgenden sollen deshalb nur die neuen Ergebnisse zum Einfluss der Materialeigenschaften in Abhängigkeit von Temperatur, Beanspruchungsgeschwindigkeit und Umgebung phänomenologisch diskutiert werden. Eine zusammenfassende Darstellung und mechanistische Interpretation der Ergebnisse befindet sich im Zwischen- [27] und Abschlussbericht [30].

2.1.4.1 Einfluss der Mikrostruktur und des Wärmebehandlungszustandes

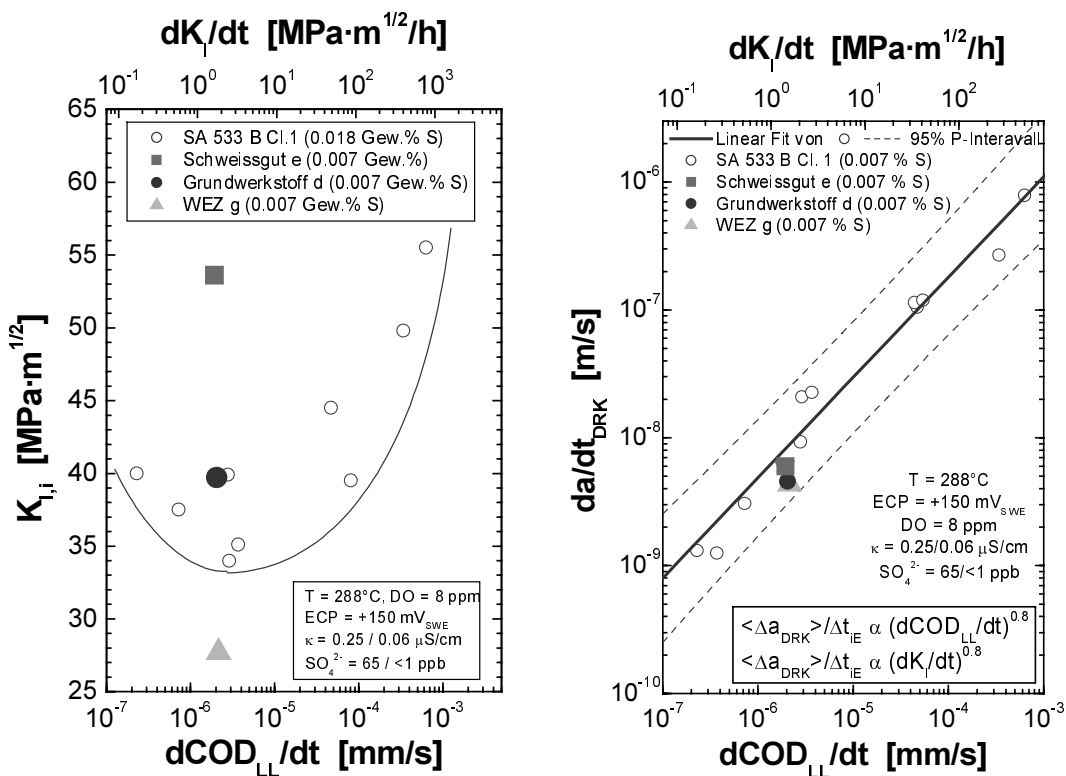
Der Einfluss der Mikrostruktur (Grundwerkstoff des Biblis C RDB-Mittelschusses, Schweissgut und Wärmeeinflusszone der Biblis C Umfangsschweissnaht) und des Wärmebehandlungszustandes (normalisiert, gehärtet, gehärtet und angelassen) wurde in Heisswasser mit einem Sauerstoff- und Sulfatgehalt von 8 ppm bzw. 65 ppb bei einer Temperatur von $288 \text{ }^\circ\text{C}$ im Beanspruchungsgeschwindigkeitsbereich maximaler DRK-Anfälligkeit untersucht. Die Eigenschaften der unterschiedlichen Gefügestände sind in Tabelle 5 und 6 verglichen.

Einfluss der Mikrostruktur:

Die Abbildung 4 zeigt den Einfluss der Mikrostruktur auf die DRK-Rissinitiierung und das DRK-Risswachstum. Zu Vergleichszwecken sind entsprechende Ergebnisse mit dem RDB-Stahl SA 533 B Cl. 1 (Legierung c) mit einem hohem Schwefel-Gehalt von 0.018 Gew.% S bei unterschiedlichen Beanspruchungsgeschwindigkeiten unter ansonsten identischen Bedingungen eingetragen. Der niedrigste Rissinitiierungswert $K_{i,1}$ wurde in der

Wärmeeinflusszone beobachtet, gefolgt vom Grundwerkstoff d (bainitische Mikrostruktur) und dem Schweissgut e (ferritische Mikrostruktur). Der Biblis C Grundwerkstoff (bainitisch, 0.007 Gew.% S) zeigt einen vergleichbaren Rissinitierungswert $K_{i,i}$ wie der RDB-Stahl SA 533 B Cl. 1 mit deutlich höherem S-Gehalt. Im Gegensatz zur DRK-Anrissanfälligkeit ist das DRK-Risswachstumsverhalten nach erfolgter Rissinitierung bei 288°C unter stark oxidierenden Bedingungen (+150 mV_{SWE}) sehr ähnlich. Die DRK-Risswachstumsraten aller drei Gefügestände liegen dabei innerhalb des Streubandes der Ergebnisse für den RDB-Stahl SA 533 B Cl. 1.

Die WEZ und das Schweissgut zeigen also bei 288 °C unter stark oxidierenden Bedingungen gegenüber dem unbeeinflussten Grundwerkstoff eine deutlich erhöhte bzw. reduzierte DRK-Anrissanfälligkeit, aber ein vergleichbares DRK Risswachstumsverhalten. Das hohe Korrosionspotential (bzw. der grosse Potentialgradient im Rissmundbereich) führt zu einer starken Anreicherung der S-Anionen (SO₄²⁻ im Bulk-Elektrolyt und S²⁻/HS⁻ infolge der Auflösung der MnS-Einschlüsse im Risskanal) im Rissspitzenelektrolyt, so dass in allen drei Gefügen der kritische Konzentrations-Grenzwert für sogenanntes „High-Sulphur“-Verhalten überschritten wird, woraus bei identischer Belastungsgeschwindigkeit ein vergleichbares Risswachstumsverhalten resultiert. Die gegenüber dem Grundwerkstoff reduzierte DRK-Anfälligkeit des Schweissgutes bei 288°C kann wegen dem identischen S-Gehalt und der vergleichbaren (und relativ geringen) DSA-Anfälligkeit vermutlich auf die günstige Morphologie der MnS-Einschlüsse im Schweissgut (extrem kleine, fein-dispers und homogen verteilte sphärische Einschlüsse) zurückgeführt werden. Zur Zeit ist noch unklar, ob die gegenüber dem Grundwerkstoff erhöhte DRK-Anrissempfindlichkeit der WEZ primär auf das stark unterschiedliche Deformationsverhalten in der WEZ (erhöhte Streckgrenze) oder durch eine unterschiedliche DSA-Anfälligkeit oder Morphologie der MnS-Einschlüsse zurückzuführen ist, da beide Grössen für die WEZ nur schwierig zu ermitteln und zu quantifizieren sind.



Figur 4: Einfluss der Mikrostruktur (Grundwerkstoff d, Schweissgut e, WEZ g) auf die DRK-Anrissanfälligkeit (links) und das DRK-Risswachstum (rechts) in sauerstoffhaltigem Heisswasser (288 °C, 8 ppm O₂, 65 ppb SO₄²⁻) bei einer Rissöffnungsrate von 2 – 3·10⁻⁶ mm/s. Zu Vergleichszwecken sind die Ergebnisse mit dem RDB-Stahl c bei verschiedenen Beanspruchungsgeschwindigkeiten unter ansonsten identischen Bedingungen eingetragen.

Einfluss des Wärmebehandlungszustands/Gefüges und der Streckgrenze/Härte:

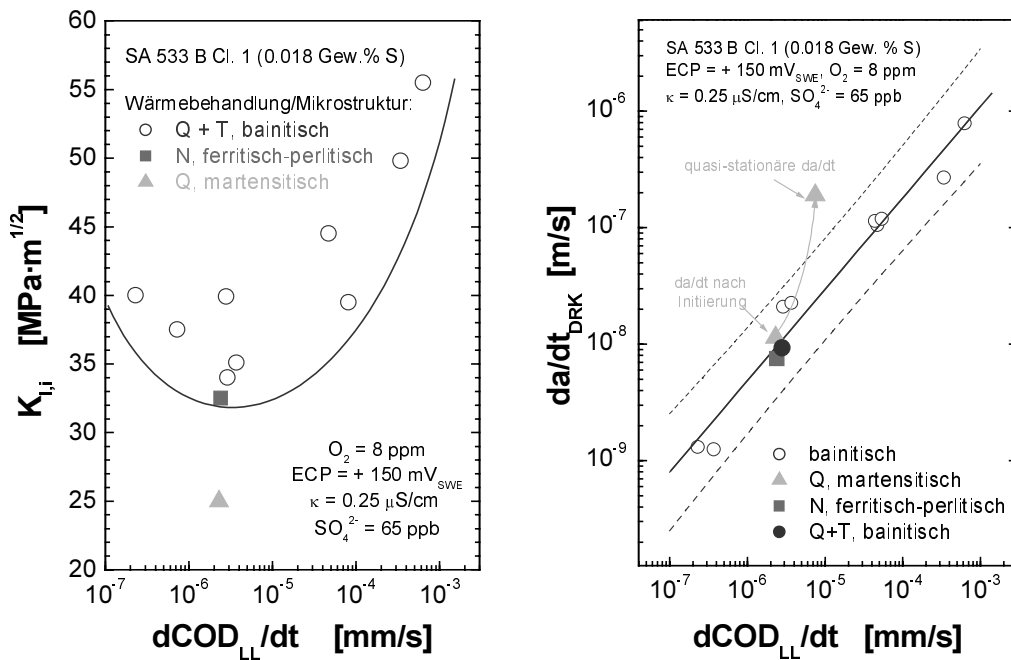
Unterschiedliche Gefügestände wurden in dem Stahl SA 533 B Cl. 1 mit hohem S-Gehalt (Legierung c) durch verschiedene Wärmebehandlungen erzeugt. Durch Austenitisieren und langsame Abkühlung im Ofen wurde ein gleichgewichtsnahes ferritisch-perlitische Gefüge eingestellt. Das ferritisch-perlitische Gefüge besitzt vergleichbare Festigkeitseigenschaften wie das bainitische Standard-Gefüge der RDB-Stähle. Durch Austenitisieren und anschliessendes Abschrecken in Wasser ohne Anlasswärmebehandlung wurde ein martensitisches Gefüge mit sehr hoher Festigkeit und Härte ($R_p = 960 \text{ MPa}$, 466 HV) erzeugt. Die unterschiedlichen Gefüge und Wärmebehandlungen sind in Tabelle 6 miteinander verglichen. Da die Morphologie der MnS-Einschlüsse durch die angewandten Wärmebehandlungen unverändert bleibt, kann die unterschiedliche EAC-Anfälligkeit auf die unterschiedliche Mikrostruktur und Streckgrenze zurückgeführt werden.

Legierung c, SA 533 B Cl. 1, 0.018 Gew.% S			
Parameter	Q + T	N	Q
Wärmebehandlung	915 °C/12 h/ 860 °C/12 h/WQ 635 °C / 12 h / FQ	900 °C / 30 min / FQ	900 °C / 30 min / WQ
Mikrostruktur	bainitisch	ferritisch-perlitisch	martensitisch
Vickershärte	197 HV10	260 HV10	466 HV10
$R_p^{288 \text{ °C}}$	411 MPa	577 MPa	960 MPa
Korngrösse	16 μm	15 μm	-

WQ: abgeschreckt in Wasser, FQ: abgekühlt im Ofen

Tabelle 6: Angewandte Wärmebehandlung und resultierende Gefüge in Legierung c.

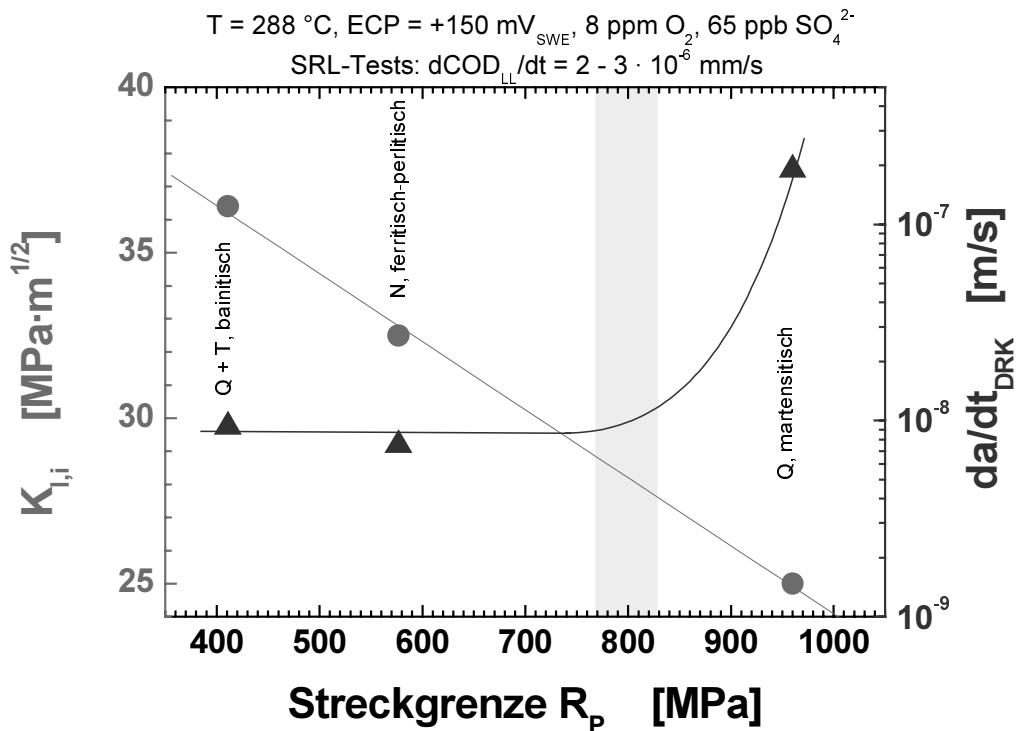
Die unterschiedlich wärmebehandelten Proben wurden unter Standardbedingungen ($ECP = + 150 \text{ mV}_{SWE}$, 8 ppm O_2 , 65 ppb SO_4^{2-}) bei einer Rissöffnungsrate von $2 - 3 \cdot 10^{-6} \text{ mm/s}$ ($dK_I/dt \approx 2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{h}$) im Bereich der maximalen DRK-Anfälligkeit in Heisswasser getestet. Die Abbildung 5 zeigt den Einfluss des Wärmebehandlungszustandes auf die DRK-Rissinitiiierung und das DRK-Risswachstum. Zu Vergleichszwecken sind auch Ergebnisse mit dem Standardgefüge bei unterschiedlichen Beanspruchungsgeschwindigkeiten unter ansonsten identischen Bedingungen eingetragen. Unter langsam, monoton ansteigender Last wurde im martensitischen Gefüge eine deutlich höhere DRK-Anfälligkeit und höhere DRK-Risswachstumsraten beobachtet als im bainitischen und ferritisch-perlitischen Gefüge, welche beide eine vergleichbare DRK-Anfälligkeit und DRK-Risswachstumsrate zeigten [27].



Figur 5: Einfluss des Wärmebehandlungszustandes (siehe Tabelle 6) bzw. Gefüges auf die DRK-Anrissanfälligkeit (links) und das DRK-Risswachstum (rechts) in sauerstoffhaltigem Heisswasser (288 °C, 8 ppm O₂, 65 ppb SO₄²⁻) bei einer Rissöffnungsrate von 2 - 3·10⁻⁶ mm/s. Zu Vergleichszwecken sind die Ergebnisse mit dem bainitischen Standardgefüge bei verschiedenen Beanspruchungsgeschwindigkeiten unter ansonsten identischen Bedingungen eingetragen.

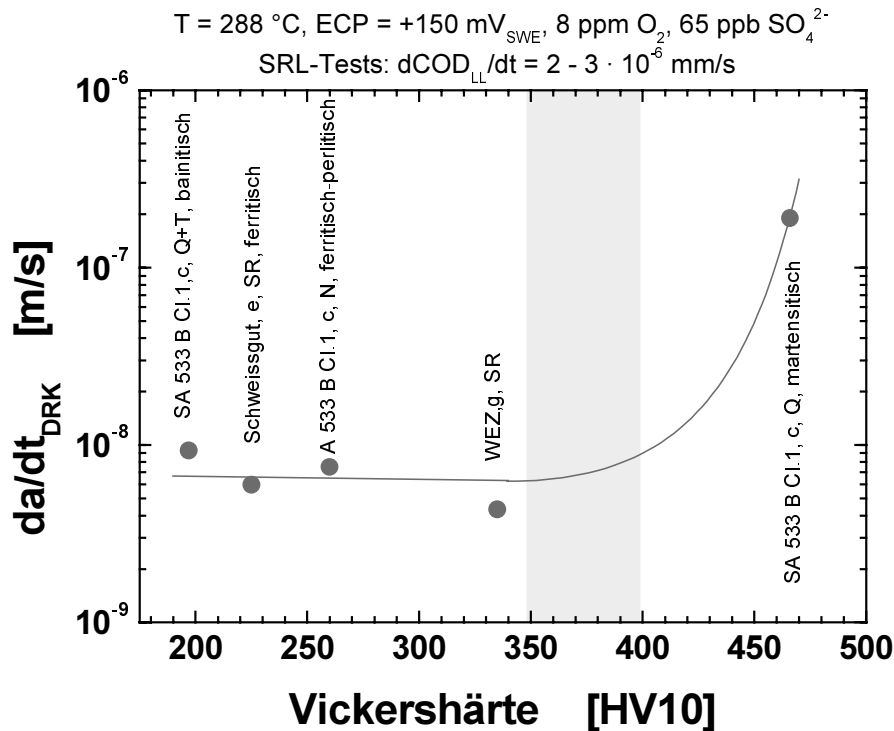
Ähnlich wie die aufgehärtete WEZ, zeigt auch das martensitische Gefüge eine deutlich erhöhte DRK-Anrissanfälligkeit. Allerdings ist die DRK-Risswachstumsrate im nicht angelassenen Martensit (Härte von 466 HV10) deutlich höher als in der WEZ (Spannungsarmglühung nach der Schweissung, Härtespitzen von 320 HV1). Wie in Figur 5 zu erkennen ist, liegt die DRK-Risswachstumsrate beim martensitischen Gefüge bei vergleichbarer Rissöffnungsrate deutlich ausserhalb des Streubandes der Ergebnisse für die anderen Gefügestände, was möglicherweise auf einen anderen Risswachstumsmechanismus hindeutet. Das unterschiedliche Risswachstumsverhalten wurde auch in SpRK-Versuchen unter konstanter Last beobachtet. So trat beispielsweise unter konstanter Last in sauerstoffhaltigem Heisswasser (8 ppm O₂, 65 ppb SO₄²⁻) bei 288 °C beim martensitischen Gefüge schnelles, stabiles SpRK-Risswachstum im Bereich von 2·10⁻⁷ m/s (6300 mm/Jahr) auf, während das SpRK-Risswachstum bei den beiden anderen Gefügen sehr rasch abklang und Risswachstumsraten < 2 · 10⁻¹¹ m/s (0.6 mm/Jahr) beobachtet wurden [27].

Figur 6 zeigt den Einfluss der Streckgrenze auf die DRK-Anfälligkeit und das DRK-Risswachstum in sauerstoffhaltigem Heisswasser (288 °C, 8 ppm O₂, 65 ppb SO₄²⁻) bei einer Rissöffnungsrate von 2 - 3·10⁻⁶ mm/s im RDB-Stahl c bei unterschiedlichen Wärmebehandlungszuständen. Man erkennt, dass für diesen Werkstoff die DRK-Anfälligkeit mit ansteigender Streckgrenze leicht zunimmt. Bis zu einer Streckgrenze von 700 – 800 MPa hängt die DRK-Risswachstumsrate unter diesen Umgebungsbedingungen nicht wesentlich von der Streckgrenze ab, darüber hingen scheint die Risswachstumsrate deutlich mit ansteigender Streckgrenze zuzunehmen.



Figur 6: Einfluss der Streckgrenze auf die DRK-Anrissanfälligkeit und das DRK-Risswachstum im RDB-Stahl c in sauerstoffhaltigem Heisswasser (288 °C, 8 ppm O₂, 65 ppb SO₄²⁻) bei einer Rissöffnungsrate von 2 – 3 · 10⁻⁶ mm/s. Die unterschiedlichen Streckgrenzen wurden durch eine unterschiedliche Wärmebehandlung eingestellt (siehe Tabelle 6).

Analog zeigt Figur 7 den Einfluss der Vickershärte auf das DRK-Risswachstum in sauerstoffhaltigem Heisswasser (288 °C, 8 ppm O₂, 65 ppb SO₄²⁻) bei einer Rissöffnungsrate von 2 - 3 · 10⁻⁶ mm/s für den RDB-Stahl c und das Schweissgut e sowie für die WEZ g. Man erkennt, dass bis zu einer kritischen Härte von ca 350 HV10 (Streckgrenze von 800 MPa) die DRK-Risswachstumsrate unter diesen stark oxidierenden Bedingungen für alle Gefügestände sehr ähnlich ist und nicht wesentlich von der Härte abhängt. Oberhalb von 350 HV10 nahm hingegen die DRK-Risswachstumsrate deutlich mit ansteigender Härte und Streckgrenze zu. In [33, 34, 36] wurde für das Auftreten von H-induzierter und interkristalliner SpRK in ferritischen Stählen in Heisswasser sehr ähnliche kritische Härtewerte von 300 bis 400 HV5 angegeben.



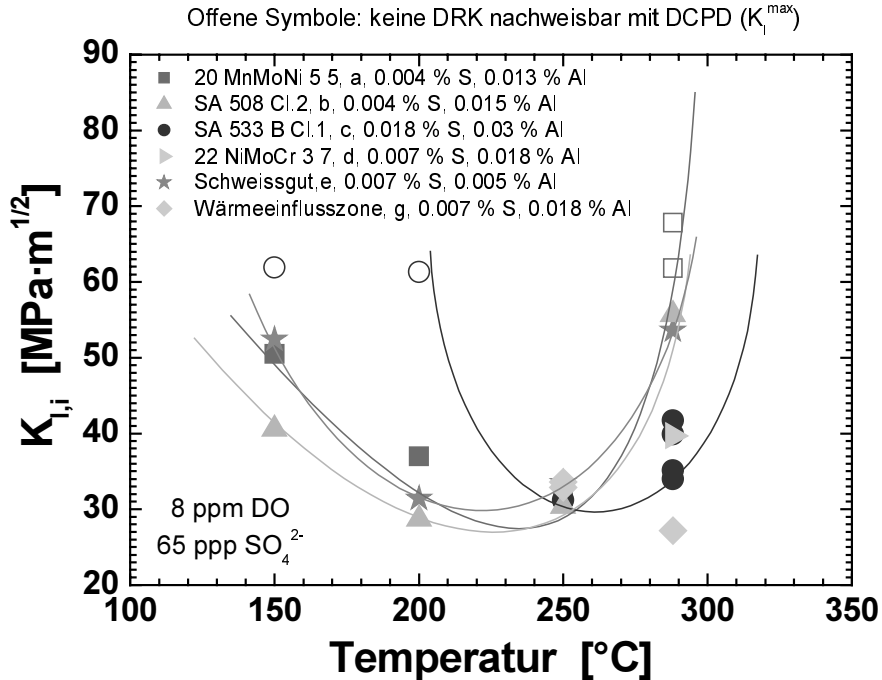
Figur 7: Einfluss der Vickershärte auf die DRK-Risswachstumsrate für den RDB-Stahl c (in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen), das Schweissgut e und die WEZ g in sauerstoffhaltigem Heisswasser (288 °C, 8 ppm O₂, 65 ppb SO₄²⁻) bei einer Rissöffnungsrate von 2 – 3 · 10⁻⁶ mm/s.

2.1.4.2 Einfluss der Mikrostruktur in Abhängigkeit der Temperatur

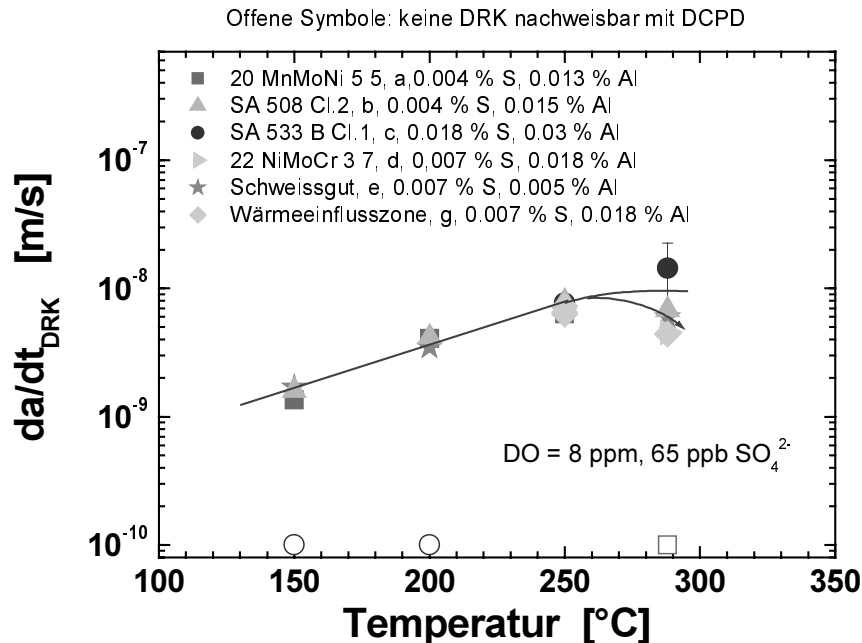
Der Einfluss der Temperatur wurde an drei RDB-Grundwerkstoffen mit niedrigem und hohem S- bzw. Al-Gehalt (Legierung a, b und c) und an dem Biblis C Schweissgutwerkstoff e in Heisswasser bei einem Sauerstoff- und Sulfatgehalt von 8 ppm bzw. 65 ppb zwischen 150 und 288 °C untersucht. Das Korrosionspotential steigt dabei mit abnehmender Temperatur leicht von +130 mV_{SWE} bei 288 °C auf +250 mV_{SWE} bei 150 °C an. Für die Versuche wurde eine Beanspruchungsgeschwindigkeit (Rissöffnungsrate von 2 - 4 · 10⁻⁶ mm/s) im Bereich der maximalen DRK-Anfälligkeit bei 288 °C gewählt. Die entsprechenden Versuche mit der WEZ g bei 288 °C und 250 °C sind abgeschlossen und ausgewertet. Die Versuche bei 200 und 150 °C sind zur Zeit noch im Gange.

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen den Einfluss der Temperatur auf die Rissinitiierung bzw. das Risswachstum. Bei 288 °C konnten in allen Legierungen ausser dem RDB-Stahl a DRK-Risswachstum mit der DCPD nachgewiesen werden. Der niedrigste Rissinitiierungswert K_{i,i} wurde in der WEZ g (0.007 Gew.% S) beobachtet, gefolgt vom Stahl c (0.018 Gew.% S) mit hohem Schwefel-Gehalt, dem Schweissgut e (0.007 Gew.% S) mit einem mittleren und der Legierung b (0.004 Gew.% S) mit einem tiefen Schwefel-Gehalt. Die entsprechende DRK-Risswachstumsrate war für den Stahl mit hohem Schwefel-Gehalt leicht höher als für die anderen Legierungen. Bei 250 °C wurden in allen RDB-Stählen und dem Schweissgut vergleichbare K_{i,i}-Werte und DRK-Risswachstumsraten beobachtet. Bei 200 °C und 150 °C zeigte der RDB-Stahl c mit hohem Schwefel-Gehalt als einzige Legierung überraschenderweise kein DRK-Risswachstum. Im untersuchten Belastungsgeschwindigkeitsbereich wurde bei allen Legierungen ein Maximum in der DRK-Anfälligkeit (Minimum der K_{i,i}-Werte) bei mittleren Temperaturen von 200 bis 250 °C beobachtet. Darunter und darüber schien die Anfälligkeit wieder abzunehmen. Die DRK-Risswachstumsraten nahmen hingegen für alle Legierungen mit zunehmender Temperatur von 150 bis 250 °C leicht zu und es wurde ein Maximum/Plateau bei/oberhalb von 250 °C beobachtet. Falls DRK-Risswachstum mit der Gleichstrompotentialsonde nachgewiesen werden konnte, lagen die Risswachstumsraten für alle RDB-Werkstoffe und Gefügestände sehr nahe beieinander.

Zwischen 150 und 250 °C wurde für das DRK-Risswachstum eine Aktivierungsenergie von 32 ± 3 kJ/mol bestimmt. Diese stimmt recht gut mit der Aktivierungsenergie für SwRK-Risswachstum von 40 bis 50 KJ/mol und für SpRK-Risswachstum von 30 bis 50 kJ/mol unter aggressiven Umgebungsbedingungen überein [37]. SSRT-Versuche [38] an glatten Rundzugproben bei ähnlichen Dehnraten und Umgebungsbedingungen zeigen dieselben Temperaturtrends wie in unseren SRL-Experimenten mit angeschwungenen Bruchmechanikproben.



Figur 8: Einfluss der Temperatur auf die DRK-Rissinitiation in den RDB-Stählen a, b, c mit niedrigem und hohem Schwefel-Gehalt sowie im Schweissgut e und der WEZ g mit mittlerem Schwefel-Gehalt bei einer Rissöffnungsrate von $2 - 4 \cdot 10^{-6}$ mm/s und Standardum-ggebungsbedingungen (8 ppm O_2 , 65 ppb SO_4^{2-}).

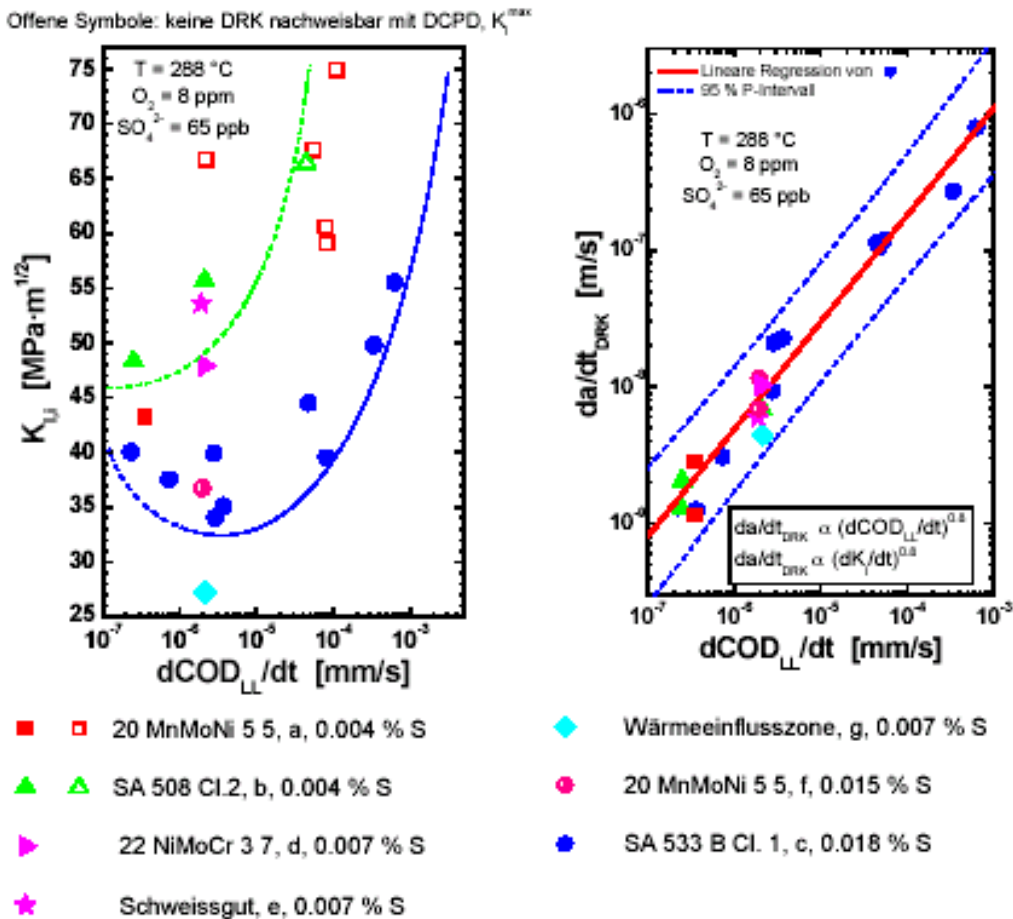


Figur 9: Einfluss der Temperatur auf das DRK-Risswachstum in den RDB-Stählen a, b, c mit niedrigem und hohem Schwefel-Gehalt sowie im Schweissgut e und der WEZ g mit mittlerem Schwefel-Gehalt bei einer Rissöffnungsrate von $2 - 4 \cdot 10^{-6}$ mm/s und Standardumgebungsbedingungen (8 ppm O_2 , 65 ppb SO_4^{2-}).

2.1.4.3 Einfluss von Schwefel-Gehalt und Dynamischer Reckalterung (DSA)

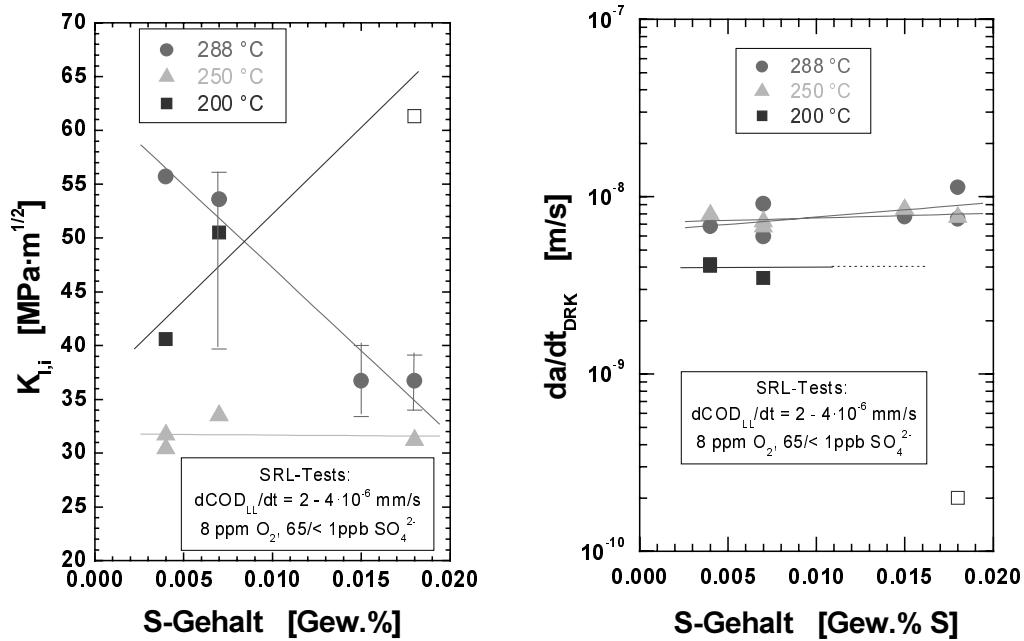
In sauerstoffhaltigem Heisswasser (0.4 - 8 ppm O₂) ausreichender Reinheit (≤ 65 ppb SO₄²⁻) wurde bei 288 °C in unseren Untersuchungen ein positiver Einfluss eines niedrigen Schwefel-Gehaltes auf die DRK-Anfälligkeit beobachtet. In den Stählen mit niedrigem und mittlerem Schwefel-Gehalt waren in den SRL-Versuchen deutlich höhere Spannungsintensitätsfaktoren K_{II} zur Initiierung von DRK-Risswachstum notwendig als in den Stählen mit hohem Schwefel-Gehalt (Figur 8, 10, 11). Auf das DRK-Risswachstum hatte ein niedriger Schwefel-Gehalt und die Probenorientierung hingegen unter diesen stark oxidierenden Umgebungsbedingungen keinen nennenswerten Einfluss (Figur 9 - 11). Bei vergleichbaren Beanspruchungsgeschwindigkeiten (Rissöffnungsraten) lagen die gemessenen Risswachstumsraten für alle Stähle jeweils im Streuband für den Stahl mit hohem Schwefel-Gehalt, vorausgesetzt, dass Rissinitiierung aufgetreten ist, was bei Stählen mit niedrigem Schwefel-Gehalt, wie schon erwähnt, eine höhere Spannungsintensität erforderte.

Der positive Einfluss eines niedrigen Schwefel-Gehaltes auf die DRK-Anfälligkeit bei Temperaturen oberhalb von 250 °C und Sulfat-Gehalten ≤ 65 ppb kann durch die Wahl geeigneter Kombinationen von Korrosionspotential (bzw. Sauerstoffgehalt) und Sulfat-Gehalt der Umgebung (BFE-Jahresbericht 2000, [28]) und/oder von Temperatur (Figur 8 und 11) und Dehnrate (Figur 10) vollständig überdeckt werden.



Figur 10: Vergleich der DRK-Anfälligkeit (links) und DRK-Risswachstumsraten (rechts) verschiedener RDB-Stähle mit unterschiedlichen Schwefel-Gehalten in SRL-Versuchen bei 288 °C in sauerstoffhaltigem Heisswasser. Insbesondere bei hohen Dehnraten wird in den Stählen mit niedrigem Schwefel-Gehalt eine deutlich geringere DRK-Anfälligkeit (höhere K_{II} -Werte) beobachtet. Falls DRK-Rissinitiierung auftritt, liegen die DRK-Risswachstumsraten der Stähle mit niedrigem und mittlerem Schwefel-Gehalt im Streuband der Ergebnisse für den Stahl mit hohem Schwefel-Gehalt.

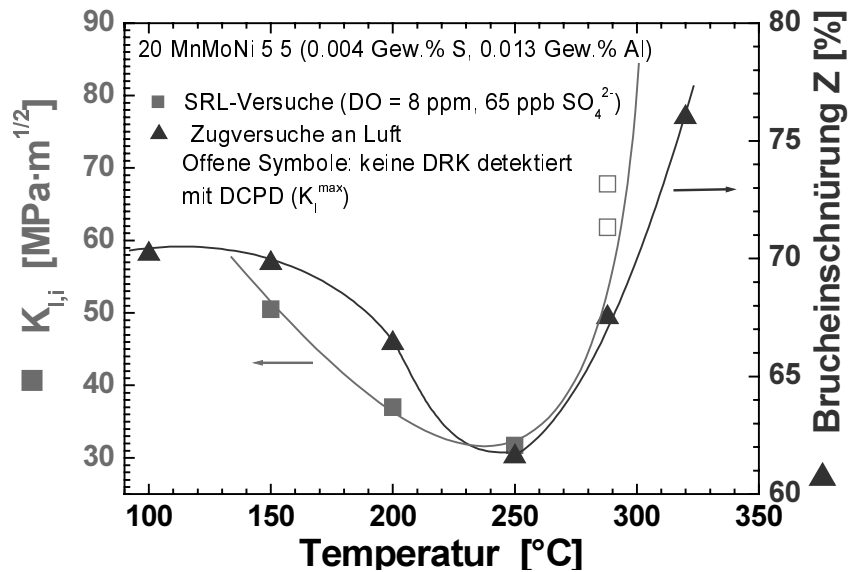
So wurde z. B. bei Zugabe einer ausreichenden hohen Menge von Sulfat (365 ppb) bei 288 °C und einem Sauerstoff-Gehalt von 8 ppm in den Stählen mit niedrigem und hohem Schwefel-Gehalt dieselbe DRK-Anfälligkeit beobachtet [1]. Während bei einem hohen Korrosionspotential und Sulfat-Gehalt der Umgebung also kein Einfluss des Schwefel-Gehalts beobachtbar ist, macht sich dieser hingegen mit abnehmendem ECP (Sauerstoffgehalt) und zunehmender Reinheit des Kühlmittels verstärkt bemerkbar. Dieses Verhalten kann sehr gut mit den existierenden Modellvorstellungen verstanden werden (siehe BFE-Jahresbericht 2000 [28]).



Figur 11: Einfluss des S-Gehaltes des Stahls auf die DRK-Anrissanfälligkeit (links) und das DRK-Risswachstum (rechts) in sauerstoffhaltigem Heisswasser (8 ppm O₂, 65/< 1ppb SO₄²⁻) bei unterschiedlichen Temperaturen und einer Rissöffnungsrate von von 2 - 4·10⁻⁶ mm/s.

Bei tieferen Temperaturen von 150 und 200 °C wurde in den Stählen mit niedrigem Schwefel-Gehalt und dem Schweissgut mit mittlerem Schwefel-Gehalt eine deutlich höhere DRK-Anfälligkeit beobachtet als im RDB-Stahl mit hohem Schwefel-Gehalt (Figur 8). Die Stähle mit niedrigem Schwefel-Gehalt zeigten des weiteren bei extrem niedrigen Dehnraten ($\leq 10^{-5}$ s⁻¹) in höchstreinem Heisswasser (< 1 ppb SO₄²⁻) bei 8 ppm beinahe dieselbe DRK-Anfälligkeit wie der Stahl mit hohem Schwefel-Gehalt [1]. Dieses Verhalten kann nicht alleine mit den bisherigen Modellvorstellungen erklärt werden, da man unter diesen Bedingungen in den Stählen mit niedrigem Schwefel-Gehalt eher eine tiefere oder bestenfalls gleich hohe DRK-Anfälligkeit erwarten würde. Neben dem Schwefel-Gehalt des Stahls scheinen deshalb auch noch andere Werkstoffparameter einen Einfluss auf die Risskorrosionsanfälligkeit auszuüben.

Die DRK-Anfälligkeit der Stähle a und b mit niedrigem Schwefel-Gehalt/hohem DSA-Anfälligkeit (Figur 1) unter extrem niedrigen Dehnraten bei 288 °C sowie das Maximum der DRK-Anfälligkeit beim mittleren Temperaturen von 200 - 250 °C deuten klar darauf hin, dass die Dynamische Reckalterung unter gewissen Kombinationen von Temperatur und Dehnraten einen starken Einfluss auf das Risskorrosionsverhalten in anfälligen RDB-Stählen ausüben kann [14, 27]. Die in Zugversuchen und bei Messungen der inneren Reibung beobachtete DSA-Anfälligkeit korreliert gut mit der Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit der DRK-Anfälligkeit und insbesondere mit der unterschiedlichen SprK-Anfälligkeit bei mittleren Temperaturen [14, 27]. Dies ist in Figur 12 beispielhaft für Legierung a gezeigt. Wie aber in Figur 9 zu erkennen ist, zeigen nach erfolgter Rissinitiation alle Werkstoffe unter diesen stark oxidierenden Bedingungen (0.4 – 8 ppm O₂) vergleichbare Risswachstumsraten. Die DSA scheint deshalb primär einen Einfluss auf die DRK-Anfälligkeit (Rissinitiation) auszuüben, nicht aber auf das nachfolgende DRK-Risswachstum.



Figur 12: Vergleich der DRK- und DSA-Anfälligkeit von Legierung a bei einer Dehnrates von 10^{-5} s^{-1} . Die Temperatur-Minima und -Verläufe der Rissinitiiierungswerte $K_{I,i}$ aus SRL-Versuchen in sauerstoffhaltigem Heisswasser und der Bruchdehnung aus Zugversuchen an Luft stimmen gut überein.

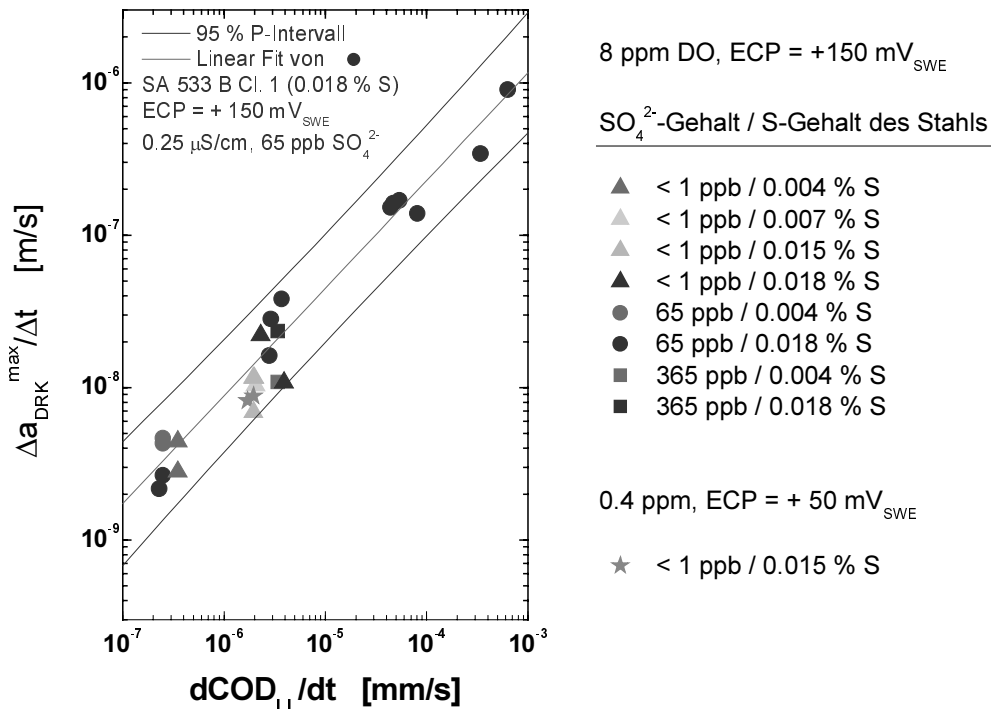
Unter den für den SWR/NWC Betrieb für den RDB charakteristischen, stark oxidierenden Bedingungen ($ECP > 0 \text{ mV}_{SWE}$, $0.4 - 8 \text{ ppm O}_2$) hängt nach erfolgter Risseinleitung die DRK-Risswachstumsrate nur noch wesentlich von der Beanspruchungsgeschwindigkeit dK/dt bzw. $dCOD_{L,1}/dt$ (Figur 10 und 13) und der Temperatur (Figur 9) ab, ist aber in guter Näherung unabhängig vom Sulfat-Gehalt der Umgebung (Figur 13) sowie vom Materialzustand (S-Gehalt, Mikrostruktur, DSA-Anfälligkeit, Härte) falls die Härtewerte 350 HV_5 nicht überschreiten (Figur 4 – 7, 9, 10, 13). Der Einfluss von Sulfat-Gehalt und Materialeigenschaften macht sich hier hauptsächlich über die DRK-Anrissanfälligkeit und die Entscheidung, ob und wann eine Risseinleitung stattfindet, bemerkbar.

2.1.4.4 Zusammenfassende Bewertung zum Einfluss von Materialeigenschaften

Aus den bisherigen Untersuchungen lassen sich folgende vorläufigen Schlussfolgerungen zum Einfluss des Materialeigenschaften ziehen:

Der S-Gehalt und die Morphologie/Grösse/chemische Zusammensetzung/räumliche Verteilung der MnS-Einschlüsse, die Streckgrenze/Härte sowie das DSA-Verhalten (bzw. allgemein das Verformungsverhalten) sind die wesentlichen Materialparameter, welche einen ausgeprägten Einfluss auf das DRK-Verhalten ausüben können. Der Einfluss der einzelnen Parameter ist allerdings schwierig voneinander zu separieren und hängt unter anderem auch von der Reinheit des Heisswassers, dem Korrosionspotential (Sauerstoffgehalt), der Temperatur und der Beanspruchungsgeschwindigkeit ab. Unter den für SWR/NWC charakteristischen, stark oxidierenden Bedingungen ($0.4 \text{ ppm} - 8 \text{ ppm DO}$, $ECP > 0 \text{ mV}_{SWE}$) macht sich der Einfluss der Materialparameter primär bei der Rissinitiiierung bemerkbar, während beim nachfolgenden DRK-Risswachstum für alle Werkstoffe ein vergleichbares Risswachstumsverhalten beobachtet wird, solange die Härte auf Werte $< 350 \text{ HV}_5$ beschränkt bleibt. Der Haupteinfluss der Materialparameter auf das Risswachstum ist hier also primär von indirekter Natur, und erfolgt über die Entscheidung ob und wann eine Einleitung des Risswachstums stattfindet. Die unterschiedlichen Materialparameter machen sich mit abnehmender Aggressivität der Systemparameter (z. B. niedriges ECP, hohe Reinheit des Heisswassers, ...) zunehmend stärker bemerkbar. Unter SWR/NWC-Bedingungen begünstigt bei rissbehafteten Komponenten ein hoher lokaler Schwefel-Gehalt, eine hohe DSA-Anfälligkeit und eine hohe Streckgrenze/Härte eine Anrissbildung durch DRK. Es wird darauf hingewiesen, dass bei Anrissbildung an fehlerfreien Oberflächen umgekehrt eine

niedrige Streckgrenze eine Anrissbildung begünstigt, da die hier notwendige, lokale Plastifizierung der Werkstoffoberfläche bei gleicher Beanspruchung einfacher erreicht wird.



Figur 13: Einfluss des Sulfat-Gehalts der Umgebung und des S-Gehalts des Stahls auf das DRK-Risswachstum in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei 288 °C unter stark oxidierenden Bedingungen (0.4 – 8 ppm O₂). Nach erfolgter Risseinleitung werden in allen Stählen vergleichbare Risswachstumsraten beobachtet, die nur noch wesentlich von der Beanspruchungsgeschwindigkeit abhängen, nicht aber vom Sulfat- und S-Gehalt.

2.1.4.5 Zusammenfassung des bisher zur DRK gewonnenen Kenntnisstandes

Das DRK-Risswachstum langer Risse (> 100 μm) wird im wesentlichen durch die **Rissstipzendehnrate** sowie durch die **Konzentration an schwefelhaltigen Anionen** (bzw. dem pH) im Elektrolyten im Bereich der Rissstipze kontrolliert. Für das Auftreten von DRK müssen gleichzeitig **kritische Bedingungen** im Rissystem auftreten, d.h. eine **hohe Aktivität an schwefelhaltigen Anionen** (und ein niedriger pH) und eine **langsame positive Rissstipzendehnrate** (und positive plastische Zug-Dehnung). Werden diese Bedingungen nicht erreicht, wird kein oder nur sehr geringes (und oft lokales) Risswachstum beobachtet. Werden diese kritischen Bedingungen erreicht oder überschritten, beobachtet man DRK-Risswachstum, das im wesentlichen nur von der Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur abhängt. Unter stark oxidierenden SWR/NWC-Bedingungen (ECP > 0 mV_{SWE}, O₂ ≥ 400 ppb) nimmt dabei die DRK-Anfälligkeit (Rissinitiation) mit abnehmender Dehnrate $d\varepsilon/dt$ bzw. Belastungsgeschwindigkeit dK/dt zu, mit einem möglichen Maximum bei sehr tiefen Dehnraten/Belastungsgeschwindigkeiten von 10⁻⁶ bis 5·10⁻⁵ s⁻¹ bzw. 0.5 – 20 MPa·m^{1/2}/h. Die DRK-Risswachstumsraten steigen dagegen mit zunehmender Dehnrate bzw. Belastungsgeschwindigkeit monoton nach einem Potenzgesetz mit einem Exponenten von ca. 0.8 an. Oberhalb einer Dehnrate bzw. Belastungsgeschwindigkeit von ca. 10⁻³ – 10⁻² s⁻¹ bzw. 1000 MPa·m^{1/2}/h wird kein DRK-Risswachstum mehr beobachtet [27].

Unter monoton ansteigender Belastung nimmt die Rissstipzendehnrate mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit, Risswachstumsrate, Streckgrenze/Härte und DSA-Anfälligkeit zu. Ein hohes Korrosionspotential bzw. hoher Sauerstoffgehalt, ein hoher S-Anionen-Gehalt (Chlorid-Gehalt) im Kühlmittel, ein hoher S-Gehalt des Stahls und quasi-stagnierende Strömungsbedingungen begünstigen die Anreicherung

von S-Anionen und eine Ansäuerung (Chlorid) im Risspitzenelektrolyt und somit eine hohe DRK-Anfälligkeit. Schwellwerte für das Auftreten von DRK wie z. B. ein kritisches Korrosionspotential können im Prinzip auf einen kritischen S-Anionen-Gehalt im Risspitzenelektrolyt zurückgeführt werden und sind deshalb nicht feste Werkstoffparameter sondern abhängig von den Werten der anderen Systemparameter (wie S- und Sulfat-Gehalt). [27]

Als wesentliche Einflussparameter wurden das Korrosionspotential (bzw. Sauerstoffgehalt), der Sulfat-/Chloridgehalt und die Temperatur der Umgebung, der Schwefel-Gehalt, das DSA-Verhalten (N_{frei} - und C_{frei} -Gehalt) und die Streckgrenze/Härte des Stahls sowie die Belastungsgeschwindigkeit und -höhe identifiziert. Innerhalb gewisser Grenzen nimmt die DRK-Anrissanfälligkeit mit ansteigendem ECP, Sulfat-/Chloridgehalt der Umgebung, Schwefel-Gehalt, DSA-Anfälligkeit und Härte des Stahls zu. Unter stark oxidierenden Bedingungen ($ECP > 0 \text{ mV}_{\text{SWE}}$, $O_2 \geq 400 \text{ ppb}$) wurde in allen Werkstoffen (RDB-Grundwerkstoff und Schweissgut) ein Maximum der DRK-Anrissanfälligkeit bei mittleren Temperaturen ($\approx 200 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$) und sehr niedrigen Dehnraten ($10^{-6} - 5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) beobachtet. Die DRK-Risswachstumsraten waren für alle RDB-Grundwerkstoffe, das Schweissgut sowie die Wärmeeinflusszone (falls maximale Härte $< 350 \text{ HV5}$) sehr ähnlich und nahmen mit ansteigender Dehnrates und ansteigender Temperatur zu, mit einem Maximum/Plateau bei/oberhalb von $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Unter simulierten transienten SWR/NWC-Betriebsbedingungen wurden im Beanspruchungsgeschwindigkeitsbereich dK_i/dt von 0.1 bis $500 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{h}$ bei hohen Korrosionspotentialen ($ECP \geq 100 \text{ mV}_{\text{SWE}}$) und ausreichend hohen Spannungsintensitätsfaktoren ($K_I > 25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) hohe DRK-Risswachstumsraten von 10^{-9} m/s (30 mm/Jahr) bis $8 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (25000 mm/Jahr) beobachtet. Die in SRL-Versuchen zur Rissinitiation erforderlichen hohen Spannungsintensitätsfaktoren K_I von mindestens $25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ entsprechen allerdings relativ tiefen Rissen im RDB mit Risslängen deutlich oberhalb der Nachweisgrenze der ZFP-Methoden. Wenn auch solch hohe Risswachstumsraten unter realen SWR-Bedingungen nur bedingt auftreten können, so helfen diese Ergebnisse mit, viele der aufgetretenen DRK-Schadenfälle zu verstehen. Insbesondere die Beobachtung, dass relativ wenige, kurzzeitige Transienten mit ausgeprägten thermomechanischen Zusatzbeanspruchungen ausreichend waren um relativ tiefe DRK-Risse in Rohrleitungen zu erzeugen [12, 39] sind in diesem Lichte nicht mehr überraschend.

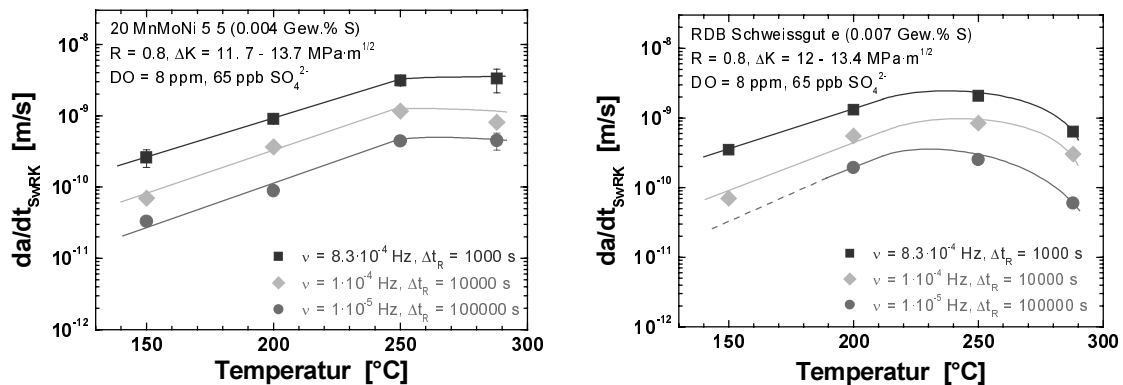
2.1.5 Schwingrisskorrosion (SwRK)

Das SwRK-Risswachstumsverhalten der RDB-Stähle a, b, c, des Schweissguts e und der WEZ g wurde im Rahmen einer Parameterstudie systematisch untersucht. Hierzu wurden lastgesteuerte, niederfrequente SwRK-Versuche mit konstanter Lastamplitude in sauerstoffhaltigem Heisswasser durchgeführt. Es wurde jeweils eine sägezahnförmige oder trapezförmige Belastung verwendet. Temperatur, Belastungsfrequenz, Haltezeit bei konstanter Maximallast, Spannungsverhältnis R und Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK wurden dabei systematisch variiert. Der Einfluss von Temperatur, Belastungshöhe, -form und -frequenz wurde für die verschiedenen RDB-Grundwerkstoffe im Rahmen des BFE-Jahresberichtes 2001 [32] eingehend diskutiert. Ein Vergleich mit dem ASME BPV Regelwerk ergab, dass die ASME XI „Wet“ Ermüdungsrisswachstumskurven unter stark oxidierenden Bedingungen ($ECP \geq 100 \text{ mV}_{\text{SWE}}$) bei niederfrequenter Belastung ($\leq 10^{-3} \text{ Hz}$) und Temperaturen oberhalb von $150 \text{ }^\circ\text{C}$ für alle RDB-Grundwerkstoffe nicht konservativ sind. Im folgenden sollen die neuen Ergebnisse zum Einfluss der Mikrostruktur (Gefüge, S-Gehalt) in Abhängigkeit von der Temperatur, der Belastungsfrequenz und -höhe und Umgebung (Sauerstoffgehalt, Sulfat-Gehalt der Umgebung) vorgestellt werden. Anschliessend wird eine mögliche Vorgehensweise zur Entwicklung neuer, konservativer SwRK-Risswachstumskurven diskutiert.

2.1.5.1 Einfluss der Mikrostruktur in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz

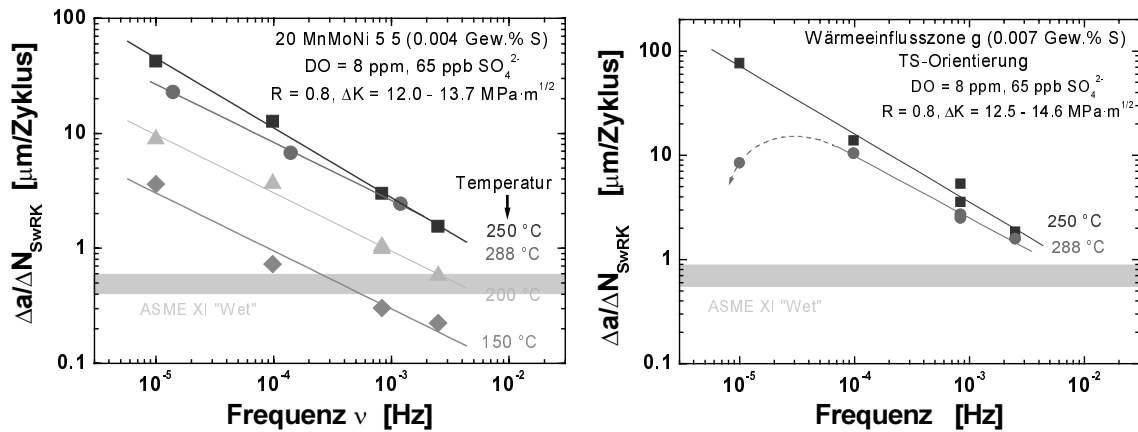
Der Einfluss Mikrostruktur in Abhängigkeit der Temperatur und Frequenz wurde bei einem Spannungsverhältnis R von 0.8 und einer Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK von ca. $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ in sauerstoffhaltigem Heisswasser (8 ppm O_2 , 65 ppb SO_4^{2-}) untersucht.

Für alle Werkstoffe und Belastungsfrequenzen stiegen sowohl der Rissfortschritt pro Schwingzyklus $\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}}$ als auch die Risswachstumsrate da/dt_{SwRK} mit ansteigender Temperatur von 150 bis 250 °C an. In den RDB-Werkstoffen a und c und der WEZ änderte sich die Risswachstumsraten bei einem weiteren Anstieg der Temperatur auf 288 °C nicht mehr wesentlich. Im RDB-Werkstoff b und dem Schweissgut e wurde ein Maximum der SwRK-Risswachstumsrate bei 250 °C beobachtet, darüber fiel die Risswachstumsrate wieder ab. Dieses Verhalten ist beispielhaft in Figur 14 für Legierung a und das Schweissgut e dargestellt. Im Temperaturbereich von 150 bis 250 °C wurde für das SwRK-Risswachstum eine Arrhenius-Aktivierungsenergie zwischen 40 und 50 KJ/mol für die unterschiedlichen Temperaturen und Belastungsfrequenzen berechnet.



Figur 14: Einfluss der Temperatur auf das SwRK-Risswachstum bei unterschiedlichen Belastungsfrequenzen im RDB-Stahl a (links) und im Schweissgut e (rechts).

Unterhalb von 10^{-2} Hz nahm der Rissfortschritt pro Schwingzyklus $\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}}$ für alle Werkstoffe und fast alle Temperaturen mit abnehmender Belastungsfrequenz zu, während die SwRK-Risswachstumsrate da/dt_{SwRK} mit absteigender Frequenz wie erwartet abnahm. Nur bei 288 °C wurde in den RDB-Werkstoffen b, c, dem Schweissgut e und der WEZ g sowie bei 250 °C in Legierung c kein weiterer Anstieg des Rissfortschritts pro Schwingzyklus $\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}}$ bei einer Reduktion der Belastungsfrequenz von 10^{-4} auf 10^{-5} Hz beobachtet. Stabiles, stationäres SwRK-Risswachstum wurde bei einem Sauerstoffgehalt von 8 und 0.4 ppm sowohl bei 65 ppb SO_4^{2-} als auch in höchstem Wasser ($< 1 \text{ ppb SO}_4^{2-}$, $\kappa \leq 0.06 \mu\text{S}/\text{cm}$) bis zu sehr niedrigen Frequenzen von 10^{-5} bis 10^{-6} Hz hinab beobachtet. Zwischen 10^{-5} und 10^{-2} Hz hängt der Rissfortschritt pro Schwingzyklus $\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}}$ in Form eines Potenzgesetzes ($\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}} = D \cdot \nu^{-n}$) von der Belastungsfrequenz mit einem Exponenten zwischen 0.4 und 0.65 (typischerweise 0.5 bis 0.6) ab. Der Einfluss der Belastungsfrequenz ist beispielhaft für den RDB-Werkstoff a und die WEZ g in Figur 15 dargestellt. Zusätzlich ist auch die ASME XI SwRK-Risswachstumsrate aus dem ASME BVP Regelwerk [40] für entsprechende Belastungsbedingungen eingetragen. Die ASME XI-Risswachstumsraten werden dabei für Belastungsfrequenzen $\leq 10^{-3} \text{ Hz}$ und Temperaturen $> 150 \text{ °C}$ deutlich überschritten.



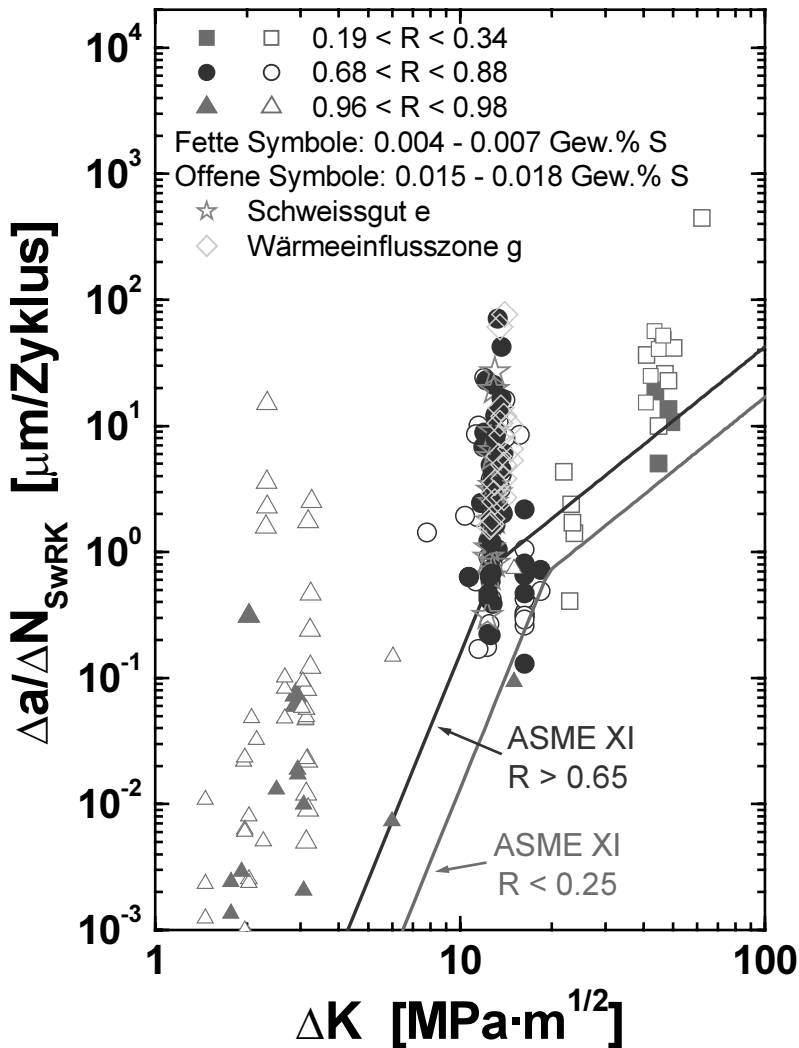
Figur 15: Einfluss der Belastungsfrequenz auf den korrosionsgestützten Rissfortschritt pro Zyklus $\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}}$ bei unterschiedlichen Temperaturen im RDB-Stahl a (links) und der WEZ g (rechts).

Im Gegensatz zum Ermüdungsrisswachstum wird bei der SwRK ein ausgeprägter Einfluss der Belastungsfrequenz beobachtet. Das Risswachstum setzt sich hier aus dem rein mechanischen und dem korrosionsgestützten Risswachstum zusammen. Ersteres ist rein zyklisch kontrolliert, während letzteres primär ein zeitabhängiger Prozess ist, der nur während der Lastanstiegsphase mit positiver (Zug) Rissspitzendehnrates und bei Zutritt des Mediums zum Risskanal (ausreichende Rissöffnung) auftritt. Wie beispielsweise in Figur 13 gezeigt wurde, hängt die Geschwindigkeit des korrosionsgestützten Risswachstums und somit auch der gesamte Rissfortschritt pro Zyklus stark von der Dehnrates (bzw. Belastungsfrequenz) ab. Bei niederfrequenter Belastung ($\leq 10^{-3}$ Hz) und stark oxidierenden Bedingungen ist der Beitrag des korrosionsgestützten Risswachstums zwischen 10 bis 1000 mal grösser als der Beitrag durch die rein mechanische Ermüdung (Figur 17 und 18).

2.1.5.2 Einfluss der Mikrostruktur in Abhängigkeit der Belastungsbedingungen

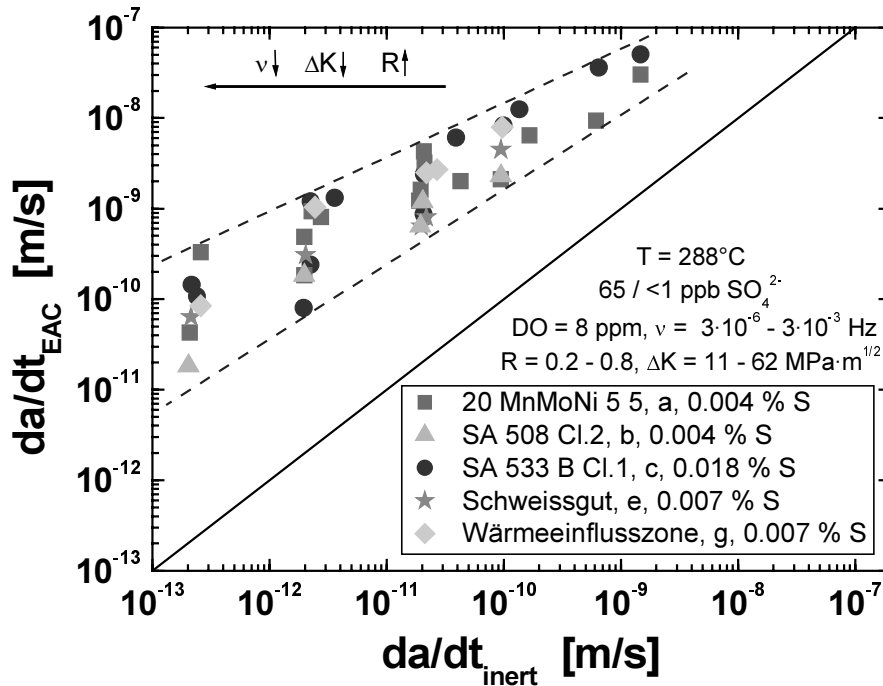
Weitere SwRK-Versuche wurden bei verschiedenen Spannungsverhältnissen R (und Schwingbreiten des Spannungsintensitätsfaktors ΔK) von 0.2 bis 0.34 (22.9 bis 64.4 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), 0.7 bis 0.88 (7.8 bis 18.4 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) und 0.96 bis 0.98 (1.4 bis 3.2 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) in sauerstoffhaltigem Heisswasser (0.4 - 8 ppm O_2 , < 1 oder 65 ppb SO_4^{2-}) bei Temperaturen zwischen 150 und 288 °C durchgeführt. In Figur 16 sind die entsprechenden Rissfortschritte pro Zyklus $\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}}$ gegen die aufgeprägte Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK aufgetragen und mit den entsprechenden ASME-XI-Risswachstumskurven aus dem ASME BPV Regelwerk [40] verglichen. Wie erwartet nimmt $\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}}$ mit zunehmendem ΔK für alle Bedingungen zu. Die Rissfortschritte pro Zyklus überschreiten dabei bei allen Temperaturen sowohl in den RDB-Stählen mit niedrigem und hohem Schwefel-Gehalt als auch im Schweissgut e und der WEZ g sowie bei hohen und niedrigen R -Werten die entsprechenden ASME-XI-Risswachstumskurven deutlich um einen Faktor 2 bis 10000 (nahe dem Ermüdungsschwellwert ΔK_{th}). Werte unterhalb der entsprechenden ASME-XI-Risswachstumskurven wurden nur bei Belastungsfrequenzen $\geq 10^{-3}$ Hz beobachtet. Die Abweichung von der ASME XI-Risswachstumskurve nimmt dabei mit abnehmender Frequenz, zunehmendem Spannungsverhältnis R sowie zunehmender Temperatur (mit einem Maximum bei 250 °C) zu.

DO = 0.4 - 8 ppm, <1 oder 65 ppb SO₄²⁻, T = 150 - 288 °C



Figur 16: Korrosionsgestützter Rissfortschritt pro Zyklus $\Delta a / \Delta N_{\text{SwRK}}$ in Abhängigkeit der aufgeprägten Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK für verschiedene Spannungsverhältnisse R. Zum Vergleich sind die Referenzrisswachstumskurven aus dem ASME BPV Regelwerk (Appendix A, Section XI) eingetragen.

In Figur 17 sind die SwRK-Risswachstumsraten da/dt_{SwRK} gegen die entsprechenden Ermüdungsrisswachstumsraten da/dt_{inert} an Luft unter ansonsten identischen Belastungsbedingungen für eine Temperatur von 288 °C aufgetragen. Man erkennt wie die umgebungsbedingte Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstums mit abnehmender Belastungsfrequenz und zunehmendem Spannungsverhältnis R ansteigt. Das sauerstoffhaltige Heisswasser führt hier je nach Belastungsbedingungen zu einer 10 bis 1000-fachen Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstums.

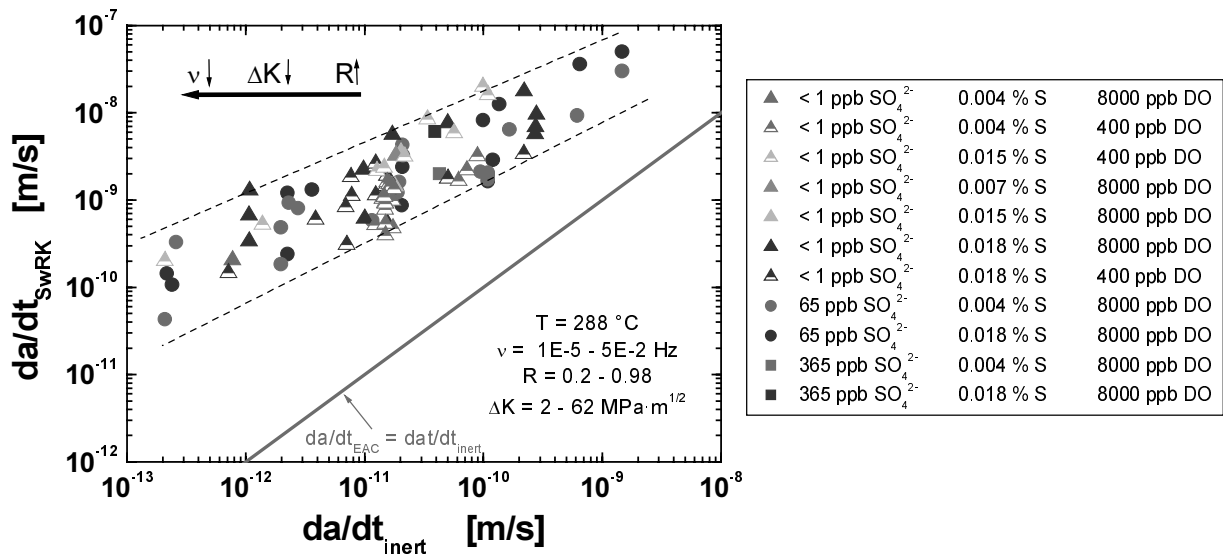


Figur 17: Vergleich der SwRK-Risswachstumsraten da/dt_{SwRK} von verschiedenen RDB-Stählen mit dem Schweissgut e und der WEZ g bei unterschiedlichen Belastungsbedingungen in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei 288 °C. Die SwRK-Risswachstumsraten da/dt_{SwRK} sind dabei gegen die Ermüdungsrisswachstumsraten da/dt_{inert} an Luft unter ansonsten identischen Bedingungen aufgetragen.

2.1.5.3 Einfluss des S-Gehalt des Stahls und des Sulfat- und Sauerstoffgehalts der Umgebung

Unter den stark oxidierenden Umgebungsbedingungen ($ECP > 0 \text{ mV}_{\text{SWE}}$, $0.4 - 8 \text{ ppm O}_2$, $< 1 - 365 \text{ ppb SO}_4^{2-}$) zeigten sowohl die RDB-Stähle mit niedrigem und hohem Schwefel-Gehalt als auch das Schweissgut e und die WEZ g über einen weiten Bereich von Belastungsbedingungen (Frequenz, R , ΔK) ein vergleichbares SwRK-Risswachstumsverhalten. Dies ist beispielhaft für eine Temperatur von 288 °C in Figur 17 und 18 dargestellt. Die SwRK-Risswachstumsraten aller Werkstoffe liegen über einen weiten Belastungsbereich in einem schmalen Streuband von einer halben ($\nu > 10^{-3} \text{ Hz}$) bis einer ganzen ($\nu \leq 10^{-3} \text{ Hz}$) Grössenordnung. Dies entspricht der in einem relativ homogenen Werkstoff bei einer niedrigen Belastungsfrequenz von 10^{-4} Hz beobachteten normalen Streuung. Weder der Schwefel- und Sulfat-Gehalt (Figur 18) noch die Mikrostruktur (Figur 17) haben unter diesen Bedingungen ($ECP > 0 \text{ mV}_{\text{SWE}}$, $0.4 - 8 \text{ ppm O}_2$) einen starken Einfluss auf das SwRK-Risswachstum. Dieses Ergebnis stimmt sehr gut mit den Beobachtungen zum DRK-Risswachstumsverhalten (Kap. 2.1.4.3) unter vergleichbaren Systembedingungen überein. Das vergleichbare Verhalten ist primär auf die stark oxidierenden Umgebungsbedingungen zurückzuführen, welche zu einer starken Anreicherung von S-haltigen Anionen durch Migration im Bereich des Risspitzenelektrolyts führen, so dass bei allen Werkstoffen die kritische Konzentration überschritten wird.

Das vergleichbare Risswachstumsverhalten der unterschiedlichen Werkstoffe unter stark oxidierenden Bedingungen ermöglicht nun die Definition von zweckmässigen und konservativen SwRK-Risswachstumskurven ohne komplexe Fallunterscheidungen nach unterschiedlichen Werkstoffen. Aufgrund des unter diesen Bedingungen im Temperaturbereich zwischen 240 und 290 °C beobachteten Maximums der SwRK-Risswachstumsraten, bietet sich für die Entwicklung neuer Referenzkurven die Verwendung der Daten aus diesem Temperaturbereich an.



Figur 18: Vergleich der SwRK-Risswachstumsraten da/dt_{SwRK} von verschiedenen RDB-Stählen mit unterschiedlichen S-Gehalten in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei 288 °C über einen weiten Bereich von Beanspruchungsbedingungen und der Wasserchemie (<1 – 365 ppb SO₄²⁻, 0,4 – 8 ppm O₂). Die SwRK-Risswachstumsraten da/dt_{SwRK} sind dabei gegen die Ermüdungsrisswachstumsraten da/dt_{inert} an Luft unter ansonsten identischen Bedingungen aufgetragen.

2.1.5.4 Entwicklung neuer Referenzkurven für die Ermüdung in Heisswasser

Für Strukturintegritäts- und Sicherheitsbewertungen, z. B. im Rahmen der periodischen Sicherheitsanalyse, werden möglichst einfache SwRK-Grenzkurven mit nur wenigen Fallunterscheidungen (z. B.: SWR/NWC, SWR/HWC, DWR) benötigt, welche das Materialverhalten konservativ aber dennoch realistisch wiedergeben. Die grosse Zahl von mehr als 20 möglichen Einflussfaktoren [26], die erhebliche Streubreite von Versuchsergebnissen, und die Unsicherheit bezüglich der exakten, lokalen wasserchemischen und thermomechanischen Randbedingungen erschweren die Festlegung gut abgesicherter Grenzkurven.

Im folgenden soll ein Vorschlag des PSI zur Entwicklung neuer Grenzkurven skizziert werden, welcher die neusten experimentellen Erkenntnisse berücksichtigt. In diesem einfachen, empirischen Superpositionsmodell setzt sich der gesamte Rissfortschritt pro Zyklus $\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}}$ in Heisswasser aus der Summe des Rissfortschrittes $\Delta a/\Delta N_{\text{inert}}$ in inerter Umgebung und einem korrosionsgestützten Beitrag $\Delta a/\Delta N_{\text{EAC}}$ zusammen:

$$\Delta a/\Delta N_{\text{SwRK}} = \Delta a/\Delta N_{\text{inert}} + \Delta a/\Delta N_{\text{EAC}} \quad (1)$$

Während der erste Beitrag durch mechanische Ermüdung ein rein zyklisch kontrolliertes Phänomen ist und nicht von der Belastungsfrequenz (bzw. –geschwindigkeit) abhängt, tritt der letztere Beitrag nur während der Lastaufbringungsphase mit positiver Rissspitzendehnrates auf und ist stark abhängig von der Belastungsfrequenz.

Aufgrund experimenteller Beobachtungen und theoretischer Überlegungen muss die Risswachstumsgeschwindigkeit einen kritischen Schwellwert $da/dt_{\text{inert}}^{\text{crit}}$ überschreiten, damit unter zyklischer Belastung eine nennenswerte, umgebungsbedingte Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstums auftritt [26]. Diese kritische Risswachstumsrate $da/dt_{\text{inert}}^{\text{crit}}$ hängt vom Korrosionspotential bzw. dem Sauerstoffgehalt der Umgebung ab und nimmt mit abnehmendem Korrosionspotential ECP zu. Unterhalb dieser kritischen Risswachstumsrate entspricht die Risswachstumsgeschwindigkeit da/dt_{SwRK} in Heisswasser derjenigen der Ermüdung an Luft. Die Risswachstumsgeschwindigkeit da/dt_{inert} an Luft ist für alle RDB-Stähle sehr ähnlich

und wird durch Gleichung (2) beschrieben, welche sich über die Lastaufbringungszeit Δt_R (bzw. Frequenz $\nu = 1/(2 \cdot \Delta t_R)$) aus dem experimentell ermittelten Paris-Gesetz [10, 11] für die Ermüdung ableiten lässt.

Oberhalb dieses kritischen Schwellwertes hängt die Geschwindigkeit des umgebungsbedingten Risswachstums da/dt_{EAC} aufgrund mechanistischer Betrachtungen in Form eines Potenzgesetzes von der Risswachstumsgeschwindigkeit da/dt_{inert} an Luft unter ansonsten identischen Belastungsbedingungen ab [26]. Aufgrund von Gleichung (1) ergibt sich hier für die Risswachstumsrate da/dt_{SwRK} in Heisswasser ein Zusammenhang in Form von Gleichung (3). Der Koeffizient C und der Exponent m hängen dabei vom Korrosionspotential ECP bzw. dem Sauerstoffgehalt der Umgebung ab.

1. $da/dt_{inert} < da/dt_{inert}^{crit} = f(ECP)$:

$$da/dt_{SwRK} = da/dt_{inert} = f(\Delta t_R, \Delta K, R) = (7.87 \cdot 10^{-11} / \Delta t_R) \cdot (\Delta K / (2.88 - R))^{3.07} \quad (2)$$

2. $da/dt_{inert} \geq da/dt_{inert}^{crit} = f(ECP)$:

$$da/dt_{SwRK} = C \cdot (da/dt_{inert})^m + da/dt_{inert} \quad C, m = f(ECP) \quad (3)$$

$$da/dt \text{ in m/s, } \Delta t_R \text{ in s, } \Delta K \text{ in MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

Gleichung (2) und (3) liefern eine umfassende und sehr einfache Beschreibung der SwRK in Heisswasser und stellen deshalb eine möglich Form für neue Grenzkurven dar. Die Parameter C, m und die kritische Risswachstumsrate da/dt_{inert}^{crit} sind für SWR/NWC-, SWR/HWC- und DWR-Bedingungen konservativ experimentell zu ermitteln. Für die Parameter C und m werden für alle drei Bedingungen vergleichbare Werte erwartet, während hingegen die kritische Risswachstumsrate sehr stark vom Korrosionspotential abhängt. Von der kritischen Risswachstumsgeschwindigkeit da/dt_{inert}^{crit} lassen sich über Gleichung (2) für gegebene Belastungsbedingungen Schwellwerte für die Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors $\Delta K_{SwRK} = f(\Delta t_R, R)$ und kritische Frequenzen $\nu_{crit} = f(\Delta K, R)$ für das Auftreten von Risskorrosion ableiten.

Gleichungen (2) und (3) bilden die Basis für die sogenannte „Time Domain“ Analyse. Eine solche Auswertung ist beispielhaft in Figur 19 für einen breiten Datensatz von zyklischen SwRK-Versuchen aus de Projekten CASTOC- [41] und RIKORR dargestellt. Die Versuchsparameter erstrecken sich über einen weiten Bereich von Umgebungs- ($T = 240 - 288 \text{ }^\circ\text{C}$, $O_2 = 0.4 - 8 \text{ ppm}$, $\kappa = 0.06 - 0.25 \text{ } \mu\text{S/cm}$), Werkstoff- (0.004 – 0.018 Gew.% S) und Belastungsparameter ($\Delta K = 11 - 62 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $R = 0.2 - 0.8$, $\nu = 3 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-3} \text{ Hz}$) und decken dabei den SWR/NWC-Betrieb und die RDB-Werkstoffe in Schweizer KKW weitgehend konservativ ab.

In Figur 19 sind die in Heisswasser gemessenen Risswachstumsraten da/dt_{SwRK} gegen die an Luft unter identischen Belastungsbedingungen gemessenen Risswachstumsraten da/dt_{inert} aufgetragen. Man erkennt, dass die Risswachstumsraten da/dt_{SwRK} in Heisswasser trotz z. T. stark unterschiedlichen Versuchsbedingungen für eine gegebene Risswachstumsrate da/dt_{inert} an Luft nur innerhalb von einer Größenordnung variieren. Mit abnehmender Belastungsfrequenz (von rechts nach links in Figur 19) beobachtet man des weiteren eine Zunahme der Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstums, dass bei sehr geringen Risswachstumsraten da/dt_{inert} an Luft (bzw. sehr niedrigen Belastungsfrequenzen) bis zu mehr als drei Größenordnungen betragen kann. Eine lineare Regression mit dem Superpositionsmodell (Gleichung (3)) ergibt für diesen Datensatz folgende Gleichung für das Risswachstum in Heisswasser:

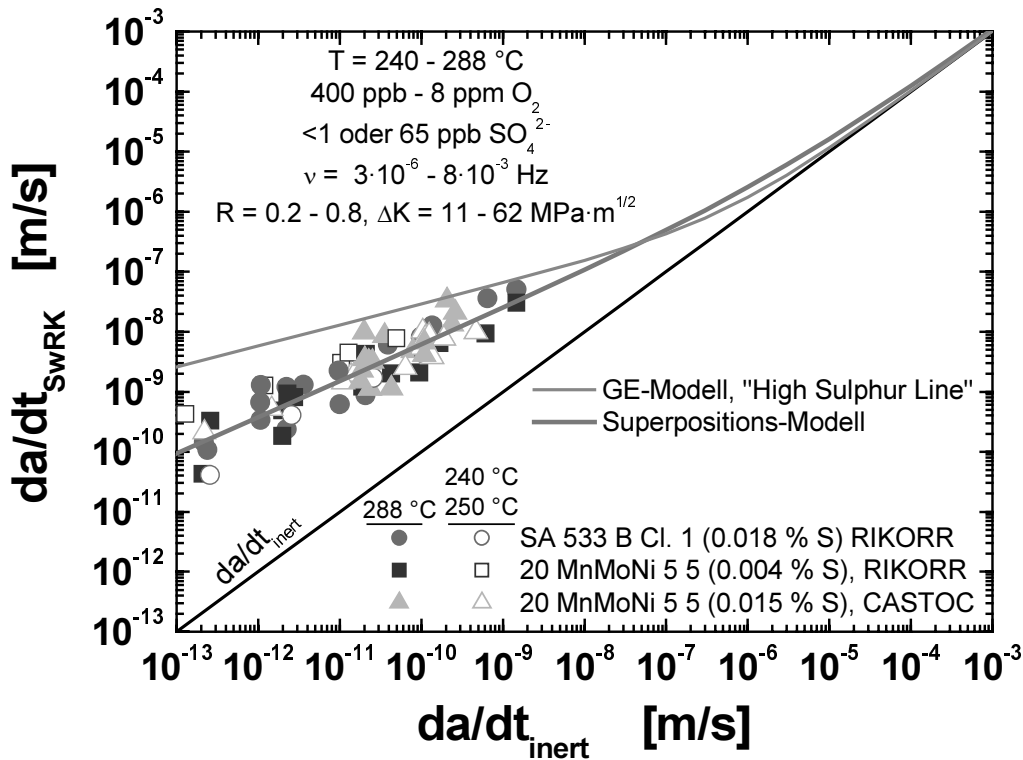
$$da/dt_{SwRK} = 6.6 \cdot 10^{-3} \cdot (da/dt_{inert})^{0.6} + da/dt_{inert} \quad (4)$$

da/dt in m/s

Gleichung (4) lässt sich über die Lastaufbringungszeit Δt_R (bzw. Frequenz $\nu = 1/(2 \cdot \Delta t_R)$) auch sehr einfach in die üblichere, zyklische Form umwandeln:

$$\Delta a / \Delta N_{SwRK} = 5.7 \cdot 10^{-9} \cdot \Delta t_R^{0.4} \cdot (\Delta K / (2.88 - R))^{1.842} + (7.87 \cdot 10^{-11} / \Delta t_R) \cdot (\Delta K / (2.88 - R))^{3.07}$$

$\Delta a / \Delta N_{SwRK}$ in m/Zyklus, Δt_R in s, ΔK in $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. (5)



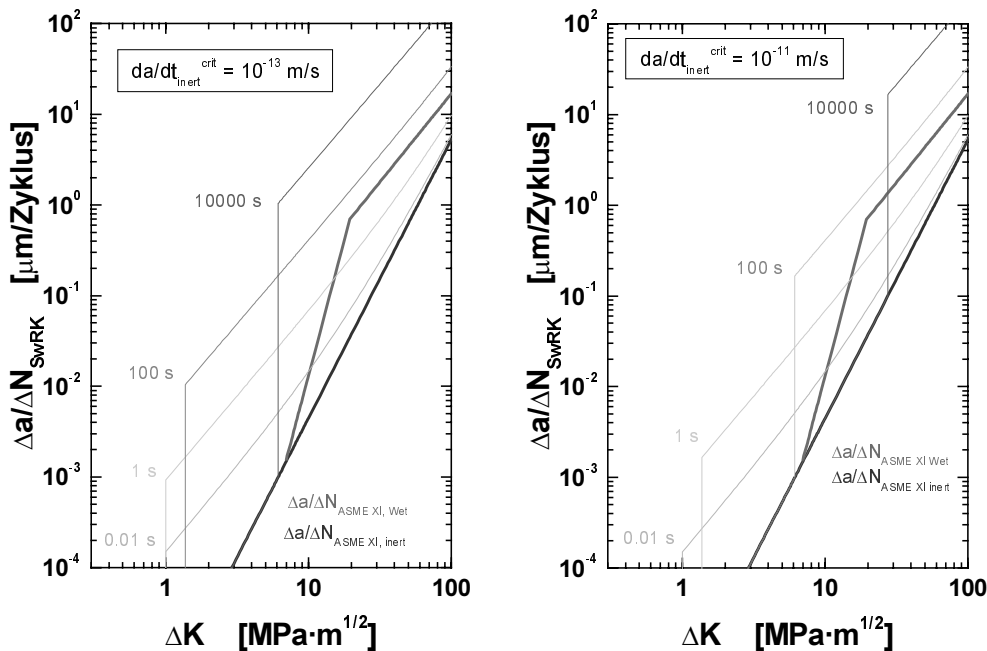
Figur 19: „Time Domain“ Analyse eines SwRK-Datensatzes unter simulierten SWR/NWC-Bedingungen mit dem Superpositionsmodell und Vergleich mit der „High Sulphur“ Grenzkurve des GE-Modells [42].

Die Ergebnisse in Figur 19 deuten darauf hin, dass die kritische Risswachstumsrate unter stark oxidierenden SWR/NWC-Bedingungen ($+50 \leq ECP \leq +200 \text{ mV}_{\text{SWE}}$) unterhalb von 10^{-13} m/s liegen könnte. Die exakte Bestimmung der kritischen Risswachstumsrate unter SWR/NWC-Bedingungen erfordert weitere Experimente bei noch tieferen Belastungsfrequenzen und Belastungen. Unter reduzierenden DWR-Bedingungen ($-800 \leq ECP \leq -600 \text{ mV}_{\text{SWE}}$) hingegen wurde eine um mindestens drei Grössenordnungen höhere kritische Risswachstumsrate von 10^{-10} bis 10^{-9} m/s beobachtet [26].

Gleichung (2) und (4) liefern zusammen eine vollständige Beschreibung des SwRK-Risswachstumsverhalten unter den in Figur 19 definierten Versuchsbedingungen und stellen deshalb auch eine mögliche Grenzkurve für das SwRK-Risswachstum in ferritischen RDB-Stählen unter SWR/NWC-Bedingungen dar. Die Gleichungen vermögen den überwiegenden Teil der experimentellen Daten innerhalb eines Faktors von 3 richtig vorherzusagen, was als sehr guter Wert für die Risskorrosion und den breiten Versuchsparameterbereich betrachtet werden kann. Sie beschreiben allerdings nur das „mittlere“ Materialverhalten unter konservativen Testbedingungen und decken deshalb nicht alle Versuchsdaten vollständig ab. Die Festlegung abgesicherter Grenzkurven erfordert aber noch eine wesentliche Erweiterung der Datenbasis durch weitere, qualifizierte Experimente. Neben SWR/NWC-Bedingungen sollten entsprechende Kurven auch für SWR/HWC- und DWR-Betriebsbedingungen ermittelt werden, da diese stark unterschiedlichen Bereichen von Korrosionspotentialen entsprechen.

Figur 20 zeigt die mit Gleichung (4) entwickelten zyklischen SwRK-Referenzkurven für ein Spannungsverhältnis R von 0.2. Hierbei ist der Rissfortschritt pro Zyklus $\Delta a / \Delta N_{\text{SwRK}}$ gegen die Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktor ΔK für verschiedene Lastaufbringungszeiten Δt_R und zwei unterschiedliche kritische Risswachstumsgeschwindigkeiten $da/dt_{\text{inert}}^{\text{crit}}$ aufgetragen und mit den entsprechenden Referenzermüdungsrisswachstumskurven im ASME BPV Regelwerk verglichen. Man erkennt, dass die zur Zeit geltenden Referenzermüdungsrisswachstumskurven im ASME BPV Regelwerk bei hohen ΔK und hohen Lastaufbringungszeiten (niedrige Belastungsfrequenzen) bzw. niedrigen ΔK und niedrigen

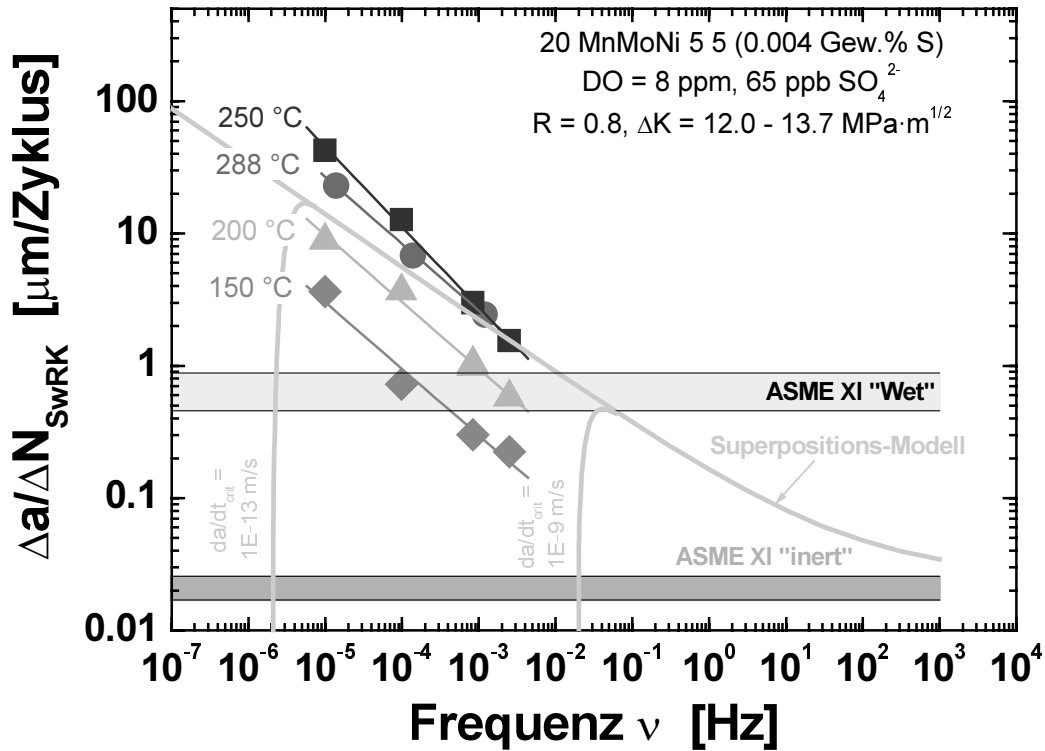
Lastaufbringungszeiten (hohe Belastungsfrequenzen) nach diesem Modell zum Teil deutlich überschritten werden und deshalb nicht in jedem Fall konservativ sind. Andererseits gibt es auch einige Kombinationen von ΔK und Δt_R bei denen die ASME XI Referenzermüdungsrisswachstumskurve das Risswachstum viel zu konservativ wiedergibt. Der Vorteil der vorgeschlagenen Methode ist einerseits, dass sie das beobachtete Risswachstumsverhalten besser und realistischer wiedergibt und andererseits Bedingungen und Schwellwerte (z. B. ΔK_{SwRK}) zu definieren vermag, unter denen Umgebungseffekte zu berücksichtigen sind oder vernachlässigt werden können. Letzteres ist für die Akzeptanz neuer Risswachstumskurven durch die Regelwerksausschüsse ein ganz entscheidender Aspekt.



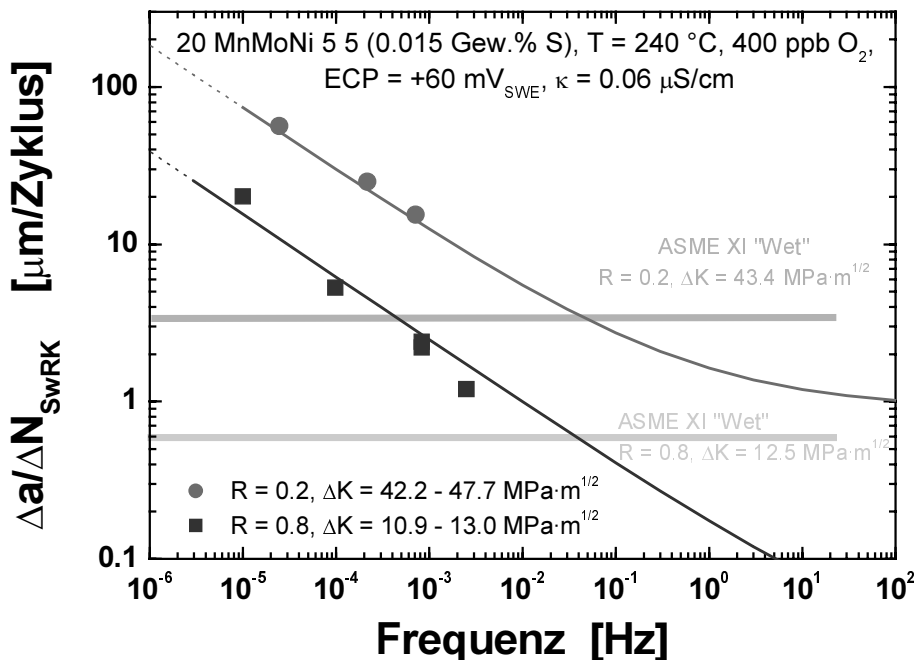
Figur 20: Vergleich der mit Gleichung (4) entwickelten SwRK-Referenzermüdungsrisswachstumskurven für ein Spannungsverhältnis R von 0.2 und eine kritische Risswachstumsrate da/dt_{inert}^{crit} von 10^{-13} m/s (links) und 10^{-11} m/s (rechts) mit den entsprechenden ASME XI Risswachstumskurven.

In Figur 21 und 22 wird das Superpositionsmodell (Gleichung 4) mit ausgewählten SwRK-Ergebnissen aus dem RIKORR und CASTOC-Projekt [41] sowohl unter konservativen als auch unter sehr realitätsnahen Umgebungsbedingungen verglichen. Die betrachteten RDB-Werkstoffe a und f zeigten im Vergleich zu den anderen untersuchten Stählen mitunter die höchsten Risswachstumsraten. In Figur 21 erkennt man, dass das Modell unter aggressiven Umgebungsbedingungen nicht alle Versuchsergebnisse konservativ abdeckt (z. B. bei sehr niedrigen Frequenzen), unter realitätsnahen wasserchemischen Bedingungen hingegen das experimentell beobachtete Risswachstumsverhalten sehr gut wiedergibt. Die entwickelte Referenzkurve gibt nur das „mittlere“ Materialverhalten über den in Figur 19 definierten, sehr weiten Parameterbereich wieder.

Es wird betont, dass Gleichung 4 nicht als endgültige Referenzkurve aufgefasst werden darf, sondern nur dazu diene, eine mögliche Vorgehensweise zur Entwicklung neuer Referenzkurven zu skizzieren. Für die Definition neuer Referenzkurven müssen alle verfügbaren SwRK-Risswachstumsdaten in einer Datenbank gesammelt und nach gewissen Gesichtspunkten (Qualität, Systemparameter, ...) durch ein internationales Expertenteam gefiltert und sortiert werden. Solch gewichtete Datensätze können dann zur Modellverifikation und Datenanalyse verwendet werden. Neben dem Superpositionsmodell können hierzu auch das GE-Modell [42] oder einfache statische Analysen verwendet werden. Zur Zeit sind durch EPRI Bestrebungen im Gange, entsprechende Aktivitäten für die Überprüfung bestehender Risswachstumskurven/Definition verbesserter neuer Referenzkurven für alle drei LWR Strukturwerkstoffgruppen (rostfreie Stähle, un- und niedriglegierte Stähle, Nickelbasislegierungen) in die Wege zu leiten.



Figur 21: Vergleich der mit Gleichung (4) berechneten SwRK-Risswachstumsraten mit den mit dem sehr anfälligen RDB-Werkstoff a unter sehr aggressiven Umgebungsbedingungen (8 ppm O₂, 65 ppb SO₄²⁻) experimentell beobachteten Ergebnissen. Bei kleinen Belastungsfrequenzen und Temperaturen von 250 und 288 °C liegen die experimentellen Daten bis maximal um einen Faktor 3 höher als die vorhergesagten Risswachstumsraten.



Figur 22: Gute Übereinstimmung zwischen der mit Gleichung (4) berechneten SwRK-Risswachstumsraten und den mit dem sehr anfälligen RDB-Werkstoff f unter realitätsnahen Umgebungsbedingungen (0.4 ppm O₂, <1 ppb SO₄²⁻) experimentell beobachteten Ergebnissen.

2.1.5.5 Zusammenfassung des bisher zur SwRK gewonnenen Kenntnisstandes

Bei Belastungsfrequenzen < 10 Hz wurde in ferritischen Stählen in sauerstoffhaltigen Heisswasser eine deutliche umgebungsbedingte Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstums beobachtet [26, 27]. Unter den für den RDB bei SWR/NWC-Fahrweise charakteristischen stark oxidierenden Umgebungsbedingungen ($0.4 - 8$ ppm O_2 , $ECP > 0$ mV_{SWE}) hängt der Rissfortschritt pro Zyklus $\Delta a/\Delta N_{SwRK}$ im wesentlichen nur von der Belastungsfrequenz, der Temperatur und der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK , in erster Näherung aber nicht vom Korrosionspotential ($0 - 200$ mV_{SWE}), dem Sulfat-Gehalt der Umgebung oder vom S-Gehalt und der Mikrostruktur des Stahls ab. Letztere Faktoren können allerdings durchaus einen Einfluss auf die Einleitung des SwRK-Risswachstums ausüben. Die beobachteten Trends stimmen dabei sehr gut mit jenen bei der DRK in SRL-Tests überein.

Unterhalb einer Belastungsfrequenz von ca. 10^{-2} Hz nahm für alle geprüften Werkstoffe und Temperaturen ($150 - 288$ °C) der Rissfortschritt pro Zyklus $\Delta a/\Delta N_{SwRK}$ mit abnehmender Belastungsfrequenz zu, während die zeitabhängige SwRK-Risswachstumsrate da/dt_{SwRK} mit abnehmender Belastungsfrequenz absank. Stabiles, stationäres SwRK-Risswachstum wurde bis hinunter zu den tiefsten geprüften Belastungsfrequenzen von 10^{-5} bis 10^{-6} Hz beobachtet, was auf eine untere kritische Frequenz ν_{crit} und kritische Risswachstumsrate da/dt_{inert}^{crit} von $< 10^{-5}$ Hz bzw. $< 10^{-13}$ m/s unter SWR/NWC-Bedingungen hindeutet. Im Belastungsfrequenzbereich zwischen 10^{-5} und 10^{-2} Hz nahm der Rissfortschritt pro Zyklus $\Delta a/\Delta N_{SwRK}$ mit abnehmender Belastungsfrequenz ν nach einem Potenzgesetz der Form $\Delta a/\Delta N_{SwRK} = D \cdot \nu^{-n}$ zu. Der Exponent n lag dabei je nach Temperatur und Werkstoff zwischen 0.4 und 0.65 und betrug typischerweise zwischen 0.5 bis 0.6 . Für alle untersuchten Belastungsfrequenzen nahm der Rissfortschritt pro Zyklus $\Delta a/\Delta N_{SwRK}$ und die zeitabhängige SwRK-Risswachstumsrate da/dt_{SwRK} mit zunehmender Temperatur zwischen 150 und 250 °C zu, mit einem Maximum/Plateau bei/oberhalb von 250 °C. Im Temperaturbereich von 150 bis 250 °C wurde je nach Belastungsfrequenz und Werkstoff eine Arrhenius-Aktivierungsenergie von 40 bis 50 KJ/mol bestimmt.

Für alle untersuchten Belastungsfrequenzen nahm der Rissfortschritt pro Zyklus $\Delta a/\Delta N_{SwRK}$ und die zeitabhängige SwRK-Risswachstumsrate da/dt_{SwRK} mit zunehmender Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK und ansteigendem Lastverhältnis R zu. In Versuchen mit sehr hohem Lastverhältnis R hat sich ein unterer Schwellwert für das Auftreten von SwRK ΔK_{SwRK} von $1 - 2$ MPa·m^{1/2} angedeutet.

Unter den stark oxidierenden Umgebungsbedingungen ($0.4 - 8$ ppm O_2 , $ECP > 0$ mV_{SWE}) zeigten alle Werkstoffe, d. h. RDB-Stähle mit niedrigem und hohem S-Gehalt und unterschiedlicher DSA-Anfälligkeit sowie das Schweissgut und die WEZ über einen sehr weiten Parameterbereich ein vergleichbares SwRK-Risswachstumsverhalten und sehr ähnliche SwRK-Risswachstumsraten. Ein möglicher Einfluss der DSA deutete sich bei sehr niedrigen Belastungsfrequenzen unterhalb von $5 \cdot 10^{-4}$ Hz an, wo in Stählen mit hoher DSA-Anfälligkeit tendenziell höhere SwRK-Risswachstumsraten beobachtet wurden. Die unterschiedlichen Materialeigenschaften machen sich primär bei der Risseinleitung bemerkbar. So wurde in Stählen mit niedrigem bis mittlerem S-Gehalt und homogener S-Verteilung sowie kleiner DSA-Anfälligkeit auch unter stark oxidierenden Bedingungen häufig Probleme bei der Einleitung von schnellem SwRK-Risswachstum beobachtet, so dass die Risse während langer Phasen oft nur sehr langsam mit Raten knapp oberhalb der Ermüdungsrisswachstumsgeschwindigkeit an Luft wuchsen. Nach erfolgter Einleitung des schnellen SwRK-Risswachstums zeigten aber diese Stähle dieselben Risswachstumsraten wie die anderen Werkstoffe.

Bei Belastungsfrequenzen unterhalb von 10^{-2} Hz führte der Einfluss des Heisswassers zu einer Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstums von einer bis vier Größenordnungen. Der Umgebungseffekt nahm dabei mit abnehmender Belastungsfrequenz und zunehmender Temperatur (mit einem Maximum bei 250 °C) zu. Im Frequenzbereich von 10^{-5} bis 10^{-2} Hz lagen dabei die zeitabhängige SwRK-Risswachstumsraten da/dt_{SwRK} im Bereich von 10^{-10} m/s (3 mm/Jahr) bis $5 \cdot 10^{-8}$ m/s (1600 mm/Jahr) und nahmen mit absinkender Belastungsfrequenz und ansteigender Temperatur (mit einem Maximum bei 250 °C) zu. Die „High Sulphur“ Kurve des GE-Modells [42] deckt dabei alle Risswachstumsdaten konservativ ab. Das Modell scheint aber eine zu hohe kritische Belastungsfrequenz ν_{crit} bzw. kritische Risswachstumsrate da/dt_{inert}^{crit} unter stark oxidierenden Bedingungen vorherzusagen.

Die ASME XI „Wet“ Risswachstumskurven im ASME BPV Regelwerk beschreiben das experimentell in sauerstoffhaltigem Heisswasser (simulierte SWR/NWC-Bedingungen) beobachtete SwRK-Risswachstumsverhalten nur unzureichend und ungenau. Je nach Systembedingungen sind die Risswachstumskurven entweder deutlich zu konservativ (z. B. bei Frequenzen $> 10^{-1}$ Hz und hohen $\Delta K > 10$ MPa·m^{1/2} oder bei Belastungsfrequenzen $< 10^{-1}$ Hz und ECP < -200 mV_{SWE}) oder überhaupt nicht konservativ. Die ASME XI „Wet“ Risswachstumskurven wurden beispielsweise in allen untersuchten Werkstoffen bei Temperaturen ≥ 150 °C und Belastungsfrequenzen unterhalb von 10^{-2} bis 10^{-1} Hz unter stark oxidierenden Bedingungen (ECP > 0 mV_{SWE}, 0,4 – 8 ppm O₂) sowohl für niedrige als auch hohe Lastverhältnisse R bei Schwingbreiten des Spannungsintensitätsfaktors $\Delta K \geq 2$ MPa·m^{1/2} z. T. deutlich überschritten. Die ASME XI „Wet“ Risswachstumskurve wurde dabei mit abnehmender Belastungsfrequenz, zunehmender Temperatur (mit Maximum bei 250 °C) und ansteigendem Lastverhältnis R immer deutlicher, z. T. um mehr als drei Grössenordnungen, überschritten. Aufgrund der erzeugten Ergebnisse scheint deshalb eine Anpassung der Referenzkurven im Regelwerk wünschenswert. Basierend auf einem einfachen Superpositionsmodell und der „Time-Domain“ Analyse der Versuchsdaten wird ein einfacher Weg vorgeschlagen, wie neue Referenzkurven entwickelt werden könnten, welche einerseits das mittlere Materialverhalten realistisch aber dennoch konservativ wiedergeben und andererseits den starken Einfluss der Belastungsfrequenz mitberücksichtigen. Diese Vorgehensweise führt je nach Systembedingungen entweder zu deutlich höheren oder tieferen Risswachstumsraten als in den heutigen ASME XI „Wet“ Risswachstumskurven.

2.1.6 Spannungsrissskorrosion (SpRK)

Im abgeschlossenen SpRKII-Projekt wurde in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei allen untersuchten RDB-Grundwerkstoffen bei einer Temperatur von 288 °C selbst bei 8 ppm O₂ und 65 ppb SO₄²⁻ und bis hin zu hohen Werten des Spannungsintensitätsfaktors nur eine äusserst geringe SpRK-Risswachstumsanfälligkeit beobachtet [1, 27]. Durch die langsame Lastaufbringung oder durch niederfrequente zyklische Last hervorgerufenen schnelles DRK- bzw. SwRK-Risswachstum klang innerhalb einer kurzen Zeitdauer nach dem Wechsel zu konstanter Last kontinuierlich ab und kam typischerweise innerhalb von 100 bis 1000 h zum Stillstand. Schnelles, langanhaltendes Risswachstum konnte nur bei extrem hohen Belastungen nahe dem K_I-Wert oder bei stark verunreinigtem Kühlmittel (ausserhalb des EPRI Action Level 3, wo eine Schnellabschaltung des Reaktors empfohlen wird) nicht ausgeschlossen werden [1, 27]. Der konservative Charakter der BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurven [35] wurde im Rahmen dieser Untersuchungen für den RDB-Grundwerkstoff und den stationären SWR-Leistungsbetrieb bei heutiger Wasserchemiefahrweise (EPRI- oder VGB-Richtlinien) durch zahlreiche Laborexperimente weiter bestätigt.

Der Einfluss der Temperatur, kleiner Belastungsfrequenzen bei hohem Spannungsverhältnis ($R > 0.95$), von periodischen Teillastungen und von Materialeigenschaften (S-Gehalt, DSA-Anfälligkeit, Wärmebehandlungszustand) auf das SpRK-Risswachstum verschiedener RDB-Grundwerkstoffe unter stark oxidierenden Umgebungsbedingungen (8 ppm O₂) wurde im Rahmen der BFE-Jahresberichte 2000 und 2001 [28, 32] eingehend diskutiert. Diese ersten orientierenden Untersuchungen zeigten klar, dass die SpRK-Grenzkurven sowohl bei niederfrequenten, sehr kleinen Lastfluktuationen bei hohem Spannungsverhältnis („Ripple Loading“) als auch bei mittleren Temperaturen (200 – 250 °C) für RDB-Stähle, die eine ausgeprägte Anfälligkeit für DSA zeigen, überschritten werden können.

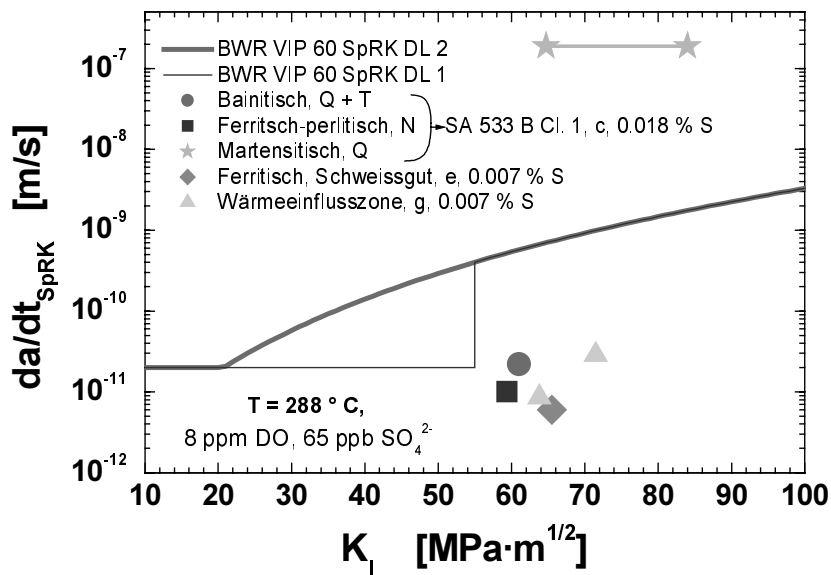
Im folgenden sollen die neuen Resultate zum Einfluss der Mikrostruktur (Schweissgut und WEZ) und Härte vorgestellt werden. Anschliessend werden die neuen Ergebnisse zum Einfluss der DSA und der „Ripple Load“ Belastung unter realitätsnahen wasserchemischen Bedingungen bei tieferen K_I-Werten diskutiert.

2.1.6.1 Einfluss der Mikrostruktur und der Härte/Streckgrenze bei 288 °C

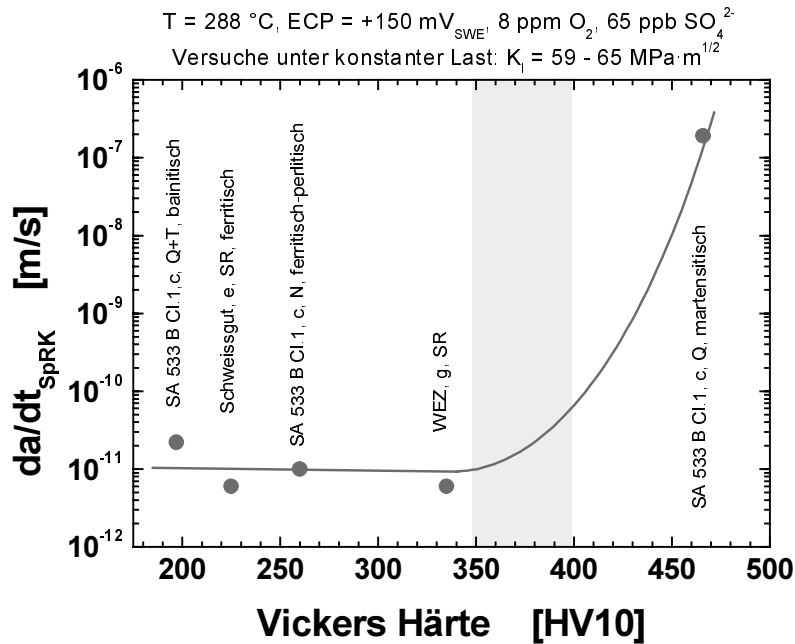
In Figur 23 werden die SpRK-Risswachstumsraten des Schweissguts e und der WEZ g mit verschiedenen Gefügeständen im RDB-Stahl c in sauerstoffhaltigem Heisswasser (8 ppm O₂, 65 ppb SO₄²⁻) bei 288 °C miteinander verglichen. Die unterschiedlichen Gefügestände im RDB-Stahl c wurden durch verschiedene Wärmebehandlungen erzeugt und sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Unter konstanter Last trat in

sauerstoffhaltigem Heisswasser bei 288 °C beim martensitischen Gefüge schnelles, stabiles SpRK-Risswachstum im Bereich von $2 \cdot 10^{-7}$ m/s (6300 mm/Jahr) auf, während das SpRK-Risswachstum bei den anderen Gefügen sehr rasch abklang und Risswachstumsraten $< 2 \cdot 10^{-11}$ m/s (0.6 mm/Jahr) beobachtet wurden. Das Schweissgut e und die WEZ g zeigten also bei 288 °C ebenso wie das bainitische Standard- und das ferritische-perlitische Gleichgewichtsgefüge des RDB-Stahls dasselbe SpRK-Verhalten. Schwefel-Gehalt und Orientierung der Proben zeigten hier zudem keinen erkennbaren Einfluss auf das SpRK-Risswachstum, was primär auf die extrem geringe SpRK-Anfälligkeit unter diesen Bedingungen zurückgeführt werden konnte [1, 27].

Figur 24 zeigt den Einfluss der Härte (bzw. der Streckgrenze) auf das SpRK-Risswachstum bei 288 °C. Die verschiedenen Gefüge mit unterschiedlichen Härten zeigten ein vergleichbares SpRK-Verhalten mit sehr geringen SpRK-Risswachstumsraten solange die Vickershärte (Streckgrenze) auf Werte < 350 HV10 (< 800 MPa) beschränkt blieb. Oberhalb dieser kritischen Härte wurde in Versuchen unter sehr aggressiven Umgebungsbedingungen [34, 36] mit ansteigender Härte eine starke Zunahme der SpRK-Risswachstumsraten/Abnahme des SpRK-Schwellwertes K_{ISCC} beobachtet [34]. In WEZ von RDB-Schweissnähten ist die Vickershärte in der am stärksten aufgehärteten Zone durch die lange Spannungsarmglühung knapp unterhalb der Anlasstemperatur auf Werte < 350 HV5 beschränkt. Allerdings können lokal deutlich erhöhte Mikrohärte von bis zu 400 HV0.2 erreicht werden, so dass in gewissen kritischen, eng lokalisierten Zonen durchaus eine erhöhte SpRK-Risswachstumsanfälligkeit vorliegen könnte. Die Überprüfung dieses Sachverhaltes erfordert die Verwendung spezieller Kompaktzugproben mit Rundkerbe, da es unmöglich ist einen Schwingriss gezielt in diese kritische Zone zu legen.



Figur 23: Einfluss der Mikrostruktur auf das SpRK-Risswachstum in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei 288 °C. Die BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurven wurden hier nur für das martensitische Gefüge überschritten.

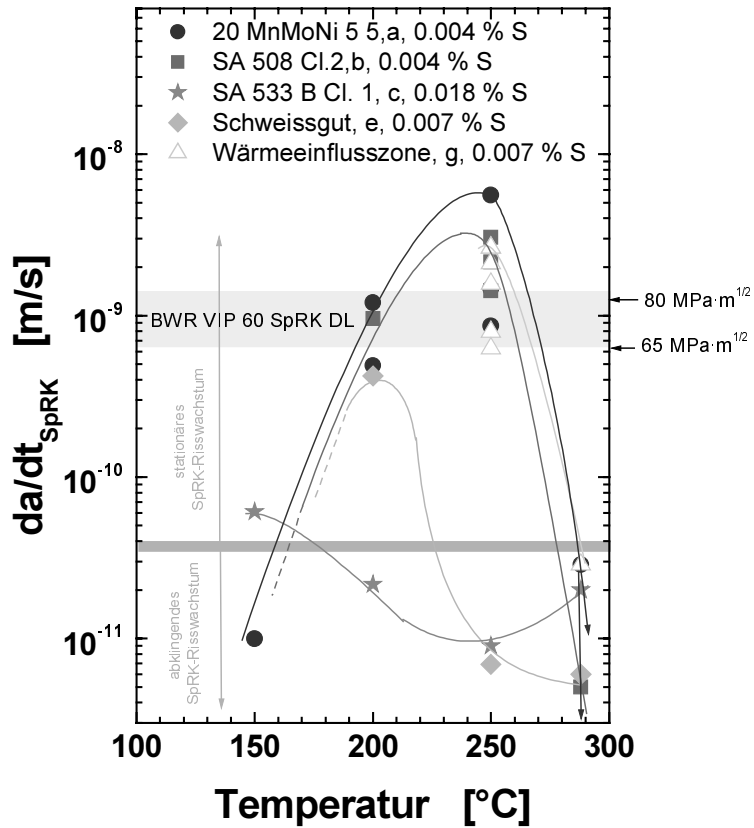


Figur 24: Einfluss der Härte auf das SpRK-Risswachstum. Bis zu einer kritischen Härte von ca. 350 HV10 wird nur ein äusserst geringes SpRK-Risswachstum von $\leq 2 \cdot 10^{-11}$ m/s beobachtet, darüber steigt die SpRK-Risswachstumsrate stark mit zunehmender Härte an.

2.1.6.2 Einfluss der Mikrostruktur in Abhängigkeit der Temperatur

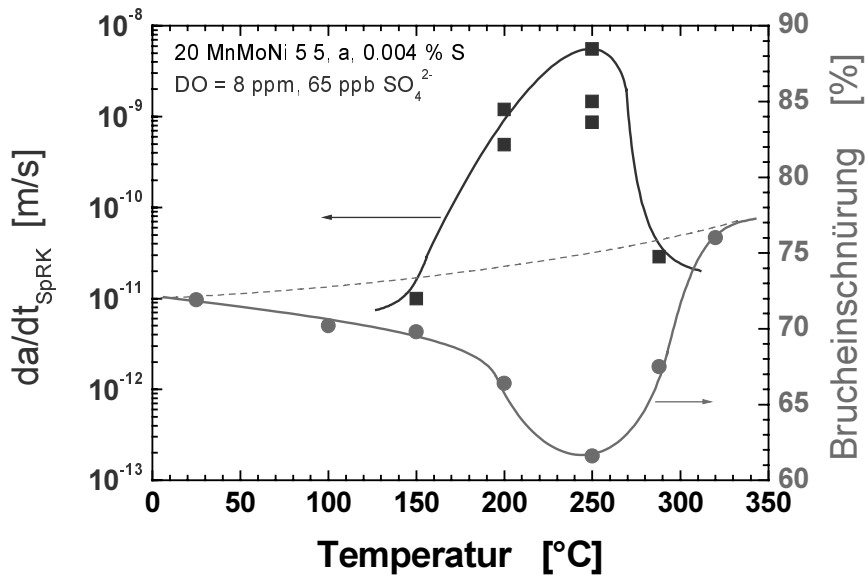
Der Einfluss der Mikrostruktur (Grundwerkstoff/Schweissgut/WEZ) auf das SpRK-Risswachstum in Abhängigkeit der Temperatur wurde in Versuchen mit den RDB-Stählen a - c, dem Schweissgut e sowie der Wärmeeinflusszone g in Heisswasser mit einem Sauerstoff- und Sulfatgehalt von 8 ppm bzw. 65 ppb untersucht. Das Korrosionspotential nahm hierbei leicht von +250 mV_{SWE} bei 150 °C auf +130 mV_{SWE} bei 288 °C ab. Durch eine sägezahnförmige, zyklische Belastung bei einer Frequenz von $8 \cdot 10^{-4}$ Hz und einem Spannungsverhältnis R von 0.8 wurde jeweils vor der Versuchsphase unter konstanter Last ein aktiv wachsender Korrosionsriss (3 bis 300 mm/Jahr) erzeugt.

Die unterschiedliche Temperaturabhängigkeit der verschiedenen Legierungen in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei hohen K_I-Werten von 65 - 80 MPa·m^{1/2} ist in Figur 25 zusammengestellt. Die RDB-Stähle a und b mit niedrigem S- und Al-Gehalt und hoher DSA-Anfälligkeit zeigten dabei sowohl bei 200 und 250 °C stabiles, stationäres SpRK-Risswachstum mit Risswachstumsraten von bis zu $5 \cdot 10^{-9}$ m/s (158 mm/Jahr) bei einem relativ hohen K_I-Wert von 75 MPa·m^{1/2}. Bei 288 °C und 150 °C hingegen wurde eine extrem geringe SpRK-Anfälligkeit mit sehr geringen SpRK-Risswachstumsraten (< 0.6 mm/Jahr) beobachtet. Ebenso zeigten das Schweissgut e und die WEZ g bei mittleren Temperaturen von 200 bzw. 250 °C schnelles, stabiles SpRK-Risswachstum mit Risswachstumsraten im Bereich oder knapp oberhalb der BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurve. Bei 288 °C wurde hingegen trotz des relativ hohen K_I-wertes nur eine geringe SpRK-Anfälligkeit mit Risswachstumsraten < 0.6 mm/Jahr beobachtet. Die Versuche mit der WEZ bei 200 und 150 °C sind zur Zeit noch im Gange. Im RDB-Stahl c mit hohem S- und Al-Gehalt wurde über den ganzen Temperaturbereich von 150 - 288 °C zeitlich abklingendes SpRK-Risswachstum mit extrem geringen Risswachstumsraten deutlich unterhalb der BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurve beobachtet.

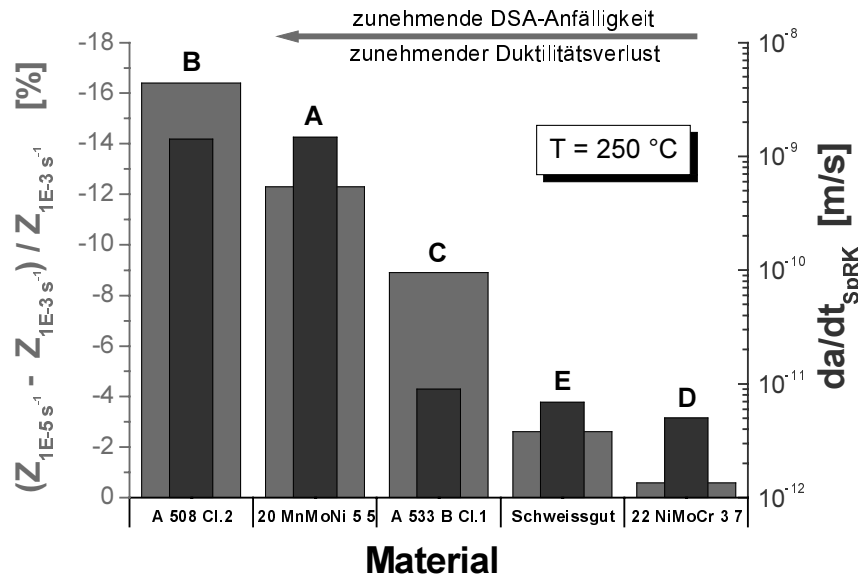


Figur 25: Einfluss der Temperatur auf das SpRK-Risswachstum in sauerstoffhaltigem Heisswasser in den RDB-Stählen a, b und c sowie im Schweissgutwerkstoff e und der WEZ g.

Wie bei der DRK wird auch hier die DSA als mögliche Ursache für das Maximum der SpRK-Anfälligkeit bei mittleren Temperaturen betrachtet, da das Maximum der SpRK-Risswachstumsanfälligkeit im RDB-Stahl a recht gut mit dem Maximum der DSA-Anfälligkeit zusammenfällt. Dies ist in Figur 26 beispielhaft für den RDB-Stahl a gezeigt. Zudem korreliert die SpRK-Risswachstumsrate bei einer Temperatur von 250 °C recht gut mit der unterschiedlichen DSA-Anfälligkeit der verschiedenen Stähle (Figur 27).

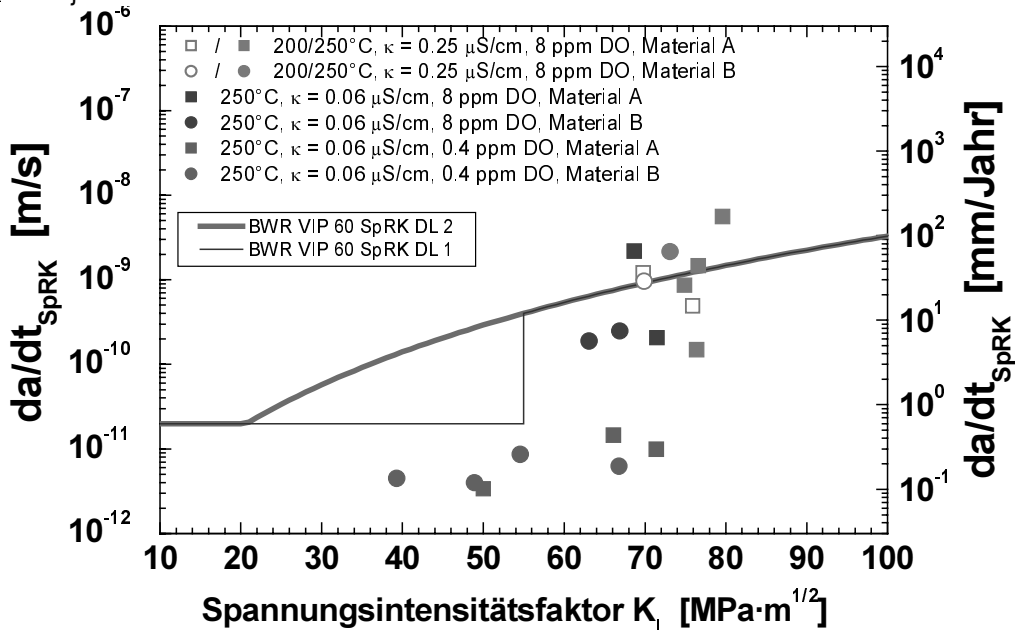


Figur 26: Zusammenfallen des Maximums der SpRK-Risswachstumsraten im RDB-Stahl a mit dem Minimum der Brucheinschnürung (Maximum der DSA-Anfälligkeit) in Zugversuchen an Luft.



Figur 27: Grobe Übereinstimmung zwischen den in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei 250 °C beobachteten SpRK-Risswachstumsraten und der DSA-Anfälligkeit (relative Abnahme der Brucheinschnürung bei einer Reduktion der Dehnrate von 10⁻³ auf 10⁻⁵ s⁻¹) der verschiedenen Werkstoffe bei dieser Temperatur.

Der mögliche Einfluss der DSA wurde in weiteren Versuchen mit den beiden RDB-Stählen a und b mit der höchsten DSA-Anfälligkeit bei einer Temperatur von 250 °C bei realitätsnahen Wasserchemiebedingungen ($\kappa = 0.06 \mu\text{S/cm}$, 8 ppm/0.4 ppm O₂) und tieferen K_I-Werten untersucht. Bei einem durch einen erhöhten Sauerstoffgehalt eingestelltem realitätsnahen Korrosionspotential von ca. +200 mV_{SWE} trat in höchstem Heisswasser mit einer Leitfähigkeit von ca. 0.06 $\mu\text{S/cm}$ in beiden Werkstoffen weiterhin schnelles stabiles SpRK-Risswachstum knapp unterhalb oder leicht oberhalb der BWR VIP 60 SpRK Grenzkurven auf. Bei einer Reduktion des Sauerstoffgehalts auf 0.4 ppm (entspricht ca. +50 mV_{SWE}) wurden hingegen bis zu hohen Werten des Spannungsintensitätsfaktors von bis zu 73 MPa·m^{1/2} nur sehr geringe SpRK-Risswachstumsraten von < 0.3 mm/Jahr beobachtet (Figur 28). Die deutlich reduzierte SpRK-Risswachstumsanfälligkeit bei 0.4 ppm O₂ muss jedoch noch durch weitere Versuche verifiziert werden.

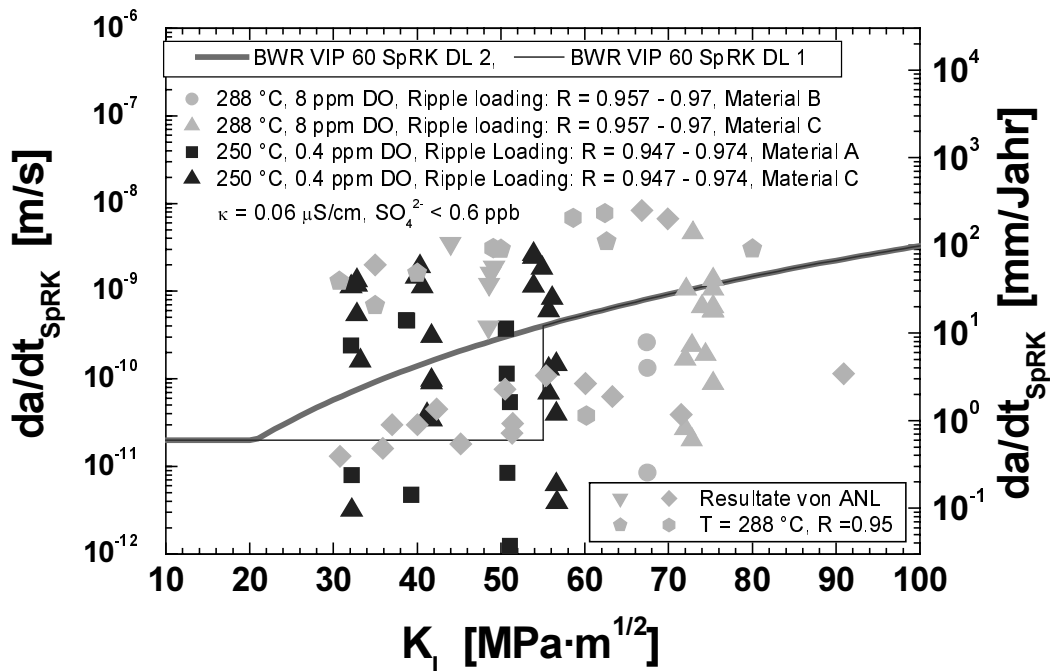


Figur 28: SpRK-Risswachstumsraten in den RDB-Stählen a und b mit höchster DSA-Anfälligkeit bei mittleren Temperaturen von 200 – 250 °C in Heisswasser (<1 ppb/65 ppb SO₄²⁻) bei einem realitätsnahen Korrosionspotential von +200 mV_{SWE} (8 ppm O₂) und einem praxisnahen Sauerstoffgehalt von 0.4 ppm.

2.1.6.3 Einfluss kleiner Lastfluktuationen bei hohem Spannungsverhältnis

Die Untersuchungen zum Einfluss niederfrequenter Lastwechsel kleiner Amplitude bei sehr hohem Spannungsverhältnis („Ripple Loading“) im Bereich des Schwellenwertes der Ermüdung ΔK_{th} an Luft von von 1 – 3 MPa·m^{1/2} wurde durch weitere Untersuchungen bei einem tieferen Sauerstoffgehalt von 0.4 ppm und kleineren Spannungsintensitätsfaktors $K_{I,max}$ von 30 bis 60 MPa·m^{1/2} ergänzt.

Figur 29 vergleicht die Ergebnisse von „Ripple Load“ Versuchen mit den RDB-Stählen a, b und c bei einem R-Wert von 0.947 bis 0.97 (ΔK von 3.3 bis 1.5 MPa·m^{1/2}) in hochreinem Heisswasser ($\kappa = 0.6 \mu\text{S/cm}$, $< 0.6 \text{ ppb Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) bei 288 °C/250 °C und einem Sauerstoffgehalt von 8 ppm (+150 bis +200 mV_{SWE}) bzw. 0.4 ppm (+50 mV_{SWE}) mit den BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurven. Zusätzlich sind entsprechende Ergebnisse aus ähnlichen Untersuchungen durch das Argonne National Laboratory (USA) unter vergleichbaren Versuchsbedingungen eingetragen [43]. Für die Lastschwankungen wurde eine asymmetrische Sägezahnbelastung gewählt und die Belastungsfrequenz systematisch zwischen $5 \cdot 10^{-2}$ und $4 \cdot 10^{-5}$ Hz variiert.



Figur 29: Vergleich der BWR VIP 60 SpRK Grenzkurven mit den unter „Ripple Load“ Belastung in hochreinem Heisswasser bei einem realitätsnahen Korrosionspotential bzw. Sauerstoffgehalt in den RDB-Stählen a – c bei Belastungsfrequenzen von $5 \cdot 10^{-2}$ bis 10^{-5} Hz beobachteten SpRK-Risswachstumsraten. Die Ergebnisse von ANL sind aus [43] entnommen.

Im Belastungsfrequenzbereich von $5 \cdot 10^{-2}$ bis 10^{-4} Hz wurde in den Stählen a und c sowohl bei einem Sauerstoffgehalt von 8 und 0.4 ppm zumindest phasenweise für längere Perioden stabiles, stationäres SpRK-Risswachstum mit Risswachstumsraten von 10^{-9} bis zu $5 \cdot 10^{-9}$ m/s bei einem $K_{I,max}$ von 30 – 77 MPa·m^{1/2} beobachtet, wobei der Riss in einzelnen Fällen zwischenzeitlich (eventuell durch Risschliesseffekte) stehen blieb, um nach einer grösseren Zyklenzahl wieder weiter fortzuschreiten. Zu niedrigeren Belastungsfrequenzen hin (10^{-5} Hz) klang das Risswachstum jeweils ab und kam zum Stillstand. Im Vergleich zur rein statischen Belastung führt die „Ripple Load“ Belastung im geeigneten Frequenzbereich in diesen Werkstoffen bei identischen K_I -Werten um bis zu mehr als 2 Grössenordnungen höheren SpRK-Risswachstumsraten.

Der RDB-Stahl c mit hohem S-Gehalt zeigte gegenüber den Stählen mit niedrigem S-Gehalt (a und b) über einen etwas weiteren Parameterbereich schnelles SpRK-Risswachstum und im allgemeinen leicht höhere SpRK-Risswachstumsraten. Bei einen Sauerstoffgehalt von 0.4 und 8 ppm wurden vergleichbare, maximale

SpRK-Risswachstumsraten beobachtet, die im Bereich von 30 – 77 MPa·m^{1/2} nur unwesentlich vom Spannungsintensitätsfaktor $K_{I,max}$ und nur leicht vom Material abhängen. Die maximalen SpRK-Risswachstumsraten aus den „Ripple Load“-Versuchen lagen auch bei einem Sauerstoffgehalt von 0.4 ppm und kleinen $K_{I,max}$ -Werten von 30 MPa·m^{1/2} zum Teil deutlich oberhalb der BWR VIP SpRK Grenzkurve 2, die bis zu einem gewissen Grad auch zyklische Belastungen wie das „Ripple Loading“, die nicht durch die Ermüdungsbewertung und -überwachung erfasst werden, mit abdecken sollte. Bei Erniedrigung der ΔK -Werte unterhalb von 1.5 bis 2 MPa·m^{1/2} wurde allerdings jeweils ein rasches Abklingen der Risswachstumsgeschwindigkeiten unterhalb der BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurve 1 beobachtet, oft verbunden mit einem Rissstillstand. Es deutet sich deshalb aus diesen Versuchen ein Schwellwert ΔK_{SWRK} für das Auftreten von Risskorrosion von 1.5 bis 2 MPa·m^{1/2} an.

Die bisherigen Ergebnisse lassen vermuten, dass das Risswachstum unter „Ripple Load“ Belastung als normale SwRK bei kleinen ΔK - und sehr hohen R-Werten verstanden werden kann und nicht als neuartiges Phänomen gedeutet werden muss. Da diese „Ripple Load“ Belastungen weder bei der Ermüdungsbewertung noch durch entsprechende Überwachungs- und Monitoringprogramme erfasst werden, erscheint aus praktischer Sicht ein Vergleich der zeitabhängigen Risswachstumsraten mit den BWR VIP 60 SpRK-Risswachstumskurven dennoch sinnvoller als ein entsprechender Bezug der Rissfortschritte pro Zyklus zu den ASME XI Referenz-Ermüdungsrisswachstumskurven.

Der Schwellwert ΔK_{SWRK} und der starke Einfluss dieser kleinen Lastfluktuationen sollte noch bei praxisnahen Bedingungen, d.h. bei deutlich tieferen ΔK -Werten sowie signifikant höheren Belastungsfrequenzen überprüft werden. Die Versuche bei sehr hoher Frequenz können allerdings nicht mit den Belastungseinrichtungen des PSI simuliert werden.

2.1.6.4 Zusammenfassung des bisher zur SpRK gewonnenen Kenntnisstandes

Eine erhöhte Anfälligkeit für eine Anrissbildung durch SpRK an der Werkstoffoberfläche von fehlerfreien ferritischen Komponenten besteht nur bei Kombinationen von hohen mechanischen Spannungen deutlich oberhalb der Warmstreckgrenze und hohen Konzentrationen an O₂, Cl⁻ und SO₄²⁻ sowie quasi-stagnierenden Bedingungen. Eine Anrissbildung durch SpRK im stationären SWR-Leistungsbetrieb scheint deshalb äusserst unwahrscheinlich. [26]

In hochreinem Heisswasser ($\kappa \approx 0.1 \mu\text{S/cm}$) wurde selbst unter stark oxidierenden Bedingungen (+150 mV_{SWE}) für Spannungsintensitätsfaktoren $K_I \leq 60 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ beim Übergang von zyklischer/langsam ansteigender (transiente Betriebsbedingungen) zu statischer Last (störungsfreier, stationärer Leistungsbetrieb) jeweils ein Abklingen des schnellen DRK/SwRK-Risswachstums (von bis zu einigen m/Jahr) auf Raten in den Bereich der BWR VIP SpRK-Grenzkurve 1 innerhalb weniger bis maximal 100 h beobachtet. Diese Beobachtung wurde auch durch Versuche mit trapezförmiger Belastung (periodische Teilentlastung) mit zunehmender Haltezeit bei konstanter Maximallast bestätigt, bei denen für lange Haltezeiten (> 10 h) ein starkes Abklingen des Risswachstum mit anschliessendem Rissstillstand beobachtet wurde.

Unter den folgenden vier Bedingungen

- statische Belastung
- Kleinbereichsflussbedingungen (linear-elastisch) und EDZ
- K_I -Werte < 55 MPa m^{1/2}
- hohe Reinheit des Heisswassers ($\kappa, \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-} < \text{EPRI Action Level 1}$)

liegt das SpRK-Risswachstum in sauerstoffhaltigem Heisswasser ($\leq 8 \text{ ppm O}_2$) unterhalb der BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurve 1. Das SpRK-Risswachstum unter rein statischer Belastung für den störungs- und transientenfreien SWR/NWC-, SWR/HWC- und DWR-Leistungsbetrieb wird deshalb ausreichend konservativ durch die BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurve 1 abgedeckt. Unter gewissen Bedingungen („Ripple Loading“,

mittlere Temperaturen und Anfälligkeit für DSA) wurden selbst bei höchster Reinheit des Heisswassers SpRK-Risswachstumsraten im Bereich oder z. T. leicht oberhalb der BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurve 2 beobachtet.

Für den RDB im stationären SWR-Leistungsbetrieb liegen die Temperaturen typischerweise im Bereich von 270 – 290 °C und für die meisten Bereiche kann mit sehr guter Approximation eine statische Beanspruchung vorausgesetzt werden. Die Grenzkurven sind hier für den RDB-Grundwerkstoff konservativ und müssen nur noch durch einige zusätzliche Versuche mit Schweissgutwerkstoffen und WEZ besser abgesichert werden. Für den Speisewasserstutzen hingegen, wo deutlich tiefere Temperaturen bis hin zu 220 °C auftreten und zumindest temporär auch gewisse Belastungsfluktuationen beobachtet werden können, stellt sich die Frage, ob hier die Grenzkurven allenfalls angepasst werden müssen.

Schnelles, langanhaltendes SpRK-Risswachstum scheint nur bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer, ungünstiger und für den normalen Reaktorbetrieb z. T. atypische Bedingungen möglich zu sein. Kombinationen folgender Faktoren können ein schnelles SpRK-Risswachstum oberhalb der BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurve 2 begünstigen:

- ein hohes Korrosionspotential $ECP > +100 \text{ mV}_{SWE}$ oder ein hoher Sauerstoffgehalt ($>> 200 \text{ ppb}$).
- quasi-stagnierende Strömungsbedingungen.
- erhöhte Konzentrationen an schwefelhaltigen Anionen (SO_4^{2-} , HS^- , S^{2-} , H_2S , $> \text{EPRI Action Level 3}$, d. h. $\geq 100 \text{ ppb}$) und an Chlorid ($> \text{EPRI Action Level 2}$, d. h. $\geq 20 \text{ ppb}$).
- ein hoher Schwefel-Gehalt ($> 0.020 \text{ Gew.}\% \text{ S}$) des Stahls, insbesondere bei Auftreten von Schwefel-Segregationszonen.
- mittlere Temperaturen (200 – 270 °C) in Verbindung mit einer ausgeprägten DSA-Anfälligkeit (d. h. hoher Gehalt an interstitiell gelöstem N und C).
- stark aufgehärtete Zonen (Härte $> 350 \text{ HV}_5$, $R_p > 800 \text{ MPa}$) in der WEZ von Schweissnähten bei unsachgemässer Schweissung/Wärmebehandlung.
- hohe mechanische Belastungen mit hohen Nennspannungen im Ligament nahe der Warmstreckgrenze und insbesondere bei starker Verletzung von Kleinbereichsflussbedingungen (\rightarrow Niedertemperaturkriechflussvorgänge).
- überlagerte Lastfluktuationen mit kleiner Amplitude bei hohem Lastverhältnis $R > 0.95$ („Ripple Loading“) oder überlagerte relativ häufige Laständerungen (z. B. periodische Teillastung)

Unter diesen in vielen Fällen für den störungsfreien Reaktorbetrieb und ordnungsgemäss hergestellte und wärmebehandelte ferritische Komponenten atypischen Bedingungen kann das SpRK-Risswachstum durch die „High Sulphur“ SpRK-Risswachstumskurve ($da/dt_{SpRK} = 9.6 \cdot 10^{-11} \cdot K_I^{1.4}$, in m/s bzw. $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) [42] konservativ abgeschätzt werden.

In zusätzlichen Experimenten sollte einerseits noch untersucht werden, bis zu welchem Grad die BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurve 2 das SpRK-Risswachstum während reaktortypischen (nicht zu extremen) wasserchemischen Transienten sowie während Lastfluktuationen (die nicht durch die Ermüdungsüberwachung erfasst werden) abdeckt. Andererseits sollte weiter abgeklärt werden, ob die BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurve 1 in RDB-Werkstoffen mit hoher DSA-Anfälligkeit auch bei K_I -Werten deutlich unterhalb von $60 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ überschritten werden kann. Es wird deshalb empfohlen weitere Versuche bei mittleren Temperaturen von 200 – 270 °C mit Werkstoffen (Grundwerkstoff, Schweissnaht und WEZ) hoher DSA-Anfälligkeit bei K_I -Werten unterhalb von $60 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ sowie mit „Ripple Load“ Belastung unter praxisnahen Bedingungen, d.h. sehr kleinen ΔK und hohen Frequenzen sowie realistischen, wasserchemischen Bedingungen durchzuführen. Das Risswachstumsverhalten während und nach Wasserchemietransienten sollte mit Chlorid-Konzentrationen von 20 ppb (EPRI Action Level 2) und 5 ppb (EPRI Action Level 1) weiter untersucht werden.

2.2 Publikationen 2002

- **S. Ritter, H.P. Seifert**, „Stress Corrosion Cracking of Low-Alloy Reactor Pressure Vessel Steels and of a Weld Filler Material under BWR Conditions”, 15th International Corrosion Congress ICC, CD-ROM, Paper No. 648, pp. 1 – 9, Granada, Spanien, 22. – 27. September 2002.
- **S. Ritter, H.P. Seifert**, „Strain-Induced Corrosion Cracking of Low-Alloy RPV-Steels under BWR Conditions”, NACE Corrosion 2002, CD-ROM, Paper No. 02516, pp.1 – 18, Denver, USA, 8. – 12. April 2002.
- **H.P. Seifert, S. Ritter**, „SICC and Low-frequency Corrosion Fatigue of Low-Alloy RPV Steels, of a Weld Filler and Weld HAZ Material under BWR Conditions – Effect of Temperature and Loading Rate/Frequency”, Minutes of the 2002 Annual Meeting of the International Cooperative Group on Environmentally Assisted Cracking of Light Water Reactor Materials, Ed.: J. Hickling, Low-Alloy Steel Session, Paper L4, Lyon, Frankreich, 14 – 19. April, 2002.
- **H.P. Seifert**: „Literature Survey on the Stress Corrosion Cracking of Low-Alloy Steels in High-Temperature Water”, PSI Bericht Nr. 02-06, Februar 2002.
- **S. Ritter, H.P. Seifert**: „Characterization of the Lower Shell and Weld Material of the Biblis C Reactor Pressure Vessel, PSI-Bericht Nr. 02-01, Januar 2002.
- **H.P. Seifert, S. Ritter**: „Environmentally-Assisted Cracking of Low-Alloy Reactor Pressure Vessel Steels under Boiling Water Reactor Conditions”, PSI-Bericht Nr. 02-05, Februar 2002.
- **D. Kalkhof, H.P. Seifert**, „Current Research Activities in the Field of Structural Integrity“, OECD NEA CSNI PWG IAGE Meeting 2002, Paris, Frankreich, 13. – 14. Mai 2002.

PSI-Publikation aus dem CASTOC-Projekt mit Bezug zur RIKORR-Thematik:

- **U. Ehrnstén, M. Ernestova, J. Foehl, D. Gomez-Briceno, F. Hüttner, J. Lapena, A. Roth, S. Ritter, H. P. Seifert, M. Zamboch**: „Crack Growth of Pressure Vessel Steel in Simulated BWR Environment, a Summary Report on Inter-Laboratory Investigations”, Technical Report WP1, CASTOC R003, 4. Juni 2002.
- **H.P. Seifert, S. Ritter**: „Effect of a Sulphate and Chloride Transient on the EAC Crack Growth Behaviour of two Low-Alloy RPV Steels in Oxygenated High-Temperature Water under Periodical Partial Unloading Conditions”, Minutes of the 2002 Annual Meeting of the International Cooperative Group on Environmentally Assisted Cracking of Light Water Reactor Materials, Ed.: J. Hickling, Low-Alloy Steel Session, Paper L6, Lyon, France, April 14 –19, 2002.
- **S. Ritter, H.P. Seifert**: „Effect of a Sulphate Transient on the EAC Crack Growth Behaviour of Low-Alloy RPV Steels under Simulated BWR Operating Conditions”, PSI-Bericht 02-09, März 2002.
- **S. Ritter, H.P. Seifert**: „Effect of a Chloride Transient on the EAC Crack Growth Behaviour of Low-Alloy RPV Steels under Simulated BWR Operating Conditions”, PSI-Bericht 02-23, November 2002.

3. Nationale Zusammenarbeit

Auf nationaler Ebene findet die Zusammenarbeit und der Technologietransfer in erster Linie im unmittelbaren kerntechnischen Umfeld statt. Die Überwachungs- und Aufsichtsbehörde HSK und die Schweizer Kraftwerke wurden im Rahmen der HSK-PSI-Projektstatusgespräche/ Halbjahressitzungen [18, 19] und anderer Veranstaltungen [44 - 46] regelmässig über den aktuellen Stand der Arbeiten informiert. Die HSK und das Kernkraftwerk Leibstadt unterstützen das Projekt bei der Zusammenstellung der wasserchemischen und thermomechanischen Randbedingungen von transienten SWR-Betriebsbedingungen.

4. Internationale Zusammenarbeit

Als Mitglied der Fachgruppe ICG-EAC (International Co-operative Group on Environmentally-Assisted Cracking of Light Water Reactor Materials) stehen wir in engem Kontakt mit der internationalen Fachwelt. Die eigenen Forschungsbeiträge werden in diesem internationalen Gremium regelmässig vorgestellt, diskutiert und mit anderen Projekten koordiniert [21, 22]. Ein reger Erfahrungs-/Informationsaustausch wird zudem mit Institutionen wie EPRI (BWR VIP) [46], VGB [47] sowie im Rahmen breiterer internationaler Zusammenarbeit (OECD/NES/CSNI PWG 3 [48]) gepflegt.

Die neuen Ergebnisse des PSI zur SwRK unter SWR/NWC-Bedingungen wurden im Mai dieses Jahres durch Ernie Eason (Modelling & Computer Services, ICG-EAC-Mitglied und Bindeglied zum ASME BPV Regelwerkausschuss, Mitentwickler des neuen Code Case N-643 für SwRK in ferritischen Stählen unter DWR-Bedingungen) der „ASME Section XI Working Group on Flaw Evaluation“ im Auftrag des PSI kurz vorgestellt. Dieser ASME BPV Regelwerks-Unterausschuss begutachtet als erste Ebene Vorschläge für neue Ermüdungsrisswachstumskurven in ferritischen Stählen. Grundsätzlich besteht die Bereitschaft über eine Revision der ASME XI Risswachstumskurven oder einen SWR/NWC Code Case nachzudenken. Die Revision eines Regelwerkes ist aber ein sehr langwieriger und iterativer Prozess, der mit vielen Widerständen verbunden ist. Die Akzeptanz für eine Revision erfordert eine breite Absicherung durch mehrere unabhängige Laboruntersuchungen und insbesondere eine klare Definition von Systembedingungen, bei denen Umgebungseffekte vernachlässigt werden können oder zu berücksichtigen sind. Im Rahmen des nächsten Treffens des ASME BPV Regelwerkausschusses im Februar 2003 in San Francisco ist geplant, dass J. Hickling von EPRI in unserem Auftrag die PSI-Ergebnisse zur SwRK und SpRK nochmals in einem ausführlicheren Rahmen dem Code Committee vorstellt. Als Ergebnis dieses Meetings wird sich zeigen, ob sich weitere Aktivitäten bezüglich einer möglichen Revision von ASME XI, z. B. im Rahmen der ICG-EAC Gruppe oder unter Federführung von EPRI unter Einbezug der SWR-Hersteller, entwickeln werden oder nicht.

Innerhalb des Projektes „CASTOC“ [49] im 5. EU-Rahmenprogramm (2000 – 2003) (EURATOM, EU Nr. FIKS-2000-00048/BBW Nr.: 99.0715) besteht auf dem Gebiet der Risskorrosion ferritischer Druckbehälter- und Rohrleitungsstähle eine intensive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern MPA Stuttgart, Framatome ANP (beide Deutschland), VTT (Finnland), CIEMAT (Spanien) und NRI (Tschechische Republik). Die Projekte „RIKORR“ und „CASTOC“ sind komplementär und ergänzen sich gut. Die Zusammenarbeit führender europäischer Labors gewährleistet eine breite Absicherung und hohe Akzeptanz der Ergebnisse. Alle Teilnehmer des Projektes haben in der Vergangenheit eng mit nationalen Behörden (HSK, TÜV, SKI), Kraftwerksbetreibern und -betreiberorganisationen (EPRI, VGB) sowie Kraftwerksherstellern (Siemens, ABB, GE) zusammengearbeitet. Durch die aktive Mitarbeit im Rahmen breiterer internationaler Kooperationen und Netzwerke (ICG-EAC, AMES, OECD/CSNI/NEA PWG3) und Zusammenarbeit mit Regelwerkausschüssen (KTA, ASME BPV) ist die Umsetzung und der Transfer der Ergebnisse, welches eine der primären Zielsetzungen des „CASTOC“-Projektes darstellen, gewährleistet. Nach Abschluss der Projekte „RIKORR“ und „CASTOC“ sollte zusammen mit den bereits durchgeführten Arbeiten auf dem Gebiet der SpRK eine Bewertung der möglichen Auswirkungen der Risskorrosion auf die Strukturintegrität und Sicherheit des RDB von SWR-Anlagen möglich sein. Daraus werden sich gezielte Schlussfolgerungen/Empfehlungen bezüglich Regelwerken/Kraftwerksbetrieb und dem weiteren Forschungsbedarf ableiten lassen.

5. Bewertung 2002 und Ausblick 2003

5.1 Bewertung 2002

Die Zielsetzungen für 2002 wurden vollumfänglich erreicht. Das Projekt kann auf Ende Jahr erfolgreich und innerhalb des budgetierten finanziellen Rahmen abgeschlossen werden und hat eine Vielzahl neuer Ergebnisse und Erkenntnisse geliefert.

5.2 Schlussfolgerungen

Folgende vorläufigen Schlüsse können aus den bisher gewonnenen Versuchsergebnissen und fraktographischen Untersuchungen gezogen werden:

1. EAC-Risswachstumsmechanismus:

Das beobachtete Risswachstumsverhalten kann zur Zeit am besten durch eine Kombination und Überlagerung der folgenden Mechanismen verstanden werden:

- Oxidfilmbruch/anodische Auflösung (Film Rupture/Anodic Dissolution (FRAD))
- Wasserstoffinduzierte Risskorrosion (Hydrogen-assisted EAC (HAC))
- Dynamische Reckalterung (Dynamic Strain Ageing (DSA))

Bei Temperaturen $\geq 120 - 180^\circ\text{C}$ und mittleren Festigkeitswerten ($R_p \approx 300 - 500 \text{ MPa}$) dominiert der FRAD-Mechanismus. Bei Temperaturen $\leq 120 - 180^\circ\text{C}$ oder bei hoher Festigkeit / Härte ($R_p \geq 800 \text{ MPa}$, $\geq 350 \text{ HV}$) dominiert die wasserstoffinduzierte Risskorrosion. Bei geeigneten Kombinationen von Temperatur ($150 - 300^\circ\text{C}$) und Belastungsgeschwindigkeit ($10^{-8} \text{ s}^{-1} \leq d\varepsilon/dt \leq 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) und einem anfälligen Werkstoff (hohe Konzentration an freiem N und C) kann auch DSA wesentlich zum Rissfortschritt beitragen. DSA ist dabei allerdings keine Voraussetzung für das Auftreten von EAC in diesen Stählen.

2. Einflussfaktoren auf das EAC-Risswachstum im RDB-Grundwerkstoff:

Das EAC-Risswachstum langer Risse ($> 100 \mu\text{m}$) wird im wesentlichen durch die Rissspitzendehnrates und die Konzentration an schwefelhaltigen Anionen (SO_4^{2-} , HS^- , S^{2-}) im Rissspitzenelektrolyt (bzw. dem pH) kontrolliert. Für das Auftreten von EAC müssen im Bereich der Rissspitze kritische Bedingungen, d.h. eine ausreichend hohe Konzentration an S-haltigen Anionen (niedriger pH) und eine langsame positive Dehnrates, gleichzeitig auftreten und aufrechterhalten werden.

Die Rissspitzendehnrates wird im wesentlichen durch die Belastungsgeschwindigkeit ($d\varepsilon/dt$, dK/dt) und -höhe (ε , K , ΔK), durch das Risswachstum selbst sowie durch das Deformationsverhalten (R_p , Verfestigung, DSA, Viskoplastizität) des Materials bestimmt. Die Konzentration an S-haltigen Anionen wird im wesentlichen durch die Auflösung der MnS-Einschlüsse im Risskanal, die Konzentration an S-haltigen Anionen im Kühlmittel sowie durch den Stofftransport im Risskanal durch Diffusion, Migration und Konvektion bestimmt. Ein hohes Korrosionspotential (Migration) und eine niedrige Stömungsgeschwindigkeit (vernachlässigbare Konvektion) begünstigen die Anreicherung von S-haltigen Anionen im Bereich der Rissspitze und somit eine hohe EAC-Risswachstumsrate.

3. Möglicher Einfluss von DSA und erhöhte Anfälligkeit aufgehärteter Zonen der WEZ:

Es wurden klare Hinweise auf einen Einfluss der DSA auf das EAC-Risswachstumsverhalten gefunden, zumindest bei gewissen Kombinationen von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit sowie einem anfälligen Material (niedriger Al-Gehalt, hoher Gehalt an freiem N und C). Die Ergebnisse zeigen deutlich die Notwendigkeit für weitergehende Untersuchungen mit RDB-Stählen mit hoher DSA-Anfälligkeit sowie Schweißnähten und ihren WEZ, insbesondere bei mittleren Temperaturen von $200 - 270^\circ\text{C}$, auf.

Ebenso wurden Hinweise für eine gegenüber dem bainitischen Gefüge deutlich erhöhte DRK- und SpRK-Anfälligkeit eines martensitischen und stark aufgehärteten Gefüges mit Härten $> 350 \text{ HV}_5$ gefunden. Ähnliche Gefügezonen, wenn auch deutlich weniger stark aufgehärtet, werden z. T. auch in der WEZ von

Schweißnähten beobachtet. Das Testen kritischer Zonen in der WEZ erfordert den Einsatz spezieller Kompaktzugproben mit Rundkerbe, da nur so gewährleistet werden kann, dass ein EAC-Riss in der kritischsten Zone initiieren kann.

4. Konservativität der Risswachstumskurven in den Regelwerken:

ASME XI: Die ASME XI „Wet“ Risswachstumskurven im ASME BPV Regelwerk beschreiben das experimentell in sauerstoffhaltigem Heisswasser (simulierte SWR/NWC-Bedingungen) beobachtete SwRK-Risswachstumsverhalten ferritischer RDB- und Rohrleitungsstähle nur unzureichend und ungenau. Je nach Systembedingungen sind die Risswachstumskurven entweder deutlich zu konservativ (z. B. bei Belastungsfrequenzen $> 10^{-1}$ Hz und hohen $\Delta K > 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ oder bei Belastungsfrequenzen $< 10^{-1}$ Hz und $\text{ECP} < -200 \text{ mV}_{\text{SWE}}$) oder überhaupt nicht konservativ. Die ASME XI „Wet“ Risswachstumskurven wurden beispielsweise in allen untersuchten Werkstoffen (Grundwerkstoff, Schweissgut und WEZ) bei Temperaturen $\geq 150 \text{ }^\circ\text{C}$ und Belastungsfrequenzen unterhalb von 10^{-2} bis 10^{-1} Hz unter stark oxidierenden Bedingungen ($\text{ECP} > 0 \text{ mV}_{\text{SWE}}$, $0.4 - 0.8 \text{ ppm O}_2$) selbst in höchstreinem ($\kappa \leq 0.06 \text{ }\mu\text{S/cm}$) Wasser sowohl für niedrige und hohe Lastverhältnisse R bei Schwingbreiten des Spannungsintensitätsfaktors $\Delta K \geq 2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ z. T. deutlich überschritten und sind deshalb im Gegensatz zu hohen Frequenzen nicht konservativ. Insbesondere bei extrem niederfrequenter Belastung und hohen Werten von ΔK und $K_{I,\text{max}}$ werden relativ grosse SwRK-Rissfortschritte beobachtet.

Es wird deshalb vorgeschlagen neue Referenzkurven auf Basis eines einfachen Superpositions-Modells und der „Time-Domain“ Analyse für SWR/NWC- und SWR/HWC- Bedingungen zu entwickeln. Die vorgeschlagene Methode vermag sowohl das mittlere Materialverhalten realistisch aber dennoch ausreichend konservativ wiederzugeben als auch den starken Einfluss der Belastungsfrequenz mitzuberechnen.

Die kritischen niederfrequenten Belastungen mit vergleichsweise hohen Rissfortschritten pro Zyklus sind charakteristisch für An- und Abfahrvorgänge sowie für spezielle Betriebszustände mit Temperaturschichtungen. Es ist zu berücksichtigen, dass sowohl Zeitdauer als auch Zyklenzahl stark begrenzt sind, und die hohen Rissfortschritte keineswegs eine Gefahr für die Sicherheit darstellen müssen. Für eine schlüssige Bewertung sind weitere Experimente insbesondere bei niedrigeren Belastungen und genauere Informationen zu den exakten wasserchemischen und lokalen thermomechanischen Randbedingungen unter diesen Betriebsbedingungen notwendig.

BWR VIP 60 SpRK-Grenzkurven: Die BWR VIP 60 SpRK Grenzkurven für das SpRK-Risswachstum unter SWR-Bedingungen ($\geq 0.4 \text{ ppm O}_2$, $\text{ECP} > 0 \text{ mV}_{\text{SWE}}$) können sowohl bei kleinen Lastfluktuationen („Ripple Loading“) als auch bei mittleren Temperaturen ($200 - 270 \text{ }^\circ\text{C}$) für RDB-Stähle, –Schweissgutwerkstoffe und ihre Wärmeeinflusszonen mit einer hohen DSA-Anfälligkeit überschritten werden. Die Grenzkurven sind deshalb auf ihre Gültigkeit bei mittleren Temperaturen und für RDB-Schweißnähte und WEZ, insbesondere bei tieferen Belastungen, hin zu überprüfen. Für den RDB-Grundwerkstoff im stationären SWR-Leistungsbetrieb ($T \approx 270 - 290 \text{ }^\circ\text{C}$, \approx statische Belastung) und K_I -Werte $< 60 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ sind die SpRK-Grenzkurven weitgehend konservativ. Für den Speisewasserstutzen ($T \approx 220 - 270 \text{ }^\circ\text{C}$, kleine Lastfluktuationen nicht ausschliessbar) muss deren Anwendung durch weitere Experimente überprüft werden.

5. Wasserchemische und thermomechanische Randbedingungen bei SWR-Betriebstransienten:

Nach Abschluss der Parametersensitivitätsstudie zur Identifikation kritischer EAC-Bedingungen werden in den Temperaturbereichen maximaler Anfälligkeit weiterführende Experimente unter möglichst betriebsnahen mechanischen und wasserchemischen Bedingungen vorgeschlagen. Die gezielte Festlegung der Versuchsparameter und die Bewertungen der Versuchsergebnisse hinsichtlich deren möglichen Auswirkungen auf die Sicherheit des RDB setzen eine möglichst genaue Kenntnis der Systembedingungen unter den für die Risskorrosion kritischen Betriebstransienten voraus.

5.3 Ausblick 2003

Das Projekt RIKORR läuft Ende 2002 aus. Aus diesem Projekt sind für 2003 noch folgende Arbeiten geplant [19, 50]:

- Abschluss und Auswertung der beiden EAC-Versuche mit der WEZ bei 200 und 150 °C bis Ende Januar 2003.
- Abschlussbericht bis Ende Februar 2003.
- Konferenzbeiträge:
 - ICG-EAC 2003 (Mai 2003, Ottawa, Kanada).
 - NACE Corrosion 2003 (März 2003, San Diego, USA).
 - 11th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors (August 2003, Skamania Lodge, USA).
- Publikation in wissenschaftlicher Zeitschrift.

5.4 Vorschlag für weiteres Vorgehen

Basierend auf den vorher formulierten Schlussfolgerungen und den sich daraus ergebenden offenen Fragen wurde ein Vorschlag für eine Fortsetzung des Projektes mit einer Laufzeit von 3 Jahren ausgearbeitet und mit der HSK diskutiert [50, 51]. Der Vertrag für das neue Programm RIKORR-II soll in Kürze unterschrieben werden. Im Rahmen des neuen Projektes sollen folgende Aufgabenstellungen bearbeitet werden:

- Erweiterung der EAC-Risswachstumsdatenbasis unter SWR/NWC-Bedingungen mit Anpassung der Wasserchemie und Belastung an reale Betriebstransienten:
 - für WEZ (Kompaktzugprobe mit Rundkerbe) und Schweissgutwerkstoffe.
 - für RDB-Werkstoffe mit ausgeprägter DSA-Anfälligkeit.
 - für „Ripple Load“-Belastung bei kleinerem ΔK und höheren Frequenzen.
 - für Chlorid-Transienten im Bereich des EPRI Action Level 2 (20 ppb Cl⁻) und 1 (5 ppb Cl⁻).
- Nachrüstung der PSI-Heisswasserkreisläufe zur Implementierung der Wasserstoffchemiefahrweise (HWC), was Neuinvestitionen von 110 kFr erfordert.
- Überprüfung der Schutzwirkung der HWC-Fahrweise in Bezug auf
 - die DRK/SwRK unter Beanspruchungen, bei denen die ASME XI „Wet“ Referenzermüdungsrisswachstumskurven bei SWR/NWC-Fahrweise nicht konservativ sind.
 - die SpRK unter Beanspruchungen, bei denen die BWR VIP 60 SpRK-Risswachstumskurven bei SWR/NWC-Fahrweise nicht konservativ sind („Ripple Load“ Belastung, mittlere Temperaturen und Werkstoffe mit hoher DSA-Anfälligkeit).
- Untersuchungen zum Einfluss des Korrosionspotentials auf das SwRK-Risswachstum:
 - Ermittlung der unteren kritischen Risswachstumsrate da/dt_{crit} / kritischen Belastungsfrequenz ν_{crit} in Abhängigkeit des ECP.
 - Ermittlung der Parameter C und m des Superpositionsmodells in Abhängigkeit des ECP.
- RIKORR-On-Call: Teilnahme am internationalen ICG-EAC-Ringversuch zur SpRK in In182-Schweissnähten unter SWR und DWR-Bedingungen (2003 – 2005, 22 Institutionen aus Nordamerika, Europa und Asien).

6. Referenzen

- [1] **H.P. Seifert, J. Heldt**, „Stress Corrosion Cracking of Low-Alloy, Reactor-Pressure-Vessel Steels in Oxygenated, High-Temperature Water“, Nuclear Engineering and Design Vol. 206, 2001, pp. 57-89.
- [2] **P. Scott, D. Tice**, „Stress Corrosion in Low Alloy Steels“, Nucl. Eng. & Design, Vol. 119, 1990, pp. 399 - 413.
- [3] **D. Blind**, „Zur Korrosionsrissbildung in druckführenden Kraftwerkskomponenten infolge Einwirkung von Hochtemperaturwasser“, Habilitationsschrift, Universität Stuttgart, 1991.
- [4] **O. K. Chopra**, „Environmental Effects on Fatigue Crack Initiation in Piping and Pressure Vessel Steels“, International Conference on Fatigue of Reactor Components, 31. Juli – 2. August, 2000, Napa, Kalifornien, USA.
- [5] **O.K. Chopra, W.J. Shack**, „Low-cycle Fatigue of Piping and Pressure Vessel Steels in LWR Environments“, Nuclear Engineering and Design, Vol. 184, 1998, pp. 49 - 76.
- [6] **Y.S. Garud, S.R. Paterson, R.B. Dooley, R.S. Pathania, J. Hickling, A. Bursik**: „Corrosion Fatigue of Water-Touched Pressure Retaining Components in Power Plants“, EPRI TR-106696, Final Report, November 1997.
- [7] **M. Higuchi, K. Iida**, „Fatigue Strength Correction Factors for Carbon and Low-Alloy Steels in Oxygen-Containing High-Temperature Water“, Nuclear Engineering and Design, 1991, Vol. 129, pp. 293 – 306.
- [8] **S. Majumdar, O.K. Chopra, W.J. Shack**, „Interim Fatigue Design Curves for Carbon, Low-Alloy and Austenitic Stainless Steels in LWR-Environments“, Report No. NUREG/CR-5999 (ANL-93/3), Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA, April 1993.
- [9] **H.S. Metha, S.R. Gosslin**, „An Environmental Factor Approach to Account for Reactor Water Effects in Light Water Reactor Pressure Vessel and Piping Fatigue Evaluations“, EPRI-Report TR-105759, EPRI, Palo Alto CA, USA, Dezember 1995.
- [10] **E.D. Eason, E.E. Nelson, J. D. Gilman**, „Technical Basis for a Revised Fatigue Crack Growth Rate Reference Curve for Ferritic Steels in Light Water Reactor Environments“, ASME PVP94-17, New York, auch in Welding Research Council Bulletin 404, New York, 1995, pp. 38 - 51.
- [11] **E.D. Eason, E.E. Nelson, J.D. Gilman**, „Modelling of Fatigue Crack Growth Rate for Ferritic Steels in Light Water Reactor Environments“, Nuclear Engineering & Design, Vol. 184, 1998, pp. 89 - 111.
- [12] **J. Hickling, D. Blind**, „Strain-Induced Corrosion Cracking in LWR Systems - Case Histories and Identification of Conditions Leading to Susceptibility“, Nucl. Eng. & Design, Vol. 91, 1986, pp. 305 - 330.
- [13] **H.P. Seifert, S. Ritter, J. Heldt**, „Strain-Induced Corrosion Cracking of Low-Alloy Reactor Pressure Vessel Steels under BWR Conditions“, 10th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, NACE/TMS/ANS, (CD-ROM, Paper No. 3), August 6 - 10, 2001, Lake Tahoe, Nevada, USA.
- [14] **H. Hänninen, H.P. Seifert, Y. Yagodzinsky, U. Ehrnstén, O. Tarasenko, P. Aaltonen**: „Effects of Dynamic Strain Aging on Environment-Assisted Cracking of Low Alloy Pressure Vessel and Piping Steels“, 10th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, NACE/TMS/ANS, (CD-ROM, Paper No. 47), August 6 - 10, 2001, Lake Tahoe, Nevada, USA.
- [15] **J. Atkinson, Z. Zao, J. Yu**, „Interactive Effect of Dynamic Strain Ageing with High Temperature Water on the Crack Initiation Behaviour of Reactor Pressure Vessel Steels“, Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth, ASTM STP 1298, pp. 199 - 215, W.A. Van der Sluys, R.S. Piascik, R. Zawierucha, Eds., ASTM, 1997.
- [16] **J. Atkinson, J. Yu**, „The Role of Dynamic Strain Ageing in the Environment-Assisted Cracking Observed in Pressure Vessel Steels“, Fatigue Fracture Engng. Mater. Struct., Vol. 20, 1997, pp. 1 – 12.
- [17] **H.P. Seifert, J. Heldt**, „Projektvorschlag: Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufes von SWR“, PSI-AN-49-99-01 , 24. 11. 1999.
- [18] **H.P. Seifert, S. Ritter, U. Ineichen, U. Tschanz**, „Risskorrosion in RDB-Stählen unter transienten SWR-Betriebsbedingungen“, HSK-PSI-Jahresprojektpräsentation 2001, 6. 12. 2001, HSK, Handout.

- [19] **H.P. Seifert, S. Ritter**, „Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponentnen des Primärkreislaufes von SWR“, 1. Halbjahresprojektbesprechung RIKORR 2002, 4. 6. 2002, PSI, Handout.
- [20] **H.P. Seifert, S. Ritter**, „Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponentnen des Primärkreislaufes von SWR“, Schlussbericht z. H. des BFE, Februar 2003, in Bearbeitung.
- [21] **H.P. Seifert, S. Ritter**, „SICC and Low-frequency Corrosion Fatigue of Low-Alloy RPV Steels, of a Weld Filler and Weld HAZ Material under BWR Conditions – Effect of Temperature and Loading Rate/Frequency“, Minutes of the 2002 Annual Meeting of the International Cooperative Group on Environmentally Assisted Cracking of Light Water Reactor Materials, Ed.: J. Hickling, Low-Alloy Steel Session, Paper L4, Lyon, Frankreich, 14 – 19. April, 2002.
- [22] **H.P. Seifert, S. Ritter**: „Effect of a Sulphate and Chloride Transient on the EAC Crack Growth Behaviour of two Low-Alloy RPV Steels in Oxygenated High-Temperature Water under Periodical Partial Unloading Conditions“, Minutes of the 2002 Annual Meeting of the International Cooperative Group on Environmentally Assisted Cracking of Light Water Reactor Materials, Ed.: J. Hickling, Low-Alloy Steel Session, Paper L6, Lyon, France, April 14 –19, 2002.
- [23] **S. Ritter, H.P. Seifert**, „Strain-Induced Corrosion Cracking of Low-Alloy RPV-Steels under BWR Conditions“, NACE Corrosion 2002, CD-ROM, Paper No. 02516, pp. 1 – 18, Denver, USA, 8. – 12. April 2002.
- [24] **S. Ritter, H.P. Seifert**, „Stress Corrosion Cracking of Low-Alloy Reactor Pressure Vessel Steels and of a Weld Filler Material under BWR Conditions“, 15th International Corrosion Congress ICC, Paper No. 648, pp. 1 – 9, Grenada, Spanien, 22. – 27. September 2002.
- [25] **S. Ritter, H.P. Seifert**: „Characterization of the Lower Shell and Weld Material of the Biblis C Reactor Pressure Vessel, PSI-Bericht Nr. 02-01, Januar 2002.
- [26] **H.P. Seifert**: „Literature Survey on the Stress Corrosion Cracking of Low-Alloy Steels in High-Temperature Water“, PSI Bericht Nr. 02-06, Februar 2002.
- [27] **H.P. Seifert, S. Ritter**: „Environmentally-Assisted Cracking of Low-Alloy Reactor Pressure Vessel Steels under Boiling Water Reactor Conditions“, PSI-Bericht Nr. 02-05, Februar 2002.
- [28] **H.P. Seifert, J. Heldt, U. Ineichen, U. Tschanz**, „Risskorrosion in druckführenden Komponenten des Primärkreislaufes von SWR“, BFE-Jahresbericht 2000, Dezember 2000.
- [29] **H.P. Seifert, S. Ritter**, „PSI Contribution to the CASTOC Round Robin on EAC of Low-Alloy RPV Steels under BWR Conditions, PSI-Bericht 01 – 08, ISSN 1019 – 0643, August 2001.
- [30] **H.P. Seifert, S. Ritter**, „Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufes von SWR“, 1. Halbjahresprojektbesprechung RIKORR 2001, 5. 7. 2001, HSK, Handout.
- [31] **H.P. Seifert, J. Heldt, U. Ineichen**, „Messung des Korrosionspotentials mit einer externen Ag/AgCl-Referenzelektrode“, PSI-TM-49-97-15, 14. 11. 1997.
- [32] **H.P. Seifert, S. Ritter, U. Ineichen, U. Tschanz, B. Gerodetti**, „Risskorrosion in druckführenden Komponenten des Primärkreislaufes von SWR“, BFE-Jahresbericht 2001, Dezember 2001.
- [33] **J. Hickling**, „Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion in niedriglegierten Stählen“, Beitrag Nr. 7, 4. MPA-Seminar, Stuttgart, 4. – 5. Oktober, 1978.
- [34] **M.O. Speidel**, „Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue Fracture Mechanics“, Corrosion in Power Generating Equipment, Proceedings of the 8th Int. Brown Boveri Symposium, Plenum, New York, USA, 1984, pp. 85 – 132.
- [35] **BWR Vessel and Internals Project**, „Evaluation of Stress Corrosion Crack Growth in Low Alloy Steel Vessel Materials in the BWR Environment (BWR VIP-60), EPRI TR-108709, 1999.
- [36] **M. Tsubota, H. Sakamoto, R. Tsuzuki**, „Intergranular Stress Corrosion Cracking of Low-Alloy and Carbon Steels in High-Temperature Water“, Proc. 6th Int. Symp. on Env. Degr. of Mat. in Nucl. Power Systems – Water Reactors, 1993, pp. 53 – 58.
- [37] **A. Kraus**, „Stress Corrosion Cracking of Pressure Vessel Steels in High Temperature Water“ Diss. ETH Nr. 10644, ETH Zürich, 1994.

- [38] **E. Lenz, N. Wieling**, „Strain-Induced Corrosion Cracking of Low Alloy Steels in LWR-Systems - Interpretation of Susceptibility by Means of a three Dimensional (T, ϵ , Dissolved Oxygen) Diagram“, Nucl. Eng. & Design, Vol. 9, 1986, pp. 331 - 344.
- [39] **J. Hickling**, “Strain-Induced Corrosion Cracking of Low-Alloy Steels under BWR Conditions: Are There Still Open Issues?”, 10th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, NACE/TMS/ANS, (CD-ROM, Paper No.156), August 6 – 10, 2001, Lake Tahoe, Nevada, USA.
- [40] **ASME XI Appendix A-4300**, 1998 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components, Appendix A, Article A-4000, Subsection A-4300: Fatigue Crack Growth Rate” ASME, New York 1998.
- [41] **U. Ehrnstén, M. Ernestova, J. Foehl, D. Gomez-Briceno, F. Hüttner, J. Lapena, A. Roth, S. Ritter, H. P. Seifert, M. Zamboch**, “Crack Growth of Pressure Vessel Steel in Simulated BWR Environment, a Summary Report on Inter-Laboratory Investigations”, Technical Report WP1, CASTOC R003, 4. Juni 2002.
- [42] **F.P. Ford**, „Status of Research on Environmentally-Assisted Cracking in LWR Pressure Vessel Steels“, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 110, 1988, pp. 113 –128.
- [43] **H.M. Chung, T.F. Kassner, S. Majumdar, J.Y. Park, A. Purohit, W.E. Rither, J.E. Sanecki, W.J. Shack**, “Environmentally Assisted Cracking in Light Water Reactors”, NUREG/CR-4667, Vol. 14, ANL-92/30, R5, August 1992.
- [44] **H.P. Seifert, S. Ritter**, „Status des EU-Projektes CASTOC“, KFES-Meeting, PSI, 17. 1. 2002, Handout.
- [45] **H.P. Seifert, S. Ritter**, „Risskorrosionsforschung in der Gruppe Bauteilsicherheit des LWV“, KKL-PSI-Meeting, 11. 6. 2002, KKL, Handout.
- [46] **H.P. Seifert**, „Ageing-related LWR Material Research Activities at PSI“, KKL-BWR VIP Meeting, KKL, 6. November 2002, Handout.
- [47] **G. Brümmer, H. Hoffmann, U. Ilg, O. Wachter, M. Widera, A. Roth**, „Beschreibung einer einhüllenden Risswachstumskurve zum Spannungsrissskorrosionsverhalten von ferritischen Reaktordruckbehälterstählen unter SWR-Bedingungen“, Paper No. 13, pp. 13-1 –13-30, 28. MPA-Seminar, Stuttgart, Deutschland, 10. –11. Oktober 2002.
- [48] **D. Kalkhof, H.P. Seifert**, „Current Research Activities in the Field of Structural Integrity“, OECD NEA CSNI PWG IAGE Meeting 2002, Paris, Frankreich, 13. – 14. Mai 2002.
- [49] **U. Ehrnstén, J. Foehl, D. Gomez-Briceño, T. Weissenberg, A. Roth, S. Ritter, H. P. Seifert, M. Zamboch**, “Crack Growth Behaviour of Low Alloy Steels for Pressure Boundary Components under Transient Light Water Reactor Operating Conditions – CASTOC”, FISA-Conference on EU Research in Reactor Safety, November 12 – 14, 2001.
- [50] **S. Ritter, H.P. Seifert**, „Ausblick auf Projekt RIKORR-II und Risskorrosion On-Call“, HSK-PSI-Projektstatusgespräch 2002, HSK, 4. 12. 2002, Handout.
- [51] **Vertragsentwurf zu RIKORR-II**, November 2002.



Datum: 27. Januar 2003
Von: Dr. Walter Neumann

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 FEVER

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Die Vereinbarung zwischen dem BFE, vertreten durch die HSK, und dem PSI, betreffend Früherkennung von Ermüdungsschäden bei Kernkraftwerkskomponenten (FEVER), endete am 30. Juni 2002.

Das Forschungsprojekt hatte das Ziel, den Weg zu einem zerstörungsfreien Prüfverfahren zu erkunden, mit dem Ermüdungsschäden an Kernkraftwerkskomponenten aus metastabilem austenitischem Stahl erkannt werden können, bevor es zu Rissbildung gekommen ist. Das anvisierte Prüfverfahren soll die deformationsinduzierte Martensitbildung in der Austenitmatrix ausnützen. Die Ermüdungsschädigung sollte über den Ferromagnetismus des gebildeten Martensits erkannt werden.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Da die Vereinbarung zwischen dem BFE und dem PSI am 30. Juni 2002 endete, wird hier die Frage betrachtet, ob das vereinbarte Arbeitsprogramm erfüllt wurde.

Das Arbeitsprogramm ist in Artikel 2 der Vereinbarung definiert. Es wurde erfüllt mit Ausnahme des Bauteilversuchs unter realitätsnahen Bedingungen. Jener wurde durch zusätzliche systematische Untersuchungen der Einflussparameter der Martensitbildung ersetzt, weil die Ergebnisse der durchgeführten Experimente diese als vordringlich erscheinen liessen. Dies geschah mit Zustimmung der HSK-Projektbegleitung.

Zu den Einflüssen von Werkstoffausgangszustand, Temperatur, Dehnamplitude und Lastzyklenzahl auf die Martensitbildung wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen. Die Experimentiertechniken Neutronen- und Röntgenbeugung und die Messtechnik „Ferromaster“ wurden zur Bestimmung des Martensitgehalts in Werkstoffproben erfolgreich eingesetzt. Für die elektromagnetischen Messtechniken Fluxgate, GMR und SQUID zur Bestimmung des Martensitgehalts wurden Messplätze aufgebaut und Erfahrungen gesammelt.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Die Fragestellungen sind aktuell. Das Forschungsprojekt passt in die internationale Forschungslandschaft. Das PSI hat im Abschlussbericht dargelegt, auf welche Weise es auf diesem Forschungsgebiet mit internationalen Projekten und Netzwerken wechselwirkt.

Die Projektergebnisse sind, da noch nicht anwendungsreif, auch für die Aufsichtsaufgaben der HSK nicht direkt anwendbar. Der geistige Austausch mit dem Projektteam des PSI war der HSK für die Erfüllung der Aufsichtsaufgaben indes förderlich.

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Das PSI gedenkt, die begonnene Forschungsarbeit in dem neuen Projekt „Diagnostik“ mit Förderung durch die HSK weiterzuführen. Bei der Festlegung der Zielsetzung und der Definition des Arbeitsprogramms dieses neuen Projekts war die FEVER-Projektbegleitung der HSK nicht involviert. Die folgenden Empfehlungen für das weitere Vorgehen resultieren unabhängig davon aus der Begleitung des Projekts FEVER.

Nachdem in dem Projekt FEVER ein Überblick gewonnen wurde, welche Einflussfaktoren für die Martensitbildung massgebend sind und wie sie wirken, sollten die weiteren Arbeiten auf die praktische Anwendbarkeit fokussiert werden:

1. **Werkstoffausgangszustand:** Die Untersuchungen im Projekt FEVER haben ergeben, dass der Werkstoffausgangszustand auf die Martensitbildung grossen Einfluss hat. Deshalb sollten sich die weiteren experimentellen Untersuchungen auf Werkstoffausgangszustände beschränken, die bei den Kernkraftwerkskomponenten von Interesse realisiert sind. Auch die Variabilität dieser Werkstoffzustände sollte betrachtet werden. Bei den folgenden Punkten 2 bis 4 wird ein derartiges Vorgehen vorausgesetzt.
2. **Martensit-Nachweis- und Diskriminierungsvermögen:** Die Ermüdungsuntersuchungen im Projekt FEVER haben bei warmgefertigten, lösungsgeglühten Proben nur geringe Martensitgehalte von wenigen Prozent gezeigt. Die elektromagnetischen Mess- und Prüfverfahren zum Nachweis von Martensit in Kraftwerkskomponenten (Ferromaster, GMR usw.) sollten deshalb darauf untersucht werden, welche von ihnen geeignet sind, derart geringe Martensitgehalte in Kraftwerkskomponenten genügend genau und zuverlässig nachzuweisen. An geeigneten Rohrleitungen in Kernkraftwerken sollten Probemessungen durchgeführt werden, und zwar an Grundwerkstoff, Schweisssgut und Wärmeeinflusszonen, um zu erfahren, mit welchem „Untergrund“ und mit welchen Diskriminierungsschwierigkeiten zu rechnen ist.
3. **Temperatureinfluss:** Bei vorläufigen Untersuchungen im Projekt FEVER an warmgefertigten, lösungsgeglühten Proben konnte Martensit nur nachgewiesen werden, wenn die Proben bei Temperaturen $\leq 140^\circ \text{C}$ ermüdet worden waren. Es sollte festgestellt werden, in welchem Temperaturbereich durch Ermüdung im Vorrissstadium so viel Martensit erzeugt wird, dass er mit den verfügbaren Mess- und Prüfmethode nachgewiesen werden kann. Die Grenzen eines möglichen Ermüdungs-Diagnoseverfahrens, die durch die Temperaturabhängigkeit der Martensitbildung und durch das Nachweisvermögen der Mess- und Prüfverfahren gegeben sind, müssen als Grundlage für die weiteren Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen bekannt sein und vorrangig experimentell herausgearbeitet werden.
4. **Interpretationskonzept:** Es sollte ein Konzept entwickelt werden, wie, angesichts der bekannten Einflussfaktoren auf die Martensitbildung und bei dem erreichbaren Nachweisvermögen für Martensit, von einem an einer Komponente gemessenen Martensitgehalt auf ihren Ermüdungsausnutzungsgrad D geschlossen werden kann oder, allgemeiner, welche Schlüsse man aus einem gemessenen Martensitgehalt ziehen kann. (Wenn man z. B., experimentell abgesichert, eine Beziehung aufstellen könnte, die beschreibt, wie der Martensitgehalt, der - innerhalb realistischer Grenzen unabhängig vom speziellen Ermüdungsvorgang - dem Erschöpfungsgrad $D = 0,8$ entspricht, von der Ermüdungstemperatur abhängt, wäre man einen Schritt weiter.)

FEVER

FRÜHERKENNUNG VON ERMÜDUNGSSCHÄDIGUNG AN KERNKRAFTWERKSKOMPONENTEN

Autor und Koautoren	D. Kalkhof, M. Grosse, M. Niffenegger, B. Tirbonod
beauftragte Institution	Paul Scherrer Institut
Adresse	5232 Villigen PSI
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 310 26 20, dietmar.kalkhof@psi.ch , www.psi.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	35028 / 74.784
Dauer des Projekts (von – bis)	01.07.1999 - 30.06.2002

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes FEVER wurden Veränderungen der mikrostrukturellen und magnetischen Eigenschaften bei niederzyklischer Ermüdung an rostfreien austenitischen Stählen untersucht. Langfristiges Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung eines Lebensdauermonitors für Ermüdung an Rohrleitungen. Für die untersuchten Material- und Versuchsbedingungen (Stahl X6CrNiTi18-10, totale Dehnamplitude 0.40 %, Temperaturbereich 20-260°C) konnte gezeigt werden, dass die deformationsinduzierte Martensitbildung als Ermüdungsindikator Verwendung finden kann. Als wesentliche Einflussgrößen auf die Martensitbildung sind der Materialausgangszustand, die akkumulierte plastische Dehnung und die Temperatur zu berücksichtigen. Die Temperaturabhängigkeit des Martensitgehalts liess sich mit einer Exponentialfunktion gut beschreiben. Die Temperaturkurven müssen in Abhängigkeit des Materialausgangszustandes, der beaufschlagten Dehnung und des Er-schöpfungsgrades ermittelt werden.

Mit der Neutronendiffraktometrie konnte eine Methode gefunden werden, die eine genaue Bestimmung des Martensitgehalts ermöglichte. Untersuchungen mit Metallographie und Röntgendiffraktometrie (Synchrotronlicht) ergaben, dass eine inhomogene Martensitverteilung in den Ermüdungsproben vorlag. Änderungen des magnetischen Verhaltens wurden mit den Kenngrößen der magnetischen Permeabilität, der Restfeldstärke und der Wirbelstromimpedanz gemessen. Mit Hilfe der Hochtechnologie-Sensoren Fluxgate, SQUID und GMR, aber auch mit einem einfachen Handprüfgerät konnten monotone Zusammenhänge der magnetischen Kenngrößen zum Martensitgehalt bestimmt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unter gewissen Einschränkungen eine Bauteilbewertung und Ermüdungsfrüherkennung mittels zerstörungsfreier magnetischer Prüfmethode möglich erscheint.

1 Projektziele

1.1 TECHNISCHER HINTERGRUND

Werkstoffalterungsvorgänge in druckführenden Primärkreislauf-Komponenten von Leichtwasserreaktoren können sowohl die Anlagensicherheit als auch ihre Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit nachhaltig beeinträchtigen und spielen bei einer möglichen Lebensdauererlängerung eine entscheidende Rolle. Der heutige Wettbewerbs- und damit Kostendruck für Stromerzeugungsanlagen setzt für den wirtschaftlichen Betrieb der Kernkraftwerke auf hohem Sicherheitsniveau den Einsatz optimierter Methoden des Lebensdauermanagements voraus.

Die Werkstoffermüdung wird in Kernkraftwerken hauptsächlich durch Wechselbeanspruchungen infolge von Temperatur- und Druckänderungen verursacht. Durch An- und Abfahrvorgänge sowie im Teillastbetrieb kommt es zu thermischen und thermomechanischen Lastwechseln an Komponenten und Rohrleitungen, die bei genügend hoher Zahl an Zyklen bis zur Initiierung von Materialrissen führen können. Besonders kritisch sind Belastungen durch thermische Schichtungen und Strömungsvermischungen, deren Orte nicht hinreichend genau bekannt sind. Bedingt durch Dichteunterschiede im Fluid aufgrund von unterschiedlichen Temperaturen zwischen der Unter- und Oberseite des Rohres kann es in Kombination mit geringen Durchflussraten zur thermischen Schichtung in horizontalen Teilen des Rohrsystems kommen. Thermische Schichtungen verursachen eine in Umfangsrichtung variierende Temperaturverteilung in der Rohrwand, die wiederum lokale Spannungen in der Wand und globale Biegespannungen im Rohrsystem bewirken. Ausser Schichtungen sind auch Temperaturtransienten infolge kalter oder heisser Einspeisevorgängen zu beachten, die im Extremfall zu Thermoschockbeanspruchungen führen können.

Da die Gefahr einer Rissbildung mit der akkumulierten mikrostrukturellen Werkstoffschädigung zunimmt, gewinnt die Früherkennung von Ermüdungsschädigung an älteren Anlagen zunehmend an Bedeutung. Aus sicherheitstechnischer Sicht unterliegen vor allem folgende Komponenten einer Überwachung:

- SWR Speisewasserstutzen des Reaktordruckbehälters
- DWR Speisewasserstutzen des Dampferzeugers
- DWR Volumenausgleichsleitung einschliesslich Stutzen
- DWR Sprühleitungen des Druckhalters
- DWR Regenerative Wärmetauscher
- DWR Rohrleitungen des Restwärmesystems
- DWR Rohrleitungen der Sicherheitseinspeisung

Die Einbeziehung von thermischen Ermüdungsvorgängen durch unerwartet auftretende Schichtungs- und Strömungsphänomene ist bei der Auslegung der betroffenen Komponenten nicht möglich. Um die Auswirkungen dieser Lasten auf die Lebensdauer zu minimieren wurden materialspezifische Grenzwerte für die Temperaturdifferenzen der sich vermischenden Teilströme festgelegt. Auch werden zunehmend spezielle Bereiche von Komponenten und Rohrleitungen mit Temperatursensoren instrumentiert, die die Temperaturverteilung am Umfang der Rohrleitungen während des An- und Abfahrens der Anlage erfassen und auswerten. Mit Hilfe dieser Temperaturmessungen wird auf den aktuellen Materialzustand (Erschöpfungsgrad) geschlossen. Eine direkte zerstörungsfreie Messung mechanischer, physikalischer oder mikrostruktureller Eigenschaften an den Komponenten scheiterte bisher an Unzulänglichkeiten der Messtechnik und vor allem an der Interpretation der Messergebnisse. Die Zuordnung mikrostruktureller Veränderungen, wie Versetzungsdichte und -verteilung, Phasentransformation sowie Mikrorissbildung zu physikalisch messbaren Grössen wie elektrischer, thermoelektrischer und magnetischer Widerstand sowie elektrische und magnetische Leitfähigkeit erfordert zukünftige Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Werkstoffdiagnostik. An metastabilen austenitischen Rohrleitungsstählen treten mikrostrukturelle Veränderungen auf, die geeignet erscheinen, eine Früherkennung zu ermöglichen.

1.2 WISSENSSTAND ZUR DEFORMATIONS- INDUZIERTEN MARTENSITBILDUNG

Die Austenit (γ)-Martensit(α')-Transformation ist der Grundmechanismus beim Härten von Stahl. Die Martensitumwandlung erfolgt diffusionslos und normalerweise durch einen Abkühlungsvorgang. Diffusionslose γ - α' Umwandlungen können mit grossen Beträgen von Scherung des Kristallgitters verbunden sein [1]. Die Umwandlung beginnt erst bei einer Unterkühlung unterhalb der Temperatur des thermodynamischen Gleichgewichts T_0 (metastabil) [2]. T_0 ist durch die Gleichheit der Freien Energien der Phasen α' und γ bei gleicher chemischer Zusammensetzung und gleichen Ordnungsgrad definiert. Die T_0 -Temperatur hängt stark von der chemischen Zusammensetzung ab. Die treibende Energie der γ - α' Umwandlung oder der Rückumwandlung ist näherungsweise proportional der Unterkühlung unter die Gleichgewichtstemperatur oder der entsprechenden Überhitzung. Bei Unterkühlung $T < T_0$ und für eine gittervariante Scherung kann eine Schubspannung definiert werden, die die Umwandlung herbeizuführen sucht. Die Idee dazu stammt von U. Dehlinger [3].

Die Temperatur, bei der die Martensitbildung beim Abkühlen beginnt, wird als M_s -Temperatur bezeichnet. Sie ist unabhängig von der Abkühlgeschwindigkeit. Unter der Einwirkung von plastischen Dehnungen kann die Martensitumwandlung auch bei höheren Temperaturen als M_s stattfinden [4]. Untersuchungen zur deformationsinduzierten Martensitbildung gehen auf die Arbeiten von Scheil und Mathieu [5, 6] zurück. Sie fanden an einer Eisen-Nickel-Legierung heraus, dass sich bei statischer Dehnung der Martensitanteil mit steigendem Kaltverformungsgrad vergrössert und mit steigender Prüftemperatur verringert. Erste systematische Experimente zu den Einflussgrössen der deformationsinduzierten Martensitbildung bei statischer Belastung wurden von Angel [7] durchgeführt. Er untersuchte an CrNi-Stählen die durch plastische Verformung erzeugte isotherme Bildung von Martensit in Abhängigkeit von der Dehnungsbeanspruchung und der Verformungsenergie. Ludwigson und Mitarbeiter [8] konnten an Stählen der Serie AISI 300 zeigen, welchen Einfluss die chemische Zusammensetzung auf die Martensitbildung ausübt.

Beobachtungen im Transmissions-Elektronenmikroskop ergaben, dass zwei Arten von Martensit entstehen können: ϵ -Martensit (hexagonal dichtest gepacktes Gitter) und α' -Martensit (kubisch-raumzentriertes Gitter). Letzteres ist ferromagnetisch. Unter der Annahme, dass der α' -Martensit an den Schnittpunkten von Versetzungs-Scherbändern gebildet wird, entwickelten Olson und Cohen ein Modell zur Berechnung der Martensitkonzentration in Abhängigkeit der angelegten Dehnung [9]. Diese Annahme scheint für die untersuchten Material- und Versuchsbedingungen realistisch zu sein, da kein ϵ -Martensit (hexagonales Gitter) beobachtet wurde. Olsen und Cohen konnten zeigen, dass ihre Modellrechnungen mit den experimentellen Ergebnisse von Angel sehr gut übereinstimmen. In Ergänzung zum Einfluss der chemischen Zusammensetzung des metastabilen austenitischen Stahls (Schaeffler-Diagramm) agiert hier die Versetzungsdichte als Mikrostrukturparameter, der die Martensitbildung kontrolliert. Hinweise, dass schneidende Versetzungs-Scherbänder als Quellen der Martensitbildung betrachtet werden können, finden sich in TEM-Untersuchungen von Susuki und Mitarbeitern [10]. Messungen des Martensitanteils mittels magnetischer Verfahren wurden von Hecker und Mitarbeitern vorgestellt [11]. Sie verwendeten u.a. ein handelsübliches Ferritoscope zur Messung der magnetischen Permeabilität.

Frühe Untersuchungen zur deformations-induzierten Martensitbildung unter Ermüdungsbedingungen gehen auf Chanani und Mitarbeiter [12] sowie Hennessy und Mitarbeiter [13] zurück. Aus den Untersuchungen zu den Einflussgrössen der Martensitbildung sind vor allem die Arbeiten von Baundry und Pineau [14] sowie Bayerlein und Mitarbeiter [15] zu nennen. Der Einfluss der plastischen Dehnungsamplitude auf den gebildeten Martensitanteil wurde in [14, 15] qualitativ beschrieben, der Einfluss der Temperatur in [14]. Oft werden die Ergebnisse jedoch nur für spezielle Last- und Materialbedingungen oder in einem kleinen Temperaturbereich präsentiert.

Zur Abhängigkeit des Martensitgehalts von der Zyklenzahl wird unterschiedliches Werkstoffverhalten beobachtet. Insbesondere gibt es verschiedene Ansichten über Schwellenwerte der Dehnungsamplitude und der Zyklenzahl, ab denen die Martensitbildung einsetzt [15,16,17]. In-situ Messungen während der Ermüdungsversuche bei unterschiedlichen Material- und Lastbedingungen könnten hier besser zur Klärung beitragen. Seit kurzem laufen verstärkt Entwicklungen für ein allgemeingültiges Werkstoffmodell der deformations-induzierten Martensitbildung, z.B. [18].

Eine umfassende Darstellung des derzeitigen Wissensstandes vermitteln die beiden Dissertationen von Basler [19] und Lang [20]. Basler untersuchte vor allem den Zusammenhang zwischen mikrostrukturellen Vorgängen und mechanischem Verhalten. Das Verdienst von Lang besteht in der Evaluierung verschiedener fortschrittlicher magnetischer Messtechniken zur Detektion des Martensits. Beide Dissertationen bildeten auch die Grundlage für die Untersuchungen am PSI [21-27]. Trotz des verbesserten Verständnisses der deformations-induzierten Martensitbildung bestehen nach wie vor keine gesicherten Erkenntnisse zur Wechselwirkung der mikrostrukturellen Mechanismen der Verformung, Ermüdung, Mikrorissbildung und technischen Risseinleitung mit den Vorgängen der Martensitumwandlung. Ein entscheidender Grund dafür besteht in den messtechnischen Schwierigkeiten, die Martensitverteilung an der Oberfläche und im Volumen zu bestimmen. Durch Streumethoden auf der Basis von Neutronenstrahlung und Synchrotronlicht ergeben sich dafür neue Möglichkeiten.

1.3 AUFGABENSTELLUNG DES PROJEKTES FEVER

Die Aufgabe der Werkstoffdiagnostik besteht darin, physikalisch-basierte Konzepte der Lebensdauerbestimmung zur Verfügung zu stellen. Sie beinhaltet die Entdeckung eines Indikators in der Mikrostruktur, der den Alterungsprozess auslöst, beeinflusst oder zumindest begleitet sowie die zerstörungsfreie Messung entsprechender vom Indikator beeinflusster mechanischer und physikalischer Eigenschaften. Das technische Ziel besteht in der Entwicklung eines Lebensdauermonitors für eine bestimmte Alterungsart und Klasse von Werkstoffen. Die Werkstoffdiagnostik nutzt mikrostrukturelle Veränderungen aus, die zeitlich weit vor der technischen Rissbildung stattfinden und ermöglicht somit die Früherkennung der Schädigung in den betroffenen Bereichen. Die elektrischen, thermoelektrischen und magnetischen Messgrößen reagieren auf alle mikrostrukturellen Veränderungen in bestimmter Weise. Der gewissenhaften Interpretation der Messergebnisse kommt deshalb besondere Bedeutung zu, die zu einer Selektion oder auch Kombination bestimmter Messgrößen führen kann.

Zur Bearbeitung von Themen der Werkstoffdiagnostik sind Untersuchungen auf den Gebieten Werkstoffmechanik, Strukturanalyse und zerstörungsfreier Materialprüfung notwendig. Ein erklärtes Ziel des Projektes bestand darin, die notwendigen Messverfahren zu optimieren bzw. erst aufzubauen und mit neuen Ideen zu verbessern. Bei den werkstoffmechanischen Versuchen kommt es darauf an, durch mechanische oder thermische Belastungen gezielt mikrostrukturelle Schädigungen in die Materialproben einzubringen. Dies geschieht im Falle der niederzyklischen Ermüdung (thermische Schichtungen in Rohrleitungen) durch dehnungsgeregelte zyklische Versuche auf servohydraulischen Prüfmaschinen. Für die Analyse der Mikrostrukturen eignen sich neben den klassischen Methoden der Metallographie und Elektronenmikroskopie vor allem Streumethoden auf der Basis von Neutronenstrahlung und hochenergetischem Röntgenlicht. Dazu stehen im PSI geeignete Diffraktometer in den Forschungsanlagen SINQ und SLS zur Verfügung. Mit den Methoden der Strukturanalyse können Versetzungsdichten, Phasenanteile und -verteilungen sowie Mikrorisse ausgewertet werden. Auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Werkstoffcharakterisierung liegt das grösste Potential bei den magnetischen Verfahren. Die Palette der Messmöglichkeiten reicht vom einfachen Handgerät zur Messung der Permeabilität bis hin zu Prüfautomaten mit Hochtechnologie-Sensoren zur Magnetfeldmessung mit Ortsauflösung. Die für das Projekt optimierten und aufgebauten Messverfahren sind zusammenfassend in Tabelle 1 dargestellt.

Die im Arbeitsprogramm formulierten Aufgaben lassen wie folgt zusammenfassen:

- Mikrostrukturelle und werkstoffmechanische Untersuchungen des Zusammenhanges von Erschöpfungsgrad (Lastwechselzahl) und Volumenanteil des gebildeten Martensits bei Raumtemperatur
- Aufbau eines stationären Messplatzes zur Magnetfeldmessung mit hochempfindlichen Sensoren
- In-situ Messung der Martensitentwicklung während des Ermüdungsversuches
- Rohrbiegeversuch (Bauteilversuch) mit gleichzeitiger Messung der Martensitbildung mittels magnetischer Methoden

Nach den ersten Ermüdungsversuchen wurde bald klar, dass es einen starken Einfluss einiger Last- und Materialbedingungen auf die Martensitbildung gibt und die genaue Kenntnisse der einzelnen Einflussgrößen notwendig ist, um gutdefinierte Versuche fahren zu können. Deshalb wurde in Abstimmung mit der HSK-Projektleitung frühzeitig entschieden, dass der Bauteilversuch im Punkt 4 ersetzt wird durch systematische Untersuchungen der Einflussgrößen auf die Martensitbildung. Als wesentliche Einflussgrößen wurden angesehen:

- Lastwechselzahl (Erschöpfungsgrad)
- Temperatur
- Belastungsfrequenz
- Materialausgangszustand (Fertigungsverfahren, Wärmebehandlung)

Damit wurde das Untersuchungsprogramm wesentlich erweitert. Aus der ursprünglich geplanten einen Serie Ermüdungsproben bei Raumtemperatur wurden 3 Gross-Serien (3 Materialzustände) mit einigen Unterserien für unterschiedliche Temperaturen und Frequenzen. Weiterhin kann die in Punkt 1 formulierte Aufgabe der Untersuchung des Einflusses der Lastwechselzahl (Erschöpfungsgrad) mit den Untersuchungen der anderen Einflussgrößen zu einer Teilaufgabe verbunden werden.

An allen Proben wurden nach der Ermüdung der Volumenanteil des Martensits mittels Neutronendiffraktometrie sowie mittels geeigneter magnetischer Verfahren bestimmt. An ausgewählten Proben erfolgten mikrostrukturelle Untersuchungen mittels Metallographie und Röntgendiffraktometrie. Der Bericht ist demzufolge in folgende Teilaufgaben gegliedert:

- Charakterisierung des mechanischen Werkstoffverhaltens bei niederzyklischer Ermüdung unter dem Einfluss deformations-induzierter Martensitbildung
- Mikrostrukturelle Untersuchungen zur Bestimmung von Martensitgehalt und Martensitverteilung in den Ermüdungsproben
- Untersuchung der Einflussgrößen Lastwechselzahl, Temperatur, Belastungsfrequenz und Materialzustand auf die Martensitbildung
- Aufbau von Versuchsanlagen zur Messung magnetischer Kenngrößen (magnetische Permeabilität, Remanenz-Feldstärke, Wirbelstrom-Impedanz (mit Ortsauflösung), In-situ Messung während des Ermüdungsversuches

Tab. 1: Übersicht der Teilgebiete der Werkstoffdiagnostik für Ermüdung mit den zugeordneten Verfahren und Messgrößen

Werkstoffmechanik	Mikrostrukturanalyse	Zerstörungsfreie Werkstoffcharakterisierung
Niederzyklische Ermüdung Gezielte Erzeugung von Defektstrukturen	Neutronendiffraktometrie Volumen-Phasenanteile	Ferritосkope Magnetische Permeabilität
Wärmebehandlung Einstellung des Materialausgangszustandes	Röntgendiffraktometrie Phasenverteilung	Magnetfeldmessplatz Fluxgate und SQUID-Sensoren
Thermo-mechanische Ermüdung Realisierung betriebsnaher Last- und Temperaturzyklen	Metallographie, Mikroskopie Bestimmung von Defekt- und Versetzungsstrukturen	Magnetometer Wirbelstrom-Impedanzmessungen mit Ortsauflösung

2 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

2.1 UNTERSUCHUNGSMATERIAL UND VERSUCHSBEDINGUNGEN

2.1.1 Werkstoff, Fertigungsverfahren und Wärmebehandlungen

Im Verlaufe des FEVER-Projektes wurden insgesamt 3 Probenserien untersucht, die sich in der chemischen Zusammensetzung, im Fertigungsverfahren und in der Wärmebehandlung unterschieden (ca. 100 Ermüdungsproben). Als Untersuchungsmaterial kam der titanstabilisierte nichtrostende Stahl X6CrNiTi18-10 (DIN Werkstoffnummer 1.4541, AISI 321) zum Einsatz. Das Material wurde ausgewählt aufgrund seiner metastabilen Eigenschaften, bei Unterkühlung oder Verformung einer teilweisen Phasentransformation von Austenit zu Martensit zu unterliegen, und aufgrund seiner weitverbreiteten Anwendung als Rohrleitungswerkstoff in der Kraftwerkstechnik. Die chemische Zusammensetzung sowie Fertigungsverfahren und Wärmebehandlung der einzelnen Serien sind in Tab.2 aufgelistet.

Tab.2: Chemische Zusammensetzung, Fertigungsverfahren und Wärmebehandlung der Ermüdungsproben (Stangenmaterial), WLA: warmgezogen und lösungsgeglüht, K: lösungsgeglüht und kaltgezogen

Nr.	Zustand	C	Cr	Ni	Ti	Si	Mn	P	S	Mo	Co
1	WLA	0.061	17.70	9.92	0.375	0.439	1.07	0.036	0.016	0.501	0.172
2	WLA	0.020	17.05	9.60	0.140	0.450	1.88	0.028	0.030	0.320	0.100
3	K	0.022	17.70	9.84	0.148	0.381	1.85	0.029	0.022	0.334	0.118

Die Serien 1 und 2 unterschieden sich in der chemischen Zusammensetzung, wogegen Fertigungstechnologie und Wärmebehandlung identisch waren. Die Serie 3 entsprach in ihrer chemischen Zusammensetzung der Serie 2, unterschied sich aber in der Herstellung und Wärmebehandlung von den anderen beiden Serien. Während die Serien 1 und 2 warmgezogen und anschliessend lösungsgeglüht wurden, erfolgte die Endfertigung der Serie 3 durch Kaltziehen. Die Auswirkungen von Lösungsgeglühtung und Kaltverfestigung auf die mechanischen Eigenschaften verdeutlicht Abbildung 1.

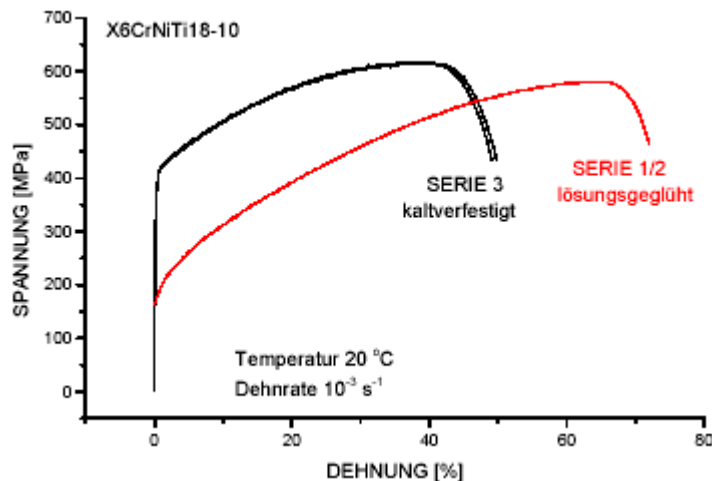


Abb. 1: Spannungs-Dehnungs-Diagramme bei Raumtemperatur für den lösungsgeglühten und kaltverfestigten Materialzustand

Durch das Lösungsglühen der Proben der Serien 1 und 2 kann angenommen werden, dass die mikrostrukturelle Defektdichte sowie auch der δ -Ferrit-Gehalt im Vergleich zum kaltverformten Material wesentlich verringert wurde. Die Bestätigung findet man in Abb. 1. Das kaltverfestigte Material mit der höheren Versetzungsdichte weist eine höhere 0.2%-Dehngrenze auf als das Material nach der Lösungsglühung. Die Bruchdehnung ist für den lösungsgeglühten Zustand grösser. Für beide Materialzustände wurden charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurven erhalten, wobei als Unterscheidung die Angabe der 0.2%-Dehngrösse ausreicht.

In den Vorschriften für die Auslegung der sicherheitsrelevanten Komponenten und Rohrleitungen aus nichtrostenden austenitischen Stählen (z.B. ASME-Code, KTA-Regeln) geht hervor, dass unabhängig von der Fertigungstechnologie die Bauteile nur im lösungsgeglühten Materialzustand eingesetzt werden dürfen. Damit entspricht der Materialzustand der Serien 1 und 2 den Kraftwerksbedingungen. Für die Ermüdungsüberwachung sind jedoch nicht nur der Grundwerkstoff, sondern auch die Schweißnähte von Interesse. Beim Schweißen entstehen in den Wärmeeinflusszonen mehr oder weniger ausgeprägte Bereiche höherer Härte und Eigenspannungen. Der Materialzustand der Prüferie 3 kann somit als Beispiel für eine aufgehärtete Zone einer Schweißnaht angesehen werden.

2.1.2 Werkstoffproben für die Ermüdungsversuche

Aus den 3 Serien wurden für die Untersuchungen der deformations-induzierten Martensitbildung sowohl Zug- als auch Ermüdungsproben gefertigt. Als Zugprobe wurde die Standardprobe B nach DIN 50125 mit einem Durchmesser von 10 mm eingesetzt. Für die Ermüdungsversuche kamen 2 unterschiedliche Probentypen nach ASTM E606 zum Einsatz. Für die Serien 1 und 2 wurden sogenannte Uhrglas-Proben ($D=18$ mm) und für die Serie 3 Zylinderproben ($D=10$ mm) hergestellt. Form und Abmessungen der Uhrglasprobe sowie der Ermüdungsprobe in Zylinderform zeigen die Abbildungen 2 und 3.

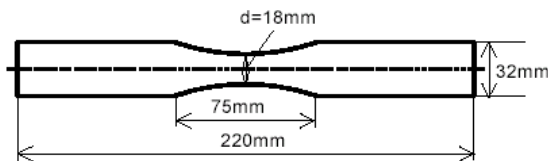


Abb. 2: Ermüdungsprobe mit der sogenannten Uhrglas- Form nach ASTM E 606

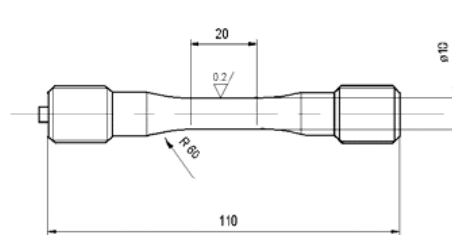


Abb. 3: Ermüdungsprobe mit zylindrischer Form im Messbereich nach ASTM E 606

Die Form der Uhrglasproben hat den Vorteil, dass die Maximaldehnung und somit die plastische Zone lokalisiert sind und dass an einer Probe verschiedene Dehnamplituden auftreten. Die Martensitbildung kann somit an einer Probe direkt als Funktion der Dehnung beobachtet werden. Der Nachteil besteht darin, dass die mit dem Dehnungsaufnehmer gemessene Dehnung nur einen über die Messlänge gemittelten Wert liefert.

Um den axialen Dehnungsverlauf in den Uhrglasproben zu bestimmen, wurden Finite Elemente (FE)-Berechnungen mit Berücksichtigung des elasto-plastischen Materialverhaltens durchgeführt. Abbildung 4 zeigt den axialen Verlauf der elastischen, plastischen und totalen Dehnungen bei quasistatischer Beanspruchung. Aus den FE-Berechnungen konnte ermittelt werden, dass die mittlere plastische Dehnung im Messbereich der Uhrglasproben 0.24 % beträgt, was vergleichbar war mit der plastischen Dehnung in den Zylinderproben, die bei der angelegten totalen Dehnungsamplitude von 0.40 % als Mittelwert während des Ermüdungsversuches gemessen wurde. Somit war es möglich, die Ergebnisse für die Uhrglasproben (Serien 1 und 2) mit denen der Zylinderproben (Serie 3) zu vergleichen.

In Abbildung 5 ist die Verteilung der totalen Dehnung im axialen Probenquerschnitt bei quasistatischer Beanspruchung dargestellt. Die entsprechende Ausdehnung der plastischen Zone zeigt Abbildung 6. Die plastische Zone beträgt bei quasistatischer Beanspruchung 10 mm und wächst im Verlauf des Ermüdungsversuches um einige mm an. Die Modellierung des elastisch-plastischen Verhaltens der Uhrglasprobe bei Ermüdung erfolgte unter Berücksichtigung der gemessenen zyklischen Verfestigung. In Abbildung 7 wird die Verteilung der im Ermüdungsversuch akkumulierten plastischen Dehnung dargestellt. In Modellen zur Berechnung der Restlebensdauer wird die akkumulierte plastische Dehnung als Schädigungsparameter eingesetzt. Unter der Bedingung, dass die Grösse der akkumulierten plastischen Dehnung ausschlaggebend ist für die Menge an gebildetem Martensit, ist nach Abbildung 7 zu erwarten, dass sich die Martensitbildung bevorzugt im Probeninneren vollzieht.

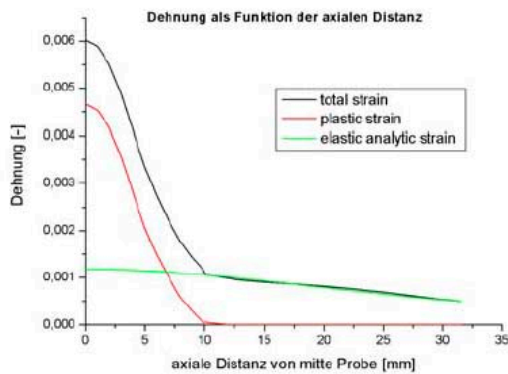


Abb. 4: Verlauf der elastischen, plastischen und totalen Dehnungsamplitude in Abhängigkeit der axialen Längskoordinate ab Probenmitte
Mittlere plastische Dehnung im Messbereich (20 mm): 0.24 %

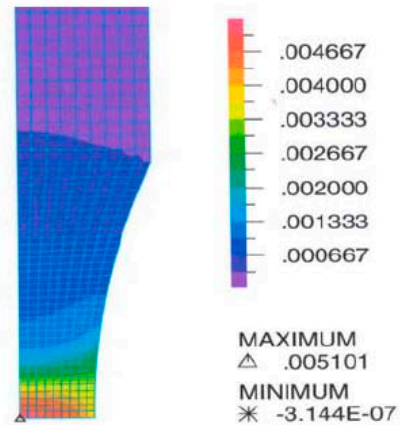


Abb. 5: Verteilung der totalen Dehnung im Längsschnitt der Uhrglas-Probe bei quasistatischer Beanspruchung

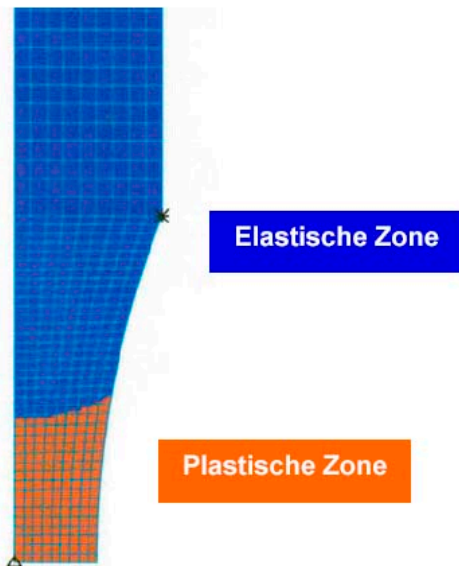


Abb. 6: Ausbreitung und Form der plastischen Zone bei quasistatischer Beanspruchung

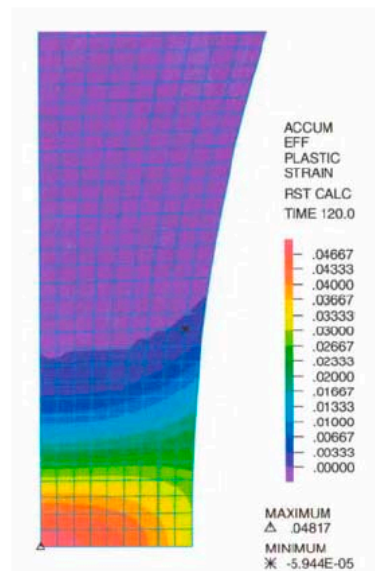


Abb. 7: Verteilung der im Ermüdungsversuch akkumulierten plastischen Dehnung im Längsschnitt der Uhrglas-Probe

2.1.3 Versuchsdurchführung der Ermüdungsversuche

Die Ermüdungsversuche wurden an einer servohydraulischen Prüfmaschine (250 kN) der Fa. Schenck (Deutschland) durchgeführt. Für die Versuche im Bereich der niederzyklischen Ermüdung (LCF) kam eine spezielle Einspannung zum Einsatz, die eine hochpräzise axiale Ausrichtung der Probe gewährleistete. Die Versuchsdurchführung erfolgte dehnungsgeregelt mittels der digitalen Steuerung Instron FastTrack 8800 der Instron Corporation (USA). Die Dehnungen wurden im gesamten Temperaturbereich von 20-260°C direkt an der Probe mit einem Aufnehmer der Fa. Sandner Messtechnik (Deutschland) vom Typ EXA 20-1.25 HT gemessen. Die Messlänge betrug 20 mm. Die Ermüdungsversuche erfolgten alternierend, d.h. im Zug-Druck-Bereich ohne Mittellast bei Frequenzen von 1.0, 0.5, 0.1 Hz. Das Spannungsverhältnis R der unteren zur oberen Spannungsamplitude war gleich -1.0 .

Zur Einstellung und Kontrolle der Temperatur kam eine spezielle für diese LCF Probenanordnung konstruierte Temperatorkammer vom Typ Instron SFL EC65 (GB) zum Einsatz. Die Kammer besitzt eine geringe Höhe, so dass kurze Proben-Einspannungen möglich waren. Die Temperatur an der Probenoberfläche wurde kontinuierlich während des Versuches gemessen. Beachtet werden musste, dass es bei Frequenzen grösser 0.1 Hz zur Wärmeentwicklung in der Probe kam, so dass hier die Umgebungstemperatur nachgeregelt wurde. Durch die Temperaturmessung an der Probenoberfläche wurde gewährleistet, dass die Versuche für alle Frequenzen bei den vorgegebenen Temperaturen abliefen.

Das Abbruchkriterium für die technische Anrissentstehung wurde auf 2% Lastabfall festgelegt, wobei sich der Lastabfall auf die maximale Spannungsamplitude bezog. Mit 5 Proben wurde eine mittlere Lastwechselzahl für die Anrissentstehung ermittelt und als Erschöpfungsgrad $D=1.0$ (oder 100%) bezeichnet. Erschöpfungsgrad $D=1.0$ bedeutet somit, dass 100% Lebensdauer bis zur technischen Anrissentstehung verbraucht ist. Die Materialzustände im Vorriss-Stadium wurden nun so eingestellt, dass der Ermüdungsversuch bei einer definierten Lastwechselzahl abgebrochen wurde, die dem gewünschten Erschöpfungsgrad entsprach. Somit entstanden Werkstoffproben für die Erschöpfungsgrade $D=0.4$, 0.6 und 0.8 .

2.2 WERKSTOFFMECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN

2.2.1 Probentemperatur während der Ermüdungsversuche

Bei den Belastungsfrequenzen von 1.0 Hz und 0.5 Hz kam es ohne zusätzliche Kühlung zu einer merklichen Erhöhung der Probentemperatur. Bei Absenkung der Frequenz auf 0.1 Hz betrug die Temperatur an der Probenoberfläche nur noch 30°C und konnte somit als Raumtemperatur gelten. Um die radiale und axiale Temperaturverteilung zu messen, wurden zylindrische Ermüdungsproben mit Thermoelementen versehen. Eine Übersicht der Positionen, an denen die Thermoelemente TE1 bis TE4 angebracht waren, zeigt die Abbildung 8. Zusätzlich wurde das Temperaturfeld mittels einer Thermographie-Kamera gemessen. Die Untersuchungen fanden bei einer totalen Dehnungsamplitude von 0.40% und einer Frequenz von 1.0 Hz statt. Wie aus Abbildung 9 hervorgeht, stieg die Temperatur in den ersten 600 Zyklen im Zentrum der Probe auf ca. 80°C an (rote Kurve). Der Temperaturverlauf an der Oberfläche und im Kern der Probe ergab keinen Unterschied (schwarze und rote Kurve). Während in radialer Richtung keine Temperaturabnahme verzeichnet wurde, erfolgte in axialer Richtung in einer Entfernung von 10 mm eine Abnahme um ca. 10°C (grüne Kurve). In der Nähe der Probeneinspannungen ging die Temperatur auf ca. 45°C zurück (blaue Kurve). Weiterhin konnten Temperaturschwankungen innerhalb eines Zyklus von ca. 1°C beobachtet werden (Abbildung 10). Ein Beispiel der Temperaturfeldmessung mittels Thermographie-Kamera ist in der Abbildung 11 dargestellt. Die Darstellung zeigt die Temperaturverteilung auf einer Teiloberfläche in der Mitte der Probe. Auch diese Messung bestätigte, dass ein nahezu homogenes Temperaturfeld vorlag, lediglich in axialer Richtung eine leichte Abnahme der Temperatur im Messbereich beobachtet wurde. Mit den durchgeführten Temperaturmessungen konnte gezeigt werden, dass die Temperaturmessung in Probenmitte an der Oberfläche der Probe geeignet ist, die Probentemperatur während des Ermüdungsversuches zu überwachen.

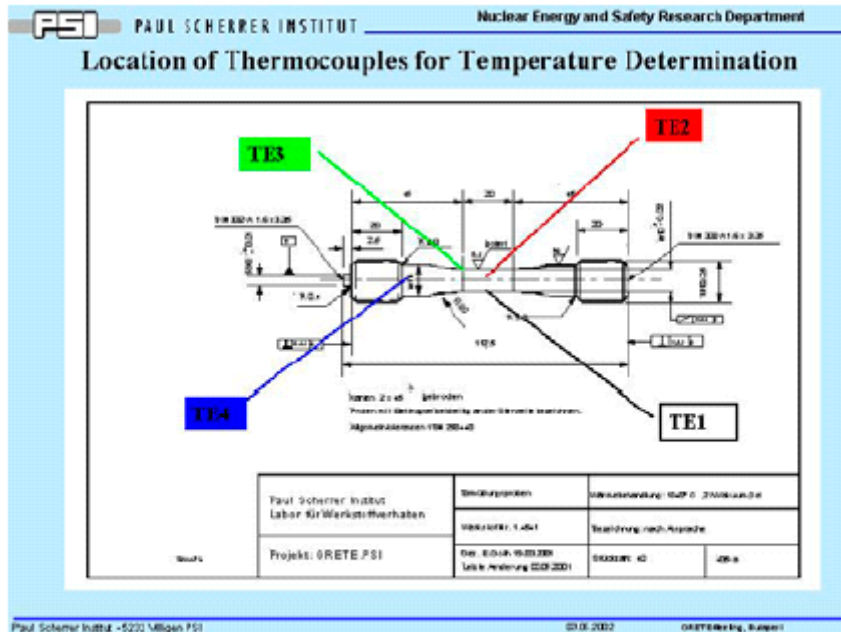


Abb. 8: Positionen der Temperaturmessungen mittels Thermoelementen

Temperatures of Fatigue Specimens B measured with Thermocouples

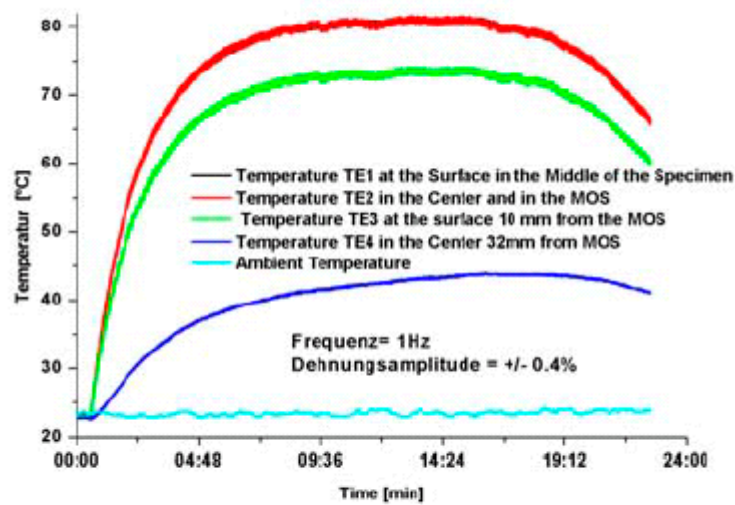


Abb.9: Temperaturmessungen an unterschiedlichen radialen und axialen Positionen

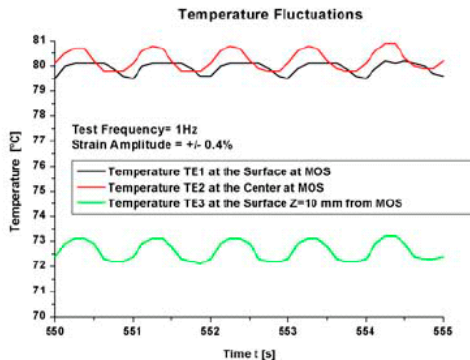


Abb. 10: Temperaturschwankungen innerhalb der Ermüdungszyklen

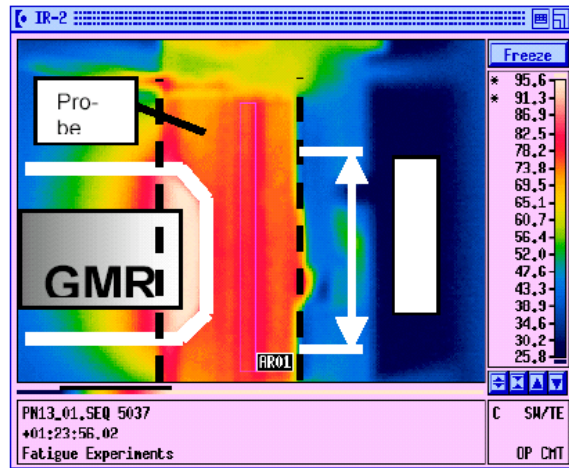


Abb. 11: Temperaturfeld im Bereich der Dehnungsmessung aufgenommen mit einer Thermographie-Kamera

2.2.2 Charakterisierung des Materialverhaltens bei niederzyklischer Ermüdung

Das mechanische Verhalten von metastabilen austenitischen Stählen wird bei statischer und zyklischer Belastung massgebend von der teilweisen deformations-induzierten Phasentransformation in Martensit beeinflusst. In der Abbildung 12 ist der typische Verlauf der Spannungsamplitude während des totaldehnungsgeregelten Ermüdungsversuches für den untersuchten Stahl dargestellt, hier am Beispiel von Versuchen der Serie 3 an Umgebungsluft bei einer Frequenz von 1.0 Hz (Probentemperatur 80°C). Das Materialverhalten ist charakterisiert durch eine Verfestigung in den ersten 10 Zyklen, gefolgt von einer Entfestigung bis zur Lastwechselzahl 1000. Nach dieser Zyklenzahl wurde bis zur technischen Rissentstehung in der sogenannten Sättigungsphase, die den weitaus längsten Lebensdauerabschnitt repräsentiert, eine sekundäre Verfestigung beobachtet. Das gesamte Materialverhalten bis hin zur technischen Anrissentstehung wird vom deformations-induzierten Martensit beeinflusst. Im besonderen lässt sich dieser Einfluss im Grad der sekundären Verfestigung beobachten. In der Literatur wurde ein Zusammenhang hergestellt zwischen dem Grad der sekundären Verfestigung und dem Martensitgehalt [14,15,17].

Das Materialverhalten wird entscheidend geprägt von der Prüftemperatur. Sowohl die mechanischen Kenngrößen 0.2%-Dehngrenze, Zugfestigkeit und Dauerschwingfestigkeit als auch der gesamte Spannungs- oder Dehnungsverlauf während des Versuches hängen in entscheidendem Masse von der Temperatur ab. Bei den metastabilen austenitischen Stählen beeinflusst die Temperaturabhängigkeit des deformations-induzierten Martensits das mechanische Verhalten zusätzlich. Die Abbildungen 13 und 14 illustrieren das Werkstoffverhalten bei statischer und zyklischer Beanspruchung bei unterschiedlichen Temperaturen am Beispiel des untersuchten Stahls im kaltverformten Materialzustand. Die Zugversuche erfolgten bei einer Dehnrage von 10⁻³ s⁻¹, die Ermüdungsversuche bei einer totalen Dehnungsamplitude von 0.40%. Im Zugversuch nahm der Grad der Verfestigung mit steigender Temperatur kontinuierlich ab. In den Ermüdungsversuchen erfolgte eine Abnahme des Grades der sekundären zyklischen Verfestigung, die sogar bei Temperaturen von 200°C und höher zu einer sekundären Entfestigung überging. In Abbildung 14 erkennt man, dass die Kurven für eine bestimmte Temperatur sehr dicht zusammenliegen, wobei recht unterschiedliche Zyklenzahlen für die Rissinitiation auftreten können. Die Kurvengruppen pro Temperatur sind deutlich voneinander getrennt, auch dann noch, wenn der Temperaturunterschied nur 10°C beträgt. Das bestätigt die Auffassung in der Literatur, dass der Grad der sekundären zyklischen Verfestigung von der Martensitbildung bestimmt wird.

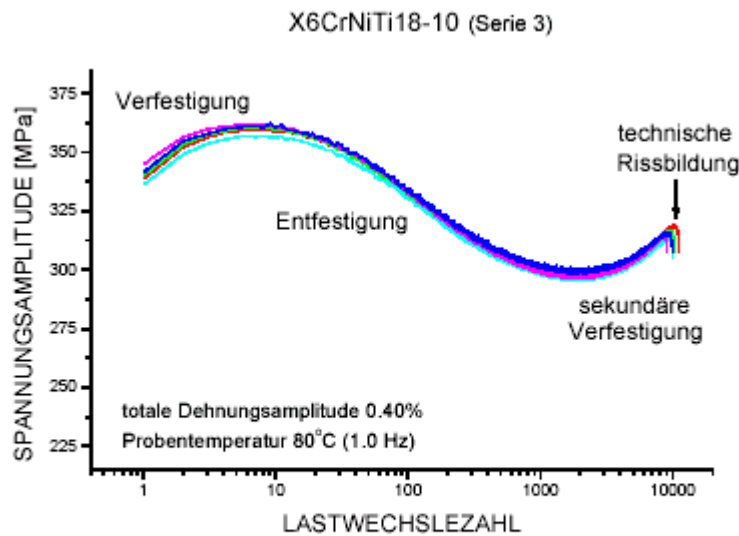


Abb. 12: Typischer Verlauf der Spannungsamplitude bei Ermüdung des metastabilen austenitischen Stahles X6CrNiTi18-10

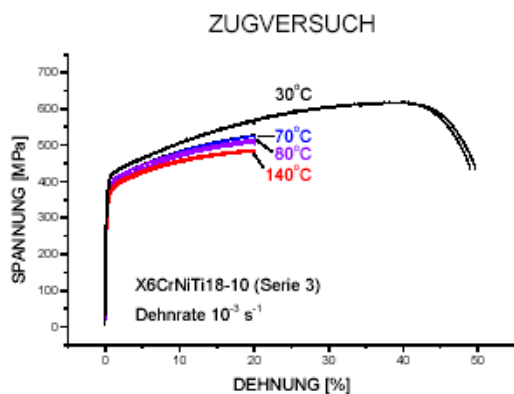


Abb. 13: Spannungs- Dehnungs- Kurven des austenitischen Stahls X6CrNiTi18-10 (Serie 3) bei unterschiedlichen Temperaturen

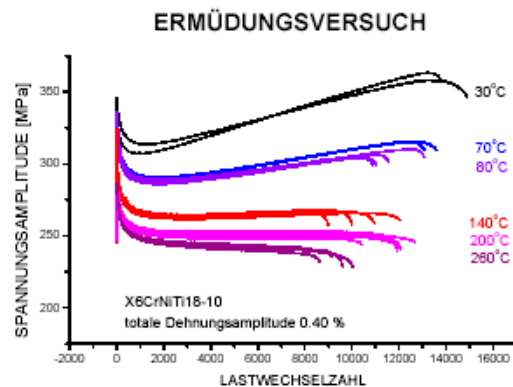


Abb. 14: Verlauf der Spannungsamplituden bei Ermüdungsversuchen von X6CrNiTi18-10 (Serie 3) bei unterschiedlichen Temperaturen

2.3. MIKROSTRUKTURELLE UNTERSUCHUNGEN

2.3.1 Bestimmung des Martensitgehalts mittels Neutronendiffraktometrie

Der Martensitanteil, der sich deformations-induziert in der austenitischen Matrix bildet, lässt sich quantitativ mittels Neutronendiffraktometrie bestimmen. Die Beugungsmethode eignet sich deshalb so gut, da Martensit und Austenit unterschiedliche Kristallgittertypen aufweisen (kubisch-raumzentriertes und kubisch-flächenzentriertes Gitter), die zu einer deutlichen Unterscheidung der Beugungspeaks ausgewählter kristallographischer Ebenen führen. Die Neutronendiffraktometrie-Experimente wurden am Diffraktometer DMC durchgeführt, das aus der Spallationsneutronen-Quelle am PSI (SINQ) mit sogenannten kalten Neutronen gespeist wird [28]. Das Gerät ist optimiert auf hohe Intensitäten und ermöglicht es, Martensitgehalte unter 1vol.% -Anteil zu bestimmen. Mit einer Neutronenwellenlänge von $\lambda = 0.38 \text{ nm}$ kam ein Streuwinkelbereich von $68^\circ \leq 2\Theta \leq 147^\circ$ zur Auswertung. Für die Messungen an den Ermüdungsproben wurde ein grosser Strahlquerschnitt von 40 mm (Breite) x 10 mm (Höhe) eingestellt, um einen mittleren Martensitanteil im Messbereich der Proben zu bestimmen. Zum Ausgleich der inhomogenen

Martensitverteilung wurde die Probe während der Martensitmessung ständig um ihre Achse gedreht. Die Bestimmung des Martensitgehaltes erfolgte mit der nachfolgend beschriebenen Methode.

Die Intensität der unter dem Winkel Θ von einer mehrphasigen Probe gestreuten Neutronen $I(\Theta)$ ist gegeben durch [29]:

$$I(\Theta) = \frac{I_0 \lambda^3 l_s V \rho'}{8\pi r \rho} \sum_i \frac{j_{hkl_i} F_{hk l_i}^2}{V_{c_i}^2 \sin \Theta_{hkl_i} \sin 2\Theta_{hkl_i}} e^{-2W_i} A_{hkl_i} \Omega_{hkl_i} v_i \quad (1)$$

hierbei sind:

I_0	Primärstrahlintensität
λ	Wellenlänge
l_s	Höhe der Detektorblende
r	Abstand Probe - Detektor
V	Volumen der Probe im Strahl
ρ, ρ'	theoretische und die wirkliche Dichte der Probe
i	Indizes der Phase
j	Multiplizität der gemessenen Netzebene
V_c	Volumen der Elementarzellen
F_{hkl}	Strukturamplitude des Reflexes
e^{-2W}	Debye-Temperatur-Korrelationsfaktor
A_{hkl}	Absorptionsfaktor des Reflexes
Ω_{hkl}	Texturfaktor des Reflexes
v_i	Volumenanteil der Phase

Ausgegangen wurde von der Voraussetzung des Zweiphasengemisches Austenit / Martensit. Hieraus ergibt sich folgende Randbedingung:

$$v_{Austenit} + v_{Martensit} = 1 \quad (2)$$

Zur Berechnung der Volumenanteile aus den Intensitätsverhältnissen zweier Peaks folgt aus Gl.(1) unter der Annahme gleicher Schwächungskoeffizienten :

$$v_1 = \left[\frac{I_2 \left(\frac{F_{hkl_1}^2}{V_{c_1}^2 \sin \Theta_{hkl_1} \sin 2\Theta_{hkl_1}} \right) j_{hkl_1} A_{hkl_1} \Omega_{hkl_1}}{I_1 \left(\frac{F_{hkl_2}^2}{V_{c_2}^2 \sin \Theta_{hkl_2} \sin 2\Theta_{hkl_2}} \right) j_{hkl_2} A_{hkl_2} \Omega_{hkl_2}} + 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

Für die kubisch-raumzentrierte Phase Martensit wurde der 110-Reflex und für den kubisch-flächenzentrierten Austenit der 111-Reflex untersucht. Aufgrund der relativ grossen freien Weglängen, die die Neutronen in Eisenwerkstoffen zurücklegen, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Absorption über alle Phasen mittelt und damit A_{hkl} bei etwa gleichen Beugungswinkeln gleich sind und herausfallen. Setzt man noch voraus, dass keine Textur vorhanden ist, oder dass es eine eindeutige, von der Phasenumwandlung resultierende Texturkorrelation gibt, dann gilt $\Omega_{hkl_1} \sim \Omega_{hkl_2}$. Für die einzelnen Phasen gelten die in Tabelle 3 angegebenen Parameter.

Tabelle 3: Parameter zur Bestimmung der Phasenzusammensetzung

Phase	Austenit (111)	Martensit (110)
Strukturtyp	kfz	krz (tetragonal verzerrt)
F_{hkl}	4	2
j_{hkl}	8	12
V_c in nm^3	0.04648	0.02362
Θ in Grad	66.25	69.09

Die Abbildungen 15 a) und b) zeigen beispielhaft Beugungsbilder einer martensitfreien und einer martensithaltigen Probe. Die Linienlage des 111-Austenitreflexes entsprach einer Gitterkonstante von $a = 3.597 \text{ \AA}$ (Literaturwert $\gamma\text{-Fe}$: 3.647). Der 110-Martensitreflex lag bei 138.20° , das einer Gitterkonstante von $a = 2.876 \text{ \AA}$ entspricht.

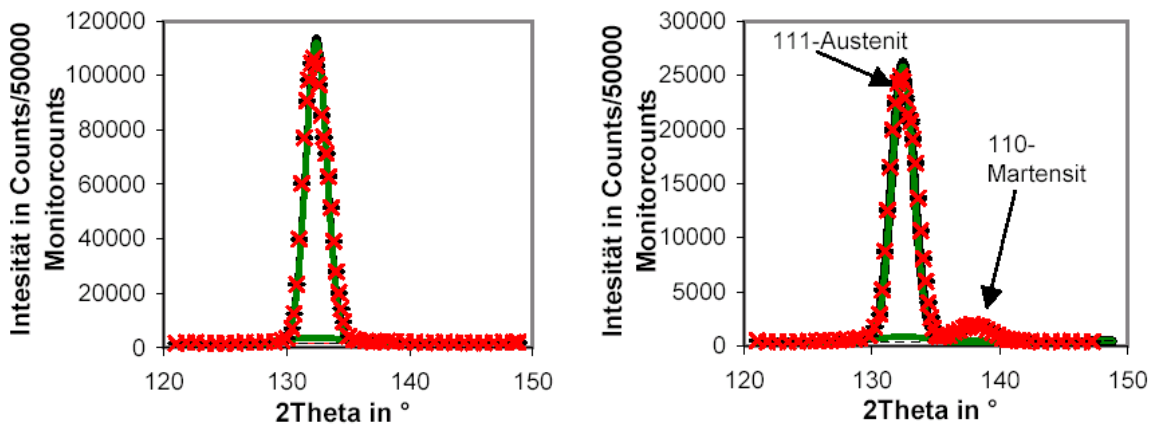


Abb. 15: Beispiele für Beugungsbilder an martensitfreien und martensithaltigen Ermüdungsproben

Die Beugungsbilder wurden mit drei Gausskurven angepasst, d.h. es wurde bei der Auswertung vorausgesetzt, dass Martensit in der Probe enthalten ist. Somit wird auch in martensitfreien Proben ein solcher Peak angepasst. Folgende zwei Anforderungen für den Nachweis von Martensit wurden formuliert, die beide gleichzeitig erfüllt sein müssen:

- Die Integralintensität geteilt durch die Zahl der Messpunkte innerhalb der Halbwertsbreite des Peaks ist grösser als die aus der Zählstatistik resultierenden Fehler der Untergrundbestimmung.
- Im Beugungsbild ist eine Schulter am 111-Austenitpeak deutlich sichtbar.

2.2.2 Beschreibung der Metallographieuntersuchungen

Zur Herstellung metallographischer Schlitte wurden aus der Probenmitte durch Quer- und Längsschnitte 5 mm dicke Scheiben entnommen. Zum Probentrennen kam eine Korund-Trennschleifscheibe zum Einsatz. Zur weiteren Präparation wurden die Proben in Epoxydharz eingebettet. Das Schleifen erfolgte mit SiC-Nassschleifpapier der Körnung 320 oder mit einer Diamantschleifscheibe der Körnung 20 μm solange, bis Planparallelität der Schliffflächen erreicht war. Zum anschliessenden Polliervorgang wurden Diamantsuspensionen mit den Körnungen 9, 3 und 1 μm verwendet. Um vor allem die Martensitstrukturen sichtbar zu machen, kamen Ätzverfahren mit sogenannter ATM V2A-Beize und Beraha-Lösung zur Anwendung [30]. Für die metallographischen Aufnahmen stand ein Auflichtmikroskop der Firma LEICA zur Verfügung. Im wesentlichen wurden die Objektive mit 50-, 200-, 500-facher Vergrößerung eingesetzt. Die Schwarz-Weiss-Bilder wurden mit schrägem Lichteinfall, die Farbbilder mit polarisiertem Licht aufgenommen. Eine CCD-Kamera ermöglichte das digitale Abspeichern und Auswerten der Aufnahmen. Zur quantitativen Gefügeanalyse stand das LEICA-Programm QUANTIMET zur Verfügung.

Mit diesen Präparationsschritten konnten die Strukturen und die Verteilung des deformations-induzierten Martensits in den Schliffflächen qualitativ bestimmt werden. Eine quantitative Bestimmung des Martensitgehaltes an den Schliffen war sehr schwierig und führte zu Ergebnissen, die von den Neutronendiffraktionsmessungen abwichen. Nach unseren Erfahrungen wird die Martensitgehaltsbestimmung mittels metallographischer Methoden, wie sie oft auch in der Literatur zur Untersuchung der deformations-induzierten Martensitbildung vorkam, als zu ungenau eingeschätzt und kann deshalb nicht empfohlen werden.

2.3.3 Durchführung von Röntgendiffraktionsexperimenten

Die Verwendung von Synchrotronlicht anstelle der Neutronenstrahlung ermöglicht die Erfassung des Martensitgehaltes mit höherer Ortsauflösung, die zu einer bildgebenden Darstellung der Martensitverteilung ausgenutzt werden kann [31]. Allerdings beschränkt sich die gewonnene Information auf den unmittelbaren Oberflächennahbereich. Für die Röntgenbeugungs (XRD)- Experimente wurden metallographische Schliffproben verwendet. Damit war eine unmittelbare Zuordnung der XRD- und der Metallographie-Aufnahmen möglich. Die XRD-Bilder dienten zum besseren Verständnis der Martensitverteilung in den Quer- und Längsschnitten und ermittelten quantitativ die Martensitkonzentration an der Oberfläche. Die Metallographie-Befunde hingegen konnten die lattenförmige Martensitstruktur auflösen und deren Verteilung qualitativ beschreiben.

Für die XRD-Experimente konnte die ROBL-Beamline an der ESRF Grenoble genutzt werden [32]. Eine Übersicht der Gesamtanlage zeigt Abbildung 16. Die verwendeten Versuchsparameter sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Aufgrund der schlechten Kornstatistik im Austenit wurde der Mittelwert der Integralintensität des (111)-Austenit-Peaks zur Bestimmung des Martensitgehaltes verwendet. Im Rahmen des FEVER-Projektes kam es insgesamt zu zwei Messkampagnen. Für die erste Messkampagne wurde eine Probe der Serie 1 ausgewählt. In einer zweiten Kampagne erfolgten Messungen an vier ausgewählten Proben der Serie 3.

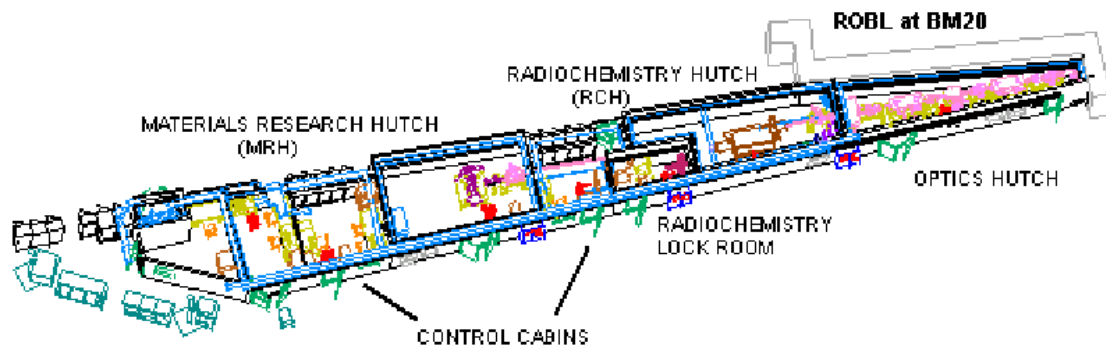


Abb. 16: Übersicht der ROBL Beamline (Rossendorfer Beamline) an der ESRF Grenoble

Tabelle 4: Versuchsparameter zur Durchführung der XRD-Experimente an der ROBL-Beamline

Messzeit	1	2
Wellenlänge	0.07107 nm	0.1787 nm
Röntgenenergie	17.415 keV	6.926 keV
Strahlquerschnitt	0.2 * 0.5 mm ²	0.4 * 0.8 mm ²
Querschnitt auf der Probe	ca. 1.0 * 0.5 mm ²	ca. 0.8 * 0.8 mm ²
Winkelbereich (2 θ)	19.3-20.5°	49.0-54.0°
Schrittweite (2 θ)	0.025°	0.04°

2.3.4 Martensitverteilung in Längs- und Querschnitten der Ermüdungsproben

a) Probenserie 1/2

Für die Ermüdungsexperimente der Serien 1 und 2 kamen sogenannte Uhrglas-Proben zum Einsatz. Die Uhrglas-Form mit veränderlichem Querschnitt hat den Vorteil, dass sich im Messbereich ein Dehnungsgradient einstellt, der ausgehend von der Probenmitte mit zunehmendem axialen Abstand eine Veränderung in der Martensitkonzentration zur Folge hat. Um die Dehnungsabhängigkeit des deformations-induzierten Martensits bei Ermüdung zu untersuchen, wurden Neutronendiffraktions-Experimente an Proben mit unterschiedlichen Erschöpfungsgrad durchgeführt. Die Blende des Strahls wurde auf nur 2 mm Schlitzbreite begrenzt, so dass ein über den Querschnitt gemittelter Martensitgehalt in 2 mm dünnen Scheiben bestimmt wurde. In Abständen von 5 mm kam es zu Beugungsmessungen, die zu einer Verteilung des Martensitanteils in Probenlängsrichtung führte. In der Abbildung 17 sind die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Zunächst ist festzustellen, dass für 3 der 4 Kurven der Martensitgehalt in der Probenmitte am grössten ist und nach dem Probenende hin abfällt. Damit konnte bestätigt werden, dass die Martensitbildung direkt mit der Dehnung gekoppelt ist. Weiter kann der Abbildung entnommen werden, dass mit steigender Lastwechselzahl bzw. anwachsendem Erschöpfungsgrad der Martensitgehalt kontinuierlich anwächst.

Eine Ausnahme in der Martensitverteilung bildete eine Probe, bei der die technische Rissbildung nicht in Probenmitte, sondern in einer axialen Entfernung von ca. 5 mm stattfand. Hier trat die grösste

Martensitbildung in der Position der Rissentstehung und nicht im kleinsten Querschnitt auf. Daraus lässt sich ableiten, dass die Rissentstehung mit einem zusätzlichen Beitrag an Martensitbildung verbunden ist.

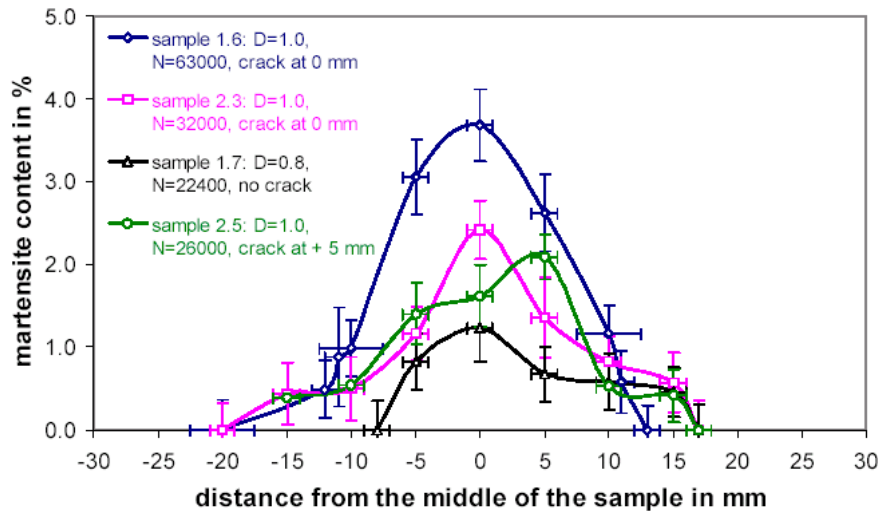


Abb.17: Martensitverteilung in Längsrichtung an Ermüdungsproben der Serie 1 mit unterschiedlichen Lastwechselzahlen bzw. Erschöpfungsgraden

An ausgewählten Proben der Serie 1 wurden an Längsschliffen metallographische Untersuchungen durchgeführt. Die Abbildung 18 zeigt beispielhaft die Martensitstrukturen im Längsschnitt der Probe mit dem höchsten Martensitgehalt. Durch die Uhrglasprobe bedingt war die Martensitkonzentration in der Probenmitte am grössten. Verdeutlicht wird dies im mittleren Bild der Abb.18. Der Martensit ordnete sich hierbei in typischen Streifen an. Die Dichte der Streifen hing von der radialen Position ab. Sie war am grössten im Zentrum der Probe und nahm zum Rand hin ab. Aufgrund des Dehnungsgradienten in Längsrichtung der Uhrglas-Proben wurde in einem Abstand von 30 mm von der Probenmitte entfernt kein Martensit mehr gefunden (Abb.18, linkes und rechtes Bild). Werden die Streifenmuster im Lichtmikroskop vergrössert, erkennt man die sogenannten lattenförmigen Strukturen des Martensits (Abb.19, linkes Bild). Vergrössert man die Gebiete zwischen den Streifen, so liess sich hier kein Martensit finden, hingegen kamen die Austenitkorngrenzen teilweise deutlich zum Vorschein (Abb.19, rechtes Bild).

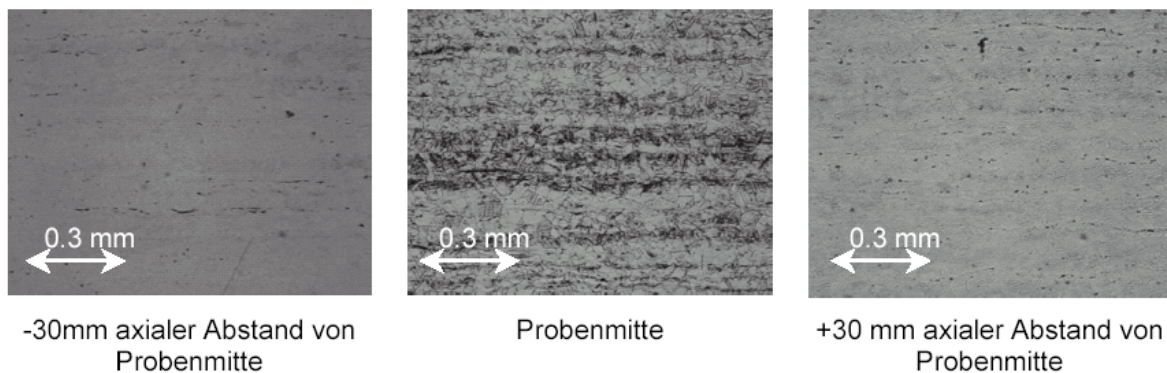
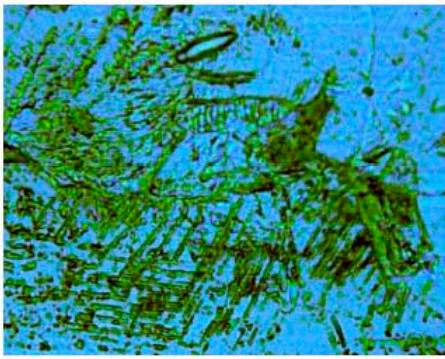
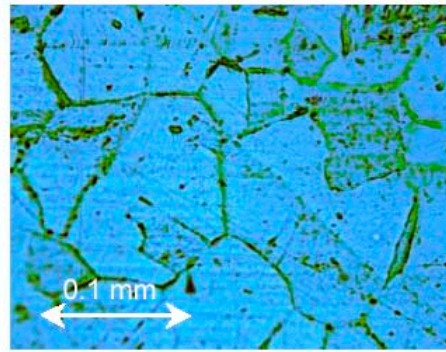


Abb.18: Längsschnitte einer ausgewählten Ermüdungsprobe des lösungsgeglühten Materialzustandes mit hohem Martensitanteil in unterschiedlicher Entfernung von der Probenmitte



Gebiet innerhalb der Streifen



Gebiet zwischen den Streifen

Abb.19a): Lattenförmiger Martensit in den Streifengebieten

Abb.19b): Austenitkornstrukturen in Gebieten zwischen den Streifen ohne Martensitbildung

In der ersten Messkampagne der Röntgendiffraktionsexperimente wurden Untersuchungen nur an einer Probe durchgeführt. Um den Vergleich mit den metallographischen Befunden zu ermöglichen, wurde die Proben mit dem grössten Martensitanteil für diese Serie ausgewählt. Die erhaltene Martensitverteilung in einem Längsschnitt der Probe zeigt die Abbildung 20. Die Untersuchungen zur Martensitverteilung mittels Röntgendiffraktometrie bestätigten die metallographischen Untersuchungen. Der Martensit war auch hier in der Probenmitte konzentriert und nahm zum Rand hin kontinuierlich ab. Auch der dehnungsabhängige Konzentrationsabfall in axialer Richtung konnte bestätigt werden. Der höchste Martensitgehalt wurde in der Umgebung des technischen Risses detektiert, wobei an der Oberfläche im Rissinitierungsgebiet nur sehr wenig Martensit gefunden wurde.

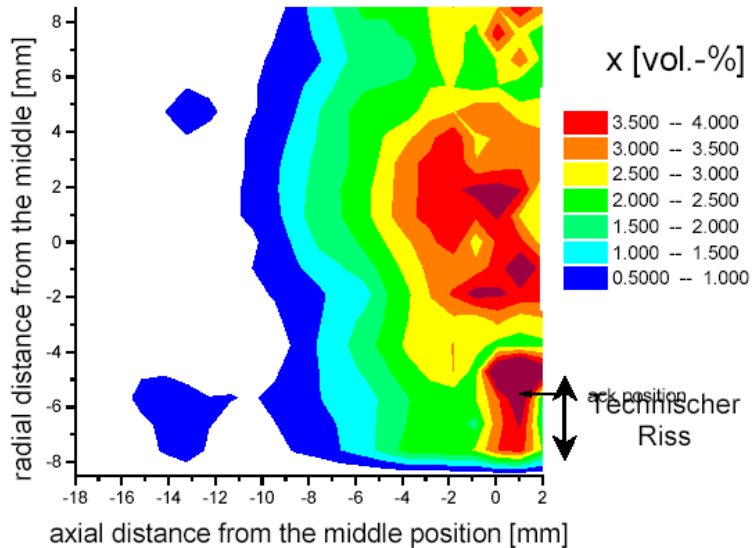


Abb.20: Martensitverteilung im Längsschnitt einer Ermüdungsprobe mit hohem Martensitgehalt gemessen mittels Röntgendiffraktometrie an der Synchrotron- Lichtquelle ESRF Grenoble

b) Probenserie 3

In den metallographischen Untersuchungen liess sich die Martensitverteilung im Querschnitt nicht in einem Bild darstellen, da die Vergrösserungen im Lichtmikroskop zu gross sind, um eine Übersicht zu erhalten. Werden viele Bilder zusammengesetzt, zeigten sich elliptische bis kreisförmige Ringe als typische Martensitverteilung. Die Martensitverteilung bestand aus einem kompakten Kern im Zentrum der Proben und aufeinanderfolgenden Schalen, wobei sich die Schalenabstände zum Rand hin immer weiter vergrösserten.

In einer zweiten Messkampagne konnten die Röntgendiffraktions-Experimente an der ESRF Grenoble an insgesamt vier ausgewählten Ermüdungsproben der Serie 3 fortgesetzt werden. Hierbei wurden sowohl Quer- als auch Längsschnitte untersucht. Um den Vergleich mit den Metallographie-Abbildungen zu ermöglichen, wurden die XRD-Experimente an den gleichen Probenstücken durchgeführt. Es wurden Proben mit bestimmten Martensitgehalten und Temperaturen ausgewählt, um beispielhaft die Martensitverteilung für niedrige, mittlere und hohe Martensitanteile darstellen zu können. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 21 bis 26 zusammengestellt.

Die Abbildungen 21 bis 24 zeigen Martensitverteilungen im Querschnitt der Ermüdungsproben bei von Abbildung zu Abbildung ansteigendem Martensitgehalt. Die entsprechenden metallographischen Schliffbilder für die Probenmitte und den linken und rechten Probenrand sind beigelegt. In allen XRD-Bildern wird deutlich, dass im wesentlichen der Martensit im Probenzentrum konzentriert war. Dieses Ergebnis hat Konsequenzen für die Schädigungsvorhersage. Es ist bekannt, dass sich die Bildung der Mikrorisse an der Oberfläche der Ermüdungsproben an den sogenannten Intrusionen und Extrusionen vollzieht. Demnach ist eine hohe Martensitkonzentration nicht unmittelbar mit der Bildung von Mikrorisse gekoppelt. In den Verteilungen kam es zu grossen örtlichen Schwankungen im Martensitgehalt. Diese Unterschiede können durch die beobachteten Ringstrukturen erklärt werden. In den Ringen besteht eine hohe Martensitkonzentration, wobei zwischen den Ringen kein Martensit vorkam. Die XRD-Ortsauflösung reichte jedoch nicht aus, diese Strukturen sichtbar zu machen. Die Metallographiebilder bestätigten den Befund, dass der Martensitgehalt im Probenzentrum am grössten war und am Rand nur wenig Martensit vorlag.

Martensitverteilungen an Längsschnitten werden beispielhaft in den Abbildungen 25 und 26 gezeigt. Hierbei konnten ähnliche Beobachtungen gemacht werden wie an den Querschnitten. Der grösste Martensitgehalt befand sich im Probenzentrum und in der Umgebung des technischen Risses. Bemerkenswert ist das metallographische Bild der Rissumgebung in Abbildung 25. Entlang der Rissufer wurden Bereiche gefunden, bei denen zwischen den Martensitstreifen nach wie vor kein Martensit auftrat. Es gab aber auch Bereiche, wo eine Martensitbildung als Folge der Rissausbreitung stattfand und die Martensitstreifen mit Brücken entlang der Rissufer verbunden waren. Demnach muss eine technische Rissausbreitung nicht immer zu einer zusätzlichen Martensitbildung führen.

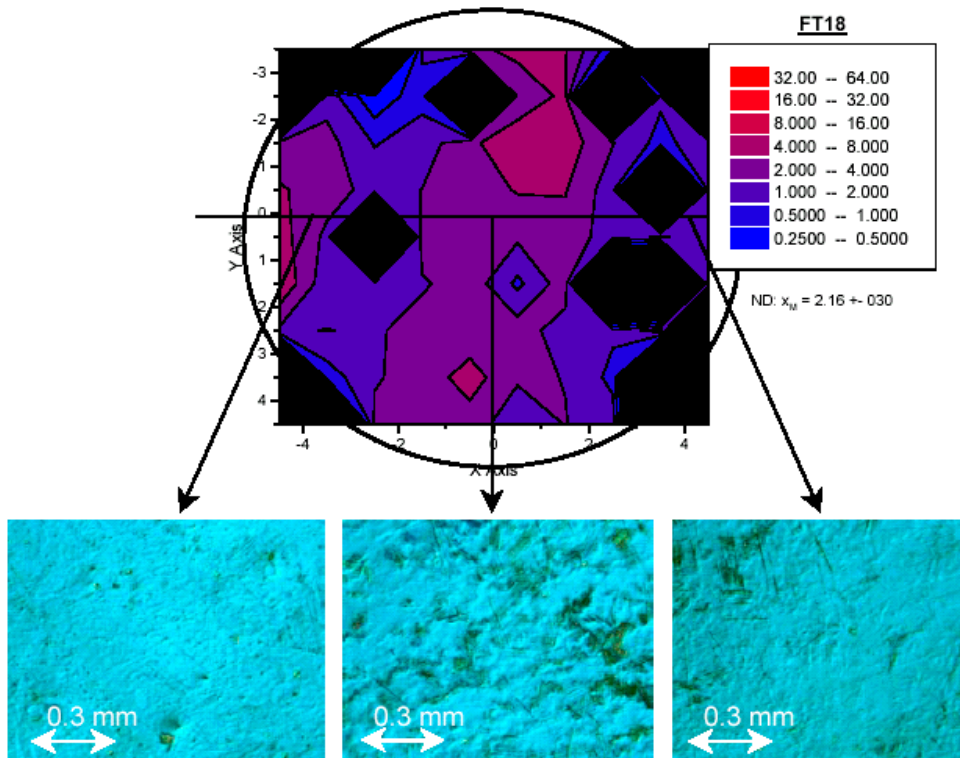


Abb.21: Martensitverteilung im Querschnitt bei 2.16 vol.-% Martensit (200 °C)

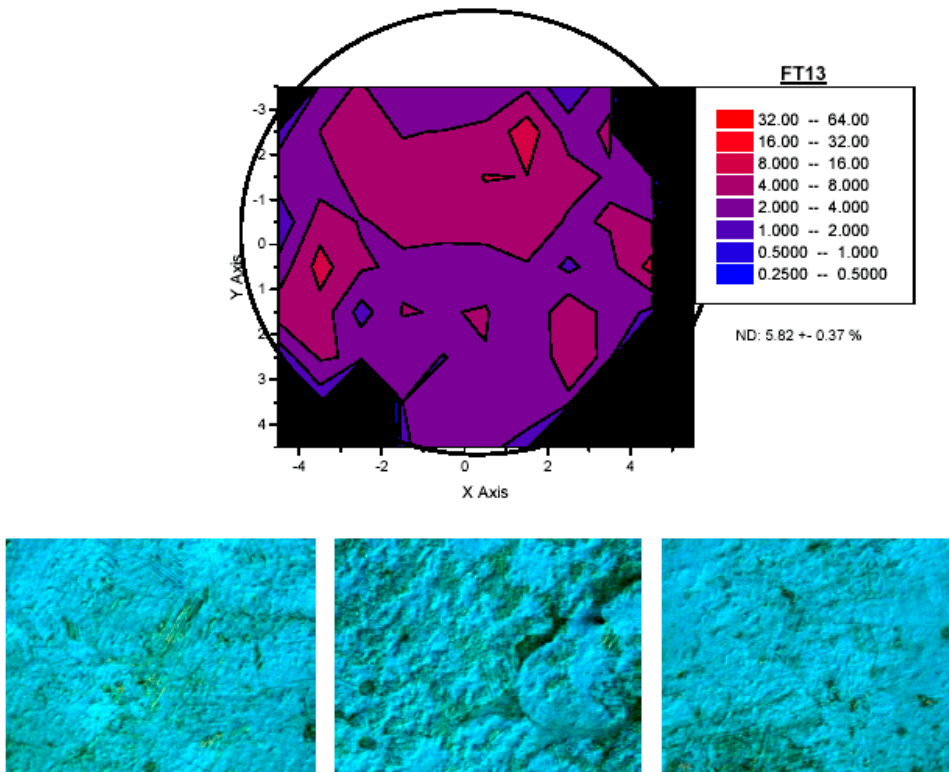


Abb.22: Martensitverteilung im Querschnitt bei 5.82 vol.-% Martensit (80 °C)

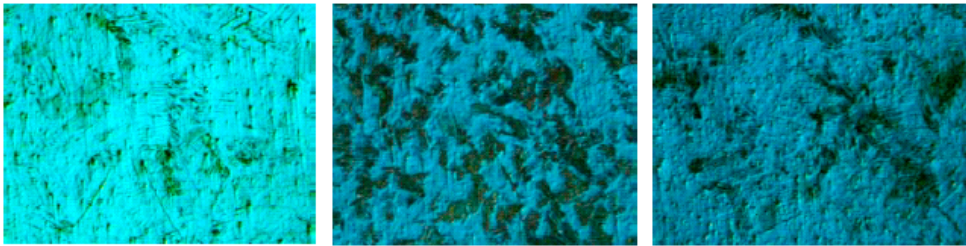
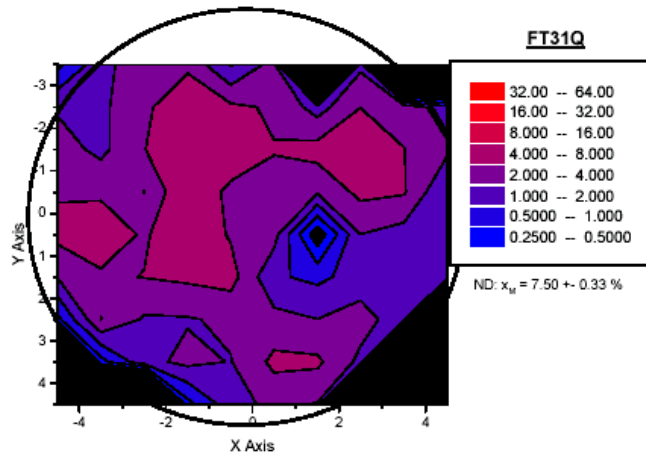


Abb.23: Martensitverteilung im Querschnitt bei 7.50 vol.-% Martensit (80 °C)

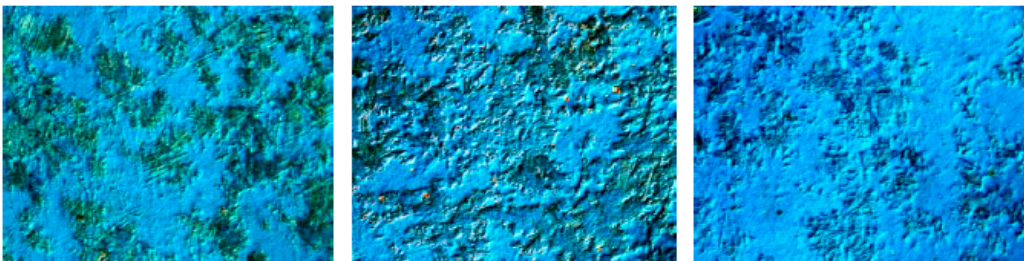
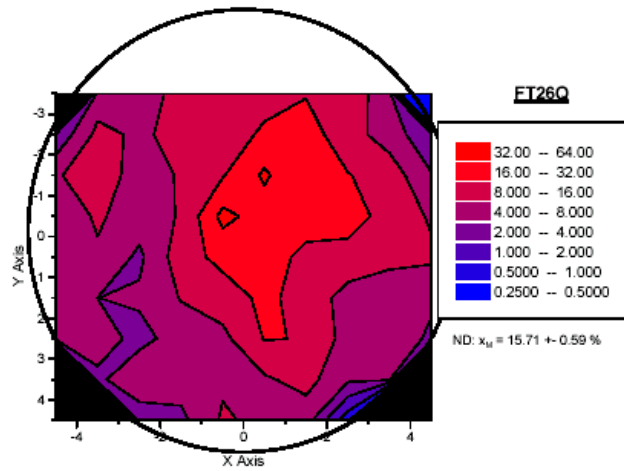


Abb.24: Martensitverteilung im Querschnitt bei 15.71 vol.-% Martensit (30 °C)

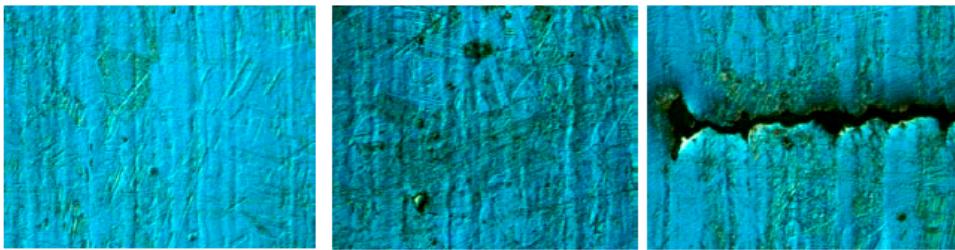
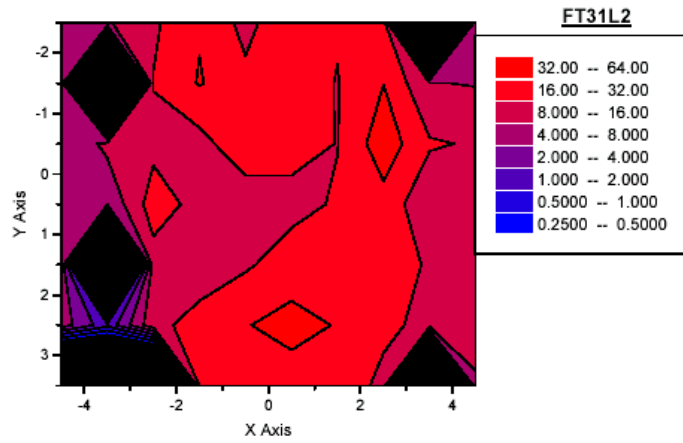


Abb.25: Martensitverteilung im Längsschnitt bei 7.50 vol.-% Martensit (80 °C)

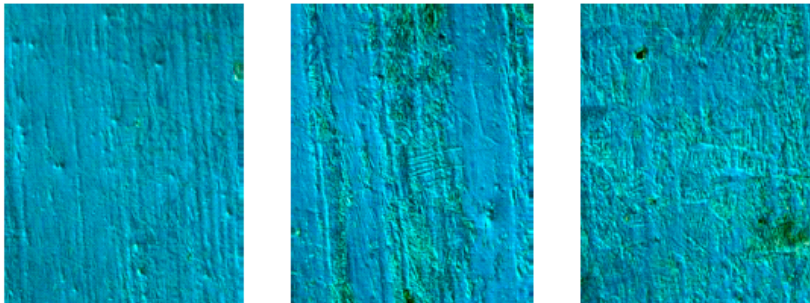
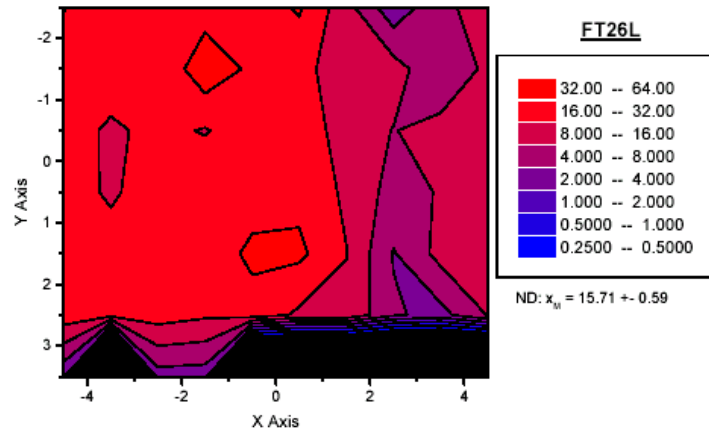


Abb.26: Martensitverteilung im Längsschnitt bei 15.71 vol.-% Martensit (30 °C)

2.3.5 Texturen im Austenit und Martensit

Der technische Vielkristall Stahl mittelt die Anisotropien der einzelnen Körner, ist also quasiisotrop. Kommt es zur Bevorzugung einer Orientierung der Körner eines polykristallinen Stahles, so spricht man von einer Textur. Die Ausbildung von Texturen gibt wichtige Hinweise zu den abgelaufenen Prozessen bei der Herstellung und Wärmebehandlung von Stählen. So stellen sich zum Beispiel bei gewalzten Blechen sogenannte Goss- und Würfeltexturen ein, je nach dem ob ein krz- und kfz-Gitter vorliegt. Die Bestimmung von Vorzugsrichtungen der Kristallorientierung ergab sich für das Projekt FEVER noch aus einem anderen wichtigen Grund. Die Martensitbestimmung am Neutronendiffraktometer erfolgte in einer Strahl-Messanordnung 90° zur Probenachse. Eine stark ausgeprägte Textur wäre somit als Fehlerquelle bei der Bestimmung des Martensit-Phasenanteils aus zwei Reflexen zu berücksichtigen und gegebenenfalls zu korrigieren.

Die Textur kann allgemein durch eine Orientierungsverteilungsfunktion beschrieben werden. Es bedarf dazu jedoch vieler Messpunkte in einem weiten Winkelbereich in drei Messebenen. Für den einfachen Fall einer Fasertextur hängt die Orientierungsverteilung nur vom Winkel zur Faserachse ab und kann mit einer Linienabtastung aufgenommen werden. Für die Fasertextur kann ein Texturfaktor wie folgt definiert werden:

$$\Omega_{hkl}(\Psi) = \frac{I_{hkl}(\Psi)}{\overline{I_{hkl}(\Psi)}} \quad (4)$$

Hierbei sind

Ω_{hkl}	der Texturfaktor
Ψ	der Winkel zur Faserachse
$I_{hkl}(\Psi)$	die Intensität beim Winkel Ψ
$\overline{I_{hkl}(\Psi)}$	der Mittelwert der Intensität über alle Ψ .

a) Probenserie 1/2

Aus der Uhrglas-Ermüdungsprobe mit dem höchsten Martensitgehalt wurde aus der Probenmitte eine Kugel mit einem Durchmesser von 5 mm herausgearbeitet. An dieser Kugel fanden Neutronenbeugungsexperimente statt, die den Martensitgehalt in Ebenen quer und längs zur Probenachse ermittelten. Die Messebenen wurden vom Dreh- bzw. Kippwinkel bestimmt. Die Abbildungen 27 und 28 zeigen die Ergebnisse der Martensitbestimmung aus zwei Reflexen nach Gleichung (3) in Abhängigkeit des Dreh- und Kippwinkels. Bei Drehung der Kugel um die Probenachse schwankt der Martensitgehalt leicht um einen Mittelwert (Abb. 27). In dieser Messebene ist keine Vorzugsrichtung zu erkennen. Bei Drehung der Probenachse selbst (Kippwinkel) ergaben sich zwei ausgeprägte Maxima des Martensitphasenanteils bei 0° und 90° (Abb. 28). Dieser Befund ist ein typisches Kennzeichen einer Fasertextur.

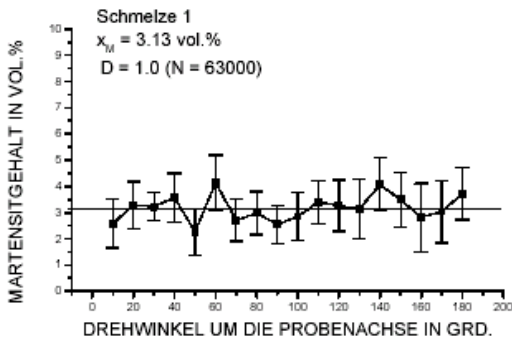


Abb.27: Martensitgehalt bestimmt mittels Neutronendiffraktometrie an einer Kugelprobe aus der Mitte einer Ermüdungsprobe in Abhängigkeit des Drehwinkels um die Probenachse

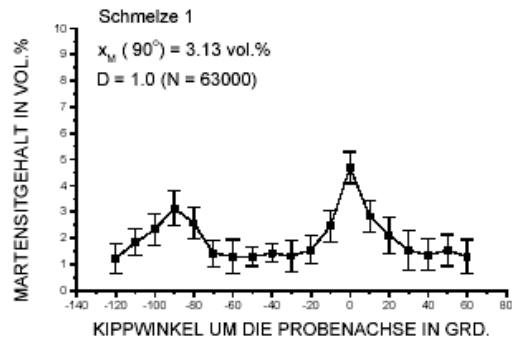


Abb.28: Martensitgehalt bestimmt mittels Neutronendiffraktometrie an einer Kugelprobe aus der Mitte einer Ermüdungsprobe in Abhängigkeit des Kippwinkels um die Probenachse

b) Probenserie 3

In Fortsetzung der Texturuntersuchungen wurden an ausgewählten Ermüdungsproben der 3. Serie Zylinderstücke aus dem mittleren Messbereich entnommen. Die Zylinder hatten einen Durchmesser und eine Höhe von jeweils 10 mm. Die Ermüdungsproben wurden so ausgewählt, dass Proben für unterschiedliche Prüftemperaturen und unterschiedliche Martensitgehalte vorlagen. Von einer Fasertextur ausgehend konzentrierten sich die Untersuchungen auf eine Messebene (parallel zur Probenachse, Kippwinkel). Zunächst wurden die Texturfaktoren für die Martensitphase nach Gleichung (4) für unterschiedliche Martensitgehalte bestimmt. In den Abbildungen 29 bis 32 sind einige ausgewählte Beispiele der Messungen dargestellt. Man erkennt, dass bei einem kleinen Martensitanteil (hohe Temperaturen) eine ausgeprägte Textur vorliegt (Abb. 29), die sich jedoch mit steigender Martensitkonzentration abbaut (Abb. 30,31). Das erklärt sich damit, dass zunächst die Martensitumwandlung in denjenigen Körnern stattfindet, die gitterstrukturell „günstig“ zur Belastungsrichtung orientiert sind. Diese bevorzugte Gitterebene liegt bei 45° zur Probenachse, wie Abbildung 29 zu entnehmen ist. Es wurde somit eine Vorzugsorientierung der (111) Martensit-Ebene beobachtet, was mit den bisherigen Erkenntnissen zur Martensitbildung übereinstimmt. Mit Erhöhung der Martensitbildungsrate bei niedrigeren Temperaturen kam es zu einer gleichmässigeren Orientierungsverteilung, so dass hier die Phasenumwandlungen in den Körnern aller Orientierungen stattfanden.

Aus der Bestimmung des Martensitgehaltes durch Phasenanalyse nach Gleichung (3) kann ein Korrekturfaktor für die Martensitmessung für jeden Kippwinkel abgeleitet werden. Die im FEVER-Projekt durchgeführten Diffraktionsmessungen zur Martensitgehaltsbestimmung wurden so durchgeführt, dass der Neutronenstrahl in einem Winkel von 90° zur Probenachse auf die Probe auftraf. In den Abbildungen 33 und 34 sind die Abhängigkeiten des Korrekturfaktors vom Kippwinkel für einen hohen und niedrigen Martensitgehalt gezeigt. Aus beiden Abbildungen geht hervor, dass bei einem Kippwinkel von 90° der Korrekturfaktor für die Martensitmessung ca. 1.0 ist. Damit konnte gezeigt werden, dass bei der im Rahmen des Projektes durchgeführte Martensitbestimmung auch beim Auftreten einer Martensittextur nur geringe Fehler auftreten, die keiner Korrektur bedürfen.

Ein Beispiel für Messungen der Austenittextur ist in Abbildung 35 dokumentiert. In der Darstellung des Texturfaktors für Austenit in Abhängigkeit des Kippwinkels wird deutlich, dass hier eine ausgeprägte Vorzugsorientierung der (111) Austenit-Ebenen vorliegt. Diese Orientierungsverteilung wurde in allen Messungen für unterschiedliche Martensitgehalte und Temperaturen in einer mehr oder weniger ausgeprägten Form beobachtet, so dass sie der Herstellung des Stangenmaterials zugeschrieben werden kann.

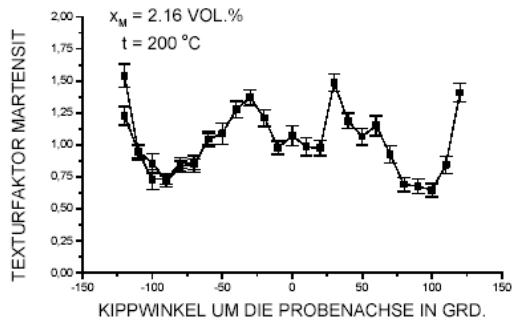


Abb.29: Texturfaktor Martensit in Abhängigkeit des Kippwinkels für einen niedrigen Martensitgehalt

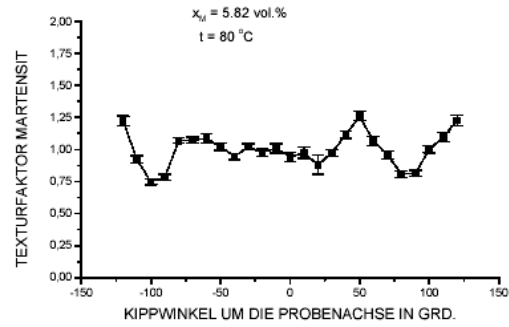


Abb.30: Texturfaktor Martensit in Abhängigkeit des Kippwinkels für einen mittleren Martensitgehalt

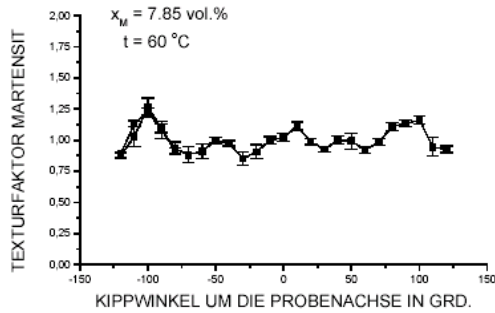


Abb.31: Texturfaktor Martensit in Abhängigkeit des Kippwinkels für einen mittleren Martensitgehalt

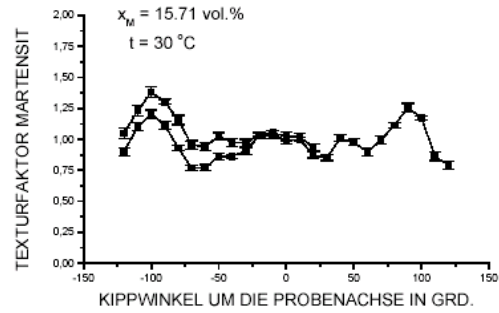


Abb.32: Texturfaktor Martensit in Abhängigkeit des Kippwinkels für einen hohen Martensitgehalt

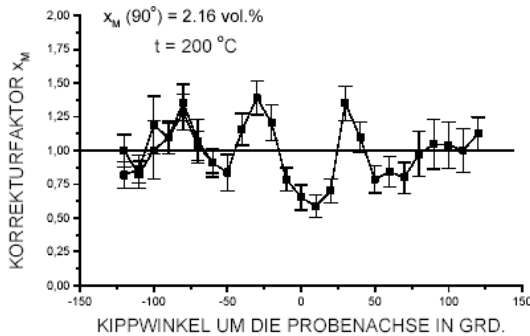


Abb.33: Korrekturfaktor für die Martensitmessung für einen niedrigen Martensitgehalt

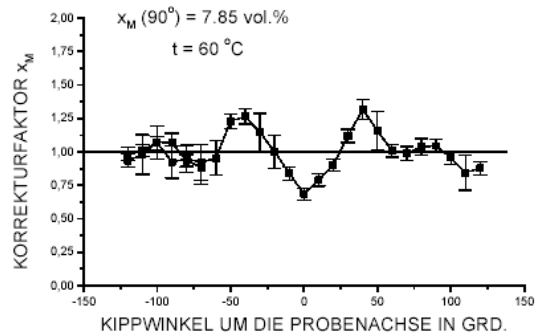


Abb.34: Korrekturfaktor für die Martensitmessung für einen hohen Martensitgehalt

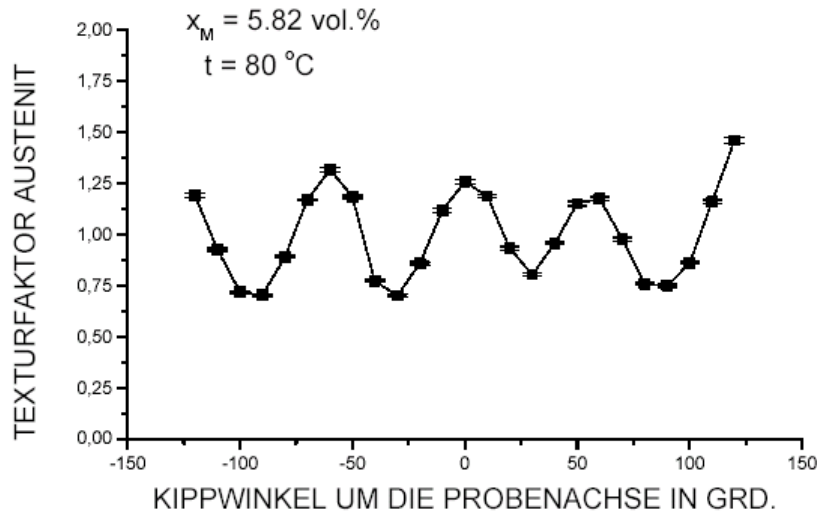


Abb.35: Texturfaktor Austenit in Abhängigkeit des Kippwinkels

2.4 EINFLUSSGRÖSSEN AUF DIE DEFORMATIONS-INDUZIERTER MARTENSITBILDUNG

2.4.1 Lastwechselzahl (Lebensdauer)

Vor den Ermüdungsversuchen wurden an zwei Serien von Zugproben der Einfluss von Dehnung und Temperatur bei quasistatischer Belastung untersucht. Als Werkstoff kam das kaltverformte Stangenmaterial der Probenserie 3 zum Einsatz. Das Ziel der quasistatischen Untersuchungen bestand zum einen darin, Anschluss an die Messungen aus der Literatur zu finden und zum anderen, den magnetischen Methoden einen Probensatz mit definiert abgestuften Martensitgehalten zum Zwecke der Kalibrierung zur Verfügung zu stellen. Für die Untersuchungen unter quasistatischer Belastung wurden Standardzugproben mit einem Durchmesser von 10 mm eingesetzt. In einer ersten Serie wurden bei Raumtemperatur die Zugproben bis zu definierten plastischen Dehnungen belastet, danach langsam entlastet und ausgebaut. Der deformationsinduzierte Martensitgehalt, der sich im Messbereich (50 mm) der Zugproben eingestellt hatte, wurden am Neutronendiffraktometer bestimmt. Die Ergebnisse zeigt die Abbildung 36. Eine einfache lineare Korrelation konnte für die Dehnungsabhängigkeit des Martensitgehaltes unter den gegebenen Material- und Lastbedingungen aufgestellt werden.

$$x_m = x_{m0} + 0.3 \varepsilon_{\text{plastic}} \quad (5)$$

gültig für X6CrNiTi18-10 (Serie 3, $\sigma_Y = 430$ MPa) und Raumtemperatur, wobei x_M und x_{M0} die Martensitgehalte in vol.% für den Belastungs- und den Ausgangszustand sowie $\varepsilon_{\text{plastic}}$ der plastische Dehnungsanteil sind.

Die ersten Ermüdungsproben wurden bis zur Entstehung eines technischen Anrisses zyklisch beansprucht. Aus 10 Proben wurde der Mittelwert für die Lastwechselzahl bei Rissinitiierung bestimmt ($N=10100$). Er diente als Basis für die Einstellung der unterschiedlichen Erschöpfungsgrade. Die weiteren niederzyklischen Ermüdungsversuche wurden bei definierten Lastwechselzahlen abgebrochen, die den Erschöpfungsgraden von $D=0.4$ ($N=4040$), $D=0.6$ ($N=6060$) und $D=0.8$ ($N=8080$) entsprachen. Die Ergebnisse der Abhängigkeit des Martensitgehaltes von der Lastwechselzahl sind in der Abbildung 37 dargestellt. Für die gegebenen Material- und Belastungsbedingungen konnte eine lineare Korrelation von Martensitgehalt zu Lastwechselzahl gefunden werden.

$$x_m = x_{m0} + 8.0 \cdot 10^{-4} N \quad (6)$$

gültig für X6CrNiTi18-10 (Serie 3, $\sigma_Y = 430$ MPa) und $t = 80^\circ\text{C}$, wobei x_M und x_{M0} die Martensitgehalte in vol.% für den Belastungs- und den Ausgangszustand sowie N die Lastwechselzahl sind.

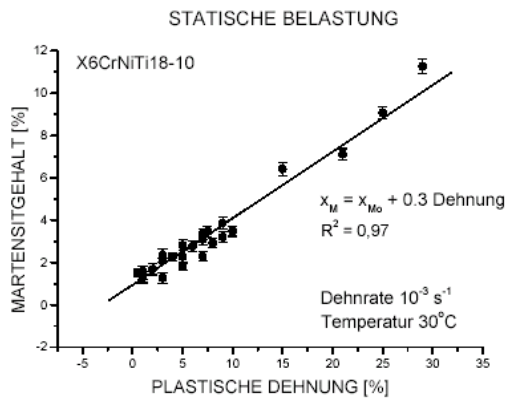


Abb.36: Bildung von deformations-induzierten Martensit bei quasistatischer Beanspruchung in Abhängigkeit von der Grösse der plastischen Dehnung

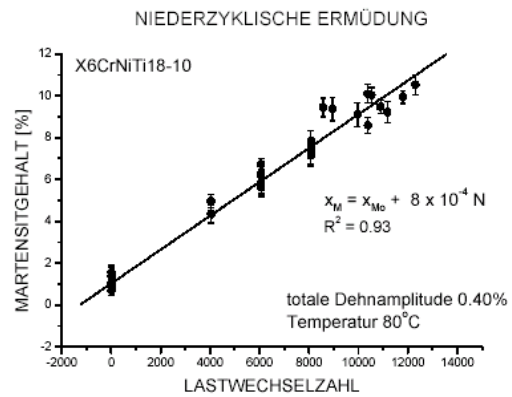


Abb.37: Bildung von deformations-induzierten Martensit bei niederzyklischer Ermüdung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl

2.4.2 Temperatur

Die treibende Kraft der Phasenumwandlung von Austenit in Martensit wird bestimmt vom Grad der Unterkühlung bezogen auf die Temperatur, bei der sich die Phasen Austenit und Martensit im thermodynamischen Gleichgewicht befinden. Durch die Zufuhr von mechanischer Energie (Dehnung, Ermüdung) erhöht sich die Freie Energie des Austenits, so dass sich der Beginn der Umwandlung zu höheren Temperaturen hin verschiebt. Deshalb muss die Temperaturabhängigkeit auf die Martensitbildung unter den gegebenen Material- und Belastungsbedingungen systematisch untersucht werden.

Die Temperaturabhängigkeit der Martensitbildung wurde zunächst an Zugproben untersucht. Proben der Serie 3 wurden bei unterschiedlichen Temperaturen bis zu einer plastischen Dehnung von 20% beansprucht. Die ermittelten Werte für den Martensitgehalt in Abhängigkeit der Temperatur im Bereich von 20 – 300°C sind in der Abbildung 38 dargestellt. Der beste Fit der Ergebnisse im untersuchten Temperaturbereich ergab sich mit einer fallenden Exponentialfunktion.

Nach den Zugversuchen erfolgten Untersuchungen zum Temperatureinfluss auf die Martensitkonzentration bei niederzyklischer Ermüdung. Bei einem definierten Erschöpfungsgrad und konstanter Lastamplitude wurden Ermüdungsversuche bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Die Ergebnisse für D=1.0 und einer totalen Dehnamplitude von 0.40% sind für den Temperaturbereich von 20 – 300°C in Abb. 39 dargestellt. Wie auch bei der statischen Belastung wurde ein exponentieller Abfall der Martensitkonzentration bei steigender Temperatur ermittelt. Die Exponentialfunktion der Temperaturabhängigkeit im Bereich von 20 – 300°C lässt sich allgemein in der folgenden Form darstellen:

$$x_m = x_{mo} + A \cdot \exp[-T / B] \tag{7}$$

x_m und x_{mo} sind die Martensitgehalte in vol.% für den Belastungs- und den Ausgangszustand, T ist die Temperatur in K. Die Parameter A und B sind in Abhängigkeit des Materials, Materialzustand und der Dehnungsamplitude zu bestimmen.

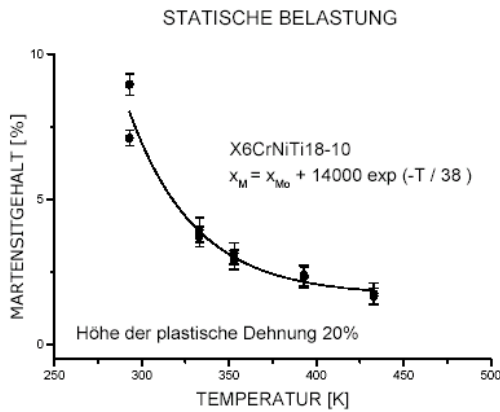


Abb. 38: Temperaturabhängigkeit der Martensitbildung bei quasistatischer Beanspruchung. Plastische Dehnung 20 %, Dehnrates 10^{-3} s^{-1} .

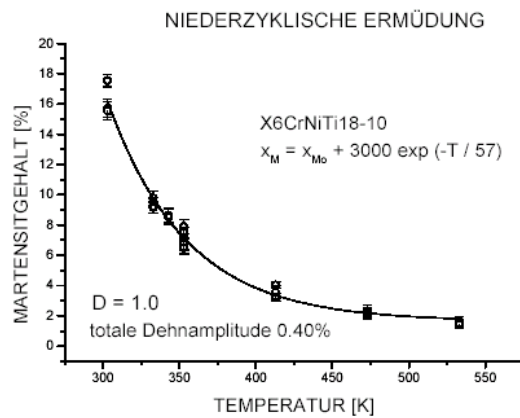


Abb. 39: Temperaturabhängigkeit der Martensitbildung bei niederzyklischer Ermüdung. Totale Dehnungsamplitude 0.40 %, Frequenz 1.0, 0.5, 0.1 Hz Erschöpfungsgrad D=1.0.

2.3.4 Belastungsfrequenz

Temperaturabhängige Martensitwerte wurden bei unterschiedlichen Frequenzen von 0.1, 0.5, und 1.0 Hz und ansonsten gleichen Material- und Belastungsbedingungen ermittelt. In der Abbildung 40 sind die Ergebnisse für den Erschöpfungsgrad D=1.0 und die totale Dehnamplitude von 0.40% dargestellt. Zur Auswertung der Daten wurde die Exponentialfunktion (7) genutzt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Belastungsfrequenz beim Umgebungsmedium Luft keinen Einfluss auf die Martensitbildung ausübt.

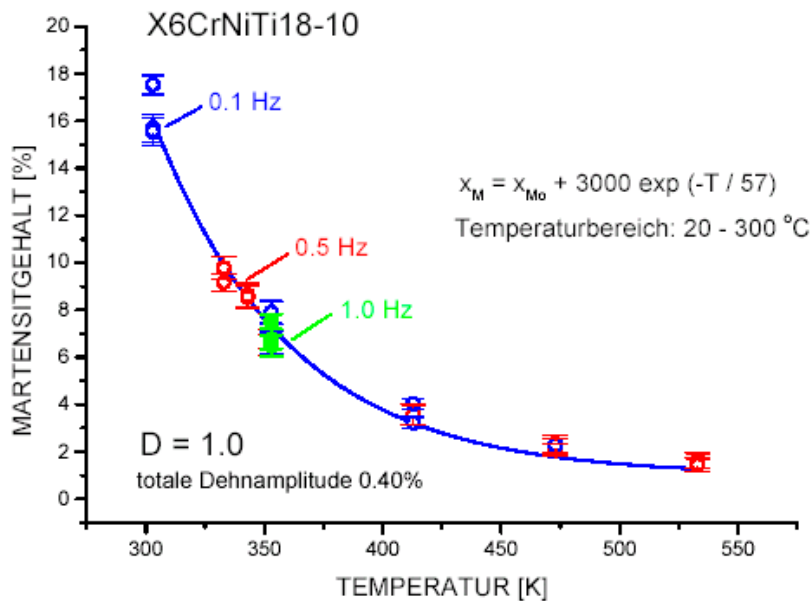


Abb. 40: Frequenzabhängigkeit der Martensitbildung bei folgenden Material- und Belastungsbedingungen: Kaltverformter Materialzustand, Erschöpfungsgrad D=1.0, totale Dehnamplitude 0.40 %.

2.3.5 Fertigungsverfahren und Wärmebehandlung

Für die Untersuchung des Einflusses der Fertigung und der Wärmebehandlung auf die Martensitbildung standen zwei unterschiedliche Materialausgangszustände zur Verfügung. Die Schmelzen 1 und 2 repräsentieren den lösungsgeglühten Materialzustand, der nach den kerntechnischen Vorschriften für den Einsatz austenitischer Rohrleitungen im Primärkreislaufes gefordert wird. Die mechanischen Kennwerte des lösungsgeglühten Zustandes werden der Auslegung der Rohrleitungen zugrunde gelegt. Das Material der Schmelze 3 wurde kaltverfestigt und weist eine relativ hohe 0.2% Dehngrenze und eine geringe Bruchdehnung auf. Diese Eigenschaften stehen für bereits gealtertes Material, das seine Zähigkeit teilweise eingebüsst hat. Auch kann in den Wärmeeinflusszonen (WEZ) von austenitischen Schweißnähten ein mehr oder weniger grosser Abfall der Zähigkeit auftreten. Da der Grad der Verfestigung auf keinen konkreten Material- und Belastungsfall eingestellt ist, soll der Materialzustand der Schmelze 3 allgemein als gealtertes Material gelten.

Die Ergebnisse der Martensitbestimmung an allen Probenreihen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl sind in Abbildung 41 zusammengestellt. Alle hier dargestellten Ermüdungsversuche wurden bei einer totalen Dehnamplitude von 0.40 % und bei einer Temperatur von 80 °C (1.0 Hz) durchgeführt. Es sind Messwerte für Erschöpfungsgrade von 0.4 bis 1.0 eingetragen. Im kaltverformten Material wurde ein Martensitgehalt im Ausgangszustand von 0.7 – 1.5 vol.% ermittelt.

Die Martensitbildungsraten für die beiden Materialzustände waren überraschenderweise sehr unterschiedlich. Der Effekt des Materialausgangszustandes auf die Martensitbildung erwies sich als sehr bedeutend. Wesentlich mehr Martensit wurde in den Proben der Schmelze 3 gebildet als in den Proben der Schmelzen 1 und 2. Während die lösungsgeglühten Proben am Lebensdauerende nur etwa 3 vol.% Martensitanteil aufwiesen, brachten es die kaltverfestigten Proben auf 9 vol.% Martensit. Die Lastwechselzahl (Lebensdauer) bis zur technischen Risseinleitung sank von 26000-63000 für den lösungsgeglühten Zustand auf 8500-12300 für das kaltverfestigte Material. Für beide Materialzustände wurde eine lineare Korrelation von Martensitgehalt und Lastwechselzahl gefunden, d.h. die Martensitbildung vollzog sich kontinuierlich von den ersten Lastwechseln an bis zur Rissiniierung. Schlussfolgernd kann festgestellt werden, dass zur Beurteilung des Martensitgehaltes in den Ermüdungsproben oder am Bauteil der Materialausgangszustand bekannt sein muss. Diese Einschätzung kann mittels Bestimmung der 0.2%-Dehngrenze aus dem Zugversuch erfolgen. Bei gealtertem Material muss mit einer erhöhten Martensitbildungsrate gerechnet werden.

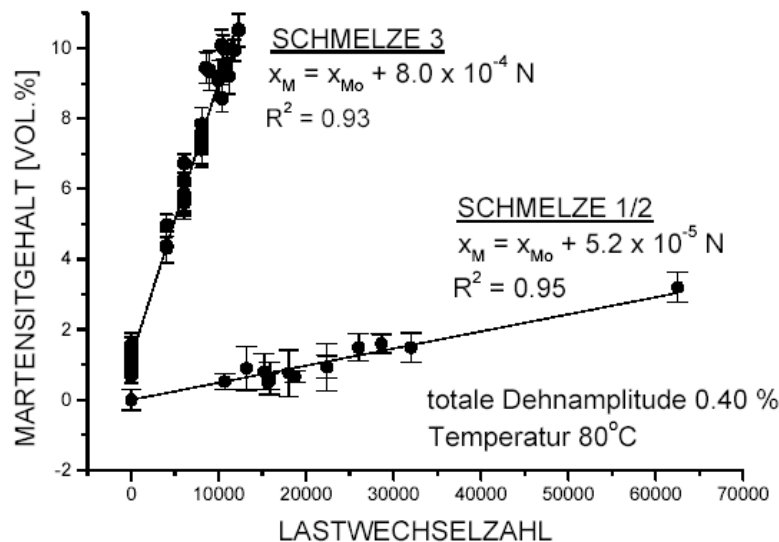


Abb.41: Martensitbildung bei niederzyklischer Ermüdung für verschiedene Materialausgangszustände des austenitischen rostfreien Stahls X6CrNiTi18-10

2.5 DETEKTION DES MARTENSITS MITTELS MAGNETISCHER METHODEN

2.5.1 Beschreibung der magnetischen und magnetinduktiven Messtechnik

Im Projekt wurde ein neues Labor für magnetische Diagnoseverfahren eingerichtet. Folgende Messplätze und Verfahren wurden aufgebaut und stehen für Messungen zur Verfügung:

- Permeabilitätsmessung mittels Handprüfgerät FERROMASTER[®]
- Restfeldmessung mittels 3-D-FLUXGATE und SQUID (Superconducting QUantum Interference Device)-Magnetometer
- Wirbelstromimpedanz-Messungen mittels GMR (Giant Magneto Resistance)- Messtechnik

Die Sensoren sind zum Teil komplementär und geben aufgrund des jeweiligen physikalischen Prinzips Informationen über unterschiedliche Materialkennwerte. Um auch kleinste ferromagnetische Ausscheidungen detektieren zu können, welche sich im Anfangsstadium des Ermüdungsvorganges oder unter höheren Temperaturen bilden, wurden hochempfindliche Magnetfeldsensoren wie Fluxgate, SQUID und GMR eingesetzt. Die Abbildung 42 liefert eine Übersicht über die spektralen Magnetfeldempfindlichkeiten der verwendeten wie auch anderer bekannter Magnetfeldsensoren. Die verwendeten Messtechniken werden nachfolgend im Detail beschrieben.

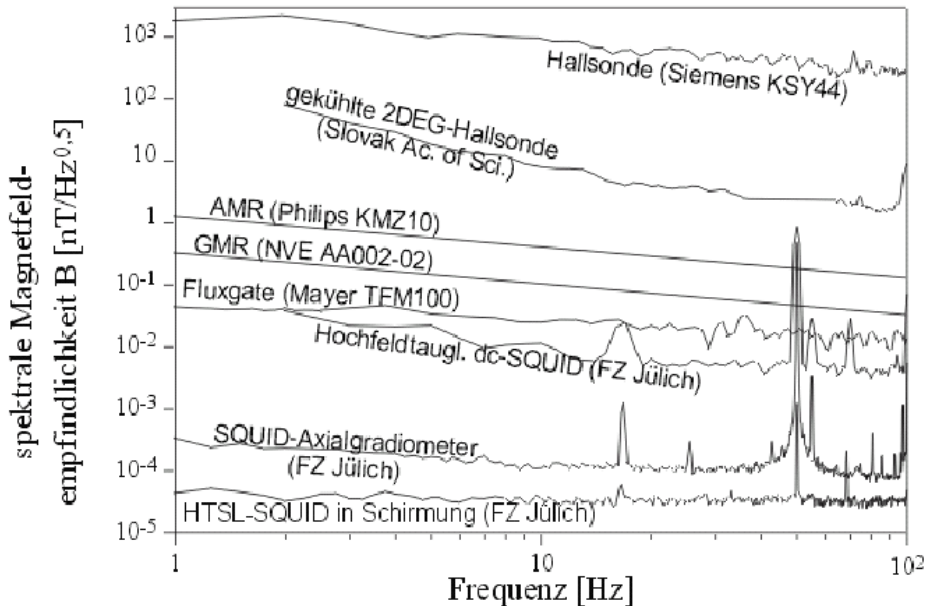


Abbildung 42: Spektrale Magnetfeldempfindlichkeit für verschiedene Magnetfeldsensoren [20]

a) Permeabilitätsmessung mittels Handprüfgerät FERROMASTER[®]

Handprüfgeräte zur Ferritgehaltmessung in austenitischen Stählen sind Stand der Technik seit ca. 1970. Je nach Verwendung der austenitischen Stähle werden für den Ferritgehalt bestimmte Grenzwerte gefordert. So ist z.B. in Schweißnähten und Auftragschweißungen ein Ferritgehalt zwischen 2 und 5 % erwünscht, während bei Druckgefäßen für die Harnstoffsynthese der Ferritgehalt kleiner 0.5 % sein soll. Da der in der Technik zu messende Ferritgehalt in der gleichen Größenordnung liegt wie der Gehalt an deformations-induziertem Martensit in den Ermüdungs-proben, kann das Messprinzip auch in den FEVER-Untersuchungen genutzt werden.

Die entwickelten Geräte arbeiten nach unterschiedlichen Verfahren. Meist erfolgt eine direkte Messung der Permeabilität (magnetische Leitfähigkeit) bei grossen Magnetfeldstärken bis hin zur magnetischen Sättigung

um 800 A/cm. Ausgenutzt wird die Beobachtung, dass die Permeabilität austenitischer Stähle bis zu einem Ferritgehalt von etwa 20 % nahezu linear ansteigt. Das im Projekt FEVER verwendete Ferritoskop der Firma Stefan Mayer, Deutschland, arbeitet nach dem Prinzip der indirekten Bestimmung der Permeabilität über den Effekt der Feldverzerrung eines Gleichfeldes [33]. Ein einpoliger Taster als Sensor enthält einen Dauermagneten und zwei Aufnahmespulen, die als sogenannte Förster-Sonden arbeiten. Enthält das Werkstück Teilchen einer magnetischen Phase kommt es beim Aufsetzen des Sensors zur Ablenkung der Feldlinien des Gleichfeldes. Die Förster-Sonden messen nun die axiale Feldkomponente des gestörten Gleichfeldes, wobei deren Grösse mit steigendem Gehalt der magnetischen Phase zunimmt.

Die Abbildung 43 zeigt das Handprüfgerät FERROMASTER®, das aus dem Sensor mit kugelförmiger Kontaktfläche (rechter Bildabschnitt) und dem elektronischen Anzeigegerät besteht. Die Geräteeichung muss bei der Martensitmessung nicht am Werkstück selbst erfolgen, sondern wird anhand speziell erzeugter Eichproben durchgeführt.



Abb. 43: Handprüfgerät zur Messung der magnetischen Permeabilität bestehend aus Sensor (Dauermagnet und Förster-Sonde) und Anzeigegerät

b) Restfeldmessung mittels 3-D-FLUXGATE und SQUID (Superconducting QUantum Interference Device)-Magnetometer

Eine Methode, Informationen über die Menge ferromagnetischer Ausscheidungen (z.B. Martensit) im paramagnetischen Austenit zu erhalten, bietet die Restfeldmessung (Remanenz). Dazu werden die Proben bis zur magnetischen Sättigung magnetisiert und anschliessend wird das Restfeld mit empfindlichen Magnetfeldsensoren gemessen. Grösse und Form des Remanenzfeldes geben Auskunft über die Menge und Verteilung des Martensites.

Der Messplatz zur Bestimmung des magnetischen Restfeldes besteht aus einem Manipulator, der die Ermüdungsprobe mäanderförmig in einer horizontalen Ebene bewegt, einem empfindlichen Magnetfeldsensor sowie einer Steuer- und Auswerte-Elektronik. Als Sensoren kamen sowohl sogenannte Fluxgate- als auch SQUID-Aufnehmer zum Einsatz. Da beim Fluxgate-Sensor nur die in Richtung der Spulenkerne verlaufende Komponente des Gleichfeldes zur Wirkung kommt, kann das zu messende Feld nach Grösse und Richtung bestimmt werden. Beim SQUID-Sensor wurde prinzipiell nur eine Feldkomponente gemessen. SQUID weist

jedoch im Vergleich zum Fluxgate eine höhere Magnetfeldstärke-Empfindlichkeit auf (ca. eine Grössenordnung), die allerdings nur bei extrem kleinen Anteilen der magnetischen Phase benötigt wird.

Der Fluxgate-Sensor ist eine hochempfindliche Sonde zum Messen von Magnetfeldern. Er arbeitet nach dem Prinzip der sogenannten Förstersonden. Förster entdeckte 1939 eine Methode zur Messung von magnetischen Gleichfeldern, die von ihm zur Entwicklung einer sehr empfindlichen Messsonde benutzt wurde. Zwei hochpermeable Kerne tragen je eine Primär- und eine Sekundärwicklung. Die Primärwicklungen sind gegeneinander geschaltet. Fliesst durch diese ein Wechselstrom, so wird in den Spulenkernen ein magnetisches Wechselfeld erzeugt. Bei Anwachsen der momentanen Feldstärke während eines Wechsels wird in dem einen Kern eine positive Magnetisierung und im anderen eine negative Magnetisierung auftreten. Die Summe beider Magnetisierungen ist bei jedem Momentanwert der Feldstärke Null. Wird dem Wechselfeld ein Gleichfeld überlagert, so wird die Magnetisierung in einem Kern verstärkt und im anderen geschwächt. Addiert man nun die erhaltenen Magnetisierungskurven für jeden Momentanwert, ergibt sich eine Kurve mit einem resultierenden Maximum. Die Grösse der resultierenden Magnetisierung ist dem zu messenden, überlagerten Gleichfeld proportional, so dass dieses Verfahren zur absoluten (differentiellen) Messung kleinster Magnetfelder herangezogen werden kann. In den FEVER-Untersuchungen wurde ein 3-Achsen-Fluxgate vom Typ FL3-100 der Firma Stefan Mayer Instruments, Deutschland, verwendet. Die Fluxgate-Messanordnung ist in Abbildung 44 dargestellt.

Der empfindlichste Magnetfeldsensor ist der Supraleitende Quanten-Interferenz-Detektor (SQUID). Die Funktionsweise eines SQUID basiert auf den physikalischen Effekten Supraleitung, Meissner-Ochsenfeld-Effekt, Magnetische Flussquantisierung und Josephson-Tunnelung von sog. Cooper-Paaren. Die magnetische Flussquantisierung erlaubt es, einzelne Flussquanten ($\Phi_0=2 \cdot 10^{-15} \text{Tm}^2$) zu messen, woraus die unübertroffene Empfindlichkeit des SQUID resultiert. Der Nachteil dieses Messprinzips ist die zum Erreichen der Supraleitung erforderliche Kühlung, welche einen Kryostaten erfordert und somit zu einem relativ grossen Messsystem führt (Abbildung 45). Verwendet wurde ein Hochtemperatur-Radiofrequenz-SQUID (HTSL-rf-SQUID) der Jülicher SQUID GmbH mit YBaCuO als Hochtemperatursupraleiter. Das Instrument ist als sog. Vektorgradiometer ausgeführt, d.h. es misst lediglich Felddifferenzen und gibt somit keine Auskunft über die absolute Grösse des Magnetfeldes. Die SQUID-Messanordnung ist in Abbildung 45 dargestellt.



Abb. 44: Messanordnung des Restfeldverfahrens mit Fluxgate-Sensor, Manipulator und Messelektronik.

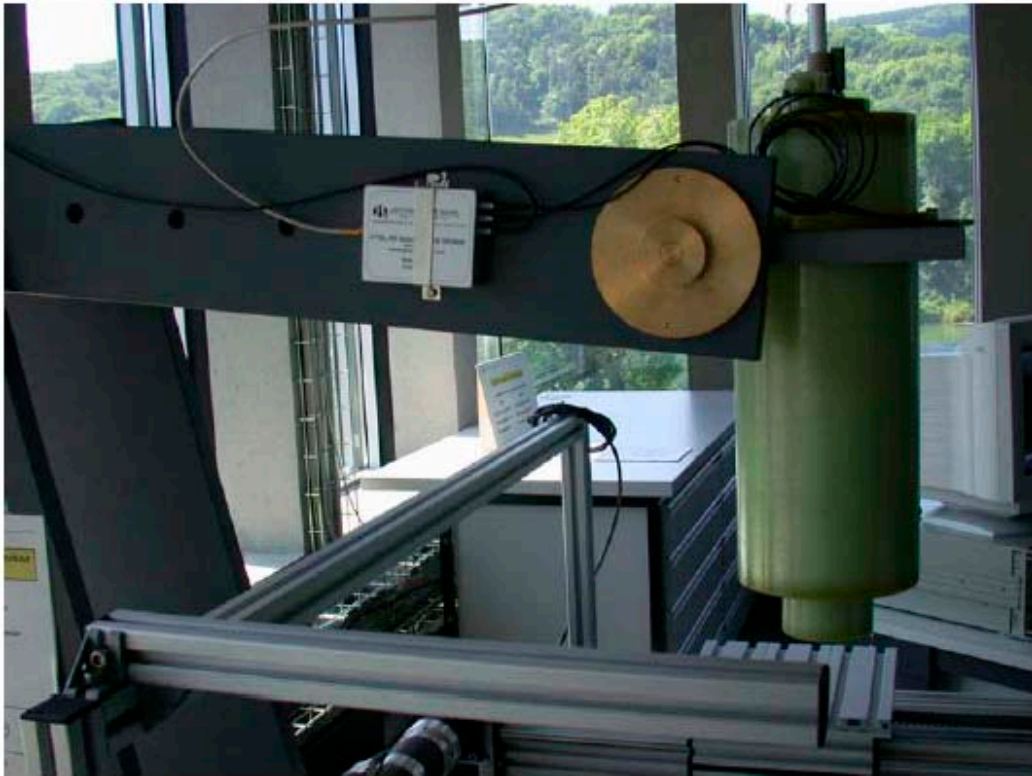


Abb.45: Messanordnung des Restfeldverfahrens mit SQUID-Sensor, Kryostat, Manipulator und Messelektronik

c) Wirbelstromimpedanz-Messungen mittels GMR-Messtechnik

Das Phänomen des Giant Magnetoresistiven Widerstandes (GMR) wurde 1988 von einer Gruppe um Fert in der Universität Paris entdeckt. Das Phänomen, welches in dünnen, anisotropen Sandwichstrukturen von ferromagnetischen und antiferromagnetischen Schichten beobachtet wird, besteht darin, dass sich der elektrische Widerstand in Abhängigkeit eines externen Magnetfeldes stark ändert. Der GMR-Effekt ist theoretisch noch nicht vollständig verstanden. Dennoch haben die auf diesem physikalischen Phänomen beruhenden GMR-Sensoren heute grosse Bedeutung, insbesondere in der Technik der Datenspeicherung. Näheres zur Funktion von GMR-Sensoren kann z.B. in [34] gefunden werden.

Der für unsere Untersuchungen verwendete GMR-Sensor (Abb. 46) zeichnet sich durch hohe Messempfindlichkeit und Signaldynamik, geringe Temperaturabhängigkeit des Messwertes sowie durch kleine Baugrösse aus. Er wird in einer Wirbelstromanordnung betrieben, d.h. das magnetische Wechselfeld eines Jochmagneten induziert in der Probe Wirbelströme, welche ihrerseits ein Magnetfeld erzeugen. Der GMR-Sensor misst das resultierende Magnetfeld an der Probenoberfläche. Aus Speisestrom und GMR-Signal wird von der Messelektronik die frequenzabhängige Impedanz berechnet. Die Impedanz ist im Wesentlichen von der Frequenz f , der elektrischen Leitfähigkeit σ und der magnetischen Permeabilität μ_r abhängig. Die Auswertung gestaltet sich schwierig, da σ und μ_r von vielen Parametern unterschiedlich stark abhängen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Einflussgrößen auf die Wirbelstromimpedanz nach [35]

Einflussgröße	El. Leitfähigkeit σ	Magn. Permeabilität μ_r
Chem. Zusammensetzung	++	+
Mischkristall-Zusammensetzung	+	+
Gefüge, Korngröße	-	++
Mischgefüge-Zusammensetzung	+	+
Ausscheidungen	-	++
Einschlüsse, Poren	-	+
Innere Spannungen	+	++
Anisotropie	-	+
Mikrorissfelder	+	+
Verformungsgrad	-	+
Dendriten im Stahl	-	-
δ -Ferrit im Austenit	+	++
α -Martensit im Austenit	+	++

Einfluss: (-) unwesentlich, (+) gering, (++) starke

GMR-Kombisensor

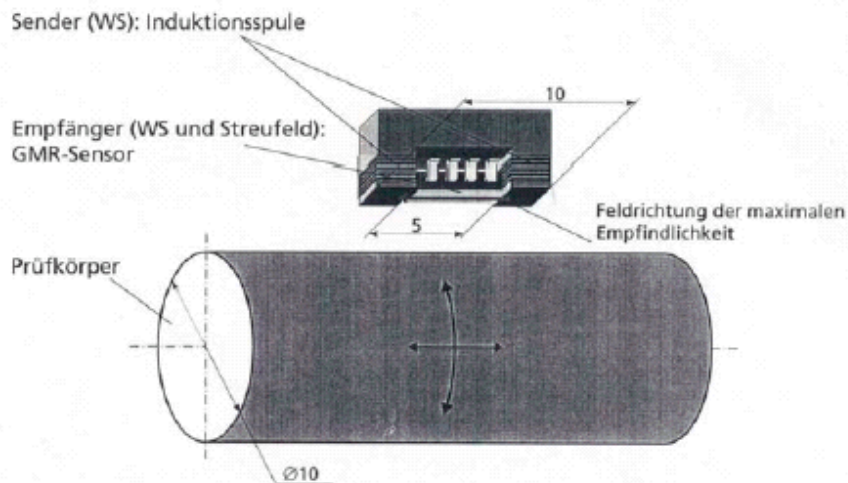


Abb. 46: Schema einer Messanordnung bestehend aus Wirbelstrom-Induktionsspule, GMR-Sensor und Probenkörper

Eine wichtige Grösse bei der Wirbelstromprüfung ist die Eindringtiefe δ der induktiven Anregung bzw. die Dicke der geprüften Materialschicht. Die Eindringtiefe δ ist abhängig von der Prüffrequenz f , der elektrischen Leitfähigkeit σ_{el} und der magnetischen Permeabilität μ_r , es gilt:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma_{el} f \mu_0 \mu_r}} \quad (8)$$

Für die untersuchten Austenite ergibt sich für die Prüffrequenz von 1kHz eine Eindringtiefe von ca. 5 mm.

Für die Bestimmung des Martensitgehaltes in den Ermüdungsproben, wurde ein spezieller Manipulator gebaut, der ein Abscannen der Oberfläche der Probe mittels GMR-Sensor ermöglicht. (Abbildung 47). Ein auf Rollen geführter Sensorschlitten ist notwendig, der über die zu prüfende Oberfläche fährt und garantiert, dass während der Messung der Abstand des Sensors zur Probenoberfläche konstant bleibt (Abb. 48). Zum Kalibrieren der Messtechnik wurde ein Probensatz mit bekanntem Martensitgehalt verwendet.

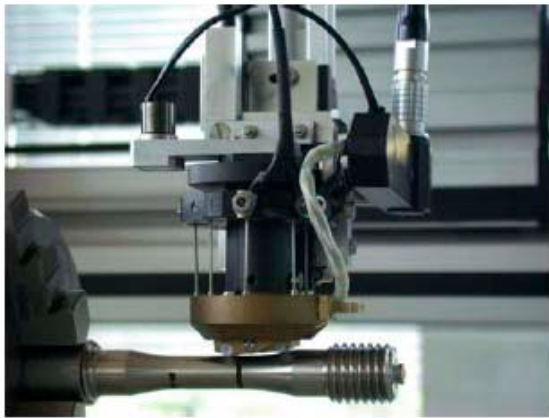


Abb. 47: Wirbelstromimpedanz- Messplatz mit Manipulator und GMR-Sensor

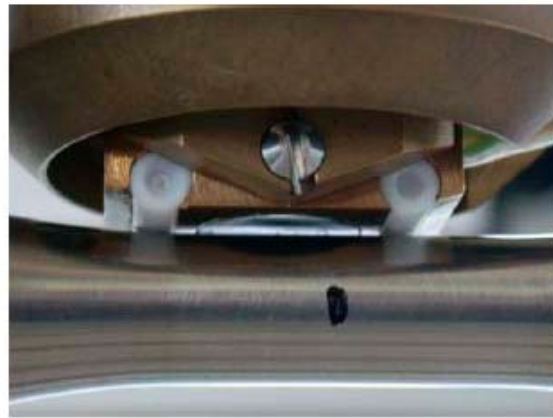


Abb. 48: GMR-Sensor und Aufnehmerschlitten zum Abscannen der Ermüdungsproben

2.5.2 Permeabilitätsmessungen mittels Ferromaster

Durch Bestimmung der magnetischen Permeabilität μ_r bzw. der Suszeptibilität $\chi = \mu_r - 1$ können Änderungen des magnetischen Verhaltens festgestellt werden. Die Bestimmung der absoluten Grösse der jeweiligen Permeabilität ist bei Anwendung des Feldverzerrungsverfahrens (Ferromaster) nicht direkt möglich. Die Bestimmung der Permeabilität erfolgt über spezielle Eichproben. Mit dem Ferromaster kann die Permeabilität im Bereich von $1 < \mu_r < 2$ bestimmt werden.

Messungen mittels Ferromaster wurden an allen Proben der Serie 3 durchgeführt, einschliesslich auch der Zugproben. In Anlehnung an die Neutronendiffraktometrie- Messungen, bei denen die Probe kontinuierlich um die Achse rotierte, wurde beim Einsatz des Ferromasters ein Mittelwert aus 12 unterschiedlichen Messpositionen bestimmt (3 axiale Positionen mit jeweils 4 Messungen am Umfang). Die Abbildung 49 zeigt die an den Zugproben gemessene Suszeptibilität in Abhängigkeit der totalen Dehnung. Es konnte ermittelt werden, dass zwischen der magnetischen Kenngrösse Suszeptibilität und der angelegten Dehnung ein linearer Zusammenhang besteht. Da der mittels Neutronendiffraktometrie bestimmte Martensitgehalt ebenfalls nahezu linear von der Dehnung abhängt, besteht eine einfache lineare Beziehung zwischen Suszeptibilität und Martensitgehalt. In Abbildung 50 ist die Korrelation für das Untersuchungsmaterial angegeben. Anhand der einfachen Messung der Suszeptibilität lässt sich innerhalb einer gewissen Streubreite der Martensitgehalt, der bei quasistatischer Beanspruchung entstanden ist, bestimmen.

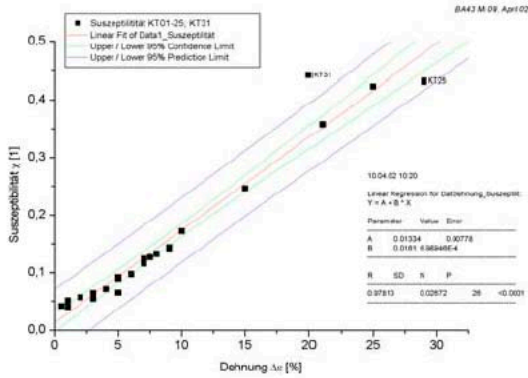


Abb.49: Zusammenhang der magnetischen Suszeptibilität und der während der quasi-statischen Beanspruchung angelegten totalen Dehnung.

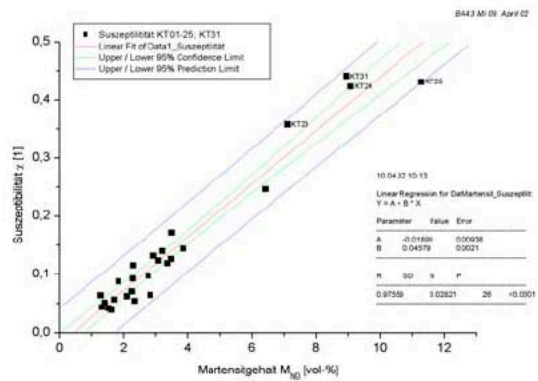


Abb.50: Zusammenhang der magnetischen Suszeptibilität und des Martensitgehaltes, der unter quasistatischen Lastbedingungen erzeugt wurde.

Für die Ermüdungsproben erfolgten die Messungen an dem Temperatur- (FT-Proben) und Zyklenzahl-Probensatz (P- und PN-Proben) der Serie 3, deren Ergebnisse in den Abbildungen 51 und 52 dargestellt sind. Es ergaben sich einfache lineare Zusammenhänge zwischen der magnetischen Suszeptibilität und dem Martensitgehalt bzw. der Lastwechselzahl. Für die untersuchten Material- und Lastbedingungen lassen sich somit innerhalb eines gewissen Streubandes aus der Suszeptibilitätsmessung der gebildete Martensitgehalt und die zugeordnete Lastwechselzahl bestimmen. Anzumerken ist, dass die Suszeptibilität bereits im Anlieferungszustand des Materials grösser Null sein kann.

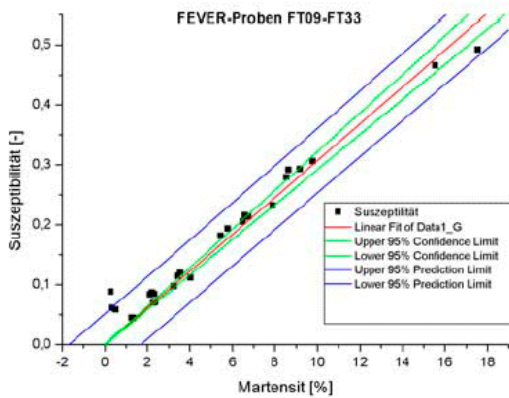


Abb.51: Abhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität vom Martensitgehalt, der bei Ermüdungsbeanspruchung mit einer totalen Dehnamplitude von 0.40 % und bei unterschiedlichen Temperaturen erzeugt wurde.

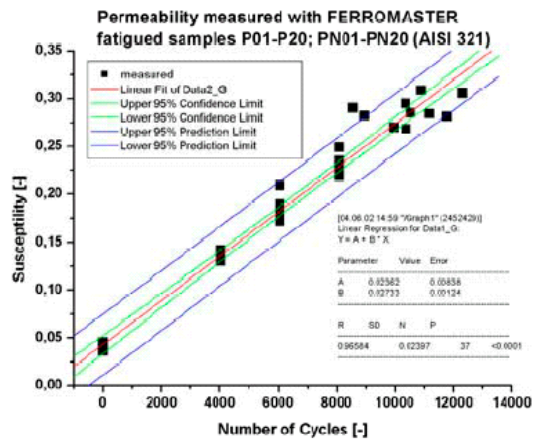


Abb. 52: Abhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität von der Lastwechselzahl aus Ermüdungsversuchen bei der totalen Dehnamplitude von 0.40 % und Temperatur von 80 °C (1.0 Hz) bei unterschiedlichen Erschöpfungsgraden

Die Änderung der Permeabilität während des Ermüdungsversuches wurde mittels In-situ-Messung bestimmt. Der Sondenkopf des Ferromasters wurde über eine speziell gefederte Halterung an die Ermüdungsprobe angekoppelt. Die Messwerte wurden periodisch am Anzeigergerät abgelesen. Deshalb war es nicht möglich, im Nulldurchgang der Dehnung zu messen. Die Abbildung 53 zeigt beispielhaft eine In-situ-Messung der magnetischen Suszeptibilität während des Ermüdungsversuches. Auch bei der In-situ-Messung konnte eine mit der Zyklenzahl lineare Zunahme der magnetischen Suszeptibilität beobachtet werden.

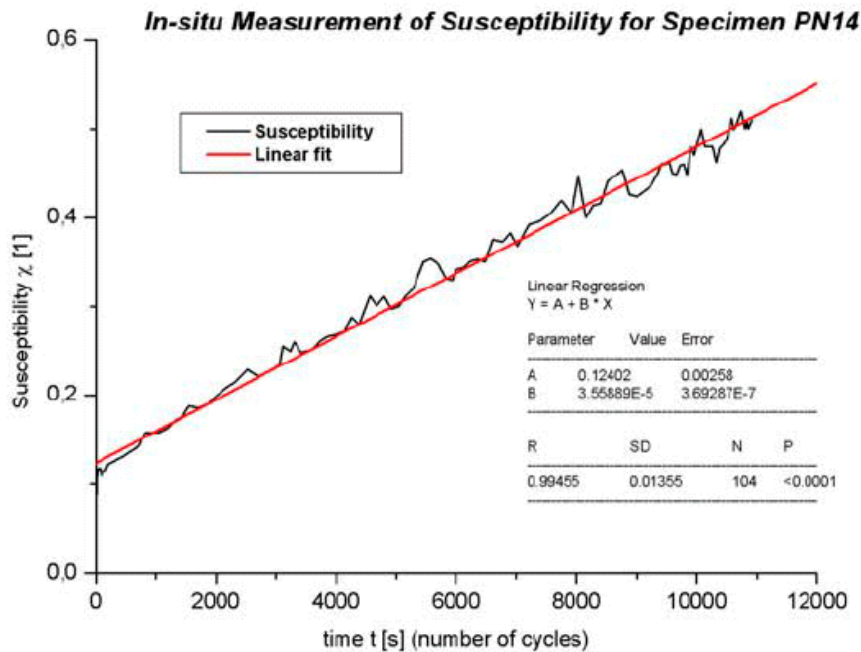


Abb. 53: In-situ-Messung der magnetischen Suszeptibilität in Abhängigkeit der Lastwechselzahl während eines Ermüdungsversuches

2.5.3 Messung der Restfeldstärke mittels Fluxgate- und SQUID-Detektoren

Mit der Messung der Restfeldstärke (Remanenz) können kleinste ferromagnetische Phasenanteile gemessen werden, falls die Messungen in einer magnetisch abgeschirmten Umgebung erfolgt. Diese Anforderung kann nur im Prüflabor erfüllt werden. Dort werden Remanenzmessungen für grundlegende Untersuchungen eingesetzt. Insbesondere für die einfache Probengeometrie unse-er Ermüdungsproben kann die Restfeldstärke als Mass für den mittleren Martensitgehalt verwendet werden. Ein Vorteil der Methode besteht darin, dass der Martensit berührungslos und in relativ grossen Entfernungen vom Prüfstück (100 mm) detektiert werden kann. Der Nachteil ist die vor der Messung durchzuführende Magnetisierung mit relativ starken Magnetfeldern.

In Übereinstimmung mit Modellrechnungen, in denen die Probe als Stabmagnet mit konstanter Magnetisierung angenommen wurde, befindet sich der Ort der maximalen axialen Feldkomponente B_x in der Mitte der Probe. In der Abbildung 54 sind beispielhaft Messungen an verschiedenen Proben der Serie 1 gezeigt, die beim linienförmigen Überfahren der Probe aufgenommen wurden. Der Verlauf der radialen Feldkomponente B_z ist in Abbildung 55 dokumentiert. Hier wird ein Nulldurchgang in Probenmitte registriert. Nach entsprechender Kalibrierung können die Maximalwerte sowohl der axialen als auch der radialen Feldkomponente zur Martensitbestimmung eingesetzt werden. Beispiele für Messungen der axialen und radialen Feldkomponente in einer Abtastebene zeigen die Abbildungen 56 und 57. Die dargestellten Feldverteilungen erfolgten an einer Kalibrierungsprobe mit einem Martensitgehalt von 9 vol.% in einem Abstand von Messebene zur Probe von 110 mm. Die zusätzliche Aufnahme der Feldverteilung in tangentialer Richtung (y -Koordinate) ermöglicht eine genauere Bestimmung der Maximalwerte der Feldkomponenten.

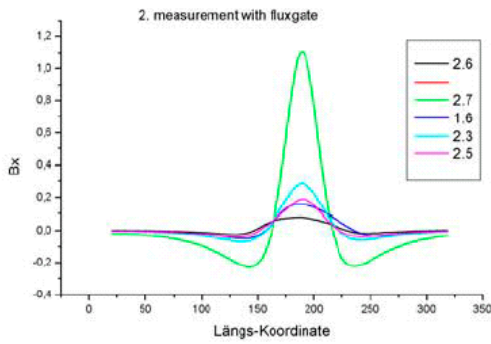


Abb.54: Linienförmiges Überfahren der Ermüdungsprobe in einem Abstand von 110 mm. Verlauf der axialen Feldkomponente an Proben mit unterschiedlichen Martensitgehalt

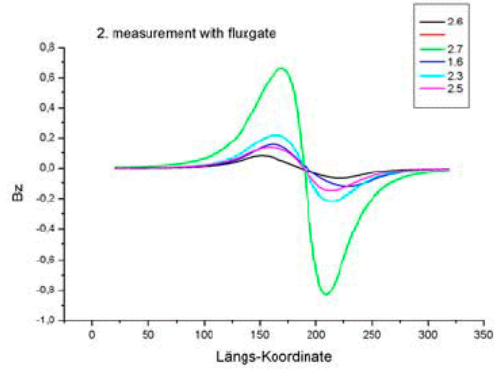


Abb.55: Linienförmiges Überfahren der Ermüdungsprobe in einem Abstand von 110 mm. Verlauf der radialen Feldkomponente an Proben mit unterschiedlichen Martensitgehalt

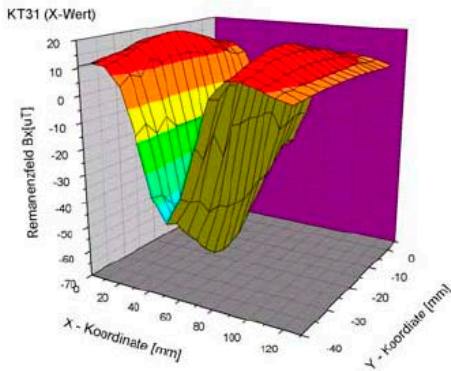


Abb. 56: Feldverteilung der axialen Komponente an einer Kalibrierungsprobe

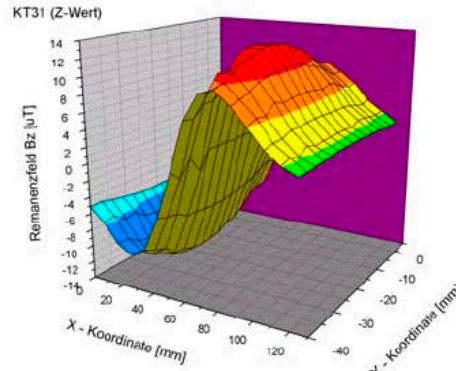


Abb.57: Feldverteilung der radialen Komponente an einer Kalibrierungsprobe

Die Probensätze FT (Temperaturproben) und P/PN (Lastwechselzahlproben) wurden mittels Fluxgate-Magnetometer ausgemessen. Vor der Remanenzmessung wurden die Proben in einer Spule mit einer Feldstärke von 112 kA/m in Längsrichtung bis zur magnetischen Sättigung magnetisiert. Zur Auswertung wurde der Maximalwert der axialen Feldkomponente verwendet. Die Abbildung 58 zeigt die maximale Restfeldstärke B_x in Funktion des Martensitgehalts. Für die FT-Proben sind auch die Resultate für den entmagnetisierten Zustand eingetragen. Auffallend ist die sehr gute Reproduzierbarkeit welche durch 1. und 2. Messung der PN-Proben belegt wird. Es konnte ermittelt werden, dass der erwartete lineare Zusammenhang zwischen Feldstärke und Martensitgehalt besteht. Der Unterschied zwischen den Messungen der PN- und FT-Proben, die für denselben Martensitgehalt unterschiedliche Werte der Remanenzfeldstärke ergaben, kann zur Zeit nicht erklärt werden. Durch die im Projekt DIAGNOSTIK geplanten Messungen der vollständigen Ummagnetisierungskurve (magn. Hystereseschleife) wird der Effekt näher untersucht.

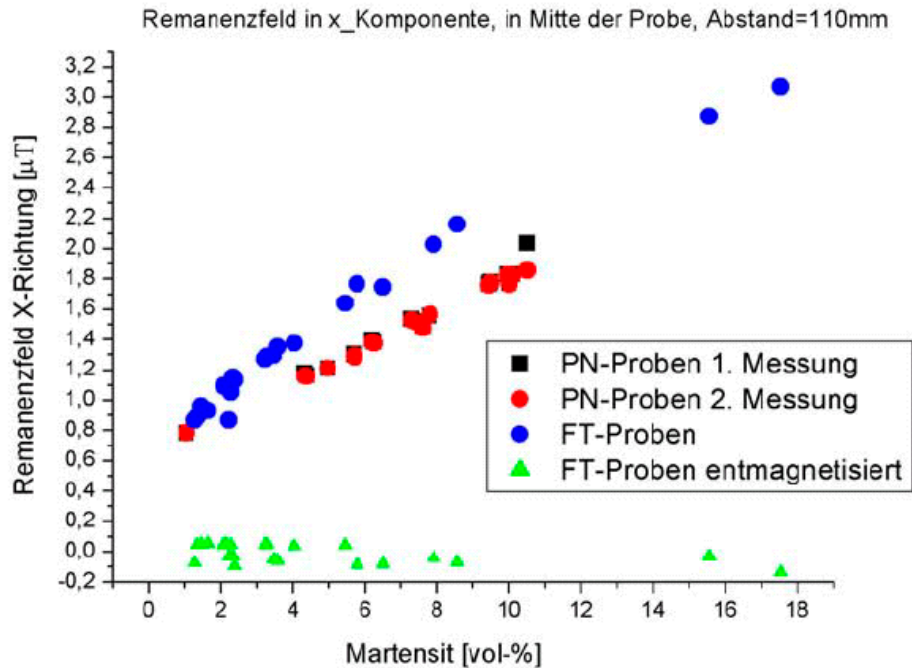
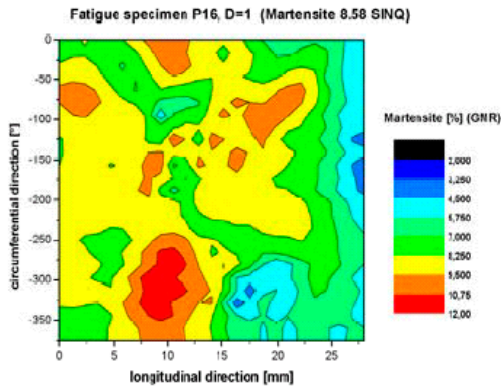


Abb.58: Zusammenhang von Restfeldstärke (Maximalwert der axialen Komponente) und Martensitgehalt an Ermüdungsproben der Serie 3

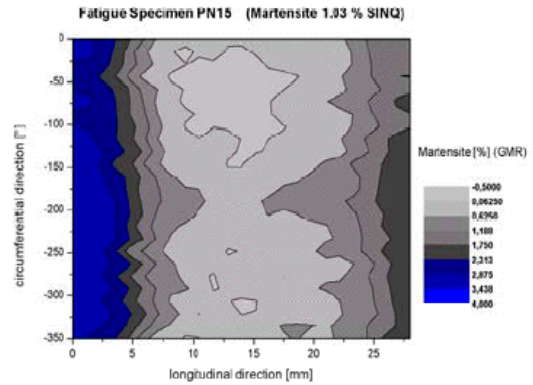
2.5.4 Messung der Wirbelstromimpedanz mittels GMR- Magnetometer

Die Bestimmung des Martensitgehaltes mit Hilfe der Wirbelstrom-Impedanz ist vielversprechend, da neuartige Hochtechnologie-Sensoren (GMR) hohe Empfindlichkeit und gute Ortsauflösung versprechen. Für den praktischen Einsatz ist von Nachteil, dass das Bauteil vor einer Messung entmagnetisiert werden muss. Wird ein Bauteil, welches etwa mit einem Magnet in Berührung gekommen ist, nicht vollständig entmagnetisiert, so wird das Messresultat erheblich verfälscht. Hinzu kommt, dass das GMR-Messsystem nicht nur für den interessierenden Martensit empfindlich ist, sondern auch auf diverse andere Parameter wie beispielweise auf den Abstand vom Sensor zur Probe reagiert. Dieser Schwierigkeit begegnet man damit, dass mit speziellen Algorithmen (z.B. Ritz-Methode) das System auf nur eine interessierende Zielgrößen kalibriert wird. Für unsere Messungen wurde das GMR-Messsystem mittels Kalibrierproben auf den Martensitgehalt eingestellt. Somit war es möglich, den Martensit an der Probenoberfläche direkt zu bestimmen. In den Abbildungen 59 und 60 sind Beispiele für GMR-Messungen an einer ermüdeten und nicht ermüdeten Probe mit 8.58 vol.% bzw. 1.03 vol.% Martensit dargestellt. Die Bilder geben Auskunft über die Martensitverteilung in der Probe. Während der Martensit im Ausgangszustand relativ homogen über der Oberfläche verteilt ist, bildeten sich bei der Ermüdungsbeanspruchung Stellen mit hoher Martensitkonzentration heraus. Der technische Riss, der sich in der Ermüdungsprobe ausbildete, konnte mittels GMR-Sensor gut nachgewiesen werden (dunkelrote Stelle am unteren Bildrand). Der technische Riss lag genau in der Probenmitte (Position 10 mm an der x-Achse). In seiner Umgebung bildet sich am meisten Martensit (siehe auch Abb.25). Im zylindrischen Messbereich von 20 mm (Position 0-20 mm an der x-Achse) kam es zu lokal sehr unterschiedlicher Martensitkonzentration. Diese inhomogene Martensitverteilung an der Probenoberfläche ohne ausgewiesene Vorzugsrichtungen deutet darauf hin, dass unterschiedliche Mechanismen der Martensitbildung an der Oberfläche und im Probenvolumen ablaufen. Insbesondere die Rolle der für die Ermüdung typischen Mikrorissbildungen an der Oberfläche auf die Martensitbildung ist durch mikrostrukturelle Untersuchungen und Modellrechnungen abzuklären (Projekt DIAGNOSTIK). Der abfallende Martensitgehalt am rechten Bildrand entspricht dem Probenbereich mit ansteigendem Querschnitt ausserhalb des Messbereiches.



P16, D=1, MD_SINQ=8.6 %

Abb.59: Martensitverteilung an der Oberfläche einer Probe, die bis zur technischen Rissentstehung ermüdet wurde.



PN15, D=0, MD_SINQ=1.0 %

Abb.60: Martensitverteilung an der Oberfläche einer Probe im Ausgangszustand

Analog zur In-situ-Messung der Permeabilität konnte auch die Wirbelstrom-Impedanz während des Ermüdungsversuches gemessen werden. Die Abbildung 61 zeigt den mittels GMR-Messtechnik bestimmten Martensitgehalt, der während eines Ermüdungsversuches bei 80°C (1.0 Hz) in den ersten 1000 Lastwechsel gemessen wurde. Der starke Anstieg des Martensitgehaltes in den ersten 300 Lastzyklen war überraschend und stimmte nicht mit dem Ergebnis der Ferromaster-Messung überein. Das verdeutlicht einmal mehr, dass die GMR-Wirbelstrom-Messsignale sehr sensibel auf verschiedenste Einflussgrößen der geometrischen und physikalischen Versuchsbedingungen reagieren und die Kalibrierung auf nur eine Zielgröße Schwierigkeiten bereitet. In dem starken Anstieg des gemessenen Martensitgehaltes zu Beginn des Ermüdungsversuches wird ein Temperatureffekt vermutet, da sich die Probe bei der Belastungsfrequenz von 1.0 Hz von Raumtemperatur auf 80°C erwärmt (siehe Kapitel 2.2.1). Weitere In-situ-Versuche bei niedrigeren Frequenzen werden zur Abklärung dieses Effektes beitragen (Projekt DIAGNOSTIK).

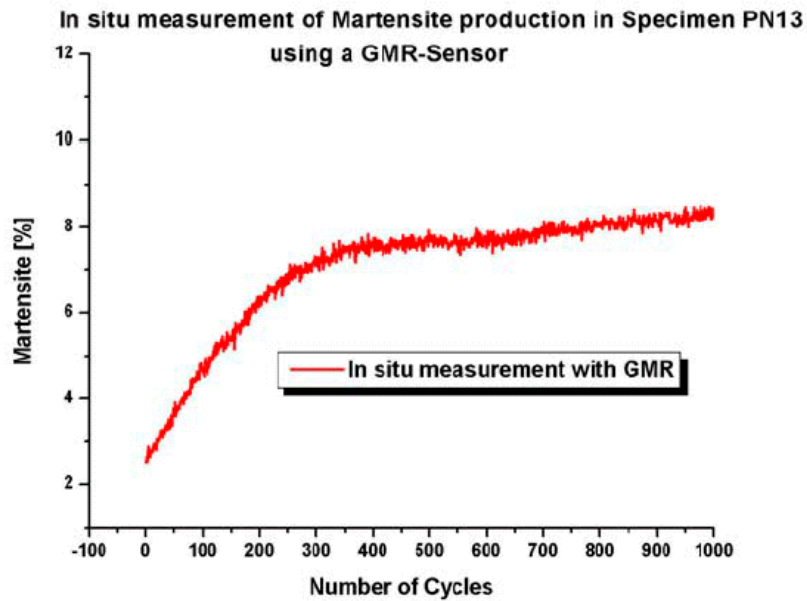


Abb. 61: In-situ-Messung des Martensitgehaltes während eines Ermüdungsversuches bei 80 °C (1.0 Hz) mittels GMR-Messtechnik

2.6 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

a) Mikrostrukturelle Untersuchungen

Die mikrostrukturellen Erkenntnisse basierten auf den Untersuchungen der Metallographie sowie der Neutronen- und Röntgendiffraktometrie (SINQ, ESRF Grenoble).

An den metallographischen Schliffen konnten die Martensitstrukturen und deren Verteilung in den Ermüdungsproben qualitativ bestimmt werden. Martensit wurde ausschliesslich in lattenförmigen Strukturen gefunden, die als typische Form des α' -Martensits anzusehen sind. Die Martensitverteilung im Querschliff von Serie 3 war charakterisiert durch einen kompakten Kern und anschliessende Ringe, deren Dichte zum Probenrand hin abnahm. Im Längsschnitt zeigte sich der Martensit konzentriert in Längsstreifen. Räumlich gesehen kam der Martensit in einem zentralen kompakten Zylinderkern vor, der von Zylinderschalen umgeben war. Zwischen den Schalen wurde kein Martensit gefunden. Auch an der Oberfläche war relativ wenig Martensit vorhanden. Diese Strukturen sind wohl als typische Erscheinung des Stangenmaterials anzusehen. Dort wurde durch das Warm- oder Kaltziehen eine Textur in die Austenitmatrix eingebracht, die sich bei der Martensitenstehung abbildete, da der Martensit zunächst in den für die Umwandlung kristallographisch günstig gelegenen Körnern entstand. Bei grösseren Erschöpfungsgraden wurde die Martensitverteilung als zunehmend homogener beobachtet. Eine quantitative Bestimmung des Martensits mittels metallographischer Methoden führte zu sehr grossen Streuungen in den Messungen. Der Martensit war farblich schwer zu markieren, da oft andere Strukturen, wie z.B. Austenitkorngrenzen, TiC-Ausscheidungen, Schlacken und Gleitlinien, dem Martensit überlagert waren. Dennoch lieferten die metallographischen Untersuchungen wichtige Informationen über die Art, Form und Verteilung des Martensits, die wichtige Hinweise für die Durchführung der Neutronen- und Röntgenbeugungsexperimente erbrachten. Eine Bestimmung des Martensitgehalts in den Ermüdungsproben war mit den bisher erprobten Metallographie-Techniken nicht möglich.

Mit der Neutronendiffraktometrie wurde ein Verfahren gefunden, mit dem es möglich war, sehr genau den Martensitgehalt in einem definierten Probenvolumen zu bestimmen. Dabei konnte auch über eine Blende der Messbereich eingeschränkt werden, was eine Längsabtastung der Ermüdungsprobe ermöglichte. Bei den Messungen war es unbedingt erforderlich, dass sich die Probe kontinuierlich um ihre Achse drehte, um die inhomogene Martensitverteilung auszugleichen. Die Neutronendiffraktometrie ist eine verifizierte Methode zur Phasenanalyse in Stählen und wurde demzufolge als Referenzmethode zur Martensitbestimmung für die zerstörungsfreien Prüfverfahren eingesetzt. Die Durchführung der Messungen am Neutronendiffraktometer DMC (SINQ) war teilweise zeitaufwendig und bedurfte der Antragstellung. Darum war eine sehr gute Planung der einzelnen Projektphasen notwendig.

Neutronendiffraktometrie-Experimente wurden auch zur Texturanalyse durchgeführt. Zunächst konnte gezeigt werden, dass in der austenitischen Matrix eine ausgeprägte Textur vorlag, die sich wahrscheinlich infolge der Fertigung des Stangenmaterials ausbildete. Auch konnte die Fasertextur des deformations-induzierten Martensits bestimmt werden. Durch Messungen der Textur an Proben mit unterschiedlichem Martensitgehalt wurde gezeigt, dass sich die Ausprägung der Textur mit steigender Martensitkonzentration zunehmend verliert. Texturmessungen sollten auch weiterhin durchgeführt werden, da ausgeprägte Texturen zu Messfehlern bei der Bestimmung des Martensitgehalts mittels Neutronendiffraktometrie führen können.

Eine vollständige Übersicht der Martensitverteilung an Längs- und Querschnitten von Proben wurde mit der Methode der Röntgendiffraktometrie mittels Synchrotronlicht (ESRF Grenoble) erreicht. Allerdings beschränkte sich die Methode auf den unmittelbaren Oberflächennahbereich und war somit komplementär zur Metallographie. Der Vorteil gegenüber metallographischen Verfahren bestand darin, dass die Messungen quantitativ den Martensitgehalt ermitteln konnten. Der Aufwand zur Durchführung von Röntgendiffraktionsmessungen mittels Synchrotronlicht war hoch. Die Experimente mussten lange im voraus geplant und vorbereitet werden. Da in Zukunft an der SLS die Möglichkeit besteht, vergleichbare Messungen durchzuführen, sollten weitere Untersuchungen vorgesehen werden. Ziel sollte es sein, den Zeitaufwand für Messung und Auswertung zu senken. Mit den durchgeführten Versuchen konnte bestätigt werden, dass die

Martensitkonzentration im Zentrum der Ermüdungsproben am höchsten war und sich mit zunehmendem Erschöpfungsgrad eine homogenere Martensitverteilung in den Proben einstellte.

b) Einflussgrößen auf die deformations-induzierte Martensitbildung

Als wesentliche Einflussgrößen auf die Martensitbildung ergaben sich aus den Untersuchungen die Temperatur und der Materialausgangszustand. Um zukünftig aus dem Martensitgehalt auf den Erschöpfungsgrad schliessen zu können, bedarf es deshalb einer Reihe von Materialkennlinien. Zunächst ist die grundlegende Abhängigkeit des Martensitgehaltes von der Lastwechselzahl für die relevanten Materialausgangszustände zu ermitteln. Für den Fall dickwandiger Rohrleitungen im Primärkreislauf von Kernkraftwerken ist nur der warmgefertigte und lösungsgeglühte Materialzustand zu berücksichtigen, da die grossen Wanddicken keine andere Fertigung zulassen. Wenn auch dünnere Rohre in Sicherheitssystemen in Betracht kommen, muss der kaltgefertigte und lösungsgeglühte Materialzustand mit untersucht werden. In den FEVER-Untersuchungen liessen sich die Materialzustände durch die 0.2%-Dehngrenze gut unterscheiden. Es erscheint demnach auch möglich, Materialkennlinien für speziell gealtertes Material oder Schweissnahtwerkstoffe aufzustellen und eine Unterscheidung durch die 0.2%-Dehngrenze vorzunehmen. In diesen Fällen wären dann wenige Zugversuche zur Unterscheidung notwendig.

Zusätzlich werden Temperatur-Kurven benötigt, die den Zusammenhang des Martensitgehaltes und der Temperatur beschreiben. Hier müssen eine Vielzahl von Kurven erstellt werden, da die Temperaturabhängigkeit vom Materialausgangszustand, der beaufschlagten Dehnungsamplitude und vom Erschöpfungsgrad beeinflusst wird. Messungen des Martensitgehaltes bei Temperaturen unter Raumtemperatur führen zu einem besseren Fit der Daten und sollten generell mit ermittelt werden. Die Entwicklung eines Werkstoffmodells zur Martensitbildung, das alle Einflussgrößen auf die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt, wäre von grosser Bedeutung und könnte die Anwendung der Methode wesentlich beschleunigen.

Die realen Beanspruchungen an den Rohrleitungen setzen sich aus Temperatur- und Dehnungszyklen zusammen, die meistens nicht synchron ablaufen. Deshalb müssen weitere Untersuchungen zeigen, welchen Einfluss die Belastungsgeschichte (variable Dehnamplitude, variable Temperatur etc.) auf Martensitbildung und Lebensdauer haben und ob die akkumulierte plastische Dehnung ein zuverlässiges Mass für die Bauteilbeurteilung ist.

c) Detektion des Martensits mittels magnetischer Methoden

Mit allen angewendeten zerstörungsfreien Messmethoden konnten die magnetischen Veränderungen nachgewiesen werden, die sich als Folge der verformungs-induzierten Martensitbildung im metastabilen austenitischen Stahl X6CrNiTi18-10 unter den gegebenen Ermüdungs-Versuchsbedingungen einstellten. Für Laborproben konnte gezeigt werden, dass ein eindeutiger, monotoner Zusammenhang zwischen Martensitgehalt und der gemessenen magnetischen Kenngrösse besteht. Bezüglich der Anwendbarkeit der verschiedenen Methoden gibt es jedoch Unterschiede.

Die Messung der magnetischen Permeabilität mit Hilfe des Handprüfgerätes Ferromaster ist eine einfache und billige Messmethode. Der lineare Zusammenhang zwischen Martensitgehalt und Permeabilität erlaubt es, auf den Erschöpfungsgrad zu schliessen. Der Messbereich des Ferromasters deckt die beim untersuchten Stahl auftretenden Permeabilitätsänderungen für die beschriebenen Versuchsbedingungen vollständig ab. Neben der Einfachheit des Messverfahrens gibt es weitere Vorteile beim Einsatz des Ferromasters. Das magnetische Gleichfeld des Gerätes erfasst grosse Materialdicken, so dass ganze Wandstärken von Rohrleitungen analysiert werden können. Die grösste Empfindlichkeit hat Ferromaster bei Stahl in einer Tiefe von 10 mm. Dabei liegt die laterale Auflösung innerhalb eines Millimeters und erlaubt somit auch das Detektieren von inhomogenen Martensitverteilungen. Bezüglich Oberflächenbeschaffenheit des Prüfobjektes sind keine besonderen Anforderungen zu erfüllen. Vor der Messung mittels Ferromaster wird ein Entmagnetisieren des Prüflings empfohlen. Da der Sensorkopf relativ gross im Vergleich zu den Ermüdungsproben ist, muss mit einem Geometrieeffekt gerechnet werden, der bei der Übertragung auf Messungen an grösseren Bauteilen berücksichtigt werden muss. Das stellt jedoch kein prinzipielles Hindernis für den praktischen Einsatz dar, da das Problem durch Anfertigen eines Kalibriersatzes mit entsprechender

Geometrie gelöst werden kann. Wie eine erste Messung gezeigt hat, liefert der Ferromaster auch bei In-situ-Messungen verlässliche Resultate und könnte als kontinuierliche Überwachung eingesetzt werden.

Auch Restfeldmessung mittels Fluxgate- und SQUID-Sensoren ergaben eine eindeutige Abhängigkeit der magnetischen Restfeldstärke vom Martensitgehalt. Das SQUID-Magnetometer ist das Verfahren mit der größten Empfindlichkeit und der größten Prüfgrössendynamik. Damit sind berührungslose Messungen im Abstand grösser 50 mm möglich. Für die Prüfpraxis könnte das bedeuten, dass Rohrleitungen untersucht werden könnten, ohne dabei die Isolation zu entfernen. Das würde zu erheblichen Kosteneinsparungen in der zerstörungsfreien Prüfung von Rohrleitungen führen. Aufgrund der notwendigen Kühlung und Isolierung des SQUID-Chip ergeben sich in der Praxis Einschränkungen bezüglich Handhabung des Gerätes und Zugänglichkeit zum Prüfstück. Auch ist die Messung in ungeschirmter Umgebung problematisch und fehleranfällig. Zur Messung kleinster Martensitanteile, also in den Fällen, in denen der Einsatz eines SQUID gerechtfertigt ist, wird eine magnetische Abschirmung erforderlich.

Für viele Einsatzfälle würde jedoch die Empfindlichkeit der Fluxgate-Sensoren ausreichen, die weit über der Empfindlichkeit bisher eingesetzter Sensoren, wie Induktionsspulen und Hallsonden liegt. Das verwendete 3-Achsen Fluxgate-Messsystem ist einfach anzuwenden. Im Gegensatz zum SQUID-Sensor, der Magnetfelddifferenzen misst, erfasst das Fluxgate-Magnetometer das absolute Magnetfeld. Bei schwachen Restfeldern kann dieses jedoch durch die Umgebung stark verzerrt werden, so dass auch hier Messungen in einer abgeschirmten Umgebung empfohlen werden. Ein entscheidendes Hindernis bei der praktischen Anwendung des Restfeldverfahrens besteht jedoch generell in der erforderlichen Magnetisierung des Prüflings. Hierzu müssen bauteilspezifische Lösungen gesucht werden, anderenfalls bleibt die Methode auf das Labor beschränkt.

Ein GMR-Sensor kann als Magnetometer zur Restfeldmessung oder als Empfänger des Wirbelstromsignals eingesetzt werden. Im Rahmen des Projekts wurde nur die zweite Variante erprobt. Es hat sich gezeigt, dass der GMR ein grosses Potential für die Werkstoffdiagnostik besitzt. Allerdings müssen auch hier gewisse Bedingungen erfüllt sein. Die wichtigste Einschränkung besteht in den Schwierigkeiten bei der Kalibrierung des Systems. Die Eigenschaften der Kalibrierproben müssen bezüglich Material- und Belastungsbedingungen mit den Bedingungen am zu prüfenden Bauteil übereinstimmen. Da der GMR auf mehrere Parameter empfindlich ist, müssen diese entweder konstant gehalten oder die Messsignale entsprechend der verschiedenen Einflüsse getrennt werden. Sehr vorteilhaft ist, dass die Wirbelstrommessungen nicht durch externe Magnetfelder gestört werden und damit die Abschirmung des Prüflings entfällt. Bei entsprechender Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie des Prüflings kann dieser mittels einer Verfahrensvorrichtung abgetastet werden, um so eine magnetische Karte des Bauteils zu erstellen. Aufgrund der Abhängigkeit insbesondere der GMR-Impedanz von den Spannungszuständen im Material ist der Einsatz dieser Messtechnik nicht auf metastabile austenitische Stähle beschränkt. Insbesondere bei rein ferromagnetischen Werkstoffen wie ferritisch-perlitischen Stählen und paramagnetischen Werkstoffen wie Aluminium-Basis-Legierungen, die eine ausgeprägte Abhängigkeit der Versetzungsdichte und -struktur von der Lastspielzahl zeigen, ist der Einsatz der GMR-Wirbelstromtechnologie erfolgversprechend.

3. Nationale Zusammenarbeit

Es bestehen enge Kontakte zur Eidgenössischen Materialprüfungs- und -forschungsanstalt EMPA in Dübendorf. Mit der Abteilung Festigkeit und Schadensanalyse werden Messtechnik und Erfahrungen auf dem Gebiet der Ermüdungsschädigung ausgetauscht. Weiterhin bestehen enge Beziehungen zur Abteilung der zerstörungsfreien Materialprüfung. Ein wissenschaftlicher Austausch aller Projekte der Kerntechnik findet im PSI Arbeitskreis „Nuclear Materials“ statt, der monatlich im PSI durchgeführt wird. Eine enge Zusammenarbeit besteht mit der Gruppe Fusionsmaterialien der EPFL. Mitarbeiter der Gruppe nutzen die PSI Geräte zur mechanischen Werkstoffprüfung und Metallographie. Mitarbeiter der EPFL stellen Wissen und Erfahrung zur Transmissionselektronenmikroskopie zur Verfügung.

4. Internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen bilateraler Zusammenarbeit wurden Messungen des Martensitgehalts an folgenden Forschungseinrichtungen durchgeführt: ESRF Grenoble (F) mit Röntgendiffraktometrie (ROBL-Beamline des Forschungszentrums Rossendorf (DE)), Forschungszentrum Jülich (DE), Siempelkamp Dresden (DE) mit SQUID-Messtechnik, Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (DE) mit GMR-Messtechnik, Universität Hannover (DE) mit einer speziellen Wirbelstromtechnik, Electricite de France (F) mit Messungen der thermoelektrischen Kraft. In die PSI-Labors kamen Mitarbeiter von Siempelkamp (DE), IzfP (DE) und EdF (F) zu Gastmessungen.

Das Projekt Grete FIS5-1999-00280, das im 5. EU-Rahmenprogramm EURATOM Nuclear Fission durchgeführt wird, beschäftigt sich mit der Überwachung von Materialalterung in Kernkraftwerken, insbesondere der Überwachung der Strahlungsversprödung von Reaktordruckbehältern und der Überwachung von thermischer Ermüdung in Primärkreislauf-Rohrleitungen. Folgende Projektpartner nehmen daran teil: Electricité de France (F), Nuclear Reserach and Consulting Group (NL), VTT Technical Reserach Centre (FIN), Tecnomat (SP), Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (DE), EC Joint Reserach Centre Petten (EC), AEA Technology (GB), CIEMAT (SP), Forschungszentrum Seibersdorf (A), Atomic Energy Research Institute (H), Universität Hannover (DE), Nuclear Research Institute Rez (CZ), Siempelkamp (DE), Institut National des Sciences Appliquees de Lyon (F), All-Russian Institute for Nuclear Power Plants Operation (RUS), Framatome ANP (DE).

Die Ergebnisse wurden an wissenschaftlichen Konferenzen vorgetragen [21-27].

Weiterhin werden aktuelle Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Alterungsüberwachung von Kernkraftwerkskomponenten in folgenden EU-Netzwerken bzw. Arbeitsgruppen ausgetauscht:

- AMES (Ageing Materials Evaluation and Studies)
- NESC (Network for Evaluating Steel Components)
- OECD NEA CSNI IAGE (Working Group on Integrity and Ageing of Components and Structures)

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Zielsetzung des Projektes FEVER bestand darin, an einem konkreten Anwendungsfall mikro-strukturelle Veränderungen zu identifizieren, die den Ermüdungsprozess auslösen, beeinflussen oder begleiten und die einhergehende Änderung der physikalischen Eigenschaften mittels zerstörungsfreier Methoden zu messen. Aufgrund der grossen Bedeutung für die Sicherheit und Verfügbarkeit der Kernkraftwerke wurde als Anwendung die niederzyklische Ermüdung in Rohrleitungen des Primärkreislaufes ausgewählt, die bei An- und Abfahrvorgängen sowie im Teillastbetrieb infolge von Temperaturschichtungen und anderen Strömungsphänomenen auftritt. Bisher erfolgt die Ermüdungsüberwachung mit der Kontrolle der Beanspruchungen am Bauteil durch Temperatur- und Dehnungsmessungen und mit zerstörungsfreien Verfahren zur Detektion technischer Risse (> 3-5 mm). Die Untersuchungen in FEVER sollten Wege aufzeigen, dass es prinzipiell möglich ist, direkt am Bauteil eine umfassende Materialzustandsanalyse vorzunehmen. Es wurde untersucht, ob die deformations-induzierte Martensitbildung, die bei Ermüdung in den rostfreien austenitischen Rohrleitungsstählen unter bestimmten Bedingungen auftritt, als Alterungsindikator genutzt werden kann. Für die Material- und Versuchsbedingungen in FEVER (Stahl X6CrNiTi18-10, Serie 1,2 lösungsgeglüht, Serie 3 kaltverformt, beaufschlagte totale Dehnamplitude 0.40 %, Temperaturbereich 20-260 oC) konnte nachgewiesen werden, dass ein linearer Zusammenhang besteht zwischen dem Martensitgehalt und der Lastwechselzahl bei Ermüdung. Das ermöglichte die Ermittlung des Erschöpfungsgrades aus dem Martensitgehalt. Dabei hing die Martensitbildungsrate vom Materialausgangszustand ab. Es ist demzufolge notwendig, Kennlinien für die relevanten Materialzustände aufzustellen. Für den betrachteten Anwendungsfall kam nur der lösungsgeglühte Ausgangszustand in Frage, da die Fertigung der dickwandigen Rohren keine andere Möglichkeit zulässt. In FEVER wurde die Martensitbildung nur bei einer konstanten Dehnungsamplitude untersucht. Die realen Beanspruchungen an

den Rohrleitungen setzen sich aus Temperatur- und Dehnungszyklen zusammen, die meistens nicht synchron ablaufen. Deshalb müssen weitere Untersuchungen zeigen, welchen Einfluss die Belastungsgeschichte (variable Dehnamplitude, variable Temperatur etc.) auf Martensitbildung und Lebensdauer haben und ob die akkumulierte plastische Dehnung ein zuverlässiges Mass für die Bauteilbeurteilung ist. Solche Untersuchungen werden im Projekt Diagnostik vorgeschlagen.

Eine wesentliche Einflussgrösse auf die Martensitbildung stellte die Temperatur dar. Für die untersuchten Material- und Versuchsbedingungen konnte ermittelt werden, dass sich der Zusammenhang von Martensitgehalt mit steigender Temperatur sehr gut mit einer abfallenden Exponentialfunktion beschreiben lässt. Die Parameter dieser Funktion hängen jedoch vom Materialausgangszustand, der beaufschlagten Dehnamplitude und vom Erschöpfungsgrad ab. Um aus dem Martensitgehalt am Bauteil auf den Erschöpfungsgrad schliessen zu können, müssen die wesentlichen Temperaturen und Dehnungen am Bauteil bekannt und die entsprechenden Martensit-Temperatur-Kurven bestimmt sein. Die Entwicklung eines Werkstoffmodells, das alle wesentlichen Einflussgrössen auf die Martensitbildung berücksichtigt, d.h. chemische Zusammensetzung des Stahls, Ausgangsversetzungsdichte, Dehnungsamplitude und Temperatur, würde den experimentellen Aufwand reduzieren und die praktische Anwendung wesentlich beschleunigen. Erste Schritte in diese Richtung sind unternommen und werden im Projekt DIAGNOSTIK verstärkt.

Für die mikrostrukturellen Untersuchungen wurden metallographische Methoden sowie Beugungsverfahren auf der Basis von Neutronen- und Synchrotronstrahlung eingesetzt. Die Metallographie ergab qualitative Informationen zu Art, Form und Verteilung des Martensits in den Ermüdungsproben. Es wurde ausschliesslich lattenförmiger Martensit beobachtet, der als typische Struktur des α' -Martensits gilt. Der Martensit war in einem zylindrischen Kern um die Probenachse konzentriert, der von Zylinderschalen mit Martensit umgeben war, deren Dichte zur Oberfläche hin abnahm. Diese Strukturen sind wohl als typische Erscheinung des Stangenmaterials anzusehen. Eine quantitative Bestimmung des Martensitgehalts mittels metallographischer Methoden war nicht möglich. Mit der Neutronendiffraktometrie wurde eine Methode gefunden, mit der eine genaue Bestimmung des Martensitgehalts in den Ermüdungsproben möglich war. Da die Neutronendiffraktometrie als Methode zur Phasenanalyse verifiziert ist, wurden die Messungen als Referenz für die zerstörungsfreien magnetischen Methoden verwendet. Die Messungen mit der Methode der Röntgendiffraktometrie auf der Basis von Synchrotronlicht ermöglichten Übersichtsaufnahmen der Martensitverteilung in den metallographischen Quer- und Längsschliffen mit einer quantitativen Auswertung. Es konnte beobachtet werden, dass mit zunehmendem Martensitgehalt die Verteilung des Martensits in den Ermüdungsproben homogener wurde. Der Aufwand für Messung und Auswertung war hoch. Da zukünftig vergleichbare Messungen an der SLS möglich sein werden, sollte sich der Aufwand reduzieren lassen. Jede der eingesetzten Methoden zur Mikrostrukturanalyse trug zum Gesamtverständnis bei. Solange die magnetischen Methoden nicht zur Martensitbestimmung verifiziert sind, ist es unerlässlich, Neutronendiffraktionsmessungen durchzuführen. Metallographie und Röntgendiffraktometrie sind sich ergänzende Methoden und sollten auch im Projekt DIAGNOSTIK weiterhin eingesetzt werden.

Zur Detektion des Martensitgehaltes mittels zerstörungsfreier magnetischer Methoden wurden ein einfaches Handprüfgerät zur Bestimmung der magnetischen Permeabilität (Ferromaster), Fluxgate- und SQUID-Magnetometer zur Messung der Restfeldstärke nach vorheriger Magnetisierung sowie ein GMR-Messsystem zur Bestimmung der Wirbelstromimpedanz eingesetzt. Das Handprüfgerät Ferromaster erwies sich als sehr vorteilhaftes und praktisches Messmittel. Ein Vorteil neben der einfachen Handhabung besteht darin, dass die Messgrösse ferromagnetische Anteile in relativ grossen Tiefen erfasst (grösste Empfindlichkeit in Stahl bei einer Tiefe von 10 mm), so dass die Werte der Permeabilität auf den Martensitgehalt aus der Neutronendiffraktometrie bezogen werden können. Die Messung mit Ferromaster ergab einen linearen Zusammenhang der magnetischen Permeabilität mit dem Martensitgehalt. Die Fluxgate- und SQUID-Sonden sind sehr empfindliche Sensoren zur Magnetfeldmessung und wurden im Projekt zur Messung der Restfeldstärke eingesetzt. Ein Nachteil für den praktischen Einsatz des Restfeldverfahrens besteht darin, dass das Bauteil vorher örtlich, z.B. mit sogenannten Jochmagneten, magnetisiert werden muss. Weiterhin ist eine magnetische Abschirmung der Sensoren und im Falle von SQUID, eine Kühlung mit flüssigen Stickstoff notwendig, was die Handhabbarkeit und die Zugänglichkeit zum Bauteil erschwert. Deshalb wird ihr Einsatz wohl auf das Labor beschränkt bleiben. Die magnetische Messgrösse Restfeldstärke ist direkt an den

Martensitgehalt gekoppelt und erfasst auch tieferliegende ferritische Anteile. Die Untersuchungen ergaben einen linearen Zusammenhang von Restfeldstärke und Martensitgehalt. Die genannten Nachteile von Fluxgate und SQUID bestehen für das GMR-Messsystem nicht. Deshalb hat es gute Chancen für einen praktischen Einsatz. Der GMR-Sensor wurde in FEVER zur Messung der Wirbelstromimpedanz genutzt. Da die Messgröße auf diverse mikrostrukturelle und geometrische Parameter empfindlich ist, müssen diese entweder konstant gehalten oder die Messsignale entsprechend der verschiedenen Einflüsse getrennt werden. Je nach Prüffrequenz bleibt die Information auf den mehr oder weniger tiefen Oberflächenbereich begrenzt. Falls die Möglichkeit des Abfahrens der Oberfläche gegeben ist, kann eine magnetische Karte erstellt werden. Diese Möglichkeit wurde in FEVER genutzt, um die Martensitverteilung an der Oberfläche der Ermüdungsproben zu ermitteln. Dabei wurde beobachtet, dass in den Rissbereichen eine starke Martensitkonzentration vorlag. Demnach löste die Entstehung des technischen Risses zusätzliche Beiträge an Martensitumwandlungen aus. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unter gewissen Einschränkungen eine Bauteilbewertung und Ermüdungsfrüherkennung mittels zerstörungsfreier magnetischer Prüfmethoden möglich ist. Unter den Voraussetzungen, dass der Materialausgangszustand und die Belastungsbedingungen bekannt sind, wird aus einer materialspezifischen Bewertungskennlinie, die den Zusammenhang von akkumulierter Belastung und magnetischer Messgröße beschreibt, der Erschöpfungsgrad für den aktuellen Wert der magnetischen Kenngröße abgelesen. Die Bestimmung der materialspezifischen Bewertungskennlinien erfordert einen entsprechend hohen Aufwand. In DIAGNOSTIK sind Messungen an neuwertigen und ermüdeten Rohrleitungsstücken im Labor und auch direkt im Kernkraftwerk mit Ferromaster und GMR-Messtechnik vorgesehen (Kernkraftwerk Gösgen).

6. Literatur

- [1] M. Cohen, E.S. Machlin, V.G. Paranjpe, Thermodynamics of the Martensitic Transformation, American Society Metals, Metals Park, 1950
- [2] L. Kaufmann, M. Cohen, Progress in Metal Physics 7 (1958) 165
- [3] U. Dehlinger, Theoretische Metallkunde, Springer Verlag Berlin, 1955
- [4] E. Hornbogen und M. Thumann, Die martensitische Phasenumwandlung und deren werkstofftechnische Anwendung, DGM Verlag, Düsseldorf, 1986
- [5] E. Scheil, Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 207 (1932) 21
- [6] K. Mathieu, Mitteilungen des Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung 24 (1942) 243
- [7] T. Angel, Formation of Martensite in Austenitic Stainless Steels, J. Iron and Steel Institute 177 (1954) 165
- [8] D.C. Ludwigson, J.A. Berger, Plastic Behaviour of Metastable Austenitic Stainless Steels, Journal of the Iron and Steel Institute 1 (1969) 63
- [9] G.B. Olson and M. Cohen, Kinetics of Strain-Induced Martensitic Nucleation, Metallurgical Transactions A, 6A (1975) 791
- [10] T. Susuki, H. Kojima, K. Susuki, T. Hasimoto, M. Ichihara, An Experimental Study of the Martensite Nucleation and Growth in Austenitic Stainless Steels, Acta Metallurgica, 25 (1977) 1151
- [11] S.S. Hecker, M.G. Stout, K.P. Staudhammer, J.L. Smith, Effects of Strain State and Strain Rate on Deformation-Induced Transformation in 304 Stainless Steel, Metallurgical Transactions A, 13A (1982) 619
- [12] G.R. Chanani, S.D. Antolovich, Low-Cycle Fatigue of a high strength metastable austenitic steel (called TRIP), Metallurgical Transactions, 5 (1974) 217
- [13] D. Hennessy, G. Steckel, C. Altstetter, Phase Transformation of Stainless Steel during Fatigue, Metallurgical Transactions A, 7A (1974) 415
- [14] G. Baudry, A. Pineau, Influence of Strain-Induced Martensitic Transformation on the Low-Cycle Fatigue Behaviour of a Stainless Steel, Mater. Sci. Eng. 28 (1977) 229
- [15] M. Bayerlein, H.-J. Christ und H. Mughrabi, Plasticity Induced Martensitic Transformation during Cyclic Deformation of AISI 304L Stainless Steel, Mater. Sci. Eng. A 114 (1989) 11

- [16] R.G. Teteruk, H.J. Maier, H.-J. Christ, Fatigue-Induced Martensitic Transformation in Metastable Stainless Steels, „Low-Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials“, ed. by K.-T. Rie and P.D. Portella, Elsevier Science Ltd., 1998
- [17] H.-J. Basler, D. Eifler, Characterisation of Plasticity-Induced Martensite Formation During Fatigue of Austenitic Steel, „Low-Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials“, ed. by K.-T. Rie and P.D. Portella, Elsevier Science Ltd., 1998
- [18] M. Cherkaoui, M. Berveiller, X. Lemoine, Couplings between Plasticity and Martensitic Phase Transformation: Overall Behavior of Polycrystalline TRIP Steels, International Journal of Plasticity, 16 (2000) 1215
- [19] H.-J. Basler, Wechselverformungsverhalten und verformungsinduzierte Martensitbildung bei dem austenitischen Stahl X6CrNiTi18-10, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1999
- [20] M.A. Lang, Zerstörungsfreie Charakterisierung des Wechselverformungsverhaltens und der verformungsinduzierten Martensitbildung bei dem austenitischen Stahl X6CrNiTi18-10 mittels empfindlicher Magnetfeldsensoren, Universität der Saarlandes, Saarbrücken, 2000
- [21] D. Kalkhof, Nondestructive Testing Methods for Monitoring of Material Degradation, IAEA Specialists Meeting, Petten, The Netherlands, 10 - 12 March 1999
- [22] D. Kalkhof, M. Grosse, M. Niffenegger, D. Stegemann, U. Gampe, Microstructural Investigations and Monitoring of Low-Cycle Fatigue Degradation in Metastable Austenitic Steel, Int. Conf. on Nondestructive Evaluation in Relation to Structural Integrity, New Orleans, USA, 24 -26 May 2000
- [23] D. Kalkhof, M. Grosse, M. Niffenegger, D. Stegemann, W. Weber, Microstructural Investigations and Monitoring of Degradation of LCF Damage in Austenitic Steel X6CrNiTi18-10, Proceedings of the 1st Int. Conf. on „Fatigue of Reactor Components“, Napa, USA, July 31 – August 2, 2000, EPRI 1006070 (2001)
- [24] M. Grosse, M. Niffenegger, D. Kalkhof, Monitoring of Low-Cycle Fatigue Degradation in X6CrNiTi18-10 Austenitic Stainless Steel, J. of Nuclear Materials 296 (2001) 305
- [25] D. Kalkhof, M. Grosse, M. Niffenegger, Monitoring of Fatigue Degradation in Austenitic Stainless Steels, 2nd Int. Conf. on „Fatigue of Reactor Components“, Snowbird, USA, 29-31 July 2002
- [26] D. Kalkhof, M. Niffenegger, M. Grosse, G. Bart, Influence of Cycle Number, Temperature and Manufacturing Process on Deformation-Induced Martensite in Metastable Austenitic Stainless Steels, Int. Symposium. „Contribution of Materials Investigation to the Resolution of Problems Encountered in Pressurized Water Reactors“, Fontevraud, France, 23-27 September 2002
- [27] D. Kalkhof, M. Grosse, M. Niffenegger, Monitoring of Fatigue Degradation in Austenitic Stainless Steels, Int. Conf. „Fatigue and Durability Assessment of Materials, Components and Structures, Queens' College Cambridge, UK, 7-9 April 2003
- [28] http://www1.psi.ch/www_sinq_hn/SINQ/instr/DMC.html
- [29] G.E. Bacon, Neutron Diffraction, Clarendon Press, Oxford, 1975
- [30] E. Weck, E. Leistner, Metallographische Anleitung zum Farbätzen nach dem Tauchverfahren, Band2: Farbätzung nach Beraha und ihre Anwendungen. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweisstechnik, 1983
- [31] G. Fanninger, U. Hartmann, Physikalische Grundlagen der Quantitativen Röntgenographischen Phasenanalyse (RPA). Härterei Technische Mitteilungen HTM 27 (1972) 233
- [32] W. Matz et al., ROBL, a CRG Beamline for Radiochemistry and Materials Research at the ESRF. Journal Synchrotron Radiation, 6 (1999) 1076
- [33] F. Förster, Über Fortschritte der zerstörungsfreien Materialprüfung mit elektromagnetischen Verfahren, Zeitschrift Materialprüfung, 4 (1962) 397
- [34] P. Grünberg, Riesenmagnetwiderstand in magnetischen Schichtstrukturen, Physikalische Blätter, 51 (1995) 1077
- [35] R. Becker, Über die Prüfung auf Fehler in metallischen Werkstoffen und Bauteilen mittels eines zerstörungsfreien Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Prüfverfahrens, Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1980



Datum: 29. Januar 2003
Von: Dieter Loy

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 STARS-IV

Einleitung

Mit dem Abschluss eines Anschlussvertrages über die Sicherheitsforschung für Transientenanalysen der Reaktoren in der Schweiz (STARS) wurde Ende 2001 der vierte STARS-Vertrag (STARS-IV) mit dem Bundesamt für Energie (BFE), vertreten durch die HSK, und dem Paul Scherrer Institut (PSI) unterzeichnet.

Der neue Auftrag des STARS-Vertrages fordert die Schwerpunkte von der Entwicklung von Anlagemodellen und der Code-Implementation auf Aspekte des Systemverhaltens zu verschieben. Des Weiteren fordert der Vertrag Entwicklungs- und Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit neuen Anforderungen für den Nachweis der Sicherheit der KKW's bei Störfällen mit hochabgebrannten Brennstäben und die Weiterentwicklung der Methodik zur Bestimmung der Rechenunsicherheit durchzuführen. Die internationale Zusammenarbeit zur besseren Nutzung von Ressourcen sowie der fachliche Erfahrungsaustausch sind durch das Projekt zu stimulieren.

Der Auftrag des STARS-Vertrages gewährleistet, dass am Paul Scherrer Institut (PSI) eine Gruppe von Experten mit adäquaten Rechenprogrammen zur Unterstützung der HSK vorhanden ist für die Durchführung von deterministischen Sicherheitsanalysen zur Überprüfung des Brennstoff- und Anlageverhaltens für alle schweizerischen Kernkraftwerke. Zudem kann die Expertengruppe zu sicherheitstechnischen Fragestellungen aus Teilbereichen der Kerntechnik Expertisen erstellen, die den Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigen.

Das STARS-Projekt steht unter der Projektleitung von Martin Zimmermann und wird innerhalb des Forschungsbereiches NES am PSI abgewickelt. Zwischen dem PSI - Projektteam und der HSK besteht eine gute und intensive Kommunikation, nicht zuletzt durch die sog. 'On-Call' - Arbeiten (Analysen zu aktuellen Themen, im Auftrag der HSK, die über einen separaten Vertrag verrechnet werden). Es finden vierteljährlich Statusgespräche statt, bei denen die gemachten Fortschritte und das weitere Vorgehen besprochen werden.

Bewertung der Projektarbeiten für das Berichtsjahr 2002

Für das Jahr 2002 konnten vom STARS-Team ein Grossteil der geplanten Ziele erreicht werden.

Im Rahmen des STARS-Vertrages werden von der STARS-Gruppe zur Simulation des Brennstoff-, Kern- und Anagenverhaltens die Rechencodes CASMO-4, SIMULATE-3, RETRAN-3D, CORETRAN, RAMONA, RELAP5/MOD3, TRAC-BF1, TRANSURANUS und FREY genutzt.

Im Berichtszeitraum wurden die Programme RETRAN-3D und CORETRAN für internationale Turbinenschnellschluss-Vergleichsrechnungen der Phase III angewendet (experimentelle Daten stammen von Peach-Bottom 2). Die Untersuchungen zur dreidimensionalen Leistungsverteilung zeigten, dass sich die Qualität eines bisher üblichen "vereinfachten" Berechnungsnachweises nur durch eine detaillierte dreidimensionale Modellierung der Neutronenkinetik überprüfen lässt.

Zur Validierung des Programms RETRAN-3D und zur Absicherung der Rechnungen zum 'On-Call 22' wurden von der STARS-Gruppe Level-Swell Experimente nachgerechnet. Die Experimente simulieren das Aufschäumen des Wasserspiegels im RDB eines Siedewasserreaktors bei einer

starken Druckentlastung, wie sie bei einem Frischdampfleitungsbruch auftreten kann. Die Validierungsrechnungen bildeten die Grundlage für eine gesicherte Aussage zur Austragung von kontaminiertem Kühlmittel über die Bruchstelle einer Frischdampfleitung.

Mit TRAC-BF1 wurde zur weiteren Validierung je ein Versuch der FIST-Testanlage für einen kleinen und grossen Leitungsbruch mit Erfolg nachgerechnet.

Stand der Wissenschaft ist es, in Bereichen in denen keine Versuche zur Verfügung stehen, oder in denen Versuche zu kostenintensiv sind, zur Validierung von Rechenprogrammen theoretisch stringente Referenzmethoden einzusetzen. Das Monte-Carlo Programm MCNP für Neutronik-Rechnungen und die Erweiterung MONTEBURNS für Abbrandrechnungen wurden zu diesem Zweck in Zusammenarbeit mit Los Alamos National Laboratory (LANL) auf einem Parallelrechner des PSI installiert und für einige Anwendungen erfolgreich genutzt.

Die HSK hat im Rahmen der Genehmigung höherer Brennstoffabbrände die schweizer Kernkraftwerke aufgefordert sich an internationalen Experimenten zum Nachweis ausreichender Sicherheitsmargen im Störfallbereich, insbesondere für reaktivitäts-induzierte Störfälle (RIA) und Kühlmittelverluststörfälle (LOCA), zu beteiligen. Die Kraftwerke sind dieser Aufforderung u.a. durch Bereitstellung von hoch abgebrannten Brennstäben gefolgt. Die STARS-Gruppe beteiligt sich mit parametrischen Auslegungsrechnungen unter Verwendung des Programms TRAC-BF1 an einem LOCA-Experiment im Halden-Reaktor in dessen Verlauf sich das Hüllrohr eines Brennstabes bei etwa 800°C bis 1100°C aufblähen soll.

Zur Quantifizierung der Rechenunsicherheit wurde mit der statistischen Software SUSE der Einfluss der Inputparameter des Programms CASMO-4 auf die berechnete Isotopenverteilung im Berichtszeitraum untersucht. Mit der Forschungsarbeit konnte die Funktionalität der Methode demonstriert werden. Die HSK erwartet, dass in Zukunft bei der Verwendung von "Best-Estimate"-Methoden für rechnerische Nachweise, vermehrt die Unsicherheit der Rechenergebnisse quantitativ ausgewiesen wird. Die Forschungsarbeit stellt sicher, dass in der STARS-Gruppe auf diesem Gebiet "know how" rechtzeitig gebildet wird.

Auf dem Gebiet der Stabilität von Siedewasserreaktoren sind Mitarbeiter der STARS-Gruppe im internationalen Projekt NACUSP führend tätig. Im Rahmen einer Promotionsarbeit wurde ein nicht lineares analytisches Modell zur Simulation des dynamischen Verhaltens eines Siedewasserreaktors bei Leistungsszillationen entwickelt, das zur Untersuchung wichtiger Modellparameter auf das Stabilitätsverhalten verwendet wurde. Dabei hat die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf die Anwendung von Systemcodes für die HSK grosse Bedeutung. Für die analytische Vorbereitung und Auswertung, eines von der HSK geforderten Stabilitätsexperiments im Rahmen der Leistungserhöhung des Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) wurde das Wissen der STARS-Gruppe im Auftrag des KKL's genutzt.

Im Rahmen der Schweizer Teilnahme am internationalen CABRI Water Loop Programm erhielt das PSI mit Unterstützung der HSK vom Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire die Dokumentation zum CABRI REP-NA 2 Experiment und den Brennstabcode SCANAIR.

Mittelfristig plant das PSI im Bereich dynamischer Brennstoffanalysen mehr Kompetenz aufzubauen. Dazu ist geplant den Brennstabcode FALCON zu beschaffen und einen Vergleich mit dem Brennstabcode SCANAIR durchzuführen.

Die HSK beabsichtigt die heute gültigen Grenzwerte der Energiefreisetzung im Brennstoff für einen RIA' Störfall (Swiss Curve) dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen. Die HSK hat in diesem Zusammenhang die US-Firma ANATECH mit FALCON-Rechnungen für MOX-Brennstoff beauftragt. Im Rahmen des 'On-Call 22' wurden von der STARS-Gruppe anlagenspezifischen Analysen ANATECH bereitgestellt. Zur Unterstützung wurde des Weiteren ein Mitarbeiter der STARS-Gruppe in die US geschickt. Es ist geplant, dass das PSI diese Rechnungen in Zukunft selbst durchführen kann.

Verzögerungen traten bei der Einführung des Dokumentenarchivs STARBase auf, das als wesentlicher Teil die Umsetzung des Qualitätsmanagementsystems (QMS) verzögerte. Die vorgesehene Pre-Zertifizierung des QMS der STARS-Gruppe konnte im Berichtszeitraum nicht erreicht werden.

Im Rahmen der 'On-Call' - Aufträge der HSK wurde während 2002 zusätzlich eine Expertise zur Abschaltsicherheit von defekten Steuerstäben einer Siedewasseranlage erstellt. Die Expertise

wurde auch deshalb von der HSK geschätzt, weil über die Fragestellung hinaus zusätzliche Aspekte der Löslichkeit von Borkarbid mit aufgegriffen wurden.

Bedeutung der Arbeiten für die HSK

Die HSK kann selbst keine unabhängige quantitative Überprüfung der vom Hersteller oder Betreiber eingereichten Störfallanalysen durchführen. Das Forschungsprojekt stellt sicher, dass ein qualifiziertes und gut ausgestattetes Expertenteam zur Durchführung von solchen Analysen vorhanden ist, dessen Arbeiten den Stand von Wissenschaft und Technik widerspiegeln.

Durch die "On-Call" - Arbeiten wird die Belastbarkeit der Rechenmethoden, sowie auch das Potential des STARS - Teams als Leistungserbringer erfolgreich bestätigt. Ausserdem ist das STARS – Team, mit seinen fachlich kompetenten und engagierten Projektmitarbeitern, nach wie vor ein sehr geschätzter Gesprächspartner im nationalen und internationalen Bereich der Nukleartechnik. Dies wurde auch vom 'Scientific Advisory Committee' (eine Beratergruppe des STARS - Projektes, bestehend aus internationalen Experten, die einmal pro Jahr tagt) bestätigt.

STARS

SICHERHEITSFORSCHUNG BEZÜGLICH TRANSIENTENANALYSE DER REAKTOREN IN DER SCHWEIZ

Autor und Koautoren	Martin A. Zimmermann
beauftragte Institution	Paul Scherrer Institut
Adresse	5232 Villigen PSI
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 310 27 33, Martin.Zimmermann@psi.ch , http://stars.web.psi.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	82611
Dauer des Projekts (von – bis)	01.01.2001 - 31.12.2004

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der erfolgreichen Teilnahme am internationalen Benchmark zum Turbinenschnellschluss überprüfte das Projekt STARS die Fähigkeit zur transienten Systemanalyse mit dreidimensionaler Neutronenkinetik in Siedewasserreaktoren im internationalen Rahmen. Sehr interessante Ergebnisse wurden mit der Doktorarbeit zum Stabilitätsverhalten von Siedewasserreaktoren erreicht, indem in RAMONA-Rechnungen ein stark von der Störungsamplitude abhängiges Stabilitätsverhalten nachgewiesen wurde, was auf das Vorliegen einer subkritischen Hopf-Bifurkation hinweist. Die Güte der Abbrandrechnung wurde anhand von Messdaten des ARIANE-Programmes überprüft (CASMO-4 und MONTEBURNS). Die Unsicherheitsanalyse wurde erstmals auf eine reaktorphysikalische Fragestellung (Abbrandrechnung) angewandt.

Ein wichtiger Schritt wurde erreicht mit der Implementierung von MCNPX als Referenzmethode für Neutronik-Probleme. Im Berichtsjahr trug das Projekt zu Auslegung des geplanten LOCA-Experimentes im Halden-Reaktor mit parametrischen Auslegungsrechnungen bei. Die Auswertung von am PSI durchgeführten Berstversuche diente der Validierung des transienten Brennstabprogrammes für LOCA-Anwendungen. Die LOCA-bezogene Validierung von TRAC-BF1 und entsprechende Arbeiten mit RETRAN-3D zum Anschwellen des Wasserniveaus nach einer Druckentlastung eines Siedewasserreaktors waren sehr stark von den Bedürfnissen der wissenschaftlichen Dienstleistungen bestimmt, die mit vier Aufträgen seitens HSK und 3 Aufträgen seitens KKL wiederum eine wichtige Rolle spielten. Dass Modifikationen in einem Kernkraftwerk direkt auf die Ergebnisse unserer Studien abgestützt wurden und sich im Test bewährten, darf als wichtiger Höhepunkt betrachtet werden. Dies trifft auch zu für die direkte Mitwirkung bei der Planung (Vorausrechnung) und der darauf folgenden Auswertung von Stabilitätstests.

Zur Verbesserung der Infrastruktur konnte das Archivsystem STARSBase in Betrieb genommen werden.

1. Projektziele

Mit dem Projekt STARS (*Sicherheitsforschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz*) werden die folgenden übergeordneten Ziele verfolgt:

- Bereitstellung einer breiten Expertise in den für die Durchführung von deterministischen Sicherheitsanalysen notwendigen Fachgebieten: Neutronik, Thermo-Hydraulik, Brennstab- und Anlageverhalten.
- Weiterentwicklung einer dem heutigen Stand der Technik genügender Methodik zur Analyse von Reaktor- und Anlage-Transienten (ohne schwere Unfälle) durch Forschungsarbeiten.

Entsprechend dieser Zielsetzung ergeben sich drei Arbeitsbereiche:

- Modellierung und Validierung
- Wissenschaftliche Dienstleistungen
- Forschung.

Die Arbeiten zur Modellierung und Validierung legen die Basis für die wissenschaftlichen Dienstleistungen zu Gunsten der HSK und der Kernkraftwerkbetreiber. Damit die im Projekt angewandte Analysemethodik auf dem neuesten Stand gehalten werden kann, sind fallweise Forschungsarbeiten notwendig. Damit kann auch die Weiterentwicklung des Know-hows der Projektmitarbeiter mit interessanten und anforderungsreichen Aufgaben gefördert werden. Für die Forschung werden teilweise auch EPFL-Doktoranden eingesetzt.

Im Berichtsjahr waren die folgenden Ziele gestellt:

- Komplettierung der anlagespezifischen Modelle für die Brennstabanalyse, Upgrade für Hochabbrand speziell für die transiente Brennstabanalyse; Validierung der transienten Brennstabanalyse anhand ausgewählter Experimente.
- Thermohydraulische Rechnungen für die Auslegung des Halden LOCA-Experiment abgeschlossen.
- Erfolgreicher Abschluss des Peach Bottom Turbine-Trip Benchmarks der OECD/NSC.
- Anwendung der Methodik zur Abschätzung der Rechenunsicherheit für ausgewählte Analysen.
- Validierungsrechnungen für TRAC-BF1 anhand von SET grösstenteils abgeschlossen; Input für die Simulation eines Integraltests erarbeitet (Penn-State LOCA Project).
- Doktorarbeit betr. Entwicklung statistischer Unsicherheitsmasse der Rechencodes gestartet.
- Erste Simulationsergebnisse zum Stabilitätsverhalten von SWR (EU-Programm **NACUSP**)
- Unterstützung bei der Planung geplanter Stabilitätsexperimente und erste Analyse der Messungen.
- Erweiterte Anwendungen des neu entwickelten analytischen Modells zur SWR-Stabilität.
- Pilot-Studie zur Anwendung Neuronaler Netzwerke für die Transientenklassifikation.
- Implementierung des QMS und Pre-Zertifizierung.
- Elektronisches Archiv operationell.

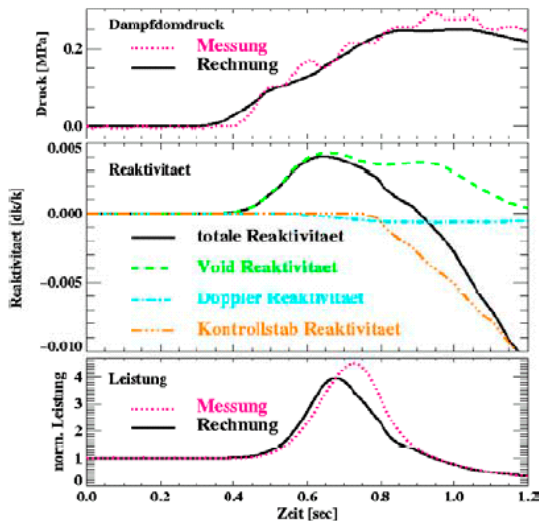
2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

In STARS sind Transientenanalysen mit dreidimensionaler Reaktorkinetik für Druckwasserreaktoren bereits gut etabliert [1]. Mit der Teilnahme am internationalen Turbinenschnellschluss-Benchmark (organisiert durch OECD/NSC) mit Rechnungen zu Phase I [2] und II [3] sollte diese Fähigkeit auf die Anwendungen in Siedewasserreaktoren ausgeweitet werden. Diese Aktivität konnte im Berichtsjahr mit der Einreichung der Resultate zur Phase III weitgehend abgeschlossen werden. Ziel des Benchmarks ist die Überprüfung der Leistungsfähigkeit der mit dreidimensionaler Neutronenkinetik gekoppelten transienten Systemprogramme in der Anwendung auf Transienten mit starker nuklearer Rückkoppelung, wie sie für Siedewasserreaktoren typisch sind. Als Grundlage dienen Messdaten eines vor Jahren im Siedewasserreaktor Peach-Bottom Unit 2 durchgeführten Experimentes: Mit der Schliessung der Turbineneinlassventile wird eine Druckwelle ausgelöst,

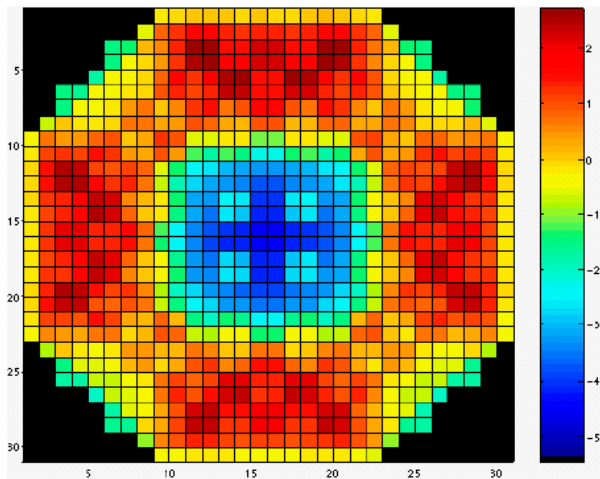
die durch die Dampfleitung in den Reaktor läuft; infolge der Kondensation des Dampfes kommt es daraufhin zu einer Leistungsexkursion, die zuerst durch die Reaktivitätsrückwirkung des Dampfes und später durch die Schnellabschaltung begrenzt wird.

Die dritte Phase befasste sich mit der integralen Systemrechnung, bei der die thermohydraulischen und die neutronenkinetischen Aspekte in Kopplung zu simulieren waren, nachdem Phase I die thermohydraulischen und Phase II die drei-dimensionalen neutronenkinetischen Aspekte separat untersuchte. Als Randbedingungen für Phase III wurden die gemessene Schliess- des Turbinenschnellschlussventils und die gemessene Öffnungszeit des Bypassventils mit den entsprechenden Startzeiten vorgegeben. PSI benutzte das transiente Systemprogramm *RETRAN-3D* für die Phasen I und III sowie das Kerndynamikprogramm *CORETRAN* für die Phase II.

Nach dem Schliessen des Turbinenschnellschlussventils entsteht eine Druckwelle, die sich unter Abschwächung in das Reaktor Druckgefäß fortpflanzt. Dort verursacht der Druckanstieg die teilweise Kondensation des Dampfes im Kern, was zu einem starken Leistungsanstieg führt. Durch das Signal "Leistung hoch" wird die Reaktorschnellabschaltung ausgelöst, die allerdings erst nach dem Einfahren der Abschaltstäbe wirksam wird. Mit der höheren Leistung wird wiederum mehr Dampf gebildet, der wegen seiner negativen nuklearen Rückwirkung leistungsbegrenzend wirkt; die Reaktorleistung wird wiederum kleiner. Nach dem Einfahren der Abschaltstäbe wird der Reaktor unterkritisch. Diese Sequenz ist in der Rechnung mit *RETRAN-3D* (mit drei-dimensionaler Darstellung der Neutronenkinetik im Kern) insgesamt ziemlich gut wiedergeben (siehe Figur 1a). Allerdings wird die maximale Reaktorleistung etwas unterschätzt.



Figur 1a Zeitliche Entwicklung des Druckes im Dampfdom, der Summe und der einzelnen Komponenten der Reaktivität sowie der Kernleistung berechnet mit *RETRAN-3D*. Die Übereinstimmung mit dem gemessenen Druck ist gut. Die berechnete Reaktorleistung unterschätzt die gemessene Leistung leicht.



Figur 1b Darstellung der mit *CORETRAN* berechneten radialen Umverteilung des Neutronenflusses zum Zeitpunkt der maximalen Leistungsentwicklung während der Turbinen-Schnellschluss-Transiente. Dargestellt ist die prozentuale Abweichung von der Ausgangsverteilung auf einer Skala von -5 % (blau) bis + 2% (rot).

Eine genauere Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der verschiedenen Beiträge zur Reaktivität zeigt (siehe Figur 1a), dass die Reaktorleistung bei etwa 0.45 s anzusteigen beginnt, weil die Void-Reaktivität infolge der durch die Druckerhöhung verursachte Dampfkondensation zunimmt. Das Leistungsmaximum tritt bei etwa 0.65 s (etwas früher als gemessen). Die darauf folgende die Reduktion der Reaktorleistung wird durch eine Abnahme der positiven Void-Reaktivität verursacht. wegen der erhöhten Reaktorleistung steigt die Dampfproduktion an, die im Wettkampf steht mit der durch die anhaltende Druckerhöhung verursachte Dampfproduktion (Kondensation). Im Ergebnis führt die leichte Reduktion des Dampfgehaltes zur erwähnten

Leistungsreduktion. Nach etwa 0.8 s beginnt die negative Reaktivität der einfahrenden Kontrollstäbe wirksam zu werden und lässt den Reaktor bei etwa 0.95 s unterkritisch werden. Die Doppler-Rückwirkung (Brennstofftemperatur) ist wegen der vergleichsweise viel stärkeren Void-Rückwirkung nur von geringerer Bedeutung für das Verständnis dieser Transiente.

Die Druckwelle trifft weitgehend homogen auf den Kernaustrittsquerschnitt auf. Die Erwartung einer axisymmetrische Antwort des Kernes ist deshalb naheliegend und bildete traditionellerweise die Basis für die Rechtfertigung der eindimensionalen Reaktorkinetik. Die nun durchgeführten Rechnungen mit dreidimensionaler Kinetik erlaubten die Überprüfung dieser Annahme. Tatsächlich zeigen die mit *CORETRAN* berechneten Neutronenflüsse nur vergleichsweise geringe Umverteilungen (siehe Figur 1b). Bemerkenswert ist aber, dass sich die Reaktorleistung tendenziell vom Zentrum in vier symmetrisch angeordnete Zonen in der Nähe des Kernrandes verlagert. Sicher trägt das Kontrollstabmuster zu dieser Umverteilung bei, unterschiedliche thermohydraulische Eigenschaften der verschiedenen Brennelementtypen bilden weitere Erklärungselemente; die genauen Ursachen werden gegenwärtig noch weiter untersucht. Ein gutes Verständnis ist insbesondere wichtig bei der Festlegung von thermohydraulisch vereinfachten Kernmodellen, bei denen die vielen Brennelemente jeweils zu relativ wenigen Kühlkanäle zusammengefasst werden.

Insgesamt belegen diese Untersuchungen deutlich, dass sich die Güte der Ergebnisse einer vereinfachten Modellierung nur anhand der Resultate eines „vollständigen“ Modells mit dreidimensionaler Neutronenkinetik prüfen lässt.

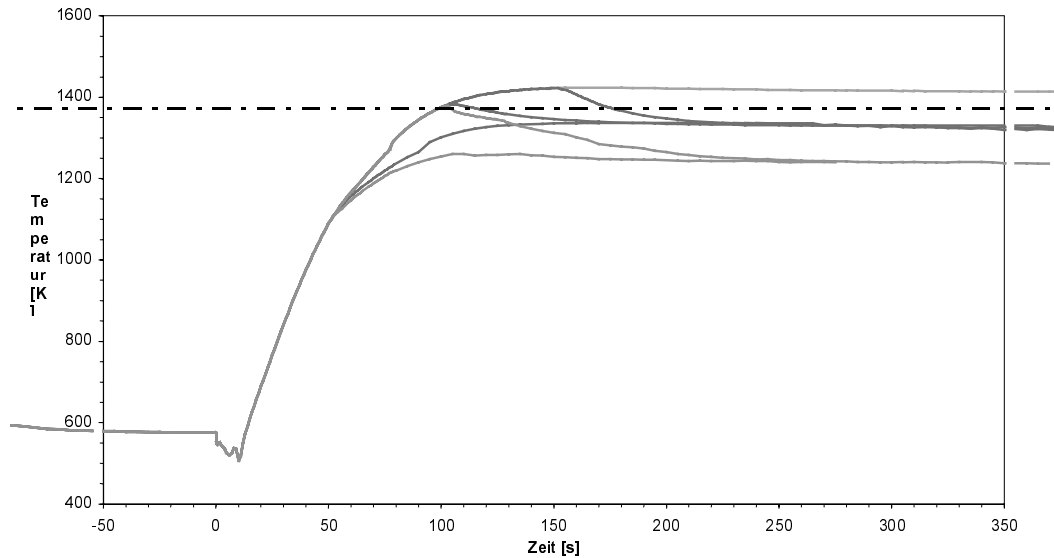
International wird die Gültigkeit der bestehenden brennstoff-bezogenen Sicherheitslimiten intensiv diskutiert. Mehrere internationale Forschungsprogramme untersuchen unterschiedlichste Aspekte, sowohl reaktivitäts-induzierte Unfälle (RIA) wie auch Kühlmittelverlustunfälle (LOCA). Auch die Schweiz beteiligt sich an einigen dieser Programme, so auch am Halden Projekt, wo gegenwärtig ein diesbezüglicher Versuch zum Brennstabverhalten während eines Kühlmittelverlustunfalles (LOCA) geplant ist.

Mit stetig höher werdender Abbrände steigen die Innendrucke der hochabgebrannten Brennstäbe. Dies könnte während der Druckentlastung eines LOCA zum Hüllrohr-Aufblähen führen, da der im Normalbetrieb höhere Ausendruck plötzlich sehr viel kleiner wird als der Hüllrohr-Innendruck. Falls die Möglichkeit der axialen Relokation des hochabgebrannten Brennstoffs in die aufgeblähte Zone besteht, könnte dies wegen der postulierten lokalen Akkumulation zu einer lokal erhöhten Wärmeproduktion führen. Dies wiederum könnte zu überhöhten Hüllrohrtemperaturen und schliesslich zum Hüllrohrversagen führen. Im Halden-Reaktor soll dies experimentell untersucht werden. Ziel des geplanten Experimentes ist nicht die möglichst realistische Simulation einer LOCA-Transiente, sondern die hoch-abgebrannten Brennstab-Proben sollen unter LOCA-ähnlichen unter möglichst kontrollierten Bedingungen zum Aufblähen gebracht werden. Mit einer langsamen Abkühlung, also dem Verzicht auf die Simulation des Wiederbenetzungsvorganges, werden weitere mechanische Störungen vermieden, die zu einer ungewollten weiteren Relokation des Brennstoffes führen könnten. Die gewählte Zieltemperatur von 800 °C oder 1100 °C wird nach der Druckentlastung des Test-Kreislaufes erreicht, der danach nur noch mit Dampf gefüllt sein wird. Die Zieltemperatur wird anschliessend während etwa 5 min möglichst konstant gehalten. Falls nötig besteht die Möglichkeit zum Einsprühen von Wasser in die Testzone.

STARS beteiligte sich am geplanten LOCA-Experiment vorerst mit parametrischen Auslegungsrechnungen, wozu das thermohydraulische Systemprogramm *TRAC-BF1* eingesetzt wurde.

Die Modellierung des Testkreislaufes stellte einige Probleme, weil *TRAC-BF1* den Wärmetransport durch Strahlung nur vom Hüllrohr zur nächsten Wand zulässt, nicht aber von dieser zu einer zweiten Wand, wie es eigentlich die Konstruktion des Kreislaufes erforderte. Nachdem eine Modifikation des Rechenprogrammes verworfen werden musste, blieb nur die Entwicklung eines vereinfachten Modelles des Kreislaufes möglich das den in den geplanten Versuchen sehr wichtigen Wärmetransport zur Senke äquivalent darstellt. Leider kann dabei die Strömungsführung nicht genau wiedergeben konnte. Dieser Mangel bleibt allerdings von untergeordneter Bedeutung, da der Dampf nach der Druckentlastung des Kreislaufes kaum mehr strömt. Ausserdem wurde mittels analytischer Rechnungen gezeigt, dass während der wichtigen Phase nach der Druckentlastung keine grossen Fehler entstehen in der Berechnung der Hüllrohrtemperatur.

Die von einer internationalen Expertengruppe vorgegebene Aufheizgeschwindigkeit wird durch lineare Stableistung bestimmt. Damit anschliessend Zieltemperatur erreicht werden kann, muss die Probe durch Einsprühen von Wasser gekühlt werden. Deshalb bestand die Aufgabe der parametrischen Rechnungen in der Ermittlung der Werte für die lineare Stableistung, für Einspeiserate des Spraysystems sowie für den Sprühbeginn (siehe Figur 2).



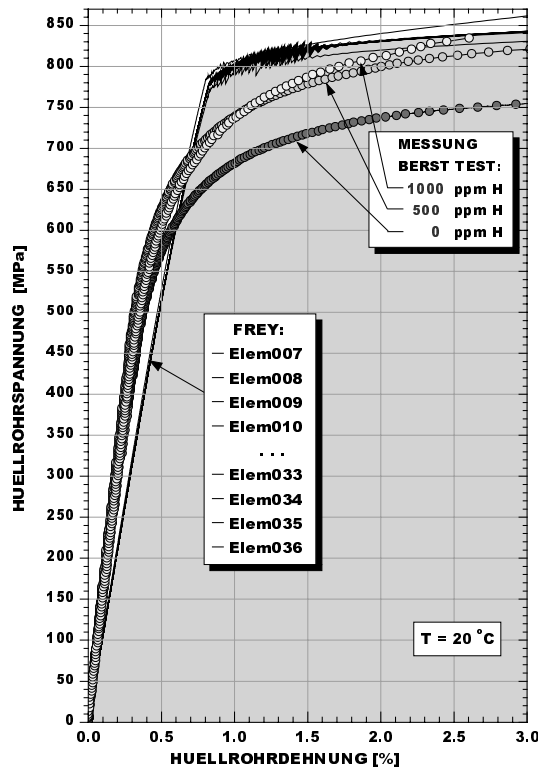
Figur 2 Zeitliche Entwicklung der Hüllrohrtemperatur bei einer Stableistung von 30 W/cm für drei Massenströme des Spray-Systems (von oben nach unten: 0, 2 und 4 g/s) mit unterschiedlicher Startzeit. Die horizontale Linie markiert eine Zieltemperatur von 1100 °C.

Ein wichtiger Nebennutzen dieser Arbeiten ergab sich, indem im Programmmodul für die Berechnung der Wärmestrahlung ein Fehler entdeckt wurde, der sich bei „normalen“ LOCA-Rechnungen nicht bemerkbar machen würde. Die für nächstes Jahr geplanten Messungen im LOCA-Testkreislauf bilden deshalb auch eine gute Basis für die Überprüfung der Strahlungsrechnung in *TRAC-BF1*.

Eine logische Ergänzung bilden die LOCA-bezogenen Arbeiten mit dem transienten Brennstabprogramm *FREY*. Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem NFIR-Projekt wurden im Hotlabor des PSI mehrere Berst-Versuche mit hydrierten Hüllrohren durchgeführt. Die dabei auftretenden mechanischen Belastungen des Hüllrohrs sind ähnlich denjenigen, die während eines LOCA auftreten. Dies gilt besonders für Brennstoff mit hohem Abbrand, bei dem der Hüllrohr-Innendruck maximale Werte annimmt und sich daher nach einem LOCA über das Hüllrohr eine maximale Druckdifferenz ausbildet.

Einige Berst-Versuche bei Raumtemperatur (20 °C) wurden mit *FREY* nachgerechnet. Zuerst musste ein detailliertes Rechenetz für die mechanische Berechnung aufgebaut und ausgetestet werden, was sich als anspruchsvolle Aufgabe erwies. Zu raschen und systematischen Erstellung dieser Rechenetze wurde ein Hilfsprogramm erstellt.

Als wichtiges Ergebnis dieser Studie zeigte sich, dass Berst-Versuch mit *FREY* insgesamt recht gut wiedergeben werden kann. Man kann daher erwarten, dass sich *FREY* auch für LOCA-Anwendungen bewähren wird. Im weiteren stellte sich heraus, die von *FREY* verwendeten mechanischen Eigenschaften keine Abhängigkeit vom Wasserstoffgehalt berücksichtigen (siehe Figur 3). Diese Abhängigkeit ist von grosser Bedeutung für die Analyse von Hüllrohren hochabgebrannter Brennstäbe.



Figur 3 Die Resultate mit *FREY* berechneten Resultate eines Berstversuches überschätzen die Spannung im plastischen Bereich: Bei 2 % Hüllrohrdehnung ermittelt *FREY* eine Spannung von etwa 830 MPa, während die Messung für nicht-hydriertes Hüllrohr (rote Kurve) nur einen Wert von etwa 745 MPa ergibt. Zusätzlich zeigen sie keine Abhängigkeit von der Wasserstoffkonzentration im Hüllrohr. Die Abweichung von den Messresultaten im elastischen Bereich (leichte Unterschätzung) lassen sich vermutlich mit Probeneffekten erklären.

Ein Mitarbeiter des Projektes konnte während eines längeren Aufenthalts bei ANTECH, dem Code-Entwickler von *FREY*, wertvolle Erfahrung mit dem Nachfolge-Programm *FALCON* gewinnen, das speziell im Hinblick auf die Modellierung von hochabgebrannten Brennstäben weiterentwickelt wurde. Von besonderem Interesse waren Verbesserungen für die RIA-Analyse [4] bei hohem Abbrand. Durch seine Beiträge zur Validierung von *FALCON* erhielt er zudem guten Einblick in dessen theoretischen Grundlagen. Eine Beschaffung dieses Programms ist vorgesehen.

Neben der thermomechanischen Beschreibung hochabgebrannten Brennstoffes bildete auch die neutronische Simulation eine wichtige Grundlage für die Transientenanalyse. Unter Benutzung von gemessenen Isotopenkonzentrationen in hochabgebrannten Brennstoffproben des ARIANE-Programmes wurden die in STARS eingesetzten Rechenprogramme zur Abbrand-Berechnung validiert.

Das Hotlabor des PSI beteiligte sich seinerzeit (zusammen mit zwei weiteren Mess-Labors) am ARIANE-Programm mit dem Ziel der Qualifizierung der chemischen Messmethoden. Die Brennstoffproben wurden aufgelöst und die identischen Probenlösungen wurden an die drei teilnehmenden Mess-Labors verteilt. Diese analysierten sie quantitativ mit je unterschiedlichen Methoden in bezug auf Aktiniden und wichtige Spaltprodukte. Für viele der untersuchten Isotope wurden belastbare Konzentrationswerte erarbeitet, einige Messwerte mussten aber leider wegen Qualitätsmängeln verworfen werden.

Die Messdaten von ARIANE bilden auch eine gute Basis für die Validierung von Rechenprogramme für die Bestimmung des Abbrandes, wofür in STARS das Programm *CASMO-4* verwendet wird. Für die hochabgebrannten UO_2 - und MOX-Proben, die aus Schweizer Reaktoren stammten, wurden die entsprechenden Rechenmodelle für *CASMO-4* erstellt. Von grosser Bedeutung war insbesondere eine genaue Modellierung der Leistungsgeschichte der verschiedenen Proben. (Teilweise musste auf die detailliertere Leistungsgeschichte aus unseren eigenen Kernfolgerechnungen zurückgegriffen werden.)

Mit Ausnahme der meisten Am-Isotope konnte für die Aktiniden eine generell gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung festgestellt werden. Auch für viele Spaltprodukte bestätigte sich dieser Befund, allerdings mussten teilweise auch grosse Abweichungen verzeichnet werden, so für die Isotope ^{109}Ag , ^{103}Rh , ^{129}I , ^{99}Tc , ^{155}Gd , ^{101}Ru , ^{106}Ru , ^{125}Sb .

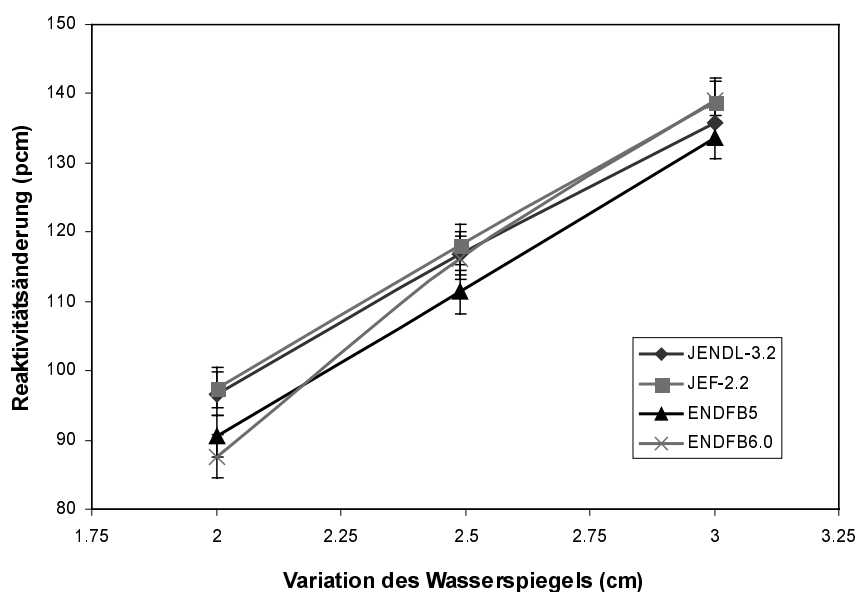
Auf Grund von Literaturstudien und eigenen Sensitivitätsstudien wurde klar, dass verschiedene Parameter der Leistungsgeschichte einen beträchtlichen Einfluss auf die berechneten Isotopenkonzentrationen haben. Für viele dieser Parameter liegen keine genügend präzisen Werte vor oder die Leistungsgeschichten wurden zu summarisch beschrieben. Es war deshalb naheliegend, die Unsicherheit der CASMO-Rechnungen auf der Basis der früher für thermohydraulische Analysen angewandten statistischen Methodik abzuschätzen versuchen.

Die für die Verbindung von CASMO-4 mit der statistischen Software SUSA notwendigen Programme wurden entwickelt und erfolgreich ausgetestet. In einem ersten Schritt wurde nur der Einfluss von Variationen der über den Input von CASMO-4 zugänglichen Parameter zur Definition der Geometrie des Brennelementes (inkl. Leistungsgeschichte) sowie der Einfluss der Variationen der Vielgruppen-Querschnitte untersucht. Ausgehend von angenommenen (subjektiven) Häufigkeitsverteilungen konnten die sich daraus ergebenden Verteilungen ausgewählter Isotopenkonzentrationen ermittelt werden. Damit ist die Funktionalität der neuen Methodik für die Abschätzung der Rechenunsicherheit von CASMO-4 gezeigt. Um zu belastbaren Aussagen über die Rechenunsicherheit von CASMO-4 zu kommen, müssen die angenommenen Unsicherheitsbereiche im nächsten Schritt durch objektiv begründbare Verteilungen ersetzt werden.

Da nicht immer Messdaten zur Überprüfung der in der Sicherheitsanalyse eingesetzten Rechenprogramme zur Verfügung stehen, kommt dem Einsatz von theoretisch stringenten Referenzmethoden ein grosser Stellenwert zu. Mit der parallelen Implementierung des Monte-Carlo-Programmes MCNPX auf dem MERLIN-Cluster konnte eine für Neutronik-Rechnungen ein wichtiger Schritt in diese Richtung erfolgreich getan werden. In einer der ersten Studie wurde die Abhängigkeit der durch kleine Änderungen des Wasserspiegels verursachten Reaktivitätsänderungen von den vier nuklearen Datenbasen in einem Nullleistungsreaktor untersucht.

Als erstes wurde ein sehr detailliertes Rechennetz entwickelt für den CROCUS Reaktor, der an der EPFL hauptsächlich für die Ausbildung der Studenten betrieben wird. Weil wegen den kleinen Variationen des Wasserspiegels im Reaktor nur kleine Reaktivitätsänderungen erwartet sehr klein sind, wurden für jeden Rechenfall 100 Millionen Neutronen verfolgt. Diese sehr umfangreichen Rechnungen konnten nur deshalb innerhalb vernünftiger Fristen ausgeführt werden, weil MCNPX in Zusammenarbeit mit den Code-Entwicklern von Los Alamos National Laboratory (LANL, USA) am PSI auf dem Parallelrechner MERLIN installiert wurde. Im wesentlichen zeigen die mit den nuklearen Bibliotheken JENDL-3.2, JEF-2.2, ENDF-B5 und ENDF-B6.0 berechneten Werte für die Reaktivitätswerte der Wasserspiegeländerungen keine wesentlichen Unterschiede (siehe Figur 4). Bei der Bewertung dieses Befundes darf nicht vergessen werden, dass die mit dem stochastischen Programm MCNPX ermittelten Resultate notwendigerweise eine gewisse statistische Streuung aufweisen (die in der Figur ausgewiesen ist).

Mit MCNPX steht nun ein dem Stand der Wissenschaft entsprechendes Werkzeug für Referenzrechnungen zur Verfügung. Es wurde bereits zur Absicherung der reaktorphysikalischen Berechnung von MOX-Kernen wie auch Kernen mit teilweiser Beladung vom am PSI entwickeltem IMF-Brennstoff verwendet [5].



Figur 4 Reaktivitätsänderung für drei verschiedene Änderungen des Wasserspiegels im CROCUS-Reaktor (EPFL), mit dem Monte-Carlo Programm *MCNPX* berechnet unter Verwendung der vier nuklearen Bibliotheken JENDL-3,2, JEF-2.2, ENDF B5 und ENDF B6.0. Unter Berücksichtigung der statistischen Streubreite unterscheiden sich die mit *MCNP* berechneten Reaktivitätswerte nicht.

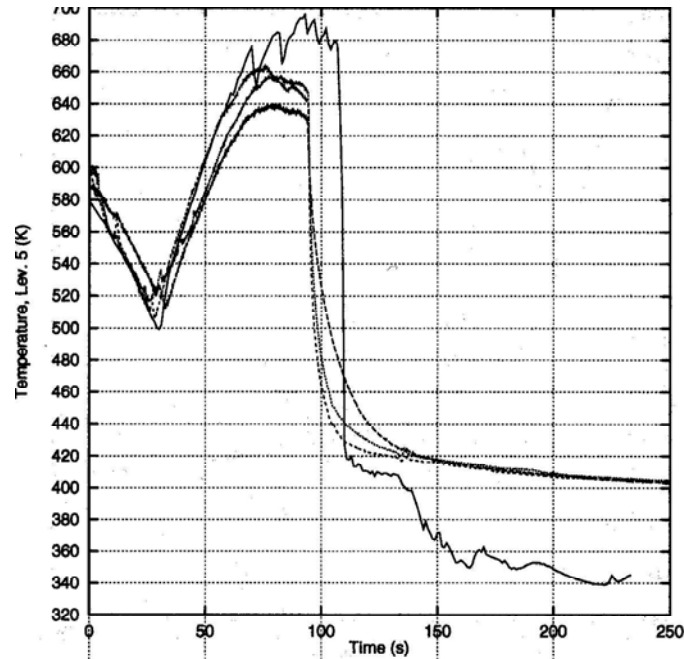
Ebenfalls in Zusammenarbeit mit LANL wurde das Programm *MONTEBURNS* installiert, einer Kopplung von *MCNPX* und dem gut bekannten Abbrand-Programm *ORIGEN-2.1*. Damit können auch Abbrandprobleme mittels Monte-Carlo-Methoden untersucht werden.

Als erste Anwendung wurde eine MOX-Probe des ARIANE-Programms analysiert. Die mit *MONTEBURNS* berechneten Isotopenkonzentrationen verglichen sich bis auf wenige Ausnahmen gut mit den gemessenen Konzentrationen. Insgesamt waren die mit *MONTEBURNS* erzielten Resultate leicht besser als diejenigen von *CASMO-4*, dies allerdings bei einem sehr viel grösseren Rechenaufwand von *MONTEBURNS*. Im Verlauf dieser Arbeiten zeigte sich sehr deutlich, dass auch die Fähigkeit zur Erweiterung der bestehenden nuklearen Bibliotheken für die problemspezifischen Bedingungen (z. B. für die Brennstoff-Temperatur) aufgebaut werden.

Auch bei den thermohydraulischen Codes besteht Bedarf nach weiterer Validierung, besonders im Zusammenhang mit der Analyse der Kühlmittelverlustunfälle in Siedewasserreaktoren, wozu das Programm *TRAC-BF1* verwendet wird. Nach den Nachrechnungen der Wiederbenetzungsversuche in den „Separate Effect“ Testanlagen NEPTUN (PSI) und FLECHT/SEASET (USA) im Vorjahr konzentrierten sich die Arbeiten während des Berichtsjahrs auf die Analyse der Integraltests in der amerikanischen Testanlage FIST. In dieser Anlage wurden die Höhenverhältnisse eines modernen Siedewasserreaktors exakt nachgebildet. Dadurch können die während bestimmter Phasen eines Kühlmittelverlust-Unfalles vor allem durch die Schwerkraft bestimmten Strömungsverhältnisse möglichst genau wiedergegeben werden. Die Anlage stellt zwar nur einen kleinen Ausschnitt des Kernbereiches eines modernen Siedewasserreaktors dar, der einem Brennelement entspricht, dennoch sind sämtliche Noteinspeise- und die Druckentlastungssysteme nachgebildet. Fluid-Volumina wie auch die Reaktorleistung sind volumen-skaliert und entsprechen dem Massstab 1/624.

Vor Jahren wurden in dieser Anlage sowohl Tests mit Grossen wie auch mit Kleinen Brüchen gefahren. Viele dieser Messungen sind öffentlich zugänglich.

Zur Validierung von *TRAC-BF1* wurde je ein Szenarium ausgewählt und mit gutem Erfolg nachgerechnet. Die guten Ergebnisse für den Grossen Bruch sind in Figur 5 wiedergegeben: Die maximale Hüllrohrtemperatur wird nur um etwa 30 K überschätzt, der zeitliche Ablauf, insbesondere der Zeitpunkt der Wiederbenetzung, sind in der Simulation ziemlich gut wiedergegeben.

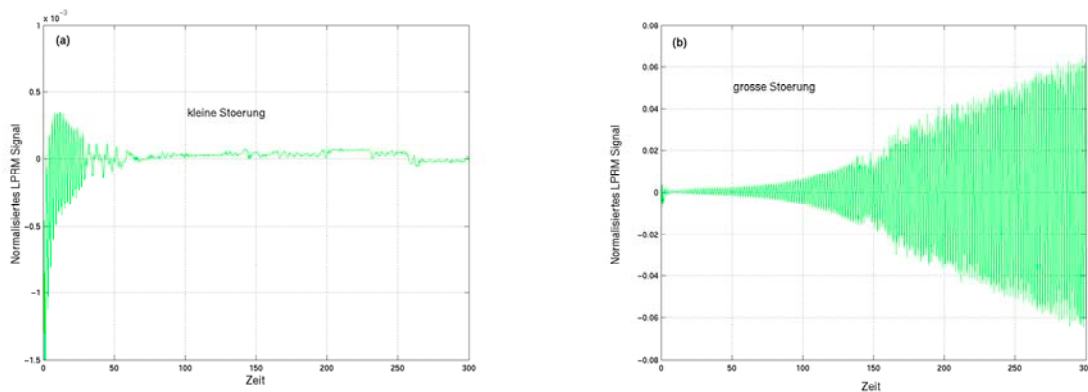


Figur 5: Vergleich der berechneten mit der in der Testanlage FIST gemessenen maximalen Hüllrohrtemperatur für ein Szenarium, wie es bei einem grossen Bruch in einem Siedewasserreaktor erwartet würde. Die Rechnung überschätzt die gemessene maximale Hüllrohrtemperatur um etwa 30 K, gibt aber den generellen Verlauf sehr gut wieder.

Im Auftrag der HSK wurde der nach einem Bruch der Dampfleitung mögliche Austrag von Reaktorwasser in das Containment mit *RETRAN-3D* in Abhängigkeit von verschiedenen anlagebedingten Randbedingungen parametrisch untersucht. Von ausschlaggebender Bedeutung ist im Zusammenhang mit diesen Szenarien, wie stark und wie schnell das Wasserniveau im Reaktor als Folge der Druckentlastung ansteigt. Mit der Nachrechnung einiger thermohydraulischen Versuche zum Aufschäumen des Wasserniveaus nach einer Druckentlastung konnte kurzfristig gezeigt werden, dass dieses Phänomen mit *RETRAN-3D* bei geeigneter Wahl des Rechnetzes ziemlich gut wiedergegeben wird.

Stabilitätsanalyse für Siedewasserreaktoren ist ein gut etabliertes Fachgebiet in STARS [6]. Das theoretische Verständnis der beim Instabilwerden eines Siedewasserreaktors auftretenden Vorgänge wird gegenwärtig mit einer Doktorarbeit vertieft. Dazu wurde ein nichtlineares analytisches Modell entwickelt [7], das im Berichtsjahr auf zwei Kernkanäle erweitert wurde. Mit der Berücksichtigung des fundamentalen und des 1. Lambda-Modes für die Neutronenkinetik können sowohl globale wie auch regionale Leistungsschwingungen untersucht werden. Der Einfluss wichtiger Modellparameter auf das Stabilitätsverhalten wurde analysiert [7], [8], [9] und schliesslich wurde auch das Bifurkationsverhalten des analytischen Modells [10] untersucht.

Ein wichtiges Thema bildet die Anwendung der gewonnen theoretischen Einsichten auf die Interpretation der mit den herkömmlichen Rechencodes (*RAMONA*) berechneten Resultate. Dazu konnten wichtige Ergebnisse erzielt werden: Stört man das Rechen-Modell eines Siedewasserreaktors, der als in einem instabilen Arbeitspunkt betrieben angenommen wird, mit einer kleinen Reaktivitätsstörung, so klingen die dadurch erzeugten Schwingungen des Neutronenflusses nach kurzer Zeit ab. Erhöht man jedoch die Amplitude der Reaktivitätsstörung stark (um das 40-fache), entsteht eine angefachte Schwingung, die sich zu einem sog. Grenzyklus entwickelt. Auf Grund der vorgängigen Untersuchungen lässt sich vermuten, dass es sich bei diesem Phänomen um eine sog. unterkritische Hopf-Bifurkation handelt.



Figur 6: Beide Figuren zeigen das zeitliche Verhalten des berechneten lokalen Neutronenfluss, wie es mit den LPRM-Detektoren gemessen würde. Auf der linken Figur wurde das analytische Modell des Siedewasserreaktors mit einer kleinen Störung gestört, worauf eine abklingende Schwingung entsteht. Auf der rechten Figur sind die entsprechenden Resultate nach einer grossen Störung (40 mal grössere Amplitude) dargestellt. Sie zeigen eine angefachte Schwingung, die sich zu einem (instabilen) Grenzyklus entwickelt.

Ein Projekt wie STARS erfordert einen beträchtlichen Einsatz zum Unterhalt einer effizienten Infrastruktur. So wurde im Berichtsjahr ein Softwaresystem entwickelt, das die Kernfolgerechnung weitgehend automatisiert und die Speicherung der sehr vielen Eingabe- und Datenfiles systematisiert. Dazu gehört aber auch, dass Projektergebnisse im Überblick zusammengefasst und publiziert werden [11], [12], [13], [14].

Nach einer sorgfältigen Evaluation konnte im Berichtsjahr endlich das Dokumentenarchivsystem *STARSB* durch die Firma *Imageware* (Ittigen) auf einem speziellen PSI-Rechner installiert. Erste Tests wiesen auf Schwachstellen in der Einbindung in die PSI-Software-Umgebung hin, die leider erst gegen Ende 2002 behoben werden konnten. In *STARSB* werden in Zukunft die Dokumentation des QMS sowie sämtliche vom Projekt STARS erzeugten Dokumente kontrolliert abgelegt und den berechtigten Benutzern zur Verfügung gestellt.

Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit der HSK (BFE) ist gewohnt intensiv: Die Resultate der wissenschaftlichen Dienstleistungen im direkten Auftrag (während des Berichtsjahres wurden 4 "On-Call"-Aufträge, darunter 2 Expertengutachten, ausgeführt), wie auch ausgewählte Ergebnisse der übrigen Projektarbeit unterstützen die Aussichtstätigkeit der HSK direkt. Erfahrene Projektmitarbeiter werden zudem häufig als Experten zu Beratungen herangezogen.

Auch mit den Kernkraftwerken bestand im Berichtsjahr eine gute und teilweise intensive technische Zusammenarbeit, dies nach Absprache mit der HSK. Ein Höhepunkt stellte der Abschluss von (mehreren) Untersuchungen zum Verhalten des Speisewassersystems nach dem Turbinenschnellschluss (Siedewasserreaktor) dar: Die auf Grund dieser Studien vorgenommenen Anlagemodifikationen bestanden den Anlagetest im letzten Herbst erfolgreich. Mit der erfolgreichen Vorausrechnung der meisten der ebenfalls im letztem Herbst durchgeführten Stabilitäts-Experimente konnte die Leistungsfähigkeit der Stabilitätsanalyse demonstriert werden.

Ein Mitarbeiter des Projekts wirkt in der neuen Expertengruppe „Sicherheitsaspekte beim Brennstoff“ mit, die mit Vertretern der Kernkraftwerke, der HSK und des PSI bestellt wurde.

Der im Rahmen des Projektes forschende Doktorand ist an der EPFL immatrikuliert. Diese Zusammenarbeit wird begünstigt durch die Tatsache, dass der Laborleiter gleichzeitig an der EPFL den Lehrstuhl für Reaktorphysik und Systemverhalten innehat.

Internationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr war die Zusammenarbeit mit folgenden Institutionen wichtig:

- Universität Illinois, USA, zur nichtlinearen Stabilitätsanalyse (Austausch von Doktoranden)
- Universität Valencia, Spanien, zur Stabilitätsanalyse von SWR
- Studsvik / Scandpower, Schweden / Norwegen / USA, zu Unterhalt und Modifikation von CASMO-4, SIMULATE-3, RAMONA-5
- Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, USA zum Unterhalt hauptsächlich von RETRAN-3D (Computer & Simulation Inc., Idaho Falls, ID, USA)
- Penn State University (PSU), USA, zum Unterhalt von TRAC-BF1
- Los Alamos National Laboratory (LANL), USA für Monte-Carlo Analyse mit MCNPX und MONTEBURNS (Monte-Carlo mit Abbrand)

Das Arbeitsgebiet Stabilitätsanalyse von Siedewasserreaktoren profitiert sehr stark von der Teilnahme am EU-Projekt **NACUSP** (FIKS-CT2000-00041), wofür ein Mitarbeiter des Projektes die technische Führung des entsprechenden Arbeitspakets übernahm.

Die aktive internationale Zusammenarbeit wird auch durch die Tatsache unterstrichen, dass das diesjährige CMS/FMS European User Group Meeting am PSI stattfand.

Mit dem OECD-Projekt **HALDEN** besteht eine aktive Zusammenarbeit bei der Auslegung und später bei der Analyse des geplanten LOCA-Experiments (IFA-650) mit hochabgebranntem Brennstoff. Der dafür notwendige Brennstoff wird von Schweizer KKW's zur Verfügung gestellt. Die erhofften Ergebnisse sind für die Bewertung der Sicherheit hochabgebrannter Brennstoffe wichtig.

Ein Mitarbeiter war zudem als Experte für die IAEA tätig.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Das mit internationalen Fachleuten besetzte wissenschaftliche Beratungsgremium des Projektes STARS hielt an seiner Sitzung im Frühjahr fest, dass der Aufbau der Analysemethodik im wesentlichen erfolgreich abgeschlossen werden konnte und dass die bisher erbrachten Leistungen hoher Qualität denjenigen eines „technical support centers“ der HSK entsprechen. Die Experten empfahlen, den Aufwand für die Validierung der gegenwärtig benutzten Rechenprogramme künftig zu reduzieren und den Aufbau neuer Analysen und vermehrte Forschung zu fördern. Untersuchungen zur Abschätzung der Rechenunsicherheit sowie zum transienten und stationären Verhalten von hochabgebrannten Brennstäben sollen mehr Gewicht erhalten. Dazu ist die Beschaffung neuer Rechenprogramme notwendig.

Die meisten der für das Jahr 2002 anvisierten Ziele konnten erreicht werden. Unerwartete Probleme und damit verbunden eine verspätete Inbetriebnahme des Dokumentenarchivs STARSBase (Ende 2002) führten zur einer entsprechenden Verzögerung bei der Umsetzung des QMS. Deshalb konnte die Pre-Zertifizierung des QMS nicht erreicht werden.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass im Berichtsjahr erstmals Ergebnisse von wissenschaftlichen Dienstleistungen im Auftrag eines KKW direkt als Basis für Anlagemodifikationen dienten. Sie belegt die hohe Glaubwürdigkeit der im Projekt STARS geleisteten Arbeit und die Kompetenz der Projektmitarbeiter.

Die Expertise der Projektmitarbeiter wird zunehmend national und teilweise auch international genutzt, was mitunter die finanzielle Basis des Projektes zu verbreitern hilft.

Wiederum negativ wirkten sich fehlende Finanzen bei EPRI aus. Infolge der Deregulierung in der amerikanischen Betreiberindustrie reduzierte sich die finanzielle Basis für den Unterhalt und die

Weiterentwicklung des transienten Systemprogramms *RETRAN-3D* und des dreidimensionalen Kerndynamikprogramms *CORETRAN* stark. Glücklicherweise konnte für *RETRAN-3D* ein Unterhaltsvertrag abgeschlossen werden, wogegen die Unterstützung für *CORETRAN* weggebrochen ist. Mit der Vorgabe, die bestehenden Investitionen (Aufbau und Validierung der Kernmodelle) bestmöglichst zu schützen, wurde deshalb für *CORETRAN* ein Ersatz evaluiert. Dieses Neutronik-Programm soll mit den Systemprogrammen *RETRAN* und *TRAC* gekoppelt werden.

Ähnliche Probleme zeigen sich auch bei *TRAC-BF1*, dem LOCA-Code für Siedewasserreaktoren. Die Qualität des Programmunterhalts fiel auf ein tiefes Niveau; das internationale Projekt zur Validierung von *TRAC-BF1* für LOCA-Anwendungen verlor die meisten der ursprünglichen Teilnehmer, so dass STARS auf die ursprünglich geplante Teilnahme verzichtete. Als Ersatz wird das im Rahmen des CAMP-Vertrages (zwischen PSI und US-NRC) verfügbar werdende Programm *TRAC-M* eingesetzt werden. (*TRAC-M* erlaubt die Übernahme der schon bestehenden Input-decks von *TRAC-BF1* auf sehr einfache Weise.)

Die zu Beginn des Jahres angebotene Doktorarbeit betr. Entwicklung statischer Unsicherheitsmasse der Rechencodes konnte leider noch nicht gestartet werden, da sich die Suche nach einem geeigneten Kandidaten sehr schwierig gestaltete.

Wegen Mangel geeigneter Ressourcen konnten die Pilotstudie zu den Neuronalen Netzwerken nicht gestartet werden.

Neben dem Unterhalt der Modelle und Codes wird die Projektarbeit 2003 auf die folgenden Hauptziele ausgerichtet:

- Elektronisches Archiv STARSBase operationell.
- Zertifizierung des QMS.
- Vertiefung des Verständnisses des transienten Brennstabverhaltens hochabgebrannter Brennstäbe während RIA und LOCA durch Analyse von ausgewählten CABRI- und Halden-Experimenten.
- Beginn der Analyse von Transienten bei tiefer Leistung und Druck (vermutlich Nachrechnung eines PKL-Tests).
- Fortführung der Forschungsarbeiten zur Abschätzung der Rechenunsicherheit von reaktorphysikalischen Problemen.
- Abschluss der Untersuchungen zu NACUSP und Verfassen eines zusammenfassenden Berichts.
- Nachrechnung des VENUS-benchmarks als erster Schritt des Aufbaus der Monte-Carlo basierten Fluenzrechnung.
- Validierung der Anwendung von CFD für reaktortypische Geometrien

Referenzen

- [1] O. Zerkak: **A PWR Main Steam Line Break Accident Analysis with RETRAN-3D**, PSI Annual Report, 2002, Annex-IV.
- [2] W. Barten, P. Coddington, H. Ferroukhi: **Peach Bottom BWR Turbine Trip Benchmark: PSI Analysis of Exercise I using RETRAN-3D**, PHYSOR 2002, 7-10 October, Seoul, Korea.
- [3] H. Ferroukhi, W. Barten, P. Coddington: **Transient 3-D Neutron Kinetic Analysis with CORETRN of a Core Thermal-Hydraulic Boundary Condition Model – Peach Bottom 2 Turbine Trip Benchmark Phase 2**. PHYSOR 2002, Seoul, Korea, October 2002
- [4] H. Wallin: **Fuel rod modelling in RIA at high burnups: TRANSURANUS vs. FREY**, PSI Annual Report, 2002, Annex-IV.
- [5] U. Kasemeyer, J. Lebenhaft, Ch. Hellwig, R. Chawla: **Comparison of Various Partial LWR Core Loadings with Inert Matrix and MOX Fuel**, Proc. OECD Enlarged Halden Project Meeting, Gol, Norway, 2002.
- [6] R. Miro, D. Ginestar, G. Verdu, D. Hennig: **A nodal modal method for the neutron diffusion equation. Application to BWR instability analysis**, Ann. of Nucl. Energy, Vol. 29, 1171-1194 (2002).

- [7] A. Dokhane, D. Hennig, Rizwan-uddin, R. Chawla: **Analytical Modelling of the Non-linear Stability Behavior of BWR**, PSI Annual Report, 2002, Annex-IV.
- [8] A. Dokhane, D. Hennig, Rizwan-uddin, R. Chawla: **Non-linear Stability Analysis with Novel BWR Reduced order models**, ANS Meeting 2002, 9-13 June, Hollywood, Florida.
- [9] Dokhane, A., Hennig, D., Rizwan-uddin, Chawla R.: **Nonlinear Stability Analysis with a Novel BWR Reduced Order Model**, PHYSOR 2002, Seoul, Korea, Oct. 7-10, 2002, CD-ROM.
- [10] A. Dokhane, D. Hennig, Rizwan-uddin, R. Chawla: **Stability and Bifurcation Analysis of Two-phase flow using a drift-flux model**, ICONE10, 14-18.4. 2002, Arlington, Virginia.
- [11] G. Th. Analytis and P. Coddington: **ANALYSIS AND SENSITIVITY STUDIES OF POSTULATED SB-LOCAs IN THE MUHLEBERG (KKM) BWR/4 BY TRAC-BF1**, Annals of Nuclear Energy, Vol. 29, 1525-1549 (2002).
- [12] R. Macian and P. Coddington: **Simulation and Analysis of Experimental Blowdown and Small Break Loss of Coolant Scenarios with RETRAN-3D**, Nuclear Technology, Vol. 139, 185-204 (2002).
- [13] P. Coddington and R. Macian: **A Study of the performance of void fraction correlations used in the context of drift-flux two-phase models**, Nuclear Engineering and Design, Vol. 215, 199-216 (2002).
- [14] P. Coddington, R. Macian, M.A. Zimmermann and R. Chawla: **Application and In-depth Assessment of RETRAN-3D for Best Estimate Analysis of Nuclear Power Plant Transients**, J. of Nuclear Science and Technology, Vol. 39, No. 9, 972-985 (2002).



Datum: 31. Januar 2003
Von: Dr. Peter Bitterli

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 PALEOSEIS

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Unter den Naturkatastrophen, die unser Land betreffen können, haben Erdbeben das grösste Gefährdungspotential. Es besteht daher ein Bedürfnis, Informationen über die Häufigkeit von schadenverursachenden Erdbeben zu gewinnen. Daten zur Erdbebenhäufigkeit in der Vergangenheit bilden eine wichtige Grundlage bei Risikobetrachtungen von Kernanlagen in der Schweiz. Die Beurteilungen der Erdbebensicherheit der Kernkraftwerke ging bis anhin von einer 1977 erarbeiteten, gesamtschweizerischen Gefährdungsstudie (Risikokarten der Schweiz) aus. Die Daten dieser Studie decken den Zeitraum der historischen Erdbebenkataloge, d.h. maximal 1000 Jahre ab. Im Innern der Kontinentalplatten haben aber grosse Erdbeben Wiederkehrperioden von hunderten bis tausenden von Jahren. Die Risikokarten von 1977 geben darum nicht genügend Information zur Risikoabschätzung bei Kernanlagen.

Mit dem Forschungsprojekt PALEOSEIS wurden nun Daten gewonnen, die eine Beurteilung der Erdbebenhäufigkeit über einen weit grösseren Zeitraum erlauben. In den Gesteinsablagerungen, die während der jüngsten Erdgeschichte entstanden, finden sich Informationen zu Starkbeben in Form von Sedimentstrukturen in Seesedimenten, die bei Erdbeben entstanden. Im Projekt wurden aber auch weitere, "geologische Archive", wie beispielsweise Phänomene in Tropfsteinhöhlen, Lockergesteinsabfolgen von aktiven Bruchzonen und Datierungen von Bergsturzböcken ausgeführt.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Der Abschluss des Projektes PALEOSEIS war auf Mitte 2002 geplant. Hauptarbeit im vergangenen Jahr war deshalb die Fertigstellung des Schlussberichtes. Dieser wurde fristgerecht bei der HSK abgeliefert. Das hauptsächliche Ziel des Projektes war die Erstellung eines paläoseismologischen Kataloges für die Zeitspanne der Nacheiszeit (Holozän). Dieses Ziel wurde erreicht, im Bericht konnte eine Zusammenstellung der prähistorischen Erdbeben für mehr als 10'000 Jahre gegeben werden. Die Resultate des Projektes PALEOSEIS konnten damit zeitgerecht in die Arbeiten zur Neubewertung der seismischen Gefährdung der Kernanlagen, im Rahmen des Projektes PEGASOS eingespielen werden.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Das Projekt PALEOSEIS hat einen wichtigen Beitrag zur Neubewertung des Erdbebenrisikos der schweizerischen Kernanlagen geliefert. Das Projekt wird vom Institut für Geophysik der ETH Zürich, mit anderer Trägerschaft weiter geführt. Dabei werden einige Teilprojekte verfeinert und insbesondere soll die Verknüpfung der einzelnen Geoarchive verbessert werden. Die HSK wird die Resultate dieser Arbeiten weiter verfolgen und in ihre Sicherheitsbetrachtungen miteinbeziehen.

Ausblick

Das Forschungsgebiet Erdbeben wird von der HSK momentan nicht mehr aktiv, d.h. mit neuen Projekten, vorangetrieben. Hingegen verfolgt die HSK den Fortschritt der Paläoseismik-Forschung im In- und Ausland. Damit wird sicher gestellt, dass neue Entwicklungen, die für seismische Risikobewertungen bei Kernanlagen von Bedeutung sind, von der HSK rechtzeitig erkannt werden.

PALEOSEIS

RECONSTRUCTING THE PALEOSEISMOLOGICAL RECORD IN NORTHERN SWITZERLAND

Autor und Koautoren	Arnfried Becker, Domenico Giardini
beauftragte Institution	Institut für Geophysik
Adresse	ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	01-632 54 23, becker@seismo.ifg.ethz.ch , www.geophys.ethz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	36D0.0 / 76503
Dauer des Projekts (von – bis)	1. März 2000 – 30. Juni 2002

ZUSAMMENFASSUNG

Die paläoseismologischen Untersuchungen konzentrierten sich auch im Jahre 2002 schwerpunktmässig auf die Basel-Region und die Innerschweiz in der Umgebung von Luzern. Die untersuchten geologischen Archive waren Seeablagerungen, eine aktive Bruchzone (Reinach-Bruch), Felssturzböcke und Höhlen. Eine ausführliche Zusammenfassung des Kenntnisstandes zum Zeitpunkt des Projektendes am 30.6.2002 gibt der Abschlussbericht an die HSK.

Am Reinach-Bruch konnten fünf ko-seismische Bewegungsereignisse – ein Ereignis weniger als im Abschlussbericht erwähnt – innerhalb der letzten 13000 Jahre nachgewiesen werden, wobei das jüngste Ereignis mit dem Basel-Erdbeben von 1356 korreliert. Die mittlere Rekurrenzzeit für Starkbebenereignisse auf dem Reinach-Bruch beträgt 2600 Jahre. Aus der Länge des Bruches, den ko-seismischen Versatzbeträgen und unter Annahme einer Dicke der seismogenen Kruste von 12-20 km konnten für die Erdbebenereignisse Magnituden M_w 6.2-6.7 berechnet werden. Zum Vergleich: anhand historischer Daten wurde für das Basel-Erdbeben eine Magnitude M_w 6.9 berechnet. Das älteste Ereignis (V) auf dem Reinach-Bruch korreliert mit dem Ereignis S5 im ehemaligen Seewener See, welches am deutlichsten Deformationsstrukturen zeigt, die als ‚Seismite‘ interpretiert werden können. Darüber hinaus besteht eine Korrelation zwischen dem Ereignis (X) und S3 in Seewen. Das Basel-Erdbeben von 1356 konnte ausser am Reinach-Bruch in drei weiteren geologischen Archiven nachgewiesen werden. So im Dieboldslöchl, einer Höhle im Faltenjura südlich von Basel, anhand von Zerstörungen an den Sinterbildungen (Lemeille et al. 1999), durch Felssturzböcke, von denen die meisten im Zeitraum zwischen 1210 und 1450 n.Chr. niedergingen, sowie anhand von schwachen Deformationsstrukturen im Baldegger See.

Die Untersuchungen subaquatischer Rutschmassen und Trübestromablagerungen im Vierwaldstätter See weisen auf fünf Starkbeben-Ereignisse hin. Neben dem historisch belegten Innerschweiz-Erdbeben von 1601 n.Chr. sind das Rutschereignisse, die an mehreren Stellen des Sees gleichzeitig auftraten und um 400, 7740, 11940 und 12560 v.Chr. durch Erdbeben ausgelöst wurden. Im Seelisberger, Lungener und Baldegger See konnten z.T. die gleichen Ereignisse nachgewiesen werden, ebenfalls in Form von Rutschmassen und Trübestromablagerungen oder in situ Deformationsstrukturen. Darüber hinaus konnten mit Hilfe von in situ-Deformationsstrukturen in mehreren Seen historisch belegte Beben nachgewiesen werden: Baselbeben von 1356, Innerschweizbeben von 1601, Beben von Altdorf 1774, Sarnenbeben von 1964. Es ist beabsichtigt, die in situ-Erdbebendeformationen in den Seeablagerungen mit Hilfe historischer Erdbeben auf EMS-98 Erdbebenintensitäten zu kalibrieren.

Projektziele

Ziel des Projektes war die Erarbeitung eines Kataloges von Starkbeben für die Schweiz im Zeitraum vom Spätpleistozän bis zur Gegenwart. Zu diesem Zweck wurden paläoseismologische Arbeitsmethoden auf vier verschiedene geologische Archive angewendet: aktive Bruchzonen, lakustrine Sedimente, Felssturzmassen, Höhlen. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Basel-Region sowie die Innerschweiz in der Umgebung von Luzern. Folgende Ziele wurden für das Jahr 2002 angestrebt:

Basel-Region:

- weitere Abklärungen zu den ko-seismischen Bewegungen am Reinach-Bruch.
- Beprobung weiterer Felssturzböcke im Jura südlich und südöstlich von Basel sowie Datierung der Felsstürze
- weitere Untersuchungen von Höhlen zur Abschätzung ihres paläoseismischen Potentials.

Innerschweiz:

- Korrelation verschiedener Erdbeben-Ereignis-Horizonte über die Grenzen einzelner Seebecken hinaus.
- Kalibrierung von Erdbeben-Deformationsstrukturen („Seismite“) anhand historischer Erdbeben.

Ein erster **Katalog der prähistorischen Erdbeben** auf dem Gebiet der Schweiz für den Zeitraum bis ca. 10000 v.Chr. wurde dem Abschlussbericht an die HSK beigefügt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Basel-Region

Am Reinach-Bruch konnten fünf ko-seismische Bewegungen nachgewiesen werden, von denen das jüngste Ereignis mit dem Basel-Erdbeben von 1356 korreliert. Die vier älteren Ereignisse waren um 2500, 5100, 8000 und 10050 v. Chr. Anhand der Länge der Bruchzone, den Versatzbeträgen sowie unter Annahme der Dicke der seismogenen Kruste von 12-20 km konnten für alle Starkbebenereignisse Magnituden M_w von 6.2 – 6.7 abgeschätzt werden. Für Januar 2003 ist die Öffnung eines weiteren Untersuchungsgrabens im südlichen Abschnitt des Reinach-Bruches unmittelbar am Nordfuss des Juras geplant.

Die Ergebnisse der Untersuchungen am Reinach-Bruch korrelieren teilweise sehr gut mit den Beobachtungen im ehemaligen Seewener See. Insbesondere trifft das auf das Ereignis S5 zu, welches die deutlichsten Spuren von Erdbebenerstürzungen in den Sedimenten zeigt („Seismite“) und auf ungefähr 10000 v. Chr. datiert werden kann. Auch das Ereignis S3, ein möglicher Seismit, korreliert mit einem Alter von 5100 v. Chr. gut mit ko-seismischen Bewegungen am Reinach-Bruch. Im Bergsee konnten für das Holozän keine „soft-sediment“-Deformationen in den organischen Seeablagerungen (Gyttja) nachgewiesen werden. Natürlich entstandene Brüche in den Gytjtjen, teilweise mit Mineralüberzug auf den Bruchflächen, deuten auch hier auf Erdbebenerstürzungen als mögliche Ursachen hin. Allerdings ist eine Korrelation dieser Beobachtungen mit Ereignissen am Reinach-Bruch und Seewener See sehr schwierig, da der Zeitpunkt eines Ereignisses, das Bruchstrukturen erzeugt, nicht genau erfasst werden kann.

Die Untersuchungen an Felssturzböcken im Tafeljura SE von Basel waren sehr erfolgreich. An insgesamt 11 Felssturzböcken von vier verschiedenen Klippen konnten Alter zwischen 1210 und 1450 n. Chr. nachgewiesen werden. Keine jüngeren und nur zwei ältere Felssturzereignisse konnten bisher im Rahmen dieser Untersuchungen nachgewiesen werden. Es zeichnet sich deutlich ab, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit das Baselerdbeben von 1356 mehrere Felsstürze im Tafeljura SE von Basel ausgelöst hat.

Erstmals wurden Höhlensedimente aus dem Tafeljura SE von Basel (Glitzersteinhöhle) erfolgreich mit der Radiokohlenstoff-Methode datiert. Sie lieferten Alter zwischen 25000 und 27000 (33000) BP. Zurzeit sind

Datierungen, ebenfalls mit der Radiokohlenstoff-Methode, an Stalaktiten aus Milandre, Ajoie, im Gange. Versuche, Sinterbildungen aus Milandre mit der U-Th-Methode zu datieren, waren aufgrund der sehr niedrigen Urangelhalte und eines relativ hohen Detritusanteils nicht sehr erfolgreich.

Innerschweiz

Die Untersuchungen an den Sedimenten aus den Innerschweizer Seen wurden fortgesetzt. Neue Lang-Bohrkerne aus dem Seelisberger See, die noch im Herbst 2001 gewonnen wurden, konnten im Laufe des Jahres vollständig beschrieben und datiert werden. Neu wurden Kurz-Bohrkerne aus dem Sarner und Baldegger See gewonnen. Damit können die Auswirkungen historisch bekannter Erdbeben auf die unterschiedlichen Sedimente in den verschiedenen Seen besser eingeschätzt und in Analogie auf ältere, historisch nicht belegte Ereignisse übertragen werden. Neben dem Unterwalden-Erdbeben vom 18.9.1601 mit einer Magnitude M_w 6.2, das ‚soft-sediment‘-Deformationen und subaquatische Rutschungen in den verschiedenen Seen verursachte, konnten die Erdbeben von Altdorf 1774 und Sarnen 1964 sowie im Baldegger See auch das Basel-Erdbeben von 1356 nachgewiesen werden. Im Vierwaldstätter See konnten durch mehrere zeitgleiche subaquatische Rutschungen in verschiedenen Seeteilen vorgeschichtliche Starkbeben um 400, 7740, 11940 und 12560 v. Chr. belegt werden. Diese wurde durch subaquatische Rutschungen, teilweise aber auch durch ‚soft-sediment‘-Deformationen in weiteren Seen nachgewiesen. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Innerschweiz in den vergangenen 14000 Jahren von fünf Starkbeben betroffen wurde, wovon das jüngste das historisch überlieferte Unterwaldenbeben von 1601 ist.

Paläoseismologische Untersuchungen in Höhlen der Innerschweiz konzentrierten sich auf das Melchsee-Frutt-Gebiet. Schäden an Sinterbildungen sind wiederholt angetroffen worden (z.B. Betten- und Schrattenhöhle) und sind teilweise sicherlich auch auf Erdbebenerstütterungen zurückzuführen. Allerdings fehlt bisher der direkte Beweis für einen solchen Zusammenhang. Weitere U-Th-Datierungen sind in Vorbereitung. Darüber hinaus wird das Gebiet im Rahmen einer Diplomarbeit am Geologischen Institut der Universität Neuenburg zusammen mit der SSKA detailliert aufgenommen, wodurch wir uns ein besseres Verständnis für die gegenwärtig oder in der jüngeren Vergangenheit wirksamen Deformationsprozesse erhoffen (Hanginstabilitäten, Gletscherbewegungen, Tektonik, Erdbeben).

Nationale Zusammenarbeit

Nationale Kooperationen bestehen zwischen der Limnogeologie der ETH (Anselmetti, McKenzie) – Nutzung der Laboreinrichtungen und der seismischen Messausrüstung; Geophysik der ETH Zürich, Arbeitsgruppe Magnetik (Hirt): Suszeptibilitätsmessungen sowie Messung der remanenten Magnetisierung; Kantonsgeologie Basel-Stadt (Huggenberger): geoelektrische Widerstandsmessungen; Teilchenphysik der ETH Zürich (Bonani) und Geographisches Institut der Universität Zürich (Keller, Woodhatch): ^{14}C -Datierungen; EAWAG (Sturm): Kullenberg- und Niederreiter-Bohrungen; EMPA (Flisch): Röntgenradiographie und Röntgentomographie; Geobotanik der Universität Bern (Ammann, Rachoud): Pollenanalysen; SSKA [Schweiz. Inst. f. Speläologie und Karst] (Jeannin, Eichenberger): Planung und Koordinierung der speläologischen Arbeiten; PSI (Eikenberg): U/Th-Datierungen.

Internationale Zusammenarbeit

Geophysikalisches Institut der Universität Louis Pasteur in Strassburg (Meghraoui): Untersuchung aktiver Bruchsysteme; Universität East Anglia in Norwich (Davenport): Paläoseismologie; Universität Franche Comté in Besançon (Magny): Limnogeologie; Universität Paris VIII (Gilli): Paläoseismologie in Höhlen; Heidelberger Akademie der Wissenschaften (Mangini): U-Th- und ESR-Datierungen, Universität Madrid (Rodríguez-Pascua): Seismite in Seeablagerungen.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Im Jahr 2002 konnte erstmalig für das Gebiet der Schweiz ein (vorläufiger) Katalog der Starkbeben für einen Zeitraum bis 10000 v. Chr. erstellt werden. Besonders für die Baselregion zeichnet sich die Untersuchung von Felssturzböcken zur Rekonstruktion prähistorischer Erdbeben als besonders erfolgversprechend ab. Diese Untersuchungen werden 2003 fortgesetzt. Darüber hinaus ist geplant, die Untersuchungen von Hanginstabilitäten auszuweiten und nicht auf Felsstürze zu beschränken. Die Korrelation von Starkbeben-Ereignissen zwischen verschiedenen geologischen Archiven entwickelt sich positiv. Als Beispiel sei das Baselerdbeben von 1356 genannt, das am Reinach-Bruch durch Hinweise auf koseismische Bewegungen, in einer Höhle durch abgebrochene und wieder angewachsene Sinterbildungen sowie durch mehrere datierte Felssturzböcke nachgewiesen werden kann. Im Rahmen dieses Projektes konnte gezeigt werden, dass paläoseismologische Arbeitsmethoden, angewendet auf verschiedene geologische Archive im Gebiet der Schweiz, erfolgreich zur Rekonstruktion der Starkbeben-geschichte eingesetzt werden konnten. Eine Zusammenfassung der bisherigen Arbeiten zur Paläoseismologie der Schweiz geben die Arbeiten von Becker et al. (2002), Lemeille et al. (1999), Meghraoui et al. (2001), Schnellmann et al. 2002 sowie der SED-Bericht (2002).

Referenzen

- [1] Becker, A.; Davenport, C.A. & Giardini, D. (2002): Palaeoseismicity studies on end-Pleistocene and Holocene lake deposits around Basle, Switzerland.- *Geophys. J. Int.*, **149**: 659-678.
- [2] Lemeille, F., Cushing, M., Carbon, D., Grellet, B., Bitterli, Th., Flehoc, Ch. and Innocent, Ch. (1999a): Co-seismic ruptures and deformations recorded by speleothems in the epicentral zone of the Basel earthquake.- *Geodinamica Acta*, **12** (3-4): 179-191.
- [3] Meghraoui, M.; Delouis, B.; Ferry, M.; Giardini, D.; Huggenberger, P.; Spottke, I. & Granet, M. (2001): Active normal faulting in the Rhine Graben and paleoseismic identification of the 1356 Basel earthquake.- *Science*, **293**: 2070-2073.
- [4] Schnellmann, M., Anselmetti, F.S., Giardini, D., McKenzie, J. A. & Ward, S.N. (2002): Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits.- *Geology*, **30** (12): 1131-1134.
- [5] SED-Bericht (2002): PALEOSEIS – Reconstructing the paleoseismological record in northern Switzerland.- Final Report to HSK and NAGRA, 30.06.2002: 29 S., 1 Tab.



Datum: 28. Januar 2003
Von: Dr. Gerhard Schoen

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 HRA

Einleitung

Das Projekt "Human Reliability Analysis" (HRA) wurde 1997 initiiert. Das Forschungsprojekt wird vom Paul Scherrer Institut (PSI) unter der Leitung von Dr. Vinh Dang durchgeführt. Mit ihm arbeiten Herr Dr. Bernhard Reer sowie im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Universität Maryland Herr Dr. Y.H. Chang. Unterstützt wird das Forschungsprojekt von den Betreibern der schweizerischen Kernkraftwerke und der HSK.

Als wichtiger Bestandteil der Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) betrachtet die HRA den Einfluss von menschlichen Handlungen, welche bei einem Störfall zum Tragen kommen. Die HRA analysiert diese Handlungen und ermittelt deren Fehlerwahrscheinlichkeiten.

Die internationale HRA-Forschung konzentriert sich vor allem auf:

- die systematische Erfassung und Quantifizierung von ungeplanten, menschlichen Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalls negativ beeinflussen (sogenannte 'Error of Commission' [EOC]),
- die Betrachtung dynamischer Aspekte von Operateurhandlungen,
- Ansätze zur Reduktion der Unsicherheit bei der Bestimmung von Fehlerwahrscheinlichkeiten und
- die Berücksichtigung/Modellierung von Teamverhalten.

Das Forschungsprojekt behandelt schwerpunktmässig Fragestellungen aus den ersten beiden Punkten.

Projektziele und -arbeiten 2002

Die Projektarbeiten beinhalten insbesondere die Weiterentwicklung von Methoden zur Quantifizierung von EOCs und die Entwicklung von Operateur-Simulationsmodellen für zukünftige, dynamische PSA-Modelle. Auf die beiden Punkte wird im Folgenden eingegangen:

Error of Commissions: Das Fehlen einer effizienten Methode zur Identifikation und zur Quantifizierung von EOCs ist der Grund, warum EOCs bisher nicht umfassend in einer PSA berücksichtigt werden. Auf diese beiden methodischen Schwächen geht das Forschungsprojekt ein. Für das Jahr 2002 war ein Entwurf einer verbesserten Vorgehensweise zur Identifikation von EOCs geplant. Dieses Ziel wurde erreicht. Die vom PSI entwickelte Methode wurde konkret angewendet und veröffentlicht. Damit liegt eine praktikable und effiziente Lösung für das Identifikationsproblem vor.

Bei der Quantifizierung von EOCs stehen die verschiedenen Einflüsse, welche zu einer Fehlentscheidung führen können, im Zentrum der Betrachtungen. Neben den "risk factors" werden auch die "mitigation factors" (Umstände, die eine Fehlentscheidung der Operateure weniger wahrscheinlich machen) betrachtet. Wie geplant wurden diese Einflussfaktoren näher beschrieben.

Die Beschreibung erfolgte in Form einer Veröffentlichung. Die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen für eine entsprechende Datensammlung wurden dem CSNI vorgeschlagen und führten zur Gründung einer OECD NEA / Task Group, welche vom PSI geleitet wird.

Dynamische PSA: Mit dynamischen PSA-Modellen (d.h. zeitabhängige Modelle für das Anlagen- und Personalverhalten) können die Interaktionen zwischen Mensch und Anlage besser abgebildet werden. Die Verfügbarkeit des zeitlichen Verlaufs von wichtigen Anlageparametern verbessert insbesondere die Modellierungsgrundlagen der Diagnoseprozesse der Operateure. Eine dynamische PSA ermöglicht eine flexible Modellierung der Konsequenzen / Szenarien einer Fehlentscheidung. Im Bereich dynamische PSA arbeitet das PSI eng mit der Universität von Maryland zusammen. Dabei übernimmt die amerikanische Universität schwerpunktmässig die Softwarearbeiten, während das PSI sich auf die Entwicklung dynamischer HRA-Modelle konzentriert. Für das Jahr 2002 war die Konzeptentwicklung für die dynamische Modellierung einer Schicht sowie die Erstellung der Softwarespezifikation vorgesehen. Mit der Verfügbarkeit der Prototyp-Software der Universität Maryland wurde auf ein schriftliches Festhalten der Softwarespezifikation verzichtet. Stattdessen stand die Überprüfung und die Entwicklung eines möglichst umfassenden Anlagemodelles im Vordergrund. Im Zusammenhang mit der Entwicklung dynamischer Modellierung einer Schicht wurde ein Bericht (in Entwurfsform) verfasst. Diese Studie soll das Verhalten der Schicht bei PTS-Szenarien (Pressurized Thermal Shock) beschreiben.

Das PSI ist Mitglied der HRA-Arbeitsgruppe der OECD-NEA/CSNI und der MOSAIC-Gruppe, ein Forum für HRA-Forscher und Anwender. Die HRA-Forschergruppe des PSI veröffentlichte in mehreren Artikeln die Projektergebnisse und nahm an internationalen Konferenzen teil.

Bewertung des Projektes

Die Arbeiten des PSI konzentrieren sich auf aktuelle und für die Weiterentwicklung der PSA wichtige Fragestellungen. Die PSI Aktivitäten orientieren und messen sich am internationalen Stand der Forschung.

Das PSI beteiligt sich aktiv an internationalen Arbeitsgruppen/Projekten und hat auf diese einen wesentlichen Einfluss.

Durch die Zusammenarbeit mit der Universität Maryland wird der Aufwand bei der Softwareentwicklung optimiert.

Durch die Anwendung der entwickelten Methoden in Kontakt mit den Betreibern der Kernkraftwerke werden die Störfallvorschriften aus einem anderen Blickwinkel betrachtet. Damit werden fruchtbare Diskussionen ausgelöst.

Das PSI überprüft für die HSK auch HRA-Studien. Diese Arbeiten waren auch im vergangenen Jahr besonders intensiv. Das Wissen, welches das PSI durch das Forschungsprojekt gewinnt, bringt das PSI auch bei der Reviewtätigkeit für die HSK ein. Dadurch steht der HSK ein hervorragendes HRA-Review-Team zur Verfügung.

Verbesserungsvorschläge und Ausblick

Seit 2002 wird das Projekt durch einen weiteren Mitarbeiter (Dr. Y.H. Chang) unterstützt. Da sich die Universität Maryland an der Finanzierung dieser Stelle beteiligt, sind noch Mittel für eine 50% Stelle vorhanden. Als Verbesserungsvorschlag sei deshalb erwähnt, dass intensiv versucht werden soll, diese Mittel auszuschöpfen.

Das Projekt ist im Zeitplan, so dass es weiterhin planmässig durchgeführt werden kann.

HRA - HUMAN RELIABILITY ANALYSIS

APPLICATIONS AND METHODS DEVELOPMENT

Autor und Koautoren	V.N. Dang
beauftragte Institution	Paul Scherrer Institut
Adresse	5232 Villigen PSI
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 310 2967, vinh.dang@psi.ch , www.psi.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	BFE Projekt-20255/Vertrag-Nummer 82610
Dauer des Projekts (von – bis)	1. März 2000 – 30. Juni 2002

ZUSAMMENFASSUNG

Die Projektarbeiten im Jahr 2002 umfassten zwei Hauptgebiete, die Ausarbeitung einer Methode zur Quantifizierung von Fehlerwahrscheinlichkeiten sowie die weitergehende Entwicklung von Methodik und Software Tools zur dynamischen Risikobewertung.

Die Grundzüge eines Quantifizierungskonzepts wurden formuliert und auf internationalen Konferenzen präsentiert. Die Schlüsselemente sind Risikofaktoren, die an der Entstehung (und Vermeidung) möglicher Fehler beteiligt sind und somit eine qualitative Basis für ein Quantifizierungsmodell darstellen, sowie Referenzfälle als Basis für die Schätzung von Fehlerwahrscheinlichkeiten. Risikofaktoren verknüpfen prognostizierende Analysen, z.B. in einer Sicherheitsstudie, mit der Auswertung von Ereignissen aus Simulatorstudien und Betriebserfahrung. Diese Elemente bilden, unter Leitung des PSI, den Rahmen einer neuen Arbeitsgruppe des OECD Committee on the Safety of Nuclear Installations. Die Arbeitsgruppe verfolgt ein Ziel von grossem Interesse, nämlich die Schaffung von Grundlagen für die Sammlung und den Austausch von Informationen über menschliches Handeln.

Auf dem Gebiet der dynamischen Risikobewertung wurde, in Zusammenarbeit mit der Universität von Maryland, mit einer Fallstudie begonnen. Ein wesentlicher Meilenstein für die Software-Infrastruktur war die Einbeziehung von für reale Problemstellungen geeigneten Modellen. Auf der Anwendungsseite wurde, als ein erster Schritt in der Analyse menschlicher Faktoren in der Fallstudie, eine Aufgabenanalyse erstellt.

Zur konzeptionellen Weiterentwicklung der Quantifizierungsmethode liegt das Hauptziel im kommenden Jahr in der Analyse einer Auswahl von Referenzfällen. Für die dynamische Risikobewertung ist das nächste Ziel die Durchführung von ersten Analysen unter Verwendung des Tools im Rahmen der Fallstudie. In dieser vorläufigen Analyse sollen drei Aspekte dynamischer Risikobewertung zusammengeführt werden: Infrastruktur, Modellierung und Anwendung.

Summary

In 2002, the project work addressed two main areas, the elaboration of a quantification method for estimating human error probabilities and the continued development of methodology and software tools for dynamic risk assessment.

An overall concept for quantification has been formulated and presented in international meetings. Its key elements are the identification of risk (and mitigating) factors for potential errors, which comprises a qualitative basis for the likelihood of errors, and the compilation of reference cases as a basis for the estimation of probabilities. Risk factors are intended to connect predictive analyses, e.g. in a safety study, with the collection and analysis of events from simulator studies, training simulators, and operational experience. These elements of the quantification approach will provide a framework for a new task of the OECD Committee on the Safety of Nuclear Installations, led by PSI. The aim of the task is to lay the groundwork for collecting and exchanging human performance information, which is much needed.

In the area of dynamic risk assessment, a case study application of the methodology and tools serves as a focus for the effort, being carried out in cooperation with researchers from the University of Maryland. An important milestone was reached on the software infrastructure front, with the integration of full-scale models that will enable the research to address a realistically-sized problem. On the application side, a task analysis of the scenario, which addresses the risk from some Pressurised Thermal Shock (PTS) scenarios, was completed and comprises the first step of the human factors analysis in the case study.

With respect to quantification, the main goal for the coming year are the analyses of a selection of reference cases, in order to advance the method from the conceptual level. In the dynamic application case study, the next objective is the completion of the initial analyses using the full-scope dynamic risk assessment tool. In these analyses, the three aspects of the dynamic risk assessment work are integrated: infrastructure, modeling, and application.

Projektziele

The aim of HRA Project is to develop methods for the analysis of human factors in probabilistic safety assessments, in order to obtain insights for maintaining and improving the safety of nuclear power plants. The aims of the work are a) reducing the uncertainties in the quantification of the probabilities of human errors, and b) developing human performance models for dynamic risk assessments.¹

The main goals for 2002 were:

1. To elaborate an overall concept for the **quantification** of human errors, i.e. for the estimation of their probabilities.
2. To continue the development of methodology and software tools for **dynamic risk assessment**. The specific goals:
 - To incorporate full-scale models of the plant response within the *ADS* software tool, in order to allow the advance from demonstration studies to research studies of a more realistic, industrial scale.
 - To review the model of human performance used within the dynamic risk assessment, as the first stage in adapting this model to integrate the results obtained earlier on errors of commission and in the analysis of operational experience.

¹ In parallel to the research program, PSI/NES supports HSK since late 1996 through on-call tasks. These tasks are mainly oriented towards reviews of the HRAs submitted to HSK by the Swiss utilities as a part of their Probabilistic Safety Assessments (PSAs). During this year, reviews of the full-power PSA and of the PSA for shutdown conditions (for one Swiss plant) were completed. The work carried out within on-calls provides impulses for the research and is closely connected to the development work aiming at the enhancements of the current methods. Nevertheless, the on-call tasks have a separate funding, and their specific content and results are not further addressed in the present report.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Quantification Methodology

In previous project work, scenarios involving errors of commission (EOCs) were identified and their probabilities were quantified in order to evaluate their risk significance. As expected, this quantification with the available methods was problematic. This stage of the work focused on elaborating a **quantification** concept, as a first step to a quantification method. The quantification concept needs to establish a link between the qualitative insights that have been obtained through the identification and examination of potential EOCs [1] and the analysis of actual experience with precursor events and incidents.

The challenge for quantification is to consider the many factors that can contribute to as well as prevent the occurrence of errors of commission. In the concept, these are referred to as “risk factors” and “mitigating factors”[2]. The envisioned quantification process includes identifying the factors present, determining which have the most impact, and assigning an overall probability of error that reflects their combined impact. An additional complication is that the impact of the risk and mitigating factors can vary significantly, depending on the situation.

The risk factors and mitigating factors have to be understood not in relation to an error considered in isolation, but instead in relation to the different options available in the situation, as shown in Figure 1. For a given situation that involves a task, the balance between risk factors and counteracting factors influence whether an undesirable option or one of the more appropriate options shown on the upper right is selected. This corresponds to the prevention level. Once the undesirable option is performed, the situation begins to develop in an unsafe direction. This development may be stopped if there are correction factors available that make the personnel immediately aware of the unsafe development, for instance, warnings, alarms, and other indications of the trend. Such correction factors present opportunities to return to a more appropriate option. Finally, if the correction opportunities are missed, there may be recovery factors later in the scenario that would allow actions to be taken to limit or prevent damage. For instance, the system shows signs of overheating and the personnel takes measures to restore cooling. This example has highlighted the system behavior, warnings, and alarms as mitigating factors. Other factors for correction and recovery include, for example, procedure steps that verify that the system is responding as desired.

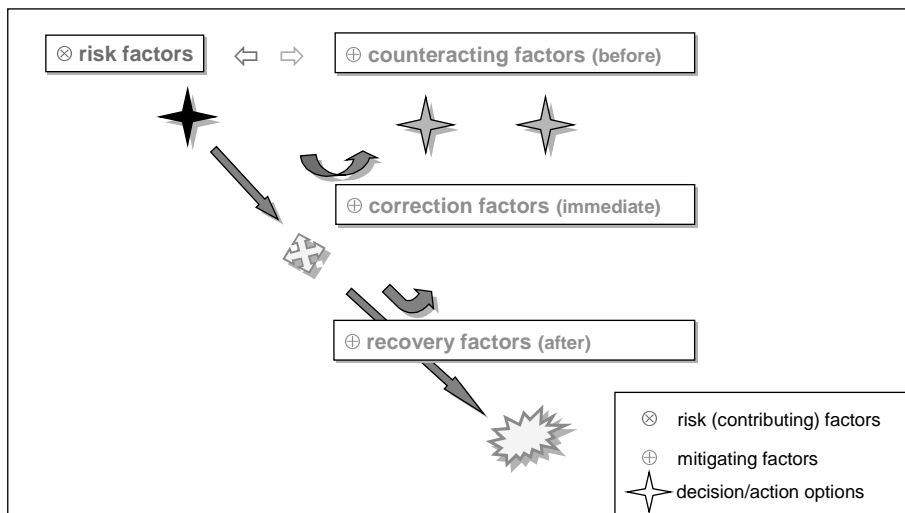


Figure 1. Risk and mitigating factors influence the selection of decision options and present opportunities for preventing, correcting, and recovering incidents.

The resulting quantification concept is based on the identification of “reference cases”, i.e. where each case is concerned with a specific task in a specific scenario. These cases can then be the subject of focused empirical studies, for example, in simulator training facilities, where the risk and mitigating factors can be examined in

detail. Other related tasks would then be quantified by comparing these tasks to a quantified “reference case”. The concept is shown graphically in Figure 2. It can be seen that the reference cases are a means to connect the risk factors identified in the qualitative analysis of the situation with the human error probabilities (HEPs). A set of risk (and mitigating) factors can be defined from the scenarios identified in predictive analysis and from operational events. Lastly, the targeted collection of data concerning the risk factors and their impacts, combined with expert judgments, is needed as to derive the probabilities for the reference cases.

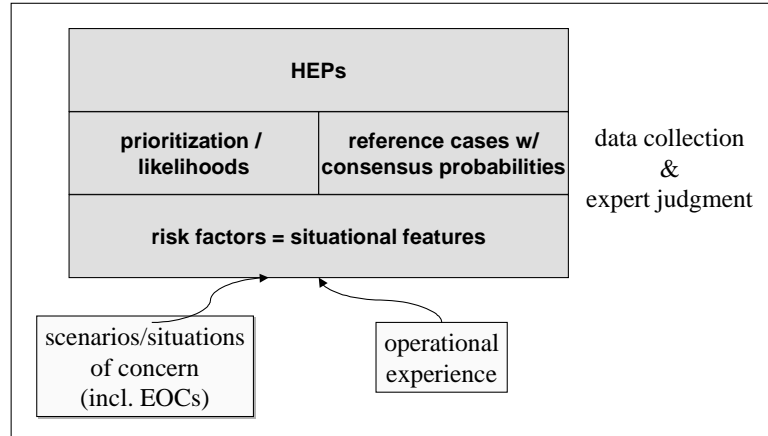


Figure 2. The quantification concept bases human error probabilities (HEPs) on a prioritization based on the qualitative analysis and a comparison to reference cases.

This quantification concept and its implications for research and data needs has been presented at international meetings, leading to the establishment of the cooperations described in the respective section below.

Besides its application to predicting, analysing, and quantifying potential accident scenarios and errors, the concept of risk factors can also be used in the analysis of actual operational events. Such analyses are needed to connect the prediction and quantification of scenarios to the data from simulated and operational event data, as mentioned earlier in connection with Figure 2.

With the cooperation of a Swiss plant, two events were analysed with the goals to 1) identify the risk and mitigating factors involved, and 2) to obtain first insights on how they can be addressed in human reliability analysis methods. In this way, the methods used in prediction and quantification can be checked in terms of how they reflect real situations.

It should be emphasized that large safety margins were preserved throughout these events (the relevant parameters remained far from safety limits). Nevertheless, the events are useful for this work mainly because they involved errors of commission; that is, the personnel inadvertently carried out actions that led to a reduction of the safety margins. The central risk factors identified are

- a) parallel performance of two tasks, in which one task caused the procedure for the second task to become inappropriate. In other words, performance of one task caused the system to deviate from the conditions necessary for the second task and on which the procedure was based.
- b) the early initiation of a task
- c) the inadvertent omission of an action causing a significant opportunity for the error of commission

The mitigating factors that were present but ineffective in these events include

- information relevant to understanding the situation is displayed
- alerting signals indicating that continuation of the procedure is inappropriate
- the procedure applicable to the situation does not mention the inappropriate action

The understanding of the interactions of such factors as they occur in real events resulting from these analyses will be used to continue to improve the guidance for prediction and quantification.

Dynamic risk assessment methodology and tools

In the area of **dynamic risk assessment** methodology and tools, work was performed on three fronts. These are 1) software infrastructure and tools, 2) a case study that is the basis for the development and application of the overall methodology, and 3) the model for predicting the human performance within the dynamic risk assessment

In the area of the software infrastructure and tools, full-scope models have been integrated into the *ADS* software [3] to represent the plant thermal-hydraulic behavior and the fracture mechanics of the reactor pressure vessel. The first runs of the full-scope *ADS* tool were successfully run. Although the application case study is performed for research, the full-scope tool is scaled to enable the application to be realistic, that is, to be comparable in scope to an “industrial” safety assessment.

Second, a case study is being performed, for the purposes of developing the dynamic methodology and comparing it with conventional non-dynamic safety assessment approaches. This case study uses the *ADS* software and models to examine the risk of damaging the reactor pressure vessel through overcooling, which is referred to as pressurised thermal shock. A preliminary task analysis of the human performance in these situations was completed [4]. It provides information for the dynamic case study and will be used to establish the conventional, baseline results with which to compare the dynamic methodology results.

Connecting the human performance model, a simulation model of the operating crew, with the plant response in a dynamic risk assessment framework allows the probabilities of human actions and errors to account for the dynamic evolution of accidents. For example, the evolution of the stress level, which influences the human performance, can be examined and used to predict the probability of errors at different points in the scenario evolution. In the example shown in Figure 3, the model predicts that the stress level increases when the water level in the steam generators (SG) first drop below the desired safety range (accompanied by alarms annunciating this condition) and continues to increase until the operators are guided by the procedures to take the actions to respond to this situation.

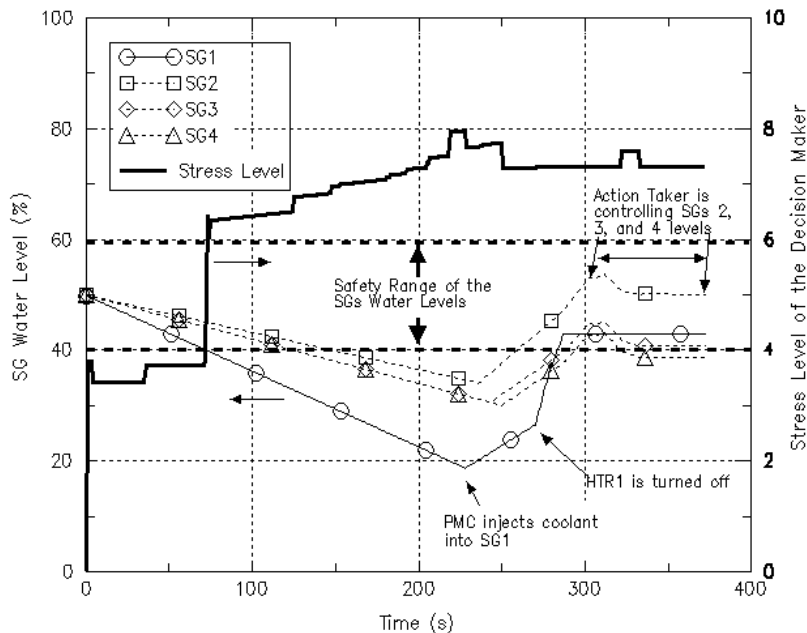


Figure 3. The evolution of the plant state affects the stress level of the operators, which in turn influences their performance (and the probability of errors). [3]

Third, the model of human performance in the ADS software, named IDAC, was reviewed. This model, for instance, considers what causes the stress level to change during the scenario as well as how this affects the performance of the operators. At this stage, particular attention was paid to whether and how the model considers the risk factors mentioned earlier. This review ensures that, although different in the analytical possibilities and the required analysis effort, the assessment of human performance in dynamic risk assessment is compatible with the non-dynamic methodologies being developed or in use currently. The results of this review will be used in the next phase to revise the IDAC model.

It is worth noting here that dynamic risk assessment methodology is intended to complement the conventional safety assessment methodology rather than to replace it [5]. Although dynamic risk assessment will provide a better analysis, it also requires significantly more effort so that its use needs to be restricted to scenarios where dynamic issues need to be examined. Identifying when dynamic issues are likely to be important in scenarios is a topic that is also being examined in the research.

Nationale Zusammenarbeit

The main cooperation at the national level has been with one of the Swiss nuclear power plants, which provided the information concerning the two operational experience events analysed in connection with risk factors and HRA method development. As discussed above, the analysis of operational experience is important to ensure that the methods developed for predicting and quantifying human performance are practical for industry and realistic in terms of the performance conditions that are considered. The results of this study and outstanding issues were presented for discussion with the utility and a final report is being prepared. A research study on the initiation of challenges to plant safety through the performance of inappropriate actions is now planned as a follow-up.

In addition, training courses on the state-of-the-art in human reliability analysis were given by the project staff to the Federal Commission for Nuclear Safety (Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen, KSA) and to Swiss utility staff.

Internationale Zusammenarbeit

A cooperation with the University of Maryland (Prof. A. Mosleh) is a key part of the research effort on dynamic risk assessment. While responsibility for the development of the overall methodology and for carrying out the case application study is shared, the PSI has the lead responsibility for the development of the human performance models within the framework and for the human factors analyses within the application study. In addition, it contributes to the development of the analysis software framework in defining requirements and specifications and evaluating the software. As noted, the highlights for 2002 included the first runs of the software tool with full-scope models and the completion of a preliminary task analysis for the application study, which provides inputs for the dynamic analysis as well as for the baseline analysis.

A second international initiative has been the start of a task group within the OECD NEA / Committee for the Safety of Nuclear Installations (CSNI). The PSI proposed and is now leading a new task group on Human Reliability Analysis, "Outlining a Framework for HRA Information Exchange" [6]. The objective of the task is to lay the groundwork for the collection and exchange of human performance information for use in HRA. A diverse range of methods with similar elements characterises current HRA developments; one aim of the task is to draw out the shared elements of the emerging methodology, stressing the convergence of the HRA framework and its benefits. On this basis, the task is to identify the data needs that are associated with this framework, i.e. that would be useful for the range of methods, and to develop a roadmap for the future exchange of information useful for HRA. For the industry, the regulatory bodies, as well as the research community, the report produced will be useful in making decisions and establishing programs to collect and exchange human performance data.

Finally, the project was active in its cooperation with the OECD Halden Reactor Project, of which Switzerland is a signatory. An invited contribution, "Quantifying Human Factors – the state of HRA and current information needs", on HRA methodology developments and data needs was presented at an OECD Halden Workshop in

November, "Review of Methods and R&D Needs to Address Issues Related to HRA". The emphasis here is on data from controlled experiments in simulators and on the design of such experiments to yield information useful for HRA. The CSNI task and the Halden efforts in these areas represent concerted, international efforts to address the issue of HRA data. In this context, the project participates both as an HRA research group as well as the coordinator of CSNI HRA task discussed above, to ensure a close coordination between these related efforts.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

The activities of 2002 were aimed at two main goals, an overall concept for the **quantification** of human errors and the continuing development of methodology and tools for **dynamic risk assessment**. An evaluation of progress and the outlook in the two areas are discussed next.

Quantification concept.

The quantification concept both outlines an overall approach to HRA quantification in the future and defines the research that is needed to implement this approach. The concept that was elaborated has two main elements: 1) the focus on the identification of "risk factors" and "mitigating factors" and 2) the use of reference cases, which are tasks in specific situations in specific facilities, as a basis for data collection and for quantification. Because of the limitations with regard to data, expert judgment has and will continue to be an important aspect of HRA quantification. For this reason, the project strategy in the area of quantification has been to promote and to contribute to an international efforts (as opposed to aiming at an independent, own quantification method). Both elements of the elaborated quantification concept have been well-received. Quantification based on reference cases is an important element of the CSNI task. Also, as intended, these cases and their associated risk factors will also be a focus for data collection.

At the practical, application level, the risk factors were also identified in the operational events analyses. This identification has provided an example of risk factors in actual events and shows the role the factors can play in connecting predictive, quantification-oriented analyses with information from past experience. In this way, the role of the risk factors and their interactions in the reference cases can be better understood; these cases then are used in the quantification process.

In addition to progressing on the CSNI task and continuing the cooperation with Halden, the next steps for the project are to develop reference cases and to quantify these. The reference cases will be selected from previously identified scenarios involving errors of commission and from current safety studies (in view of reducing the uncertainty in their estimates). Both the qualitative and quantitative aspects of such reference cases can then be subject to discussion within the safety community. Furthermore, some aspects may be examined in simulator studies, for instance, at the Halden project.

Dynamic risk assessment.

The first runs of the full-scope ADS tool represent an important milestone in the development of the software infrastructure for dynamic risk assessment. Features to support the analysis of the runs, for instance, examining specific scenario histories, and to increase performance are being implemented next.

The efforts on the methodological side are centered on the case application study, which examines the risk from pressurised thermal shock (overcooling). Preliminary analyses of the scenario and of the tasks of the personnel in particular, have been completed. Besides this application-oriented work, the current model of human performance was reviewed in light of the insights on errors of commission obtained earlier in the project.

In the application case study, the definition of the scenario and the associated task analysis will be finalised in 2003. As planned, the human performance model will be revised to enable the important aspects of the main tasks to be represented in the dynamic risk assessment. This revision will involve operationalising the effects and interactions of the risk and mitigating factors in the human performance model. The next objective is the completion of the initial ADS analyses for the application case study; the revised human performance model

will be applied in these analyses. In these analyses, the three aspects of the dynamic risk assessment work are integrated: infrastructure, modeling, and application.

Referenzen

- [1] B. Reer, V.N. Dang, S. Hirschberg, **Identifying and Assessing Errors of Commission – Results of Applying the CESA Method**, in: W.J. Bonano et al. (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 6)*, San Juan, Puerto Rico, USA, 23-28 Jun. 2002, Vol. I, pp. 177-182, Elsevier, Amsterdam, 2002.
- [2] V.N. Dang, B. Reer, **Decision and Commission Errors – From Identification to Quantification Issues**, in: J. J. Persensky et al. (Eds.), *New Century, New Trends, Proceedings of the 2002 IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants*, September 15-19, 2002, Scottsdale, Arizona, USA, pp. 3-26 to 3-33, Institute for Electrical and Electronical Engineers, New York, 2002.
- [3] Y.H. Chang, A. Mosleh, **ADS: A Computer Program for Dynamic Probabilistic Risk Assessment**, *Proceedings of the ANS International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment*, Detroit, Michigan, USA, 6-9 October 2002.
- [4] B. Reer, **Task Analysis (Preliminary) for the Pressurized Thermal Shock (PTS) Case Study**, work report, Paul Scherrer Institut, December 2002.
- [5] V.N. Dang, **Application Of An Operator-Plant Model For Dynamic Risk Assessment**, in: W.J. Bonano et al. (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 6)*, San Juan, Puerto Rico, USA, 23-28 Jun. 2002, Vol. I, pp. 183-188, Elsevier, Amsterdam, 2002.
- [6] V.N. Dang, **Outlining a Framework for HRA Information Exchange**, Proposal for Task 2002(1) of the Working Group on Risk Assessment, OECD Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations, June 2002.



Datum: 3. Februar 2003
Von: Dr. Roland Scheidegger

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Die verschiedenen Arten von Zellen zeigen erhebliche Unterschiede bezüglich ihrer Strahlenempfindlichkeit. Diese Unterschiede beruhen unter Anderem darauf, welche Gene je nach Dosis, Dosisleistung oder auch Zelltyp angeregt werden. Die strahleninduzierte Genexpression führt als Antwort auf eine Bestrahlung dazu, dass bestimmte Gene grössere Mengen Eiweiss produzieren. Das Spektrum dieser Genprodukte reicht von Reparatur- und Signalmolekülen bis zu solchen, die den Zelltod einleiten.

Die Suche nach den Genen, die Zelltyp-spezifisch nach Bestrahlung aktiviert oder überaktiviert werden, ist ein zentraler Teil der molekularen Strahlenbiologie. Die Erkenntnisse können zur Erklärung der Zelltyp-abhängigen und der individuellen Strahlenempfindlichkeit beitragen. Die zelluläre Empfindlichkeit gegenüber ionisierenden Strahlen steht aber auch im Brennpunkt der Bemühungen um eine Optimierung der Strahlentherapie.

Während man nämlich lange Zeit davon ausging, durch die Wirkung der Strahlung die Tumorzellen direkt schädigen zu müssen, so gibt es vermehrt viel-versprechende Ansätze, die Tumormasse von der Blutzufuhr abzuschneiden. Ohne die dringend benötigte Versorgung mit Nährstoffen müsste die Geschwulst das Wachstum verlangsamen, einstellen oder sie würde sich sogar zurückbilden.

Ziel für einen derartigen Therapieansatz sind die Endothelzellen der Blutgefässe, die die Tumoren bilden, um ihre Versorgung mit Nährstoffen sicherzustellen (Angiogenese). Die Endothelzellen kleiden die Innenseite der Gefässe und Kapillaren aus und müssen sich bei deren Neubildung sehr schnell teilen.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Ziel der Experimente

Man möchte ein strahleninduzierbares Gen entwickeln. Künstlich veränderte Gene, die durch Strahlung aktiviert werden können, werden ins Erbgut von kultivierten Endothelzellen eingeschleust. Nach Bestrahlung wird die Menge des von ihnen neu gebildeten Eiweisses gemessen. Es wurden die folgenden molekulargenetischen Methoden angewendet, um die künstlich erhöhte Strahlenempfindlichkeit der Ziel-Zellen zu messen:

Künstliches Reporter-gen/Promoter-Konstrukt

- In die Endothelzellen wird ein modifiziertes Gen eingeführt, welches durch Strahlung aktiviert werden kann. Nach der Aktivierung soll es ein Eiweiss produzieren, das die genetisch veränderten Zellen selektiv und lokal schädigt. Eine Kombination von Genterapie und Radiotherapie sollte es ermöglichen, die Strahlenwirkung auf das Tumorgewebe zu beschränken und das umliegende gesunde Gewebe zu schonen.

Aus diesem experimentellen Ansatz ergeben sich zudem Erkenntnisse über die molekularen Zusammenhänge, die in den Endothelzellen die Strahlenempfindlichkeit (mit)bestimmen.

Ein Gen besteht aus denjenigen DNS-Abschnitten, welche die Information für das von ihm produzierte Eiweiss enthalten. Davor liegen Kontroll-Abschnitte (Promotoren), die die Aktivität des Gens und somit die Menge des produzierten (exprimierten) Eiweisses bestimmen. In einer Vorstufe suchte man nach geeigneten strahleninduzierbaren Promotoren, die nach Bestrahlung ihr Gen hyperaktivieren. Das Ergebnis ist eine verstärkte Produktion von Eiweiss als Reaktion auf Bestrahlung. Als Gen hinter der Kontrollsequenz wählt man eines, das ein gut nachweisbares und quantifizierbares Eiweiss-Produkt bildet.

Die künstlichen Gen-Konstrukte werden in ringförmige DNS-Stücke (Plasmide) eingebaut und ins Erbgut von kultivierten Endothelzellen eingeschleust. Dort nehmen sie ihre Funktion wahr und produzieren auf Bestrahlung hin das gewünschte Eiweiss.

Die Stärke der Expression ist bekanntermassen abhängig vom genetischen Hintergrund der Empfänger-Zelle, also vom Rest ihres Genoms. Gene, wie das bekannte Tumor-Suppressorgen p53 können in geeignetem Zustand eine Überexpression fördern. Im Experiment vereinfacht dies den Nachweis des gelungenen Einbaus des Fremdgens und die Quantifizierung.

Microarray-Methode

- Wenn ein Gen auf der DNS abgelesen (exprimiert) wird, wird seine Information im Kern in RNS und dann im Cytoplasma in die entsprechende Aminosäurekette (das Eiweiss) übersetzt. Je mehr RNA gebildet wird, desto stärker ist die Expression des betreffenden Gens. Das RNS-Molekül selbst ist komplementär zu einem Strang der DNS. Über eine Chip-ähnliche Oberfläche (Microarray) mit Zehntausenden einsträngigen DNS-Abschnitten, die verschiedene (bekannte) Gene enthalten, gibt man eine Lösung mit einem RNS-Gemisch aus Zellen. Wurde eines dieser Gene exprimiert, so wird seine mit einem Farbstoff markierte RNS an die komplementäre Region der DNS auf dem Chip gebunden. Dessen Muster und die Farbintensität können mit Hilfe eines Computers ausgewertet werden.

Das System mit dem künstlich konstruierten Gen erwies sich als strahleninduzierbar, allerdings liegt die Erhöhung von einem Faktor drei über Untergrund unter den Erwartungen. Auch für eine Anwendung in der Strahlentherapie, wo hohe Dosen appliziert werden, ist diese Erhöhung nicht hoch genug.

In den Experimenten mit dem Microarray-System konnte zwar eine grössere Anzahl strahleninduzierbarer Gene gefunden werden, aber auch hier lagen die Expressionen nicht über dem dreifachen Untergrund.

Die bislang in den verwendeten Zellen erprobten Gene scheinen mit Dosen von wenigen Gray nicht stark genug induzierbar zu sein. Ein Bezug zur praktischen Anwendung in Therapie oder Strahlenschutz kann noch nicht hergestellt werden. Mit Hilfe der Microarray-Technik wird die Expression weiterer Gene gemessen. Finden sich stark induzierbare Gene, so sollen sie mit der Promoter-Technik für weiterführende Experimente an den Endothelzellen eingesetzt werden.

Mittels modernster molekularbiologischer Techniken verschafft man sich Einblick in die genetische Kontrolle der Strahlenempfindlichkeit. Die Informationen über Gene, die sich durch Strahlung aktivieren lassen, haben nicht nur für die klinische Therapie Bedeutung. Wenn man weiss, wie sich die zelluläre oder Zelltyp-abhängige Strahlenempfindlichkeit genetisch zusammensetzt, können spezifischere Massnahmen gegen Strahlenschädigungen ergriffen werden.

MOLEKULARBIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR ZELLULÄREN RADIOSENSITIVITÄT

Autor und Koautoren	Anne Anstett, Carine Chastel, Kurt Ballmer, Josef Jiricny, Rolf Jaussi
beauftragte Institution	Institut für Medizinische Radiobiologie der UNIZH und des PSI
Adresse	Bau OFLG/121
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 310 2877, rolf.jaussi@psi.ch , http://www.imr.unizh.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	23978/80385
Dauer des Projekts (von – bis)	1.1.2001 - 31.12.2003

ZUSAMMENFASSUNG

Das Wachstum der meisten Tumoren ist abhängig von der Blutversorgung. Wir haben zum Ziel die Radiosensitivität von Endothelzellen spezifisch in Tumorblutgefässen zu erhöhen. Dadurch ist eine Verbesserung der Radiotherapie von Tumoren zu erwarten und wir erhalten grundlegende Daten zur Radiosensitivität von Endothelzellen. Wir streben als Zielvorgabe eine Kombination von Gentherapie mit Radiotherapie an. Mit diesem langfristigen Projekt streben wir die Etablierung eines strahleninduzierbaren Promoters an.

Gemäss den Erfahrungen im letzten Jahr war es uns nicht möglich einen der 5 ursprünglich gewählten Promoter reproduzierbar um mehr als einen Faktor 2-3 zu induzieren. Wir erachten diese geringe Induktion als problematisch für das Vorhaben und haben deshalb die Suche nach geeigneten Promoter mit einer globalen Analyse der Genexpression in bestrahlten Endothelzellen begonnen. Eine Serie von Microarray-Analysen der Expression von 12'500 Genen pro Chip wurde mit einer Reihe von verschiedenen behandelten und unterschiedlich intensiv bestrahlten menschlichen, primären mikrovaskulären Endothelzellen und der endothelialen Zelllinie EA.hy926 durchgeführt. Die Resultate umfassen eine Gesamtzahl von über 100'000 Einzelmessungen von RNA-Konzentrationen. Die detaillierte statistische Auswertung dieser Resultate ist im Gang.

Trotz der notwendigen statistisch untermauerten Analyse der Daten steht jetzt schon fest, dass kein stark induzierbarer natürlicher Promoter in den untersuchten Endothelzellen vorhanden ist. Die höchste beobachtete Konzentrationszunahme einer mRNA beträgt etwa das Dreifache des Kontrollniveaus. Diese Beobachtung gilt für alle untersuchten Bedingungen (1-9 Gy 300 kV Röntgen; 1, 6, 12 und 24 h nach Bestrahlung; Zellen konfluent oder wachsend im Zellzyklus) und mit beiden untersuchten Zelltypen. Wir schliessen daraus, dass die untersuchten Zellen unter den gewählten Kulturbedingungen kein einziges Gen über dreifach induzieren.

Projektziele

Bedeutung des Projekts: Wir möchten ein strahleninduzierbares Gen entwickeln, das zur Expression und Sekretion von toxischem Protein in bestrahlten Zellen führt. Dieses toxische Protein sollte das Gewebe lokal beschädigen und damit die Radiotherapie von Tumoren unterstützen. Die Studie ist auch von grundlegendem radiobiologischem Interesse.

Ziel für 2001: Charakterisierung eines ausgewählten Serum-Response-Elements.

Ziel für 2002: Charakterisierung von mindestens einem weiteren Promoter auf seine Eignung zur Unterstützung der Radiotherapie. Bei positivem Befund erste Ergebnisse mit der Expression eines toxischen Proteins.

Ziel für 2003: Da offenbar keine geeigneten Promoter in den Zellen vorliegen, müssen neue Wege zur Verstärkung der Schädigung von bestrahlten Zellen gesucht werden. Eine Studie zum Verständnis der molekularen Ereignisse bei der Auslösung der Apoptose in bestrahlten Zellen wird angestrebt.

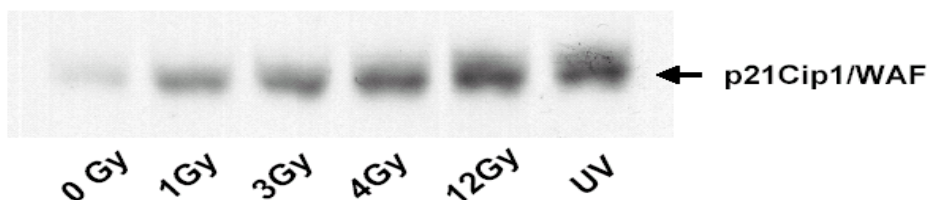
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Nach den letztjährigen negativen Resultaten mit der Charakterisierung des Gal-Elk Transkriptionssystems, welches nie eine reproduzierbare Induktion von mehr als dreifach zeigte, versuchten wir dieses Jahr auf zwei Wegen an einen stärker strahleninduzierbaren Promoter heranzukommen. Das wohlbekanntere strahleninduzierbare System von p53 und p21 sollte auf seine Funktionalität in Endothelzellen im Detail geprüft werden. Simultan zu diesen Experimenten sollte die Genexpression in Endothelzellen global mit Mikroarray-Technologie analysiert werden. Dieses Experiment erfasst praktisch alle Promoter in den Endothelzellen und erlaubt uns, die besten natürlichen Promoter Kandidaten zu ermitteln. Der Nachteil dieses Vorgehens besteht darin, dass, der Promoter, je nach induziertem Gen, zuerst kloniert werden muss. Erst dann ist es möglich seine Eignung im Kontext eines Plasmids zu prüfen.

Resultate mit dem p53-p21-System

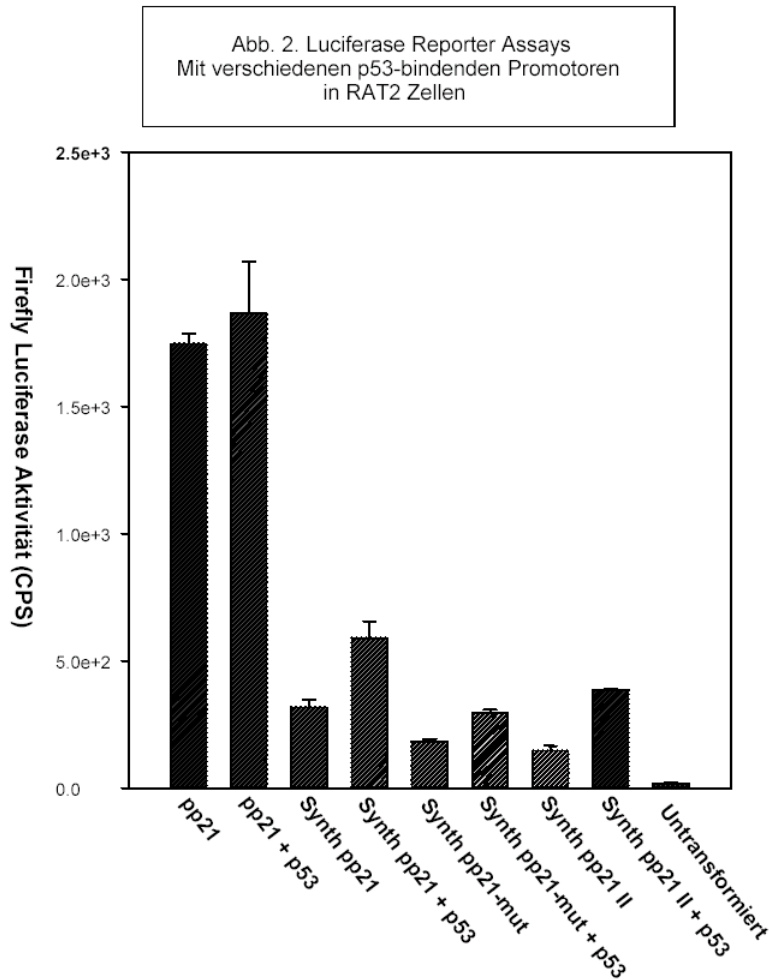
Die Induzierbarkeit des p21-Proteins nach Bestrahlung wurde in verschiedenen Zelllinien mittels Western Blots bestimmt. In der untransformierten RAT2 Zelllinie erwarteten wir gemäss Literaturangaben eine etwa 5-10-fache Induktion und konnten diese auch reproduzieren. Abb. 1.

Abb. 1 Effekt von Röntgenbestrahlung auf das endogene p21Cip1/WAF in der RAT2 Zelllinie



2×10^6 Zellen/10cm Platte wuchsen 24 h in DMEM mit 10% Serum. 2h vor der Bestrahlung wurde frisches Medium auf die Zellen gegeben. 8h nach den Bestrahlungen wurden die Zellen geerntet und für einen Western Blot verwendet. p21 wurde mit Ziege-anti-p21 (von Santa Cruz 1/500) und Esel-anti-Ziege-Alkalische Phosphatase (Santa Cruz 1/10'000) nachgewiesen. In einem nächsten Schritt wurde nun die

potenzielle Induktion der Transkription des Promoters mittels Luziferasre-Reporter-Assays gemessen. Wiederum sollte gemäss Literatur eine starke Induktion des Systems zu erwarten sein, wenn das Reportersystem in Zellen mit Überexpression von p53 beobachtet wird. Dennoch fanden wir weniger als 2-fache Induktion des Promoters trotz Stimulus durch Überexpression des p53-Proteins von einem Plasmid mit einem CMV-Promoter, Abb. 2.



RAT2 Zellen wurden ausgesät (10^5 Zellen/3.5mm Platte) und 24 h wachengelassen. Danach wurden sie mit je $1\mu\text{g}$ der Reporterplasmide transfiziert. In den mit "+ p53" markierten Proben wurden zusätzlich $0.3\mu\text{g}$ eines Plasmids, welches p53 vom CMV Promoter exprimiert, appliziert. 24 h nach der Transfektion wurden die Zellen geerntet und die Aktivität der Reporterluciferase im Luminometer (Lumicount Packard) bestimmt. Schluss: Das p53-p21-System ist durch ionisierende Strahlung induzierbar. In den untersuchten Zellen fanden wir aber eine geringe Induktion bei einem relativ hohen Untergrund, sodass wir von der Verwendung dieses Systems in einer radiotherapeutischen Anwendung Abstand nehmen mussten.

Resultate mit Microarray-Analyse der Genexpression in Endothelzellen

Wir verwendeten primäre mikrovaskuläre Endothelzellen in verschiedenen Wachstumszuständen und nach verschieden hohen Strahlendosen bei der Suche nach strahleninduzierbaren Promoter. Die Zellen wurden in Endothelzellen-Medium bis zur Konfluenz gebracht und zwei Tage nach Erreichen der Konfluenz bestrahlt. Diese Zellen befanden mehrheitlich in der G_0 -Phase des Zellzyklus. Dieselben Zellkulturen wurden auch verdünnter auf die Kulturschalen gegeben und vor Erreichen der Konfluenz als exponentiell wachsende Zellpopulation bestrahlt. In beiden Wachstumszuständen fanden wir eine grössere Anzahl strahleninduzierter

Gene. Allerdings erreichte keine der Induktionen mit messbarer Expression auf dem Kontrollchip mehr als den dreifachen Untergrund. Offenbar ist in diesen kultivierten Zellen kein einziges Gen mit ionisierender Strahlung im Bereich von einigen wenigen Gy stark induzierbar. Dieser Befund ist vermutlich umfassend; die Chips analysieren je 12500 Gene. Derselbe Befund ergab sich auch nach Analyse einer Endothelzellen-ähnlichen Zelllinie, Ea.Hy926.

Der Befund der schwachen Induktion deckt sich mit den Resultaten anderer Forschungsgruppen, die ebenfalls mit Zellkulturen nur geringe Induktion von Genexpression mit Strahlung feststellten. In einer Arbeit wurden auch Gewebe *in vivo* in der Maus analysiert. In diesem Fall fand man einige hoch induzierbare Gene; es ist aber nicht klar, in welchem Zelltypus diese Induktion auftritt. Aufgrund solcher Befunde wollten wir die Frage prüfen, ob Kontakte zwischen den Zellen und der extrazellulären Matrix die Strahlensensitivität der Gene beeinflussen. Deshalb ermittelten wir Bedingungen unter welchen die Endothelzellen als Kapillargefäße wachsen, d.h. Röhren (tubes) bilden. Wir erreichten Bedingungen in denen die Zelle zu ca. 50% als Einzelschicht (Monolayer) und zu 50% als Kapillaren wuchsen. Diese Kulturen wurden bestrahlt und für RNA-Extraktion verwendet, gefolgt von einer Analyse ihrer Genexpression mittels Chip Technologie. Wiederum erhielten wir dasselbe Resultat: keine starke Induktion irgendwelcher Gene. Sämtliche Zellen und Behandlungen, welche anschliessend mit Chiptechnologie analysiert wurden sind in untenstehender Tabelle zusammengefasst:

Zeit nach Bestrahlung Zelltyp	1h	6h	12h
HMVEC Konfluente Zellen	∅ Gy 3 Gy	3 Gy	∅ Gy 3 Gy 3+3+3 Gy 9 Gy
HMVEC Im Zyklus (80% konfluent)			∅ Gy 3 Gy
EaHy926 Konfluente Zellen	∅ Gy 3 Gy ∅ Gy 3 Gy ∅ Gy 3 Gy	∅ Gy 3 Gy 3 Gy 3+3+3 Gy 9 Gy	∅ Gy 3 Gy 3 Gy
EaHy926 Im Zyklus (80% konfluent)	∅ Gy 3 Gy	∅ Gy 3 Gy	∅ Gy 3 Gy
EaHy926 50% Kapillaren		∅ Gy 3 Gy	

Konzentration, durch Strahlung induzierbar. Unter keiner der geprüften Bedingungen konnten durch ionisierende Strahlung stark induzierbare Gene in Endothelzellen gefunden werden. Es ist deshalb notwendig, das Ziel der selektiven Sensibilisierung von bestrahlten Zellen mit neuen Strategien anzugehen. Wir untersuchen momentan den Einfluss von einzelnen schwach induzierten Genen auf die Strahlenempfindlichkeit der Zellen.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Das Gal-Elk System kann unter den gewählten Bedingungen kaum reproduzierbar induziert werden. Wir haben deshalb mit der Eignungsprüfung weiterer Promoter begonnen. Wir sind insbesondere an Promoter mit Bindungsstellen für p53 oder NF-KappaB interessiert. Diese beiden Transkriptionsfaktoren sind in gestressten Zellen stimuliert und sind zentrale Faktoren, welche unter anderem das Überleben, respektive den Zelltod regulieren (siehe Kurz-Review [2]).

Auf der Suche nach besser geeigneten Promoter beginnen wir nun auch die Expression einer grösseren Anzahl von Genen in bestrahlten Zellen mit Mikroarray-Technologie zu messen. Falls wir ein stark induziertes Gen finden, so werden wir dessen Promoter isolieren und als Alternative zum Gal-Elk System verwenden.

Referenzen

- [1] M. Kyriakis. *Life-or-death decisions*, *Nature* 414:265-266, 2001.
- [2] M. Urich, M. Senften, P. E. Shaw, and K. Ballmer-Hofer. A role for the small GTPase Rac in polyomavirus middle-T antigen-mediated activation of the serum response element and in cell transformation. *Oncogene* 14:1235-1241, 1997.



Datum: 7. Februar 2003
Von: Dr. Franz Cartier

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Zusammenarbeit in der Dosimetrie

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Die Personendosimetrie der äusseren und inneren Strahlenexposition ist eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes. Die Dosimetrieverordnung stellt hohen technischen Anforderungen an die Dosimetriestellen. Erhebliche Bedeutung haben auch die Messungen zur Freigabe von Materialien aus der kontrollierten Zonen und zur Überwachung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung. Die Sektion Messwesen der Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit des PSI ist vom Bundesamt "metas" als akkreditierte Stelle zugelassen und befasst sich mit Fragen zur Eichung und Kalibrierung von Dosimetriesystemen und Strahlenmessgeräten wie beispielsweise Oberflächenkontaminationsmessgeräten. Die vorliegende Vereinbarung ermöglicht der HSK Expertisen sowie Entwicklungs- und Forschungsarbeiten im Gebiet der Strahlenmesstechnik durchführen zu lassen.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Abgeschlossen wurde das Teilprojekt über die Bestimmung von Oberflächenkontaminationen mittels Wischtests und Handmessgeräten. Es wurden Messverfahren und Anleitungen zur qualitätsgesicherten Kalibrierung erarbeitet und der Einsatz im Bereich der Transportgesetzgebung bewertet. Der Projektbegleiter beurteilt auch den Arbeitsfortschritt in den andern Teilprojekten als sehr gut.

Bei den Personendosimetern für Neutronen wurden weitere Messungen in Referenzstrahlenfelder durchgeführt, die wichtige Daten und Erfahrungen lieferten.

Für die Anlagen zur Bestimmung der Aktivität in Abfallfässern (Fassmessanlagen für Gamma strahlende Nuklide) sind komplexe Kalibrierverfahren in Entwicklung.

Für das Teilprojekt "Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Aerosolverluste in komplexen Probenahmesystemen" ist die Vorstudie zur Evaluation von Messmethoden und Geräten abgeschlossen und darauf gestützt der Zeit- und Kostenplan erstellt worden.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Die in den Teilprojekten formulierten Fragestellungen sind nach wie vor aktuell. Die Neutronendosimetrie ist für den praktischen Strahlenschutz bei Transporten von abgebrannten Brennelementen von Bedeutung. Dieses Teilprojekt ist in das internationale Projekt EVIDOS des EU-Forschungsprogramms eingebettet. Die in den beiden andern Teilprojekten in Entwicklung stehenden Kalibrierverfahren erleichtern die im Aufsichtsbereich der HSK anstehenden messtechnische Beurteilungen wesentlich, weil sie auf qualitätsgesicherte Expertisen zurückgreifen können.

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Die Vereinbarung mit dem PSI endet am 31. Dezember 2003. Der Projektbegleiter schlägt vor die Vereinbarung um 3 Jahre zu verlängern.

ZUSAMMENARBEIT IN DER DOSIMETRIE

Autor und Koautoren	Ch. Schuler, M. Boschung, G. Butterweck und C. Wernli
beauftragte Institution	Paul Scherrer Institut
Adresse	5232 Villigen PSI
Telefon, E-mail, Internetadresse	056/310 28 78; christoph.schuler@psi.ch; http://www.psi.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	DIS Nr. 80086
Dauer des Projekts (von – bis)	01.01. 2001 - 31.12. 2003

ZUSAMMENFASSUNG

Das Forschungsprojekt „Zusammenarbeit in der Dosimetrie“ war 2002 in verschiedene Arbeitsgebiete oder Teilprojekte unterteilt:

- Die Untersuchung zur Mess- und Auswertemethodik zur indirekten Bestimmung von Oberflächenkontaminationen konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Normengerechte Mess- und Auswerteverfahren und standardisierte Gerätekalibrierungen in den dem Aufsichtsbereich der HSK unterstehenden Institutionen gewährleisteten die durch sehr strikte Grenzwerte geforderte hohe Messresultatqualität.
- In der Neutronendosimetrie werden einerseits durch die Teilnahme am EU-Projekt EVIDOS und andererseits durch aktive Entwicklungszusammenarbeit wertvolle Erkenntnisse für dieses komplexe Teilgebiet der Dosimetrie gewonnen. Zudem wird die Aufrechterhaltung des Informationsstandes zu „state of the art“ in der Neutronendosimetrie sichergestellt.
- Einrichtungen für die Messung der Aktivität von Abfallgebinden (Fassmessanlagen) stellen je nach Art der Abfallkonditionierung hohe Ansprüche an die Messtechnik. Die Optimierung von Kalibrier- und Auswertemethodik ist deshalb unumgänglich.
- Mit der Einrichtung eines Kompetenzzentrums an der Sektion Messwesen des PSI für die Überprüfung von Raum- und Abluftanlagen ist begonnen worden. Ziel ist die Bestimmung von Aerosolverlusten in komplexen Leitungssystemen.

Projektziele

Grundsätzliches Ziel des Projekts

Gemäss Vereinbarung vom 1. Januar 2001 ist das grundsätzliche Ziel dieses Forschungsprojektes, mit geeigneten Studien, Entwicklungsarbeiten sowie Messkampagnen auf eine Verbesserung der Dosimetrie hinzuwirken, wobei diese Arbeiten durch die Sektion Messwesen des PSI in enger Zusammenarbeit mit der HSK zu leisten sind.

Geplante Teilprojekte

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollten im Jahr 2002 die folgenden Teilprojekte bearbeitet werden:

Nr.	Teilprojekt	Ziel
01/2	Erarbeitung von Messverfahren und Anleitungen zur Kalibrierung von Geräten zur Bestimmung von Oberflächenkontaminationen mittels Wischtest	Normengerechte Messverfahren und Vergleichbarkeit von Messresultaten aufgrund der Standardisierung der Kalibrier- und Prüfmethodik und der Gewährleistung der Rückverfolgbarkeit
01/3	Laufende Berichterstattung über die internationale Normentätigkeit im Strahlenschutz, insbesondere bei IEC und ISO	Orientierung der HSK; Mitarbeit bei Neugestaltung oder Revisionen von Normenwerken
01/4	Weiterentwicklung elektronischer Neutronendosimeter auf Basis von Direct Ion Storage (DIS) und Berichterstattung über das EU-Projekt EVIDOS	Einbringen der Erfahrungen und Prüfmöglichkeiten von Anwenderseite in ein industrielles Entwicklungsprojekt; Gewährleistung und Aufrechterhaltung des Informationsstandes zu „state of the art“ in der Neutronendosimetrie; Gewinn neuer Erkenntnisse durch Teilnahme an einem internationalen Forschungsprojekt
02/1	Kalibrierung (gemäss separater Aufträge an die Sektion) und Überprüfung von Fassmessanlagen in KKW, ZWILAG und PSI (β -Spektroskopie, β -DL)	Empfindlichkeitsoptimierung durch Kalibrierungen; Gewährleistung der Vergleichbarkeit von Messresultaten
02/2	Entwicklung einer Methode zur Bestimmung von Aerosolverlusten in komplexen Leitungssystemen	Einrichtung eines Kompetenzzentrums für die Überprüfung von Raum- oder Abluftüberwachungsanlagen
02/3	Ad hoc Evaluation eines tragbaren Oberflächenkontaminationsmonitors für die HSK	Eruiieren eines für komplexe Messaufgaben bestgeeigneten Geräts

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Übersicht Stand der Arbeiten

Teilprojekt	Abgeschlossen mit Bericht	Zurzeit in Bearbeitung (Einzelheiten in den entsprechenden Abschnitten)
01/2	[1], [2]	
01/3		X
01/4		X
02/1		X
02/2		X
02/3		X

01/2 Erarbeitung von Messverfahren und Anleitungen zur Kalibrierung von Geräten zur Bestimmung von Oberflächenkontaminationen mittels Wischtest

In Fällen erhöhter Umgebungsphotonenstrahlungsfelder (z.B. bei Brennelement-Bahntransporten) ist eine direkte Messung von Oberflächenkontaminationen nicht mehr möglich und es muss auf die Bestimmung von Oberflächenkontaminationen mittels Wischtest zurückgegriffen werden (indirekte Messmethodik). Mess- und Kalibrierverfahren von Geräten zur indirekten Bestimmung von Oberflächenkontaminationen sind sehr weitgehend durch ISO-Normen standardisiert.

In einer ersten Arbeit [1] wurde mittels einer Umfrage aufgezeigt, dass die zurzeit in KKW und ZWILAG eingesetzten Mess- und Auswerteverfahren normengerecht sind. Kalibrierungen von stationären Messeinrichtungen in KKW und ZWILAG durch die Eichstelle des PSI mit normengerechten Kalibrierquellen sowie die Berechnung von Nachweisgrenzen erbrachte die geforderte Rückverfolgbarkeit und standardisierte Kalibriermethodik.

Die strengen ADR-Kontaminationsgrenzwerte für radioaktive Transporte stellen hohe Anforderungen an die eingesetzten Messinstrumente. Es wurde deshalb in einer zweiten Arbeit [2] für tragbare Oberflächenkontaminationsmessgeräte (Stichprobe: Am PSI eingesetzte Kontaminationsmonitore) untersucht, ob diese für die Beurteilung von Über- oder Unterschreitungen der Grenzwerte für Oberflächenkontaminationen nach ADR/SDR, Klasse 7, einsetzbar sind. Dazu wurden Kalibrierungen sowie Berechnungen der Nachweisgrenzen für die direkte und indirekte Messmethodik nach ISO 11292-1 herangezogen.

Es zeigte sich, dass für die direkte Messmethodik die Zahl der für die Beurteilung von Kontaminationen bezüglich der strengeren Grenzwerte der ADR/SDR, Klasse 7, geeigneten tragbaren Messinstrumente beschränkt ist und eine sorgfältige Wahl des geeigneten Messgeräts notwendig ist. Für die Beurteilung von Kontaminationen bezüglich dieser restriktiveren Grenzwerte nach der indirekten Messmethodik sind tragbare Kontaminationsmonitore nicht geeignet und es müssen stationäre Messeinrichtungen, wie in [1] geprüft, herangezogen werden.

Das Teilprojekt wurde mit den Berichten [1] und [2] abgeschlossen.

01/3 Laufende Berichterstattung über die internationale Normentätigkeit im Strahlenschutz, insbesondere bei IEC und ISO

C. Wernli hat an der ISO/TC 85/SC 2 Jahrestagung in Ringhals, Schweden, teilgenommen. Die ISO-Normentätigkeit im Strahlenschutz wird sehr stark von Frankreich unterstützt und beeinflusst. Direkt beteiligt ist die Sektion Messwesen PSI zurzeit in der Neutronendosimetrie. Der ISO-Normentwurf 21909 „Passive Neutron Dosimeters“, mit von der Sektion Messwesen verfassten Kapiteln zu CR-39- und DIS-N-Dosimetern, wurde im Jahr 2002 den Mitgliedsländern zur Stellungnahme vorgelegt. Alle haben zugestimmt, teilweise mit sehr umfangreichen Kommentaren. Diese müssen im Jahr 2003 in den Entwurf eingearbeitet werden.

Beim IEC TC 45 übernahm Herr Thoma, KKB, neu den Vorsitz des Schweizer Unterausschusses. An einer ersten Sitzung in neuer Zusammensetzung wurden die laufenden Projekte besprochen und die Arbeitsweise des Unterausschusses festgelegt. C. Wernli ist Mitglied der IEC Arbeitsgruppe B14 „Thermoluminescence dosimetry for personal and environmental monitoring“. Gemäss Beschluss anlässlich der letzten Sitzung soll diese Norm auf andere Techniken, unter anderem DIS-Systeme, erweitert werden.

01/4 Weiterentwicklung elektronischer Neutronendosimeter auf Basis von Direct Ion Storage (DIS) und Berichterstattung über das EU-Projekt EVIDOS

Bei den elektronischen Neutronendosimetern auf Basis von Direct Ion Storage (DIS) wurden im Berichtsjahr keine neuen baulichen Entwicklungen durchgeführt. Die bestehenden Prototypen wurden jedoch mit verschiedenen Borabschirmungen in thermischen Neutronenstrahlenfeldern getestet.

Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes EVIDOS wurden im Herbst Messungen in den Neutronen-Referenzfeldern der Anlage CANEL und mit den ISO-Quellen in Cadarache/F durchgeführt. Eingesetzt wurden DISN-Dosimeter mit 4 unterschiedlichen Radiator-Konfigurationen sowie CR-39-Dosimeter. Bedingt durch technische Probleme bei der Anlage konnte mit den DISN-Dosimetern nur bei einem Winkel Daten gesammelt werden. Mit den CR-39-Dosimetern konnte dagegen bei den vorgesehenen Winkeln von 0, 45 und 75 Grad neue Daten erfasst werden. Im weiteren wurden die Vorbereitungen für die nächsten Messkampagnen (Mol/B und Sellafield/GB) vorangetrieben.

Die Berichterstattung über das bis 2005 angelegte Forschungsprojekt EVIDOS wird im Rahmen dieses Teilprojekts im Folgejahr weitergeführt.

02/1 Kalibrierung (gemäss separater Aufträge an die Sektion) und Überprüfung von Fassmessanlagen in KKW, ZWILAG und PSI (β -Spektroskopie, β -DL)

Weil die β -Strahlung der Aktivität von Abfallfässern durch massive Betonummantelungen sehr stark abgeschirmt wird, erfordert die Messung dieser Aktivität mit sogenannten Fassmessanlagen komplexe Kalibrierungen. Das PSI konfigurierte deshalb ein auf diese Anforderungen speziell zugeschnittenes Kalibrierfass [3].

Eine Evaluation der für die Abfallkonditionierung am PSI charakteristischen Gebindetypen ergab, dass eine Kalibrierung der Fassmessanlage des PSI für drei Messgeometrien notwendig war. Es mussten deshalb Ausbeutebestimmungen für die Geometrien „Fass mit breiter aktivitätsfreier Betonummantelung“, „Fass mit schmaler aktivitätsfreier Betonummantelung“ und „Fass mit voller Bestückung (ohne Betonummantelung)“ durchgeführt werden [3].

Im Folgejahr werden die Fassmessanlagen der ZWILAG kalibriert und überprüft werden.

02/2 Entwicklung einer Methode zur Bestimmung von Aerosolverlusten in komplexen Leitungssystemen

Das Ziel dieses im Berichtszeitraum neu angelaufenen Teilprojekts ist die Entwicklung einer Methode zur Prüfung von Aerosolverlusten in Probenahmeleitungen. Die Methode soll insbesondere Leitungssysteme einschliessen, bei denen eine direkte Messung der Aerosolkonzentration am Beginn der Probenahmeleitung nicht möglich ist. Hierfür wurde ein Konzept entwickelt, das auf der Doppelmarkierung eines Luftpakets mit fluoreszierenden Aerosolpartikeln definierter Grösse und einem inerten Tracergas basiert. Das Verhältnis von Aerosolkonzentration zu Tracergaskonzentration ist eine von Verdünnungen und Beimischungen unabhängige Messgrösse. Es wird an zugänglichen Orten des Leitungssystems und am Ende der Probenahmeleitung

bestimmt. Der Vergleich dieser Messwerte liefert Aufschluss über die Verluste an Aerosolpartikeln für eine wohldefinierte Teilchengrösse. Mit geeigneten Aerosolgeneratoren ist der Einsatz von monodispersen Partikeln im Durchmesserbereich zwischen 0.05 und 50 Mikrometern möglich.

Es wurde zunächst ein Zeit- und Kostenplan des Projekts erstellt. Vorstudien für die Evaluation von kostengünstigen Messmethoden für fluoreszierende Aerosolpartikel und das Tracergas Schwefelhexafluorid sind angelaufen.

02/3 ad hoc Evaluation eines tragbaren Oberflächenkontaminationsmonitors für die HSK

Verschiedene, zum Teil auch bei KKW, PSI und ZWILAG (noch) nicht im Betrieb stehende Oberflächenkontaminationsmonitore mit Szintillationsdetektor, Xe-gefülltem Proportionalzählrohr und gasgespültem Proportionalzählrohr wurden unter Einbezug von Kalibrierungen und Nachweisgrenzenberechnungen gemäss den Forderungen der HSK an Empfindlichkeit und Nachweisgrenzen evaluiert.

Zur Erweiterung dieser Evaluation werden weitere Monitore untersucht.

Internationale Zusammenarbeit

Die im Abschnitt 01/3 beschriebene Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts EVIDOS (Contract No FIKR-CT-2001-00175 EU-Forschungsprogramm EURATOM/NUCLEAR FISSION [BBW Nr. 01.0024]) verläuft ausgezeichnet.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die im Abschnitt „Geplante Teilprojekte“ beschriebenen gesetzten Ziele konnten aus Sicht des PSI für die abgeschlossenen Teilprojekte vollumfänglich erreicht werden.

Die Teilprojekte **01/3**, **01/4**, **02/1**, **02/2** und **02/3** werden 2003 in Rahmen des Projekts weitergeführt werden.

Referenzen

- [1] Ch. Schuler, R. Habegger und G. Butterweck: **Stand der indirekten Oberflächenkontaminationsmesstechnik in KKW und ZWILAG**, TM-96-02-15, 2002
- [2] Ch. Schuler, G. Butterweck, und Hp. Zimmerli: **Die Beurteilung von Oberflächenkontaminationen nach ADR/SDR, Klasse 7, mit tragbaren Oberflächenkontaminationsmonitoren**, TM-96-02-17, 2002
- [3] G. Butterweck, Ch. Schuler und R. Habegger: **Kalibrierung der PSI-Fassmessaanlage**, TM-96-02-12, 2002
- [4] Fantuzzi, E., Boschung, M., Fiechtner, A., Hoffmann, J., McKeever, R. and Stokes, R.: **Intecomparison Among Fast Neutron Dosimetric Services Using CR39 Material of Different Compositions**, 21st International Conference on Nuclear Tracks in Solids, New Delhi, India, 21. - 25. Oktober 2002



Datum: 6. Februar 2003
Von: Dr. Franz Cartier

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Zusammenarbeit in der Radioanalytik

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Trotz hohem Stand der Messtechnik im Strahlenschutz ergeben sich immer neue Anforderungen aus der Praxis, denen mit Neuentwicklungen von Messmethoden und mit neuen Lösungsansätzen begegnet werden muss. Beispiele sind Freigabemessungen von Materialien beim Rückbau oder Messungen von Umweltproben im Rahmen der Überwachung der Immissionen und von Proben für die zur Überwachung der Inkorporationen. Im PSI befasst sich die Sektion Messwesen der Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit mit Fragestellungen dieser Art. Die vorliegende Vereinbarung ermöglicht der HSK Entwicklungsarbeiten für Analyse- und Messmethoden durchführen zu lassen.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Der Projektbegleiter beurteilt den Arbeitsfortschritt als sehr gut:

Das radiochemische Trennverfahren für die Analyse der Transurane Plutonium, Ameritium und Curium in Stuhlproben ist durch zwei Methoden zur Trennung von Uran und Thorium erweitert worden. Eine der Methoden kam in der internationalen Vergleichsmessung PROCORAD 2002 zur Anwendung. Die Methode zur Trennung von Neptunium ist noch in Entwicklung.

Die Methode zur Analyse von ^{90}Sr ist erweitert worden, sodass ^{89}Sr und ^{90}Sr simultan bestimmt werden kann. Diese Methode ist bei einem Ereignis besonders geeignet.

Die Methode zur Bestimmung von ^{14}C in Umweltproben wie beispielsweise Baumblättern ist in einer Vergleichsmessung mit der Uni Bern erprobt worden.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Ein wesentlicher Gewinn der Vereinbarung ist die Umsetzung des Stands der Technik der chemischen Trenn- und Analyseverfahren in die Radioanalytik. Hier ist insbesondere der Einsatz modernster chromatographischen Extraktionskolonnen zu erwähnen. Die hohe Qualität der Messmethoden ist anhand der Ergebnisse an nationalen und internationalen Vergleichsmessungen belegt. Für die Aufsichtstätigkeit der HSK sind die umfassenden Immissionsmessungen in der Umgebung des ZWILAG zur Beweissicherung sehr wichtig. Von grossem Nutzen für die HSK ist auch die umgehende Bearbeitung von aktuell anstehenden Fragen, wie die Bestimmung von Polonium in Blei Bismut Legierungen einer Forschungsanlage und der Transurane in Reaktorwasser Proben aus einem Kernkraftwerk.

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Die regelmässigen Fortschrittssitzungen in der Mitte- und die Berichterstattung auf Ende Quartal wird im gegenseitigen Einverständnis weitergeführt. Diese Vereinbarung mit dem PSI trat am Januar 2002 in Kraft und endet am 31. Dezember 2004.

Rapport annuel 2002, 8 janvier 2003

RADIOANALYTIQUE

Autor und Koautoren	S. Bajo; J. Eikenberg
beauftragte Institution	Paul Scherrer Institut, Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit
Adresse	5232 Villigen PSI
Telefon, E-mail, Internetadresse	56-310 23 39, sixto.bajo@psi.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	Kredit 0.805-3100.044/8 / 82612
Dauer des Projekts (von – bis)	01.01.2002 – 31.12.2004

RESUME

Notre travail a porté sur:

1. Développement et /ou d'application de méthodes radiochimiques pour la détermination de:
 - Pu, Am, Cm, U, Th et Np dans les selles;
 - ^{89}Sr et ^{90}Sr dans l'eau de réacteur et les échantillons de l'environnement;
 - ^{14}C dans la végétation des alentours du PSI, KKB et KKL;
 - actinides dans frottis de KKL;
 - $^{206,208,210}\text{Po}$ dans la cible Pb-Bi de la source à spallation (SINQ) au PSI; et
 - actinides dans les eaux du laboratoire du Grimsel (CEDRA).
2. Participation à des essais d'intercomparaison en Suisse : Institut de radiophysique appliquée (Lausanne), Office fédéral de la santé publique (Fribourg).
3. Participation à des essais d'intercomparaison internationaux: eaux, urines, sols, selles (Bundesamt für Strahlenschutz (D), PROCORAD (F), IAEA (A).

Buts du projet

- 01/1 Elargissement des méthodes radiochimiques de dosage des actinides Pu, Am et Cm dans les selles à l'U, le Th et le Np
- 02/1 Détermination simultanée de ^{89}Sr et ^{90}Sr dans l'eau de réacteur et les échantillons de l'environnement
- 02/2 Détermination de ^{14}C dans des échantillons des alentours du PSI, KKB et KKL
- 02/3 Calibrage d'un détecteur de Ge pour le rayonnement gamma à faible énergie. Application d'un logiciel pour la correction en spectrométrie gamma de la géométrie de mesure, de l'autoabsorption et des effets de coïncidence
- 02/4 Travaux ad hoc pour la SDN en accord avec le directeur du projet
- 02/5 Participation à des essais internationaux d'intercomparaison

Travaux effectués et résultats acquis

01/1 Elargissement des méthodes radiochimiques de dosage des actinides Pu, Am et Cm dans les selles à l'U, le Th et le Np

U et Th. Suite aux travaux de 2001 (cf. paragraphe 01/1 du Rapport 2001), les méthodes suivantes ont été adaptées pour le dosage de l'U et du Th dans les selles. Dans tous les cas l'échantillon est calciné par chauffage progressif de 200°C à 500°C. Les traceurs appropriés sont alors ajoutés. Suite à l'ajout d'acide nitrique et l'évaporation à sec, les cendres sont de nouveau calcinées à 400 °C. On procède alors au lessivage des cendres par l'acide nitrique 8 molaire à ébullition. La solution résultante est séparée du petit résidu insoluble et l'acidité en acide nitrique est ajustée en fonction de la méthode choisie.

Méthode A: L'U et le Th sont déterminés ensemble avec le Pu, l'Am et le Cm. La solution de départ est 3 molaire en acide nitrique. On procède alors à la réduction du Pu à Pu(III) avec les réactifs acide ascorbique/sulfamate ferreux. La solution résultante contient Pu(III), Am(III), Cm(III), U(VI) et Th(IV). Elle est versée dans une colonne UTEVA de la firme EICHROM. Le Th et l'U sont retenus sur la colonne tandis que les autres restent dans la solution. Cette solution entre dans une colonne TRU.Spec, qui permet la séparation du Pu d'un côté et de l'Am et du Cm de l'autre.

La colonne UTEVA est lavée par l'acide nitrique 3 molaire, et le Th est ensuite élué par l'acide chlorhydrique 5 molaire suivi de l'élué de l'U par l'acide chlorhydrique 0.020 molaire.

Cette méthode a été appliquée à la détermination de l'U dans les selles de l'exercice d'intercomparaison PROCORAD 2002 (cf 02/5).

Méthode B: Seul le Th ou le Th plus le Pu sont déterminés. La solution de départ est 8 molaire en acide nitrique. Le Th(IV) plus le Pu(IV) sont fixés sur l'échangeur anionique BIORAD 1-X2. L'U, l'Am et le Cm passent avec la solution de départ et les lavages d'acide nitrique 8 molaire. Le Th est ensuite élué par l'acide chlorhydrique 10-12.2 molaire et le Pu par une solution 9 molaire en acide chlorhydrique et 0.10 molaire en acide iodidrique.

Dans tous les cas, les nucléides séparés sont électrodéposés sur des disques en acier inoxydable avant la mesure par spectrométrie alpha.

Np. Le Pu(IV) et le Np(IV) ont été séparés dans l'acide nitrique 8 molaire sur l'échangeur anionique BIORAD 1-X2. La fraction Np contient < 1% du Pu. L'obtention de Np(IV) dans la solution du lessivage des cendres est problématique. Une publication récente de A. Morgenstern et al. (Radiochimica Acta 90, 81-85 (2002)) contient quelques idées qui pourraient aider à résoudre le problème. Elles seront testées pendant l'année 2003.

02/1 Détermination simultanée de ^{89}Sr et ^{90}Sr dans l'eau de réacteur et les échantillons de l'environnement

La détermination de ^{90}Sr dans différentes matrices est effectuée dans notre laboratoire depuis plusieurs années. Une méthode a été maintenant mise en oeuvre pour permettre la détermination simultanée de ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28.7$ a) et ^{89}Sr ($T_{1/2} = 50.5$ d). Cette méthode comporte les étapes suivantes : 1) mise en solution de l'échantillon en présence du traceur ^{85}Sr ; 2) séparation du Sr des principaux composants de la matrice; 3) séparation du Sr des isotopes d'Y (^{90}Y et ^{91}Y) par chromatographie d'extraction sur une colonne Sr.Spec de la firme Eichrom; 4) élution du Sr (^{90}Sr et ^{89}Sr); 5) mesure immédiate de ^{89}Sr par scintillation liquide basée sur l'effet Cerenkov ; 6) attente pour permettre la croissance de ^{90}Y (fille de ^{90}Sr) et mesure Cerenkov de $^{89}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$; et 7) addition d'un scintillateur pour permettre la mesure de $^{89}\text{Sr} + ^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (fenêtre A : activité de l'échantillon) et ^{85}Sr (fenêtre B : activité du traceur pour le calcul du rendement chimique).

02/2 Détermination de ^{14}C dans des échantillons des alentours du PSI, KKB et KKL

La méthode mise au point ces dernières années est basée sur la transformation en benzène du carbone de l'échantillon (cf paragraphe 01/4 du rapport 2001). Elle a été appliquée à la détermination du ^{14}C dans des feuilles d'arbres. Les arbres étaient situés dans les alentours du PSI et des centrales nucléaires de Beznau et Leibstadt.

La justesse de notre méthode a été vérifiée en analysant un standard d'acide oxalique du NIST avec une teneur en ^{14}C de 226 mBq/g de carbone. Notre résultat diffère en + 0.9 % de la valeur certifiée.

Quelques échantillons provenant du PSI sont en cours d'analyse par l'Institut de physique de l'Université de Berne dans le cadre d'un essai d'intercomparaison.

02/3 Calibrage d'un détecteur de Ge pour les rayonnements gamma à faible énergie. Application d'un logiciel pour la correction en spectrométrie gamma de la géométrie de mesure, de l'autoabsorption et des effets de coïncidence

Le logiciel GESPECOR est actuellement en développement. On demande au logiciel de fournir des résultats lors de la mesure d'échantillons de différentes densités et compositions chimiques et dans le cas d'échantillons de géométrie non calibrée. Les effets de sommation doivent être pris en compte. Actuellement les travaux portent sur la mesure de sources de référence de différentes densités en variant la distance source-détecteur.

02/4 Travaux ad hoc pour la SDN en accord avec le directeur du projet

Centrale nucléaire de Leibstadt. Analyses de routine pour la détermination de ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{242}Cm et ^{244}Cm dans l'eau du réacteur et dans les frottis par les méthodes décrites dans les rapports des années précédentes.

Source de neutrons à spallation SINQ au PSI. Dans le domaine de la radioprotection nous avons été amenés à déterminer plusieurs isotopes de Po (^{206}Po , ^{208}Po et ^{210}Po) dans l'alliage Pb-Bi de la cible du SINQ. Pour ce faire, des échantillons d'environ 1 g ont été mis en solution par l'acide nitrique en présence du ^{209}Po comme traceur. La solution résultante a été évaporée à sec, les nitrates transformés en chlorures et le Po déposé sur un disque en argent d'une solution environ 1 molaire en acide chlorhydrique. Les disques ainsi obtenus ont été mesurés par spectrométrie alpha.

On a tiré profit de l'expérience acquise pour mettre au point une méthode pour la détermination du Po (habituellement ^{210}Po) dans la matière organique. Etant donné que lors de la minéralisation de la matière organique par voie sèche le Po est partiellement ou totalement volatilisé, on a fait appel à une méthode par voie humide. Le minéralisat ainsi obtenu est dilué avec de l'eau, l'acidité est ajustée et le Po déposé sur le disque en argent. Il n'y a pas de pertes de Po pendant la minéralisation. La méthode mise au point est prête à l'emploi.

Collaboration nationale

Centrale nucléaire de Gösgen. Des contacts ont été établis avec cette centrale pour la mise en œuvre de la méthode d'électrodéposition des actinides utilisée dans notre laboratoire (S. Bajo et J. Eikenberg, *Electrodeposition of actinides for alpha-spectrometry*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1999, 242, 745-751).

CEDRA. Dans le cadre des expériences de migration de radionucléides dans les formations géologiques (Laboratoire souterrain du Grimsel), nous avons effectué le dosage de quelques actinides dans des échantillons d'eau. Les nucléides déterminés sont ^{233}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , et ^{241}Am . Nos résultats sont tout à fait d'accord avec ceux du Forschungszentrum Karlsruhe pour des échantillons similaires.

Institut universitaire de radiophysique appliquée (IRA) à Lausanne. Participation à l'intercomparaison GEDI 2002 de mesure du tritium dans les urines. Les analyses ont porté sur quatre échantillons dopés au niveau d'environ 1 MBq/l. Nos résultats ont montré des écarts allant de - 7 % à - 13 %.

Office fédéral de la santé publique (OFSP), Section de surveillance de la radioactivité (SUEr). Participation à l'intercomparaison Tritium SUEr 2002 de mesure du tritium dans l'eau. L'intercomparaison a porté sur un échantillon dopé à 2400 Bq/l. Notre résultat a montré un écart de - 3 %.

ZWILAG. L'étude conduite pendant 1997-2001 sur la détermination de ^{90}Sr , ^{63}Ni , ^{137}Cs , $^{238,239}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm et ^{14}C a été conclue et un rapport a été publié [1]. Ces nucléides, sauf ^{14}C , ont été déterminés dans 50 échantillons de sol pris périodiquement entre octobre 1997 et décembre 1999. Les quatre parcelles d'échantillonnage ont été choisies dans la direction des quatre points cardinaux autour du Dépôt intermédiaire de résidus radioactifs (ZWILAG) à Würenlingen. Les parcelles ont été échantillonnées six fois pendant la période indiquée, avant la mise en service du dépôt.

Le ^{14}C n'a pas été déterminé dans les sols mais dans les feuilles d'arbres.

Les résultats obtenus sont tout à fait d'accord avec ceux du plateau suisse publiés annuellement par l'Office fédéral de la santé publique.

Collaboration internationale

02/5 Participation à des essais internationaux d'intercomparaison

Résultats soumis en 2000-2001 et publiés en 2002

Actinides dans les urines. Détermination de Pu, Am et U dans les urines (Actiniden in Urin 2001, IAEA, Vienne, Autriche). Deux échantillons A et B dopés avec plusieurs actinides au niveau de 10-20 mBq par actinide. Nos résultats ont montré des écarts de + 10 % (^{239}Pu , A), + 25 % (^{241}Am , A), + 4 % (^{238}U , B), + 1 % ($^{235+236}\text{U}$, B) et + 9 % (^{234}U , B).

^{35}S dans les urines. Détermination de ^{35}S dans les urines (^{35}S in Urin 2001, Bundesamt für Strahlenschutz, Berlin). Deux échantillons 1 et 2 dopés avec 89.9 Bq/l et 276 Bq/l, respectivement. Nos résultats ont montré des écarts de + 10 % (1) et + 2 % (2).

Radionucléides dans les sédiments. Détermination de radionucléides dans 3 sédiments d'eau douce, l'un naturel (S1) et les autres dopés (S2, S3) avec 13 radionucléides (émetteurs gamma). Nos résultats ont montré un très bon accord avec la valeur moyenne des résultats des laboratoires acceptés (S1), et avec les valeurs cible (S2, S3). Un rapport a été publié (Walter J. Krause: *Vergleichsanalyse im Sediment 2000*, Zwischenbericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Rapport BfG-1345, Koblenz, März 2002.

Résultats soumis et publiés en 2002

Actinides dans les selles. Détermination d'actinides dans 3 échantillons de cendres de selles (A, B et C) PROCORAD 2002 (Association pour la PROMotion du CONtrôle de qualité des analyses de biologie médicale en RADiotoxicologie, France, www.procorad.org). Le CD sur l'évaluation des résultats peut être obtenu auprès des auteurs du présent rapport.

Les selles, provenant de personnes non exposées, ont été dopées au laboratoire du CEA à La Hague. Valeurs cibles 17-30 mBq par nucléide dans 3 g de cendres. Nos résultats ont montré les écarts suivants: de -1 à - 4 % (^{239}Pu), + 1 % (^{238}Pu) et + 2 % (^{241}Am).

Nous avons aussi déterminé l'uranium (^{238}U et ^{234}U) dans les 3 échantillons. Il s'agit de l'uranium naturel (non dopé). Il n'y a pas de valeurs cibles. Nos valeurs sont comparées aux moyennes arithmétiques de l'ensemble des résultats acceptés. Ils montrent les écarts suivants: de - 4 % à + 4 % pour les échantillons A et B et - 13 % pour l'échantillon C.

^3H dans les urines. Détermination du ^3H dans les urines dans le cadre de PROCORAD 2002 (voir plus haut). Quatre échantillons d'urines (B, C, D, E) dopés avec de l'eau tritiée dans la fourchette 1 - 6 kBq/l. Nos résultats ont montré des écarts dans l'intervalle allant de - 16 % à - 4 %. En plus, un échantillon (F) dopé avec de la thymidine tritiée au niveau de 36 kBq/l s'est écarté de - 11 % de la valeur cible.

Résultats soumis en 2001-2002 et pas encore publiés

Détermination de la teneur en radionucléides de l'eau (Gammaring 2001, Forschungszentrum Seibersdorf, Vienne, Autriche).

IAEA Intercomparison Irish Sea Sediment IAEA-385. Les mesures effectuées ont porté sur les émetteurs gamma. Il est prévu de déterminer aussi le $^{238,239}\text{Pu}$ l'année prochaine.

Références

- [1] J. Eikenberg, S. Bajo, J. Hitz, H. Beer, C. Gann, M. Rüthi, L. Wyer, J. Ziegler: ***Spezialnuklid-Analysen für die Beweissicherung ZWILAG 1997-2001: Abschlussbericht der Immissionsmessungen***, PSI Bericht Nr. 02-15, ISSN 1019-0643, July 2002.



Datum: 10. Februar 2003
Von: Dr. Georg Schwarz

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Aeroradiometrie 2

Allgemeines

Der Erhalt der Einsatzbereitschaft der Aeroradiometrie bedingt eine ständige Wartung und eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Methodik und der Messsysteme. Aus diesem Grund wurde das bisher bestehende Forschungsprojekt "Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie" im Jahr 2001 in einen Expertenvertrag mit dem PSI überführt. Neben dem Erhalt der Einsatzbereitschaft soll die Mitarbeit der Schweiz am EU-Projekt „European Calibration and Coordination of Mobile and Airborne Gamma Spectrometry (ECCOMAGS)“ ermöglicht und somit auch die internationale Vergleichbarkeit der Messergebnisse verbessert werden. Zudem soll die wissenschaftliche Betreuung der operationellen Einsätze durch die Nationale Alarmzentrale sichergestellt werden. Schliesslich soll die HSK beim Aufbau und der Anwendung von Datenbanken unterstützt werden.

Wurde das anvisierte Ziel 2002 erreicht?

Der Schwerpunkt der Arbeiten im Jahre 2002 lag bei der Vorbereitung der internationalen Messübung in Schottland. Wegen organisatorischer Mängel seitens der Organisatoren vor Ort erhielten die Schweiz und weitere europäische Teams mit militärischen Helikoptern keine Britische Flugerlaubnis.

Dank der Improvisationsfähigkeit und des Einsatzes des schweizerischen Teams ist es dann doch gelungen beim Rückflug einige Datensätze zu erfassen. So konnte trotz widriger Umstände ein Quervergleich mit den übrigen europäischen Teams durchgeführt und damit das Hauptziel für das Jahr 2002 erreicht werden.

Die Berichterstattung über die durchgeführten Messungen erfolgte termingerecht. Wichtige Vorbereitungsarbeiten für die im Jahr 2003 vorgesehene Systemerneuerung konnten abgeschlossen werden.

Wie schätzen Sie die Bedeutung von dieser Forschungstätigkeit ein?

Die Aeroradiometrie ist ein wichtiges Element der schweizerischen Notfallorganisation und wird seit 1994 operationell unter der Leitung der NAZ eingesetzt. Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Erweiterungen und Verbesserungen am Messsystem und an der Methodik erlauben nicht nur schnellere und bessere Resultate für alle beteiligten Stellen in Notfällen sondern auch eine internationale Vergleichbarkeit der Messdaten.

Was könnte noch verbessert werden?

Das Projekt war trotz widriger äusserer Umstände erfolgreich. Es drängen sich zurzeit keine Verbesserungsmassnahmen auf.

AERORADIOMETRIE 2

Autor und Koautoren	B. Bucher, Ch. Wernli
beauftragte Institution	Paul Scherrer Institut
Adresse	5232 Villigen PSI
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 310 23 38, benno.bucher@psi.ch , www.psi.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	60239 / H-100061
Dauer des Projekts (von – bis)	03.04.2001 – 31.12.2003

ZUSAMMENFASSUNG

Im Jahre 2002 konnten verschiedene Teilaspekte des Projektes bearbeitet werden. Neben der Berichterstattung in der Publikation „Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz“, herausgegeben vom Bundesamt für Gesundheit, wurde auch der wissenschaftliche Bericht zu den Messungen im Rahmen der Übung UARM01 publiziert. Nach längerer Vorbereitungsphase fand Ende Mai die internationale Messübung im Rahmen des EU-Projektes ECCOMAGS statt. Obwohl uns und anderen Teams, die mit militärischen Helikoptern an der Übung teilnehmen wollten, die Flugerlaubnis für Messflüge verweigert wurde, konnten beim Rückflug wertvolle Daten gesammelt werden. Diese ermöglichen neben der genauen Backgroundbestimmung auch einen Vergleich mit anderen europäischen Messteams. In der Operationalisierung der neuen online Auswertungssoftware konnten mit der ersten Einführung der Benutzer und der Fertigstellung der Dokumentation und Benutzeranleitung wichtige Schritte gemacht werden. Für die Datenbank, die alle schweizerischen aeroradiometrischen Messungen enthalten soll, konnte die Datenstruktur entwickelt und implementiert werden. Mit der entsprechenden Software für den Datenimport wurde begonnen. Schliesslich konnten im Jahre 2002 auch die organisatorischen, finanziellen und konzeptionellen Voraussetzungen für die Erneuerung der Messsysteme geschaffen werden.

Projektziele

Die Aeroradiometrie ist ein Messmittel der Einsatzorganisation Radioaktivität (EOR) des Bundes und untersteht operationell der Nationalen Alarmzentrale. Der Erhalt der Einsatzbereitschaft der Aeroradiometrie bedingt eine ständige Wartung und eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Methodik und der Messsysteme. Weiter soll die Mitarbeit der Schweiz am EU-Projekt „European Calibration and Coordination of Mobile and Airborne Gamma Spectrometry (ECCOMAGS)“ ermöglicht und somit auch die internationale Vergleichbarkeit der Messergebnisse verbessert werden. Zudem soll die wissenschaftliche Betreuung der operationellen Einsätze durch die Nationale Alarmzentrale sichergestellt werden. Schliesslich soll die HSK beim Aufbau und der Anwendung von Datenbanken unterstützt werden.

Im Jahr 2002 sollte die Operationalisierung der neuen online Auswertesoftware vorangetrieben und der wissenschaftliche Bericht sowie die Berichterstattung über die Messungen des Jahres 2001 abgeschlossen werden. Im Rahmen des EU-Projektes ECCOMAGS sollte an der internationalen Gemeinschaftsübung in Schottland teilgenommen werden. Zudem sollte mit dem Aufbau einer Datenbank für alle bisherigen aeroradiometrische Messungen begonnen werden. Für die Erneuerung der Messsysteme sind die konzeptionellen Grundlagen zu schaffen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Mai 2002 konnte nach aufwendigen Vorarbeiten an der internationalen Messübung in Schottland teilgenommen werden. Zusammen mit Mitarbeitern der NAZ, Angehörigen des *Stabes BR NAZ*, Mitarbeitern der *SUeR* und der *ETH* Zürich flog ein Super Puma der *Schweizer Armee*, der mit dem aeroradiometrischen Messsystem ausgerüstet war, zur Airbase West Freugh im Südwesten Schottlands. Aufgrund organisatorischer Mängel seitens der Organisatoren vor Ort wurde uns und anderen europäischen Teams, die mit militärischen Helikoptern teilnehmen wollten, die Flugerlaubnis für die Messflüge verweigert. Trotzdem konnten beim Rückflug in die Schweiz wertvolle Messdaten gesammelt werden. So gelang es dennoch, die Ergebnisse unseres Messsystems mit denen anderer europäischer Teams aus Schottland, Deutschland, Frankreich, Schweden und Dänemark zu vergleichen. Es zeigte sich eine sehr gute lineare Korrelation mit den Ergebnissen der anderen Teams, was die korrekte Kalibration unseres Messsystems bestätigte. Weiter konnten aus qualitativ sehr guten Messdaten, die über dem Meer gesammelt wurden, der Background des Helikopters und der kosmische Beitrag sehr genau bestimmt werden.

Neben der internationalen Messübung in Schottland wurden auch noch Messflüge in der Umgebung der Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt sowie der Forschungsanstalt Paul Scherrer Institut durchgeführt. Alle diese Flüge standen unter der operationellen Leitung der NAZ, die dabei wissenschaftlich unterstützt wurde. Zudem wurden die Benutzer aus dem Stab BR NAZ während der Messflüge in den Einsatz der online Auswertungssoftware eingeführt.

Der wissenschaftliche Bericht „*Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM01*“ wurde erstellt [1] und Mitte Jahr publiziert. Im weiteren wurde auch ein Beitrag an den Jahresbericht des Bundesamtes für Gesundheit in „*Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2001*“ [2] geliefert.

Für die Erfassung aller aeroradiometrischer Messdaten wurde eine Datenbankstruktur entwickelt und implementiert. Zudem wurde mit der Entwicklung einer Software begonnen, welche die bestehenden Rohdaten in die Datenbank einfüllt.

Für die Operationalisierung der neu entwickelten online Auswertungssoftware *GammaMap* wurden als vorbereitende Arbeiten die Dokumentation sowie die Benutzeranleitung fertiggestellt. Die Schulung der Benutzer konnte noch nicht abgeschlossen werden.

Für die geplante Erneuerung der Messsysteme wurden die organisatorischen und konzeptionellen Voraussetzungen geschaffen. So konnten die nötigen finanziellen Mittel für nächstes Jahr bereitgestellt und auch die Verantwortlichkeiten für die Erneuerung sowie die Wartung der Messsysteme festgelegt werden. Ein Zeitplan für die durchzuführenden Arbeiten liegt vor.

Nationale Zusammenarbeit

Zur Zeit erfolgt die Wartung der Messsysteme durch das Institut für Geophysik der ETH Zürich. Die operationelle Leitung der Messflüge liegt bei der Nationalen Alarmzentrale. Sie führt die jährlichen Messflüge als Übung des Stabes BR NAZ durch. In diese Übungen sind jeweils auch Experten aus dem Bundesamt für Gesundheit (Abteilung Strahlenschutz, Sektion Überwachung der Radioaktivität) integriert.

Als Berater der HSK in Aeroradiometrie und als Vorsitzender der Fachgruppe Aeroradiometrie Schweiz (FAR) ist Prof. L. Rybach (Küsnacht) tätig.

Internationale Zusammenarbeit

Die HSK ist Partner im EU-Projekt „European Calibration and Coordination of Mobile and Airborne Gamma Spectrometry (ECCOMAGS, FIKR-CT-2000-20098)“. Die entsprechenden Kontakte und Zusammenarbeiten werden von B. Bucher (PSI) wahrgenommen. Dank dieses Projektes bestehen beste Kontakte zu den Aeroradiometrie-Teams in Deutschland, Österreich, Frankreich, Dänemark, Schottland, Schweden und Norwegen. Trotz gewisser Probleme lieferte die gemeinsame Übung in Schottland einen sehr wertvollen Beitrag zur Interkalibration der europäischen Aeroradiometriesysteme.

Im weiteren bestehen gute Kontakte zum Schwedischen Strahlenschutzinstitut (SSI) bezüglich Softwareentwicklung.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die Teilnahme an der internationalen Messübung und deren Resultate demonstrierten die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des schweizerischen Messsystems. Das EU-Projekt ECCOMAGS wird auch im Jahre 2003 weiterlaufen. Dabei werden die Schwerpunkte bei der Zusammenarbeit in der Spektrenanalyse und bei den unbemannten Flugobjekten liegen. Neben den Kontakten zu den Partnern aus dem EU-Projekt sollen auch Kontakte zu anderen Organisationen gepflegt werden, die im Bereich Strahlenschutz und Notfallorganisation (Bereich Radioaktivität) tätig sind.

Mit der Berichterstattung über die aeroradiometrischen Messungen des Jahres 2001 konnte ein weiteres Mal ein Beitrag zur Überwachung der Umweltradioaktivität geleistet werden. Zu den Messflügen des Jahres 2002 wird wiederum ein wissenschaftlicher Bericht erstellt und 2003 publiziert werden.

Mit dem Erstellen der Dokumentation und der Benutzeranleitung für die neue online Datenauswertungssoftware konnte ein erster Schritt zur Operationalisierung gemacht werden. Trotz erster Einführung der Benutzer in die Handhabung der Software ist aber eine eigentliche Schulung immer noch nötig. Diese ist für das Jahr 2003 geplant.

Mit der Implementierung der Aeroradiometriedatenbankstruktur erfolgte ein erster Schritt zur Datenarchivierung und -haltung. Nun müssen noch die existierenden Rohdaten in die Datenbank eingespielen und ein Interface zur Datenbewirtschaftung und -nutzung geschaffen werden.

Im Jahre 2002 konnten die Voraussetzungen für die Erneuerung der Messsysteme geschaffen werden. Diese wird nun im Jahre 2003 erfolgen. Im Zuge dieser Erneuerung wird auch die Wartung von der ETH Zürich ans PSI übergehen.

Referenzen

- [1] B. Bucher, L. Rybach, G. Schwarz, Chr. Bärlocher: **Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM01**. Bericht für das Jahr 2001 zuhanden der Fachgruppe Aeroradiometrie (FAR). Interner Bericht, Paul Scherrer Institut, 2002.
- [2] B. Bucher, L. Rybach, G. Schwarz, Chr. Bärlocher: **Aeroradiometrische Aufnahmen in der Schweiz, in: Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz, 2001**. Abteilung Strahlenschutz, Bundesamt für Gesundheit, 2002, ISBN 3-905235-40-4.

Publikationen 2002

- [1] B. Bucher, L. Rybach, G. Schwarz: Environmental Mapping: Comparison of Ground and Airborne Gamma Spectrometry Results under Alpine Conditions, In: D.C.W. Sanderson & J. McLeod (editors), Proc. Int. Symposium on Recent Applications and Developments in Mobile and Airborne Spectrometry (RADMAGS'98), p. 21-28, Univ. Glasgow UK, ISBN 0 85261 685 6
- [2] L. Rybach, B. Bucher, G. Schwarz: Airborne Surveys of Swiss Nuclear Facility Sites, In: D.C.W. Sanderson & J. McLeod (editors), Proc. Int. Symposium on Recent Applications and Developments in Mobile and Airborne Spectrometry (RADMAGS'98), p. 115-121, Univ. Glasgow UK, ISBN 0 85261 685 6
- [3] G. Oberlercher, B. Bucher: A Comparison of the Austrian and Swiss Airborne Gamma Spectroscopy Systems in Alpine Terrain. In: Recent Applications and Developments on Mobile Airborne Gamma Spectrometry, D.C.W. Sanderson & J. McLeod (editors), Proc. Int. Symposium on Recent Applications and Developments in Mobile and Airborne Spectrometry (RADMAGS'98), p. 203-209, Univ. Glasgow UK, ISBN 0 85261 685 6
- [4] L. Rybach, D. Bächler, B. Bucher, G. Schwarz: Radiation doses of Swiss population from external sources. *Journal of Environmental Radioactivity* 62, No. 3, 2002, p. 277-286

Internationale Projekte



Datum: 14. Februar 2003
Von: Dr.-Ing. Brigitte Faust

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Phebus FP

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Seit 1997 beteiligt sich die Schweiz (PSI, HSK) neben den Institutionen des Gastgeberlandes Frankreich (IPSN, EdF), der Europäischen Union, den USA (NRC), Japan (NUPEC, JAERI), Korea (KAERI und Kanada (COG) mit In-Kind Forschungsbeiträgen am internationalen Programm PHEBUS FP (Fission Products). Die Modellierung (FP-Tests) von schweren Störfällen am Forschungsreaktor PHEBUS des ISPN (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire) im französischen Cadarache liefert umfassende Daten zum Verhalten von Spaltprodukten im Kern, im Dampferzeuger und im Containment. Die Beteiligung an diesem Projekt verschafft der Schweiz den Zugang zu international validierten Daten, die in die Codes zur Reaktorsicherheit integriert werden können, sowie die Ableitung von Massnahmen für Sicherheitskonzepte und -vorkehrungen.

Die In-Kind Beiträge der Schweiz durch das *Paul Scherrer Institut*, Bereich Nukleare Energien und Sicherheit, konzentrieren sich auf Post-Test-Analysen (z.B. Ermittlung der Massenbilanz von Spaltprodukten und Elementen der Strukturmaterialien) sowie auf Experimente zum Verhalten des Jods im Reaktorsicherheitsbehälter.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Durchführung von Nachbestrahlungsanalysen zur Charakterisierung des Spaltprodukt- und Brennstoffverhaltens während des Tests FTP-4

Da erst die Ende Mai 2002 (ursprünglich für November 2001 geplant) gelieferten Probelösungen die für Versuche erforderliche Konzentration aufwiesen, konnten die experimentellen Arbeiten zur Analyse der restlichen Nuklide im Jahre 2002 nicht mehr abgeschlossen werden. Die Auslaug-Lösungen der Filter werden Anfang 2003 charakterisiert, der Abschlussbericht hierfür soll bis spätestens Ende März 2003 erstellt werden. Durch die hohen Temperaturen in den Brennstofffragmenten wurden sehr hohe Freisetzungsraten für Cäsium und moderate bis hohe Freisetzungen für die Spaltprodukte mittlerer Flüchtigkeit festgestellt.

Durchführung von Auslaugexperimenten im Rahmen des FTP-2 Versuches

Im Labor OHLA/202 des PSI wurde hinter der 10 cm Bleiabschirmung eine Apparatur zur Auslaugung von drei Filtern aufgebaut. In den anschliessend durchgeführten γ -spektrometrischen Messungen wurde nur eine geringe Spaltproduktfreisetzung festgestellt. Neben der Hauptkomponente Cäsium (leicht flüchtig) wurden kleinere Mengen ^{110m}Ag , ^{125}Sb , ^{129}I und ^{155}Eu angetroffen. Die massenspektrometrischen Analysen werden 2003 weitergeführt und der Abschlussbericht bis Juni 2003 erstellt.

"Borcarbid-Tests" (FPT3)

Der Start des "Borcarbid-Tests" (FPT3), ursprünglich vorgesehen für das Jahr 2003, musste verschoben werden. Durchgeführt wurden lediglich die hierfür erforderlichen Vorarbeiten (siehe Testprotokoll vom April 2002), wobei zu bemerken ist, dass anstelle von Silber-Indium-Cadmium (SIC) als Absorbermaterial Borcarbid verwendet wird. Man möchte damit feststellen, ob die dabei entstehenden Spaltprodukte und insbesondere die Jodverbindungen weniger flüchtig sind und deshalb im Sumpf des Containments zurückgehalten werden können.

Untersuchung des Einflusses der β -Strahlung auf die Stabilität des Silberjodids im Containmentsumpf

Auf Eigeninitiative des PSI wurde dieses Experiment im Rahmen des Phebus-Programmes durchgeführt. Der Einfluss der β -Strahlung auf die Stabilität des Silberjodids im Containmentsumpf wurde in einem In-Kind Beitrag des Labors für Thermohydraulik (LTH) experimentell untersucht und erfolgreich abgeschlossen. Die Resultate und Schlussfolgerungen für die Reaktorsicherheit sollen in einem speziell dafür einberufenen gemeinsamen Meeting des PSI mit dem IRSN/Cadarache, Frankreich, beraten und zur Diskussion gestellt werden. Zusammen mit den PSI-Beiträgen zum ICHEMM-Projekt des 5. Euratom-Rahmenprogramms werden Massnahmen zur substanziellen Verbesserung der Jodrückhaltung abgeleitet, die auch eine lagerechte Entsorgung einbeziehen (eine Analyse der Sumpflösung ist auch in den nächsten Projektabschnitten nicht geplant)

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Phebus ist im Moment auf der ganzen Welt das einzige Versuchsprojekt im Grossmassstab (1:5000) auf dem Gebiet der schweren Unfälle. Durch die internationale Zusammenarbeit der Forscher sind nicht nur qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erwarten, sondern es wird auch deren Verständnis untereinander gefördert. Weitere Arbeiten sind noch erforderlich, um das Wissen aus den gewonnenen Resultaten auf die Sicherheitsanalyse und das Unfallmanagement transferieren zu können.

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

In einem, im Juni 2003 in Cadarache, Frankreich, stattfindenden Internationalen Technischen Seminar zum Phebus FP Programm wird in sechs Sektionen eine Übersicht über bisherige Testergebnisse gegeben. Berichtet wird auch über die Brennstabbündel-Degradation, die Spaltproduktfreisetzung und ihr Transportverhalten sowie über die Jodchemie bzw. neu entwickelte Methoden zur Charakterisierung des Jodverhaltens. Die Resultate dienen nicht nur dem Programm Phebus, sondern sollen auch bei den zukünftigen experimentell-orientierten Jod-Projekten des CEA und IRSN angewandt werden.

PHEBUS FISSION PRODUCT PROGRAMM

SCHWEIZER IN-KIND BEITRÄGE

Autor und Koautoren	Z.Kopajtic, D.Gavillet J.Birchley, S.Guentay
beauftragte Institution	Paul Scherrer Institut
Adresse	5232 Villigen PSI
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 310 2111, jonathan.birchley@psi.ch, www.psi.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	H 84.2-72.PRJV
Dauer des Projekts (von – bis)	11.06.1997 – 30.06.2003

ZUSAMMENFASSUNG

Das PSI beteiligt sich an der Planung, der Durchführung von Nachbestrahlungsuntersuchungen (PIE) und –analysen (PTA) sowie der Datenauswertung der Experimente des PHEBUS FP Programms. Mit Modellrechnungen werden einzelne Aspekte (SCDAP/RELAPS, VICTORIA, CONTAIN, IMPAIR-3) und auch die Gesamtheit (MELCOR) des Ablaufs eines Reaktorstörfalls verfolgt sowie die Codes validiert und qualifiziert.

Im LWV wurden im Rahmen des FPT4-PTA Versuches Auslauglösungen von Filtern 4AO-031 und 4AO-042 γ - und massenspektrometrisch Spaltprodukte und der Elemente des Brennstoffes und der Strukturmaterialien analysiert sowie die Massenbilanz berechnet. Das FPT4-PTA Projekt sollte ursprünglich per Ende 2002 abgeschlossen sein. Die erste Lieferung von Proben hat sich vor allem wegen der Schwierigkeiten beim Transport stark verzögert. Die dann im November 2001 gelieferten Proben wurden beim Lieferanten (ITU) bedauerlicherweise so stark verdünnt, dass die Konzentrationen der meisten Elemente unter den Nachweisgrenzen lagen. Es wurde deshalb beschlossen, einen zweiten Transport mit konzentrierteren Probelösungen zu organisieren. Die neuen Proben wurden Ende Mai 2002 geliefert. Leider konnten diesmal nur sehr kleine Probenmengen transportiert werden. Mit der Projektleitung in Cadarache musste deshalb eine Priorisierung bei der Bestimmung von Nukliden gesetzt werden. Infolge diverser Vorkommnisse konnten leider nicht alle experimentellen Arbeiten 2002 abgeschlossen werden. Die restlichen Nuklide werden Anfang 2003 analysiert. Der Abschlussbericht wird bis spätestens Ende März 2003 erstellt.

Im Rahmen des FPT2-PTA Versuches wurde zuerst in der Kapelle des Labors OHLA/202 hinter der 10 cm Bleiabschirmung eine Apparatur zur Auslaugung von drei Filtern aufgebaut. Daraufhin wurden mit allen drei Filtern Auslaugexperimente und anschliessend die γ -spektrometrischen Messungen von Auslaug-Lösungen durchgeführt. Dabei konnten neben der Hauptkomponente Cäsium auch kleinere Mengen weiterer Spaltprodukte ^{110m}Ag , ^{125}Sb , ^{129}I und ^{155}Eu bestimmt werden.

Die massenspektrometrischen Analysen werden 2003 ausgeführt und der Abschlussbericht bis Juni 2003 erstellt. Die Analysen von Sumpflösungen wurden aus dem Projekt sistiert. Dafür wurden wir gebeten, die Auslaug-Versuche und Analysen an zwei zusätzlichen Filtern, die bei AET (UK) analysiert werden sollten, am PSI durchzuführen. Diese Arbeiten sollen im Rahmen des FPT2-PTA (LWV) abgewickelt werden. Zur Zeit werden Transportformalitäten abgeklärt und ein neues Work Statement erstellt. Zwei Offerten für die PIE Untersuchungen von Proben von FPT2 und FPT4 Materialien wurden der PHEBUS-Projektleitung unterbreitet (EPMA und Abbrand). Der Transport von 5 Proben von Cadarache zum PSI wurde organisiert. Dieser Transport ist für Frühling 2003 vorgesehen. Der Einfluss der β -Strahlung auf die Stabilität des Silberiodids im Sumpf des Containments wurde in einem In-Kind Beitrag des Labors für Thermohydraulik (LTH) experimentell untersucht und erfolgreich abgeschlossen. Die Resultate und Schlussfolgerungen für die Reaktorsicherheit werden in einem speziell dafür einberufenen gemeinsamen Meeting des PSI mit dem IRSN/Cadarache, Frankreich beraten und auf eingeladenen Vorträgen zum Internationalen PHEBUS-Seminar zur Diskussion gestellt. Zusammen mit den PSI-Beiträgen zum ICHEMM-Projekt des 5.Euratom-Rahmenprogramms werden Massnahmen zur substantiellen Verbesserung der lodrückhaltung abgeleitet, die auch eine lagergerechte Entsorgung einbeziehen.

Projektziele

Am Kernreaktor „PHEBUS“ in Cadarache (Frankreich) werden im Rahmen der international koordinierten langfristigen Arbeiten Experimente durchgeführt, welche die Daten für eine realitätsnahe Modellierung von Störfallabläufen liefern sollen. Dabei wird insbesondere der Verlauf der Freisetzung von Spaltprodukten verfolgt, die bei einem möglichen Schmelzen des Brennstoffs im Kernreaktor, verursacht durch Versagen der Kühlung, auftreten kann. Das Projekt ist integriert in die Forschung des Bereiches Nukleare Energie und Sicherheit (NES) des Paul Scherrer Instituts (PSI) und dient der Beurteilung von Sicherheitsanalysen und des Störfall-Managements von Kernkraftwerken. Am Projekt sind neben den Institutionen des Gastgeberlandes Frankreich (IPSN, EdF) auch die Europäische Union sowie Vertreter aus USA (NRC), Japan (NUPEC, JAERI), Korea (KAERI), Kanada (COG) und der Schweiz (HSK, PSI) beteiligt.

Ziele des PHEBUS FP Programms für das Jahr 2002

Die Laboruntersuchungen zu den in den Jahren 1999 (FPT4) und 2000 (FPT2) durchgeführten Kernschmelz-Experimenten sowie die Datenauswertung waren auch im vergangenen Jahr die Schwerpunkte der Arbeiten für das Programm.

Die ursprünglich gesetzten Ziele sahen für das Projekt FPT4-PTA den Abschluss aller experimentellen Arbeiten bis Ende 2001 und für das Projekt FPT2-PTA bis Ende 2002 vor. Infolge verschiedener Vorkommnisse, insbesondere der Transportschwierigkeiten, mussten diese Ziele im Herbst 2002 erneut korrigiert werden. Es wurde nun erwartet, dass alle Resultate der FPT4-PTA Untersuchungen (inkl. Draft-Bericht) bis Ende 2002 erhältlich sein werden. Die FPT2-PTA Untersuchungen sollen bis Sommer 2003 abgeschlossen sein.

Der Start des „Borcarbid-Tests“ (FPT3), ursprünglich vorgesehen für das Jahr 2003, musste ebenfalls verschoben werden.

SCHWEIZER IN-KIND BEITRÄGE

Im vergangenen Jahr war die Schweiz durch das Labor für Werkstoffverhalten (LWV) des NES wiederum direkt am PHEBUS FP Programm mit den Forschungsprojekten **FPT4-PTA** und **FPT2-PTA** beteiligt.

Der Bereich NES verfügt über grosse Erfahrungen auf den Gebieten der Kerntechnik und der Sicherheit (Modellierung und experimentelle Untersuchungen). Im Hotlabor des PSI stehen moderne Geräte und Apparaturen für Untersuchungen von bestrahlten und unbestrahlten Kernbrennstoffen und Strukturmaterialien zur Verfügung.

Der Einfluss der β -Strahlung auf die Stabilität des Silberiodids im Sumpf des Containments wurde in einem In-Kind Beitrag des Labors für Thermohydraulik (LTH) experimentell untersucht und erfolgreich abgeschlossen. Die Resultate und Schlussfolgerungen für die Reaktorsicherheit werden in einem speziell dafür einberufenen gemeinsamen Meeting des PSI mit dem IRSN/Cadarache, Frankreich beraten. Eine Übersicht der Ergebnisse und ihres Anwendungspotentials dieses PSI-Forschungsbeitrags zum PHEBUS-Programm sind ebenso wie die Vorstellung der dabei neu entwickelten Methoden zur Charakterisierung des Iodverhaltens Teil der Agenda des bevorstehenden internationalen PHEBUS-Seminars in Frankreich. Ihre Anwendung wird bei den zukünftigen experimentell-orientierten Iod-Projekten des CEA und IRSN in Betracht gezogen werden.

Ziele für das Jahr 2002 waren:

Projekt FPT4-PTA

Der Abschluss der experimentellen Arbeiten zur Charakterisierung der Auslaug-Lösungen von Filtern **4 AO 031** und **4 AO 042** (Massenbilanz von Spaltprodukten und Elementen der Strukturmaterialien). Erstellung des Abschlussberichtes.

Projekt FPT2-PTA

- a) Auslaugung von Filtern **FIPF 714 2G1-01Q**, **FIPF 715 2G1-031** und **FIPF 718 2G1-051**.
- b) Quantitative γ -spektrometrische Analysen von Spaltprodukten in Auslaug-Lösungen (Massenbilanz).
- c) Quantitative massenspektrometrische Analysen von Spaltprodukten, Actiniden und Elementen der Strukturmaterialien in Auslaug-Lösungen (Massenbilanz).
- d) Probenahme von Aerosolen vom Filter FIPF 718 2G1-051. Analysen von Aerosolen mittels EPMA.
- e) Quantitative Analysen (γ -und massenspektrometrische) von Sumpflösungen CAPF 717 2H8-240 und CAPF 719 2H8-260 (Massenbilanz).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

PHEBUS FP PROGRAMM-AKTIVITÄTEN DES JAHRES 2002

Dominierend in der Berichtsperiode waren die Fortsetzung der Arbeiten zur Auswertung der Tests FPT4 und FPT2 sowie die Vorbereitungen für den bevorstehenden FPT3.

Für den **Test FPT4**, der die Untersuchung der Spaltproduktfreisetzung aus geschmolzenem Kernbrennstoff zum Ziel hatte, wurden sehr hohe Freisetzungsraten für Cäsium sowie moderate bis hohe Freisetzungen für die Spaltprodukte mit mittlerer Flüchtigkeit festgestellt, ein Kennzeichen für die hohen Temperaturen, denen die Brennstofffragmente während des Experiments ausgesetzt waren.

Ungeachtet der im Vergleich mit FPT1 oder FPT0 weiter fortgeschrittenen Degradation des Brennstabbbündels wurde während des **Tests FPT2** nur eine geringe Spaltproduktfreisetzung aus der Pool-Schmelze gemessen; möglicherweise zurückzuführen auf die Bypass-Bildung von Dampf während des Experiments.

Weitere signifikante Ergebnisse dieses Tests sind:

- a) Fast das gesamte, aus dem Brennstoff freigesetzte Iod kondensierte im Dampferzeuger, nur etwa 1% wurde als Dampf im Containment gefunden.
- b) Der Iod-Gasanteil im Containment nahm ab bis auf einen Anteil von grössenordnungsmässig 0.1%.
- c) Im Gegensatz zu den Ergebnissen von FPT1 lag das zurückbleibende Iod in anorganischer Form vor.

Das Brennstabbbündel des **PHEBUS FP Tests 3** wird zunächst mit Borcarbid (B4C) Absorberstäben bestückt, um auf Fragen, bezogen auf Siedewasserreaktoren, einschliesslich des Typs WWER, und die französischen Druckwasserreaktoren (1300Mwe) eingehen zu können. Vor besonderem Interesse sind der Einfluss von B4C auf die Zerstörung des Reaktorkerns und auf die Wasserstoffbildung sowie die Möglichkeit der Bildung von Methan und seiner Reaktion mit Iod zu dem flüchtigen Methylodid. Intensiv wurde an Sicherheitsanalysen und der Sicherheitsplanung gearbeitet.

PHEBUS FPT4-PTA (Task NO. 5)

Die Hauptziele der FPT4-PTA waren:

- Bestimmung der Massenbilanz für die auf den Filtern abgelagerte Nuklide mit dem Ziel, die Freisetzung der flüchtigen Spaltprodukte und der Actiniden aus dem Brennstoff im Core bei hohen Temperaturen (ca. 2700 °C) bei verschiedenen Zeitetappen des Versuches zu untersuchen.
- Charakterisierung des unterschiedlichen Elementverhaltens durch Bestimmung der chemischen Speziation einzelner Komponenten.

Zu diesem Zweck wurden im LWV Auslauglösungen von zwei Rückhaltefiltern analytisch (γ - und massenspektrometrische) untersucht. Wegen der anfänglichen Transportschwierigkeiten wurden die Proben mit grosser Verspätung geliefert.

Unglücklicherweise wurde bereits nach den ersten analytischen Untersuchungen festgestellt, dass die Proben beim Lieferanten (ITU) zu sehr verdünnt wurden, so dass die Konzentrationen der meisten Nuklide unter den Nachweisgrenzen der analytischen Messmethoden lagen. Daraufhin hat die PHEBUS-Projektleitung beschlossen, einen zweiten Transport mit konzentrierteren Lösungen zu organisieren.

Die neuen Proben wurden vom ITU (D) erst Ende Mai 2002 geliefert. Leider konnten wegen der restriktiven Haltung der Behörde in Deutschland nur sehr kleine Probemengen transportiert werden. Mit der Projektleitung in Cadarache musste deshalb eine Priorisierung für die Bestimmung von Nukliden erfolgen, da abzusehen war, dass die gelieferten Probemengen nicht für alle geplanten Analysen ausreichen würden.

Probenbezeichnung

In Tabelle 1 sind Auslauglösungen (1 M HNO₃) und dazugehörige Iod-Auffanglösungen (4 M NaOH), die untersucht wurden, aufgeführt.

	Filter	Lösung	Mengen [g]	Verdünnungsfaktor
1. Lieferung (November 2001)	4AO-031	1 M HNO ₃	104.421	4418.180
		4 M NaOH	10.011	1
	4AO-042	1 M HNO ₃	103.684	4511.578
		4 M NaOH	9.110	1
2. Lieferung (Mai 2002)	4AO-031	1 M HNO ₃	0.5640	1
	4AO-042	1 M HNO ₃	0.3707	1

Tabelle 1: Analysierte Auslauglösungen

Quantitative γ -spektrometrische Analysen

2.1.2.1 Instrumentierung und technische Daten

Alle γ -spektrometrische Untersuchungen wurden am Canberra-Packard Spektrometer des LWV durchgeführt.

Hardware:	Digital Equipment Corp. (DEC)	WAX-Workstation 4000/60
	Canberra-Packard	AIM Model 556
		ADC Model 8706
		Amplifier Model 2024
Software :	Canberra-Packard	VAX/VMS-Genie
Detektor:	ORTEC	HPGE, 30 % relative efficiency
	EURISYS	12 % relative efficiency
Auflösung (Energie):		< 2.0 keV (Co-60: 1332.5 keV)
Energiebereich:		40 - 2100 keV (Standard)
Energie Kalibrierung:		Eu-152
"efficiency" Kalibrierung:		Geometrie: Punkt, Ampulle (V = 5, 50, 500 ml)
		Abstände: 0 – 213 cm

2.1.2.2 Resultate der γ -spektrometrischen Untersuchungen

Mit γ -Spektrometrie konnten nur solche Radionuklide bestimmt werden, deren Halbwertszeiten grösser als ca. 6 Monate und die in genügend hohen Konzentrationen in den Analyt-Lösungen vorhanden sind. Tabelle 2 beinhaltet die Konzentrationen aller γ -spektrometrisch messbaren Nuklide in den Analyt-Lösungen sowie deren gesamthaft abgelagerte Mengen am betreffenden Filter.

		¹²⁵ Sb	¹²⁹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
Filter: 4AO-031					
	Analyt-Lösung [Bq/g]	1.078·10 ⁸	1.251	6.715·10 ⁷	2.362·10 ⁸
	Total [Bq]	8.513·10 ⁸	142.6	5.303·10 ¹⁰	1.865·10 ¹¹
	Total [g]	2.225·10 ⁻⁵	2.181·10 ⁻⁵	1.106·10 ⁻³	5.820·10 ⁻²
Filter: 4AO-042					
	Analyt-Lösung [Bq/g]	n.d.	3.095	2.703·10 ⁷	9.497·10 ⁷
	Total [Bq]	n.d.	4.539·10 ²	2.113·10 ¹⁰	7.426·10 ¹⁰
	Total [g]	n.d.	6.940 ⁻⁵	4.409·10 ⁻⁴	2.317·10 ⁻²

n.d. = nicht detektierbar

Tabelle 2: Resultate der γ -spektrometrischen Messungen. Die γ -spektrometrisch ermittelte Aktivität der einzelnen Nuklide wurde auf ein für alle Proben gleiches Messdatum berechnet (1. Januar 2002). Die Massenbilanz der einzelnen Nuklide wurde unter der Annahme berechnet, dass es sich bei den angelieferten Probelösungen (2. Lieferung) um Original-Auslauglösungen handelt.

Das leicht flüchtige Cäsium bildet den weitaus grössten Anteil der Gesamtaktivität.

Massenspektrometrische Analysen

2.1.3.1 Instrumentierung und Messparameter

Die massenspektrometrischen Untersuchungen wurden mit dem Induktiv gekoppelten Plasma Massenspektrometer (ICP-MS, VG PlasmaQuad PQ2+, UK) durchgeführt. Zur Bestimmung von Nukliden, bei denen isobare Interferenzen (unterschiedliche Elemente mit Isotopen gleicher Masse) auftreten, wurde zur chemischen Abtrennung der Elemente das „high performance liquid chromatography“ System (HPLC, DIONEX DX-300) online ans ICP-MS gekoppelt (vgl. Abb. 1).

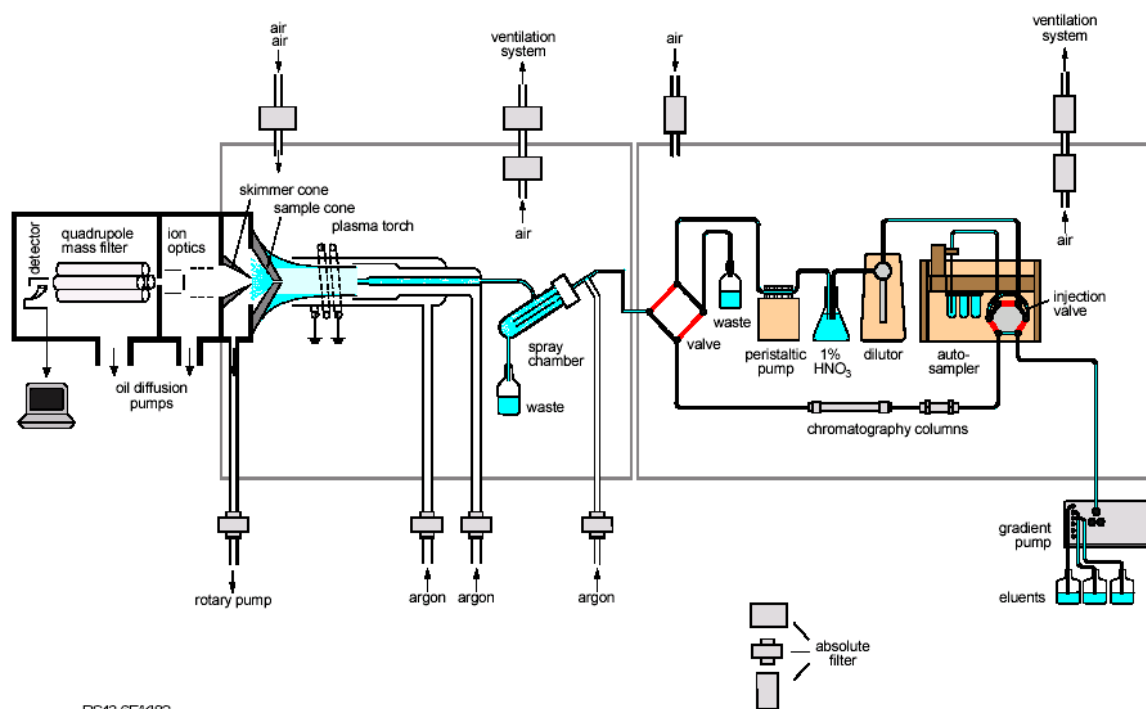


Abbildung 1: Schematische Darstellung der online HPLC-ICP-MS Kopplung

Instrumenten- und Messparameter

ICP-MS		HPLC	
Generatorleistung	1350 W	Eluent	1 M HNO ₃
Kühlgasfluss	13 l/min	Flussrate	1 ml/min
Hilfsgasfluss	0.8 – 1 l/min	Trennsäule	CS10 (DIONEX)
Zerstäubergasfluss	0.9 – 1 l/min		
Probenezufuhr	ca. 100 µl/min		

2.1.3.2 Resultate der massenspektrometrischen Untersuchungen

Nicht alle massenspektrometrischen Analysen konnten 2002 rechtzeitig abgeschlossen werden. Einige bereits ausgeführte Analysen müssen wiederholt werden, da die Kontrollmessungen der Standards ausserhalb des Vertrauensbereichs lagen. Für Messungen einiger interessierender Elemente (Lanthanide) müssen konzentriertere Analyt-Lösungen verwendet werden. In der Tabelle 3 sind die Resultate der bisherigen massenspektrometrischen Analysen zusammengefasst. Die restlichen Analysen sollen bis Februar 2003 beendet werden.

	Filter 4AO-031	Filter 4AO-042
Cs	0.242	$7.23 \cdot 10^{-2}$
Ba	$2.39 \cdot 10^{-2}$	$< 5.0 \cdot 10^{-3}$
W	$1.13 \cdot 10^{-3}$	$7.71 \cdot 10^{-4}$
Re	$7.35 \cdot 10^{-2}$	$5.81 \cdot 10^{-3}$
U	$1.23 \cdot 10^{-2}$	$< 4.0 \cdot 10^{-4}$
Np	$< 8.0 \cdot 10^{-6}$	$< 8.0 \cdot 10^{-6}$
Pu	$< 8.0 \cdot 10^{-6}$	$< 8.0 \cdot 10^{-6}$
Am	$< 8.0 \cdot 10^{-6}$	$< 8.0 \cdot 10^{-6}$
Cm	$< 8.0 \cdot 10^{-6}$	$< 8.0 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 3: Resultate der massenspektrometrischen Analysen. Die Massenbilanz der einzelnen Nuklide wurde unter der Annahme berechnet, dass es sich bei den angelieferten Probelösungen (2. Lieferung) um Original-Auslauglösungen handelt. Alle Angaben in [g].

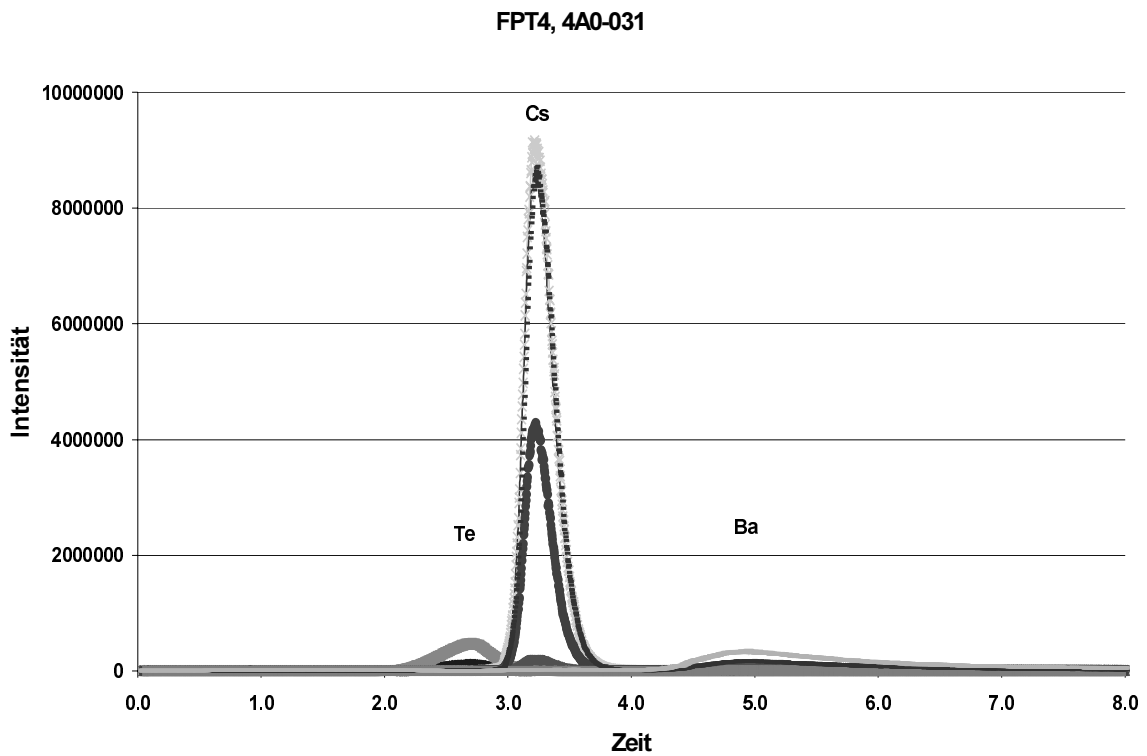


Fig. 2: HPLC-ICP-MS Chromatogramm der Trennung von Te, Cs und Ba. Integrationszeit 10.24 ms pro Punkt.

Auslauglösung vom Filter 4AO-031				
Isotop	¹³³ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁵ Cs	¹³⁷ Cs
Atom %	42.50	0.741	17.61	39.25
nat. Isotopenzus.setzg.	100	-	-	-
Isotop	¹³⁴ Ba	¹³⁶ Ba	¹³⁷ Ba	¹³⁸ Ba
Atom %	16.3	1.4	21.6	60.7
nat. Isotopenzus.setzg.	2.4	7.9	11.2	71.7
Auslauglösung vom Filter 4AO-042				
Isotop	¹³³ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁵ Cs	¹³⁷ Cs
Atom %	43.04	0.664	16.54	39.75
nat. Isotopenzus.setzg.	100	-	-	-
Isotop	¹³⁴ Ba	¹³⁶ Ba	¹³⁷ Ba	¹³⁸ Ba
Atom %	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Tabelle 4: Bestimmung des Cs-Isotopenvektors in Auslauglösungen

Die obigen Resultate stimmen trotz teilweise unterschiedlicher Messmethoden gut mit den Resultaten anderer Labors (COMIR/SACLAY (F), ITU (D), CHALMERS (S)) überein [1]. Auffällig erscheint die auf den Filtern relativ kleine Menge des flüchtigen Iods. Eine systematische Unterbestimmung kann wegen des möglichen Iod-Verlustes während der Auslaugung von Filtern nicht ausgeschlossen werden.

Das leicht flüchtige Cäsium wurde wie erwartet sowohl beim oberen Plenum (Temperaturgradient 450-2000 °C) [2] als auch bei den sequentiell angeordneten Filtern (Temperaturgradient: 250-450 °C) als die Hauptkomponente detektiert. Die Menge des gefundenen Cäsiums am Filter 4AO-031 entspricht etwa 3.2 % und diejenige des Filters 4AO-042 ca. 1 % des gesamthaft freigesetzten Cäsiums. Neben Cäsium konnte auch Barium bestimmt werden. Das Barium wurde vorwiegend auf dem Filter 4AO-031 (ca. 3.6 %) und nur in Spuren (< 0.1 %) auf dem Filter 4AO-042 gefunden. Die Isotopenanalyse von Cäsium und Barium zeigt eindeutig, dass es sich bei beiden Elementen um Spaltprodukte handelt (vgl. Tabelle 4). Zur Abtrennung von Te, Cs und Ba wurde die online Trennungsmethode HPLC-ICP-MS verwendet (vgl. Fig. 2).

Interessant erscheint auch die Tatsache, dass die Freisetzung von Lanthaniden, Actiniden und Elementen der Strukturmaterialien (Re, W) sehr gering ist. Nur ca. 0.07 % des ursprünglichen Gesamtinventars an Rhenium konnten auf dem Filter 4AO-031 beziehungsweise 0.005 % auf dem Filter 4AO-042 gefunden werden. Von Komponenten des Brennstoffes konnte nur Uran detektiert werden, während die Konzentrationen aller anderen Actiniden unter der Bestimmungsgrenze lagen. Diese geringe Mobilität der Brennstoffkomponenten konnte bereits bei der Charakterisierung von Aerosolen im Plenum und in Coupons festgestellt werden [2].

PHEBUS FPT2-PTA (Task NO. 6A)

Wegen der Transportschwierigkeiten einerseits und des fehlerhaften Handlings mit Proben in Cadarache andererseits mussten die Analysen von Sumpflösungen annulliert werden. Zur analytischen Untersuchung wurden deshalb nur drei Filter geliefert (vgl. Fig. 3).



Fig. 3; Filter 2G1-01Q FIPF-714

Probenbezeichnung

In Tabelle 5 sind die drei Filter beschrieben, die untersucht wurden.

Tabelle 5: Bezeichnung und Charakterisierung der sequentiellen Filter

	PTA Referenz	Bezeichnung	Zeit der Probe- nahme	
Doppelfilter (poral + Quarz)	2G1-01Q	FIPF 714	11:56	11:59
Einzelfilter (poral)	2G1-031	FIPF 715	12:02	12:06
Einzelfilter (poral)	2G1-051	FIPF 718	13:54	13:56

Auslaugungsprozess

Die Auflösung der am Filter abgeschiedenen Aerosole erfolgte in einem Zwei-Stufen-Prozess. Ein Teil des am Filter FIPF-714 abgeschiedenen Materials wurde zuerst in demineralisiertem Wasser bei einer Temperatur von 50 °C während einer Stunde aufgelöst. Das restliche schwerlösliche Material wurde anschliessend in einem Säuregemisch aus 7 M HNO₃/0.1 M HF während einer Stunde bei einer Temperatur von 50 °C aufgelöst. Da die ersten Übersichtsanalysen zeigten, dass die Auslaugzeit von je einer Stunde möglicherweise für eine vollständige Auflösung nicht ausreichend war, wurde die Auflösprozedur geändert. Die Auslaugdauer sowohl beim Wasser als auch beim Säuregemisch wurde für alle folgenden Filter auf vier Stunden verlängert.

2.2.2.1 Apparatur und Auslaugungsprozedur

Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung der Auflösungsapparatur und Fig. 5 die experimentelle Anordnung der Geräte in der mit 10 cm Blei abgeschirmten Kapelle im Labor OHLA/202.

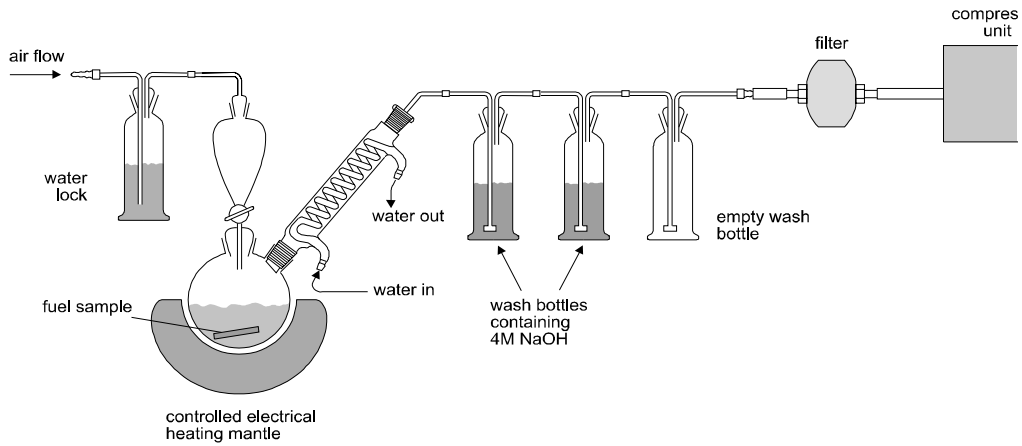


Fig. 4: Schematische Darstellung der Auslaugapparatur



Fig. 5: Experimentelle Anordnung der Geräte

	Temperatur [°C]	Zeit ¹⁾ [h]	Mengen [g]		
			FIPF-714	FIPF-715	FIPF-718
1. Auslaugung in demin. Wasser	51 ± 1	1/4	467.15	501.37	498.17
Iod-Auffanggefäß I., 4 M NaOH	RT	1/4	107.22	114.17	114.39
Iod-Auffanggefäß II., 4 M NaOH	RT	1/4	107.07	114.01	114.38
2. Auswaschen mit demin. Wasser	RT	0.17	497.19	501.41	497.96
3. Auslaugung in 7 M HNO ₃ , 0.1 M HF	51 ± 1	1/4	615.28	610.50	610.82
Iod-Auffanggefäß I., 4 M NaOH	RT	1/4	111.58	114.00	114.30
Iod-Auffanggefäß II., 4 M NaOH	RT	1/4	111.59	114.08	114.21
4. Auswaschen mit 7 M HNO ₃ , 0.1 M HF	RT	0.17	596.74	610.62	610.37
5. Restliche Waschlösung	RT	0.1	58.56	86.31	144.62

¹⁾ = Die Auslaugzeiten für die Filter 2G1-031 FIPF-715 und 2G1-051 FIPF-718 betragen 4 h

Tabelle 6: Experimentelle Parameter für die Auslaugung von sequentiellen Filtern

γ-spektrometrische Analysen

	^{110m} Ag [Bq]	¹²⁵ Sb [Bq]	¹²⁹ I [Bq]	¹³⁴ Cs [Bq]	¹³⁷ Cs [Bq]	¹⁵⁵ Eu [Bq]
2G1-01Q FIPF-714						
Wasser Auslauglösungen ¹⁾	n.d.	n.d.	n.d.	3.189·10 ⁵	1.158·10 ⁸	8.194·10 ³
Säure Auslauglösungen ²⁾	1.895·10 ⁴	n.d.	n.d.	9.956·10 ⁵	3.647·10 ⁷	n.d.
Restliche Waschlösung	4.235·10 ²	n.d.	n.d.	1.068·10 ⁴	3.921·10 ⁵	n.d.
Filter nach Auslaugung	1.005·10 ⁴	n.d.	n.d.	1.060·10 ⁵	3.839·10 ⁶	1.305·10 ⁴
Gesamtaktivität [Bq]	2.943·10 ⁴	n.d.	n.d.	4.301·10 ⁵	1.565·10 ⁸	2.124·10 ⁴
Gesamtgewicht [g]	1.68·10 ⁻¹⁰	n.d.	n.d.	8.972·10 ⁻⁸	4.885·10 ⁻⁵	1.23·10 ⁻⁹
2G1-031 FIPF-715						
Wasser Auslauglösungen ¹⁾	n.d.	n.d.	12.09	1.185·10 ⁹	4.454·10 ¹⁰	n.d.
Säure Auslauglösungen ²⁾	1.646·10 ⁵	n.d.	12.15	2.721·10 ⁵	1.007·10 ⁷	1.355·10 ⁴
Restliche Waschlösung	1.317·10 ³	n.d.	n.d.	2.619·10 ³	9.882·10 ⁴	n.d.
Filter nach Auslaugung	8.407·10 ³	n.d.	n.d.	6.190·10 ⁴	2.158·10 ⁶	6.907·10 ³
Gesamtaktivität [Bq]	1.743·10 ⁵	n.d.	24.24	1.185·10 ⁹	4.455·10 ¹⁰	2.045·10 ⁴
Gesamtgewicht [g]	9.93·10 ⁻¹⁰	n.d.	3.706·10 ⁻⁵	2.473·10 ⁻⁵	1.390·10 ⁻²	1.187·10 ⁻⁹
2G1-051 FIPF-718						
Wasser Auslauglösungen ¹⁾	n.d.	n.d.	n.d.	1.604·10 ⁵	7.605·10 ⁹	n.d.
Säure Auslauglösungen ²⁾	2.484·10 ⁵	3.110·10 ⁵	25.72	1.805·10 ⁵	8.396·10 ⁷	n.d.
Restliche Waschlösung	2.013·10 ⁴	6.758·10 ³	n.d.	7.539·10 ⁴	2.955·10 ⁶	n.d.
Filter nach Auslaugung	1.765·10 ⁵	1.519·10 ⁵	n.d.	1.999·10 ⁵	9.590·10 ⁷	9.343·10 ³
Gesamtaktivität [Bq]	2.681·10 ⁵	3.269·10 ⁵	25.72	1.643·10 ⁵	7.788·10 ⁹	9.343·10 ³
Gesamtgewicht [g]	1.527·10 ⁻⁸	8.545·10 ⁻⁸	3.93·10 ⁻⁸	3.426·10 ⁻⁶	2.430·10 ⁻³	5.552·10 ⁻⁹

n.d. = nicht detektierbar

¹⁾ Gesamtmenge der wässrigen Auslaug- und Waschlösungen

²⁾ Gesamtmenge der säurehaltigen Auslaug- und Waschlösungen

Tabelle 7: Resultate der γ-spektrometrischen Messungen von Auslauglösungen und Filtern nach der Auslaugung. Zur Berechnung der Massenbilanz wurden die Resultate aller Messungen aufsummiert und die Mengen der einzelnen freigesetzten Nuklide berechnet.

Für γ-spektrometrische Messungen (vgl. Abschnitt 3.1.2.1) der Auslauglösungen wurden bestimmte Mengen der Lösungen in Behälter von 5 und 50 ml abgefüllt. Iod wurde mit dem planaren Be-Detektor (EURISYS) in 50 ml Flaschen gemessen. Für die Kalkulation der Massenbilanz musste die totale Aktivität des Filters (Aktivität in Auslauglösungen und am Filter) bestimmt und aufsummiert werden.

In Tabelle 7 sind die Resultate der γ -spektrometrischen Messungen zusammengefasst. Die γ -spektrometrisch ermittelte Aktivität der einzelnen Nuklide wurde auf ein für alle Proben gleiches Messdatum berechnet (1. Juni 2002).

Auch hier wurde das flüchtige Cäsium als die Hauptkomponente bestimmt. Als leicht lösliches Material findet man es erwartungsgemäss hauptsächlich in der wässrigen Fraktion. Iod wurde in vergleichbaren Mengen wie in Auslauglösungen aus dem Versuch FPT4 gefunden. Auch hier muss mit einem Verlust vom Iod während der Auslaugung und folglich mit einer Unterbestimmung des Iods gerechnet werden. Die schwerlöslichen Nuklide wie Ag, Eu und Sb konnten erst mit starken Säuren aufgelöst werden. Ob diese Auflösung bei der vorgegebenen Prozedur vollständig verlief, ist nicht gesichert.

Probenahme für die Charakterisierung von Aerosolen

Vom Filter 2G1-051 FIPF-718 wurden an verschiedenen Orten der Filteroberfläche Aerosolproben zur Charakterisierung mit der Elektronen-Mikrosonde (EPMA) genommen (vgl. Abb. 5). Die EPMA Untersuchungen werden zur Zeit gerade durchgeführt.

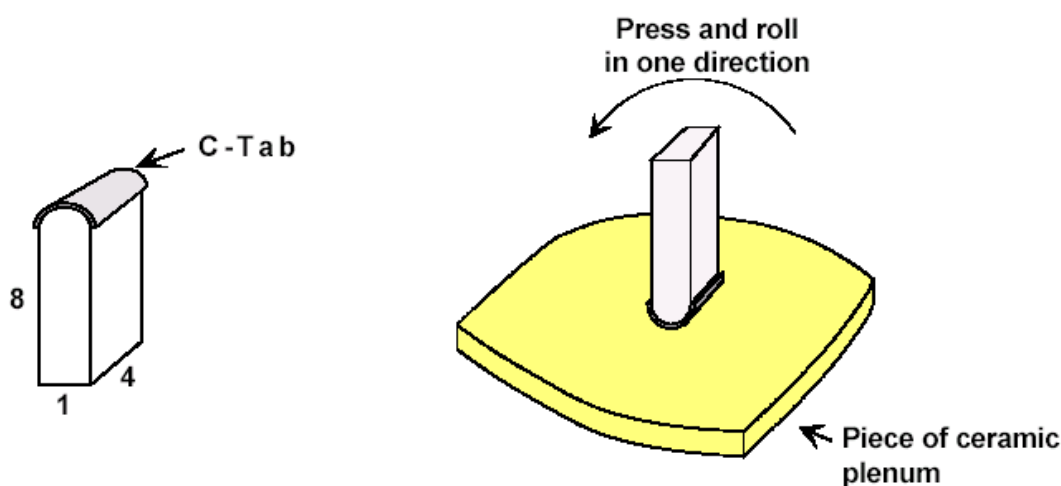


Fig. 6: Schematische Darstellung der Probenahme von Aerosolen.

PSI-Beiträge zur PHEBUS FP Programmgestaltung und Datenauswertung

Post-Experiment-Analysen der Tests FPT-1 und FPT-2

Am PSI wurden mit Modellrechnungen unter Verwendung der Codes SCDAP/RELAP5, VICTORIA, CONTAIN und IMPAIR-3 in detaillierten Analysen verschiedene einzelne Aspekte des Tests FPT1 bearbeitet. Ausserdem wurde für gleichzeitige Simulierung aller in Betracht zu ziehenden Phenomena schwerer Störfälle, beginnend mit der Reaktorkern-Zerstörung, der Spaltproduktfreisetzung und der Wasserstoffbildung bis hin zum Aerosolverhalten im Containment der MELCOR Code eingesetzt. Der MELCOR Code besitzt das Potential, alle Aspekte eines Anlagenstörfalls integrierend zu modellieren und entspricht damit am effektivsten den Anforderungen der Operatoren der Schweizer KKW. Die Berechnung reproduziert erfolgreich das Transientenverhalten und erfasst nahezu alle sicherheitsrelevanten Phenomena mit ausreichend bis guter Genauigkeit. Insbesondere die thermische Rückkopplung des Brennstabündelverhaltens, der Wasserstoffbildung, der Gesamtfreisetzung an Edelgasen und flüchtigen Spaltprodukten sowie das thermo-hydraulische und Aerosol-Verhalten sind in guter Übereinstimmung mit dem Experiment.

Eine erste Analyse des FPT2-Bündel Verhaltens wurde auch mit dem MELCOR Code durchgeführt. Ungeachtet der reduzierten Dampfeinleitung und der Periode des Dampf mangels in diesem Experiment wurde eine ähnlich gute Übereinstimmung erreicht.

Unterstützung der Planung des nächsten PHEBUS Tests FPT3

In Unterstützung der PHEBUS Projektarbeiten zur Testplanung wurden detaillierte Analysen mit Hilfe des PHEBUS Codes durchgeführt und die Ergebnisse der PHEBUS FP Projektleitung zur Verfügung gestellt. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass eine ausreichend lange Periode des Dampf Mangels und hinlänglich hohe Bündeltemperaturen entsprechend der Planung erreicht werden können.

Nationale Zusammenarbeit

Das Projekt wurde stets im engen Kontakt mit allen für die Sicherheit zuständigen Institutionen in der Schweiz durchgeführt. Die Resultate der Schweizer In-Kind Forschungsprojekte werden in regelmässigen Konsultationen mit Vertretern der HSK, aller schweizerischen Kernkraftwerke und des PSI vorgestellt und diskutiert. Das LWV ist ebenfalls mit eigenen Arbeiten direkt an den PSI-Projekten PROTEUS Phase II und LISOR/MEGAPIE beteiligt.

Internationale Zusammenarbeit

Die hier beschriebenen Forschungsbeiträge sind Bestandteile des international unterstützten **PHEBUS FP** Programms zur Reaktorsicherheit. Das LWV ist im laufenden EU-5 Programm mit eigenen Projekten **CONFIRM** [3] und **MICROMOX** [4] beteiligt. In einer engen Zusammenarbeit mit **JNC** (Japan) und **NRG** (Holland) (**Projekt FUJI**) [5] werden neue fortgeschrittene Brennstoffe für Bestrahlungsversuche entwickelt und hergestellt, welche zur Verbrennung des Plutoniums und Neptuniums in schnellen Brutreaktoren verwendet werden sollen.

Untersuchungen zur Iodrückhaltung im Sumpf des Containments während eines schweren Reaktorunfalls waren Gegenstand des im März 2003 abzuschliessenden Programms ICHEMM (Bestandteil des 5. EU-Rahmenprogramms zur Reaktorsicherheit, FIKS-CT1999-00009), einer Zusammenfassung von 7 nationalen Forschungsprojekten.

Das PSI konzentrierte sich in seinem Forschungsbeitrag auf die Zersetzung der am schwersten abzutrennenden organischen Iodverbindung, dem leichtflüchtigen Methyljodid.

Im Ergebnis des PSI-Beitrags konnten, ausgehend von einer Modellierung der Hydrolyse- und Radiolyseprozesse, Additive gefunden werden, die zu einer nahezu vollständigen Iod-Rückhaltung führen. Das entstehende nichtflüchtige Iodid wird an das Additiv gebunden, das strahlenbeständig und für eine Langzeitlagerung geeignet ist. Die Anwendung zur Verbesserung der Sicherheitsmassnahmen in einem Reaktorstörfall werden gegenwärtig geprüft.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

FPT4-PTA (LWV Task NO. 5)

Das FPT4-PTA Projekt sollte ursprünglich per Ende 2002 abgeschlossen sein. Die erste Lieferung von Proben hat sich vor allem wegen der Schwierigkeiten beim Transport stark verzögert. Die dann im November 2001 gelieferten Proben wurden beim Lieferanten (ITU) bedauerlicherweise so stark verdünnt, dass die Konzentrationen der meisten Elemente unter den Nachweisgrenzen lagen. Es wurde deshalb beschlossen, einen zweiten Transport mit konzentrierteren Probelösungen zu organisieren. Die neuen Proben wurden Ende Mai 2002 geliefert. Leider konnten diesmal nur sehr kleine Probenmengen transportiert werden. Mit der Projektleitung in Cadarache musste deshalb eine Priorisierung bei der Bestimmung von Nukliden gesetzt werden.

Generell zeigen die Analysen von Filter-Auslauglösungen das Element Cäsium als Hauptkomponente der freigesetzten Nuklide. Auf den sequentiell angeordneten Filtern bei einem Temperaturgradienten zwischen 250 und 450 °C konnten nur ca. 3.2 % (Filter 4AO-031) bzw. 1 % (Filter 4AO-042) der gesamthaft freigesetzten Mengen leicht flüchtigen Cäsiums gefunden werden.

An leicht flüchtigen Spaltprodukten konnten kleine Mengen des Nuklids ^{129}I gefunden werden ($2.18 \cdot 10^{-5}$ g bzw. $6.94 \cdot 10^{-5}$ g). Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Iod wahrscheinlich unterbestimmt wurde, da ein Iod-Verlust während der Auslaugung nicht ausgeschlossen werden kann.

Ferner wurden kleine Mengen von Barium (0.024 g) und Antimon ($2.2 \cdot 10^{-5}$ g) nachgewiesen. Massenspektrometrische Isotopen-Analysen zeigten, dass es sich beim Barium und Cäsium eindeutig um Spaltprodukte handelt.

Die Freisetzung von schwer flüchtigen Komponenten des Brennstoffes (Actiniden) und der Strukturmaterialien (Re, W) erscheint klein. Von Komponenten des Brennstoffes konnte nur in geringen Mengen Uran ($4.8 \cdot 10^{-4}$ % des Bündelinventars) gefunden werden. Die Konzentrationen aller anderen Actiniden lagen unter der Bestimmungsgrenze.

Infolge diverser Vorkommnisse konnten leider nicht alle experimentellen Arbeiten 2002 abgeschlossen werden. Die restlichen Nuklide werden Anfang 2003 analysiert. Der Abschlussbericht wird bis spätestens Ende März 2003 erstellt.

FPT2-PTA (LWV Task NO. 6A)

Nachdem alle Filter geliefert wurden, musste in der Kapelle des Labors OHLA/202 hinter der 10 cm Bleiabschirmung eine Apparatur zur Auslaugung von Filtern aufgebaut und inaktiv getestet werden. In der Zeit zwischen Mai und September 2002 wurden mit allen drei Filtern Auslaugexperimente durchgeführt. Anschliessend wurden die γ -spektrometrische Messungen von Auslaug-Lösungen gemacht. Dabei konnten neben der Hauptkomponente Cäsium auch kleinere Mengen weiterer Spaltprodukte $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{125}Sb , ^{129}I und ^{155}Eu bestimmt werden. Die massenspektrometrischen Analysen werden nun 2003 ausgeführt. Der Abschlussbericht soll bis Juni 2003 erstellt werden. Die Analysen von Sumpflösungen wurden aus dem Projekt sistiert. Dafür wurden wir gebeten, die Auslaug-Versuche und Analysen an zwei zusätzlichen Filtern, die bei AET (UK) analysiert werden sollten, am PSI durchzuführen. Diese Arbeiten sollen im Rahmen des FPT2-PTA (LWV) abgewickelt werden. Zur Zeit werden Transportformalitäten abgeklärt und ein neues Work Statement erstellt. Zwei Offerten für die PIE Untersuchungen von Proben von FPT2 und FPT4 Materialien wurden der PHEBUS-Projektleitung unterbreitet (EPMA und Abbrand). Der Transport von 5 Proben von Cadarache zum PSI wurde organisiert. Dieser Transport ist für Frühling 2003 vorgesehen.

Internationales Seminar zur Bewertung des PHEBUS FP Programms

Im Juni 2003 findet ein Internationales Technisches Seminar zum PHEBUS FP Programm in Aix-en-Provence statt. Es wird in der Regel im Abstand von 3 Jahren veranstaltet und steht allen interessierten Institutionen offen. In 6 Sektionen wird eine Übersicht über die bisherigen Testergebnisse gegeben sowie die Brennstabündel-Degradation, die Spaltproduktfreisetzung und ihr Transportverhalten sowie die Iodchemie behandelt. In Abstimmung mit den entsprechenden internationalen Organisationen werden die Resultate zum Vergleich der Datenauswertung des Test FPT1 (Internationalen Standard Problem, ISP-46) diskutiert und das Projekt Phebus-2K vorgestellt. Das PSI ist mit zwei eingeladenen Vorträgen zu den Ergebnissen des In-Kind Beitrags über die radiolytische Zersetzung des Silberiodids sowie über die Speziesanalyse des Iod vertreten.

Referenzen

- [1] R. Zeyen: **PHEBUS P.F. Information Meeting**, JRC/Institute for Energy Petten, March 20, 2002; Collection of Viewgraphs.
- [2] R. Restani, Z. Kopajtic, D. Gavillet; **“PHEBUS FPT4-PTA: Electron Probe Micro Analyses of Filter Cartridges”**, TM-43-01-15. December 2001.
- [3] CONFIRM, **„Preparation and Characterisation of Nitrides with Actinides as Candidate for ADS Fuel for Irradiation Tests in Studsvik-Reaktor”**, EU-FIKW-CT2000-00096.
- [4] MICROMOX, **„LWR MOX, High Burn-up Structure Programme“**, SIKS-2000-00030.
- [5] Projekt FUJI; JNC-NRG-PSI **„Co-operation in the Research and Development of Advanced Sphere-pac Fuel, Phase II”**



Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires
Divisione principale della Sicurezza degli Impianti Nucleari
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate

Datum: 11. Februar 2003
Von: Marianne Zünd

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 OECD Halden Reactor Projekt

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Das OECD Halden Reaktor Projekt läuft seit dem Jahr 1958 und ist eines der grossen Gemeinschaftsprojekte der *OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development)*. Mit rund 100 Teilnehmern aus 20 Ländern bildet es ein wichtiges, internationales Forschungsnetzwerk. Schwerpunkte des Programms sind Experimente zum Verhalten von Brennstoffen und Materialien unter normalen und transienten Bedingungen sowie Untersuchungen der Leistungsfähigkeit von Menschen bei der Überwachung und Steuerung komplexer Systeme. Ende 2002 wurde das 3-Jahresprogramm 2000 – 2002 erfolgreich abgeschlossen. Das neue Programm für die Jahre 2003 - 2005 wird plangemäss im Frühjahr 2003 gestartet.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Die Budgetvorgaben konnten im Jahr 2002 weitgehend eingehalten werden, obwohl für den Reaktorbetrieb grössere Aufwände als geplant erforderlich waren. Da Argentinien aufgrund seiner schlechten wirtschaftlichen Situation seinen finanzielle Beitrag für das Berichtsjahr voraussichtlich nicht leisten kann, muss auf Projektreserven zurückgegriffen werden.

Insgesamt beschäftigte das Projekt im Jahr 2002 rund 280 Personen. In beiden Projektbereichen "Fuels and Materials" und "MMS" (Man-Machine-System) war die Personalsituation ausgeglichen und befriedigend.

Im September 2002 wurde in Storefjell, Norwegen, das Enlarged Halden Program Group Meeting mit 350 Teilnehmern erfolgreich durchgeführt. Die Schweiz war mit 2 Personen vom KKL; 3 Personen vom PSI und 1 Person von der HSK vertreten. Das nächste EHPG-Meeting findet im März 2004 in Lillehammer statt.

[1] Fuels & Materials Research

Der Reaktor hatte im Jahre 2002 eine normale Verfügbarkeit und es waren mehrere Experimente für die Untersuchung des Betriebsverhaltens von keramischen Brennstoffen (UO₂, MOX, inert matrix) und Hüllrohrmaterialien installiert. Im inert matrix Experiment, für welches das Paul Scherrer Institut den Brennstoff produziert hat, wurde eine weitere Leistungserhöhung durchgeführt. Die Untersuchungen des Spannungsrisskorrosionsverhaltens von im Reaktorkern eingesetzten Strukturmaterialien sollen zur Aufklärung der Fragen zur Lebensdauer von Kernkomponenten beitragen. Das Reaktorinventar beinhaltete im Berichtsjahr insgesamt 15 Experimente, bei welchen stark vorbestrahlter, re-instrumentierter Brennstoff sowie Materialien mit hohen Neutronen-Fluenzen aus kommerziellen Leichtwasserreaktoren eingesetzt wurden.

[2] Man-Machine-System Research

Im MMS Bereich liefen die Arbeiten nach Plan. Mit einigen Teilnehmerorganisationen wurden Zusammenarbeitsprojekte initiiert, z.B. Testinstallationen der Applikation TEMPO für die Optimierung der thermischen Leistung im Turbinenkreislauf.

Im Jahr 2002 wurden unter anderem Experimente zu den Auswirkungen unterschiedlicher Automatisierungsgrade der Prozessausführung mit Hilfe von computerisierten Prozeduren auf die Leistung des Operateurs und sein Situationsverständnis gestartet. Diese Experimente werden im Siedewasserreaktorsimulator HAMBO mit Operateuren aus schwedischen Kernkraftwerken als Testpersonen ausgeführt. Mit einer weiteren Untersuchung konnte gezeigt werden, wie die "Virtual Reality" Technologie genutzt werden kann, um den Abgleich eines Kontrollraumdesigns mit Human-Factors-Richtlinien zu erreichen.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Die Beteiligung am Halden Projekt erlaubt der HSK den Zugriff auf den aktuellsten Stand von Wissenschaft und Technik in den Bereichen der Brennstoffe, der Werkstoffe und der menschlichen Faktoren. Es liegt somit eine international abgesicherte wissenschaftliche Basis vor, aufgrund derer Kriterien und Richtlinien für den zukünftigen Einsatz der neuen Brennstoffe und Materialien und für verbesserte Sicherheitsbestimmungen abgeleitet werden können.

Durch das Projekt, bzw. durch das Schweizerische Halden Komitee und die beiden Fachgruppen, erfolgt zudem ein laufender Informationsaustausch und ein wertvoller Knowhow Transfer zwischen dem Halden Projekt, der HSK, dem PSI und den Betreibern.

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Neben der Fortführung der Langzeitbestrahlungstests sind im Jahr 2003 6 neue Tests oder Beladungen geplant. Sie umfassen das Experiment IFA-629, den Überdrucktest IFA-610, zwei Experimente zum Materialverhalten und den LOCA Test. Es werden vorgängig zu den Experimenten Untersuchungen mit frischem Brennstoff durchgeführt, um Anhaltspunkte zur Systemdynamik zu erhalten und so mögliche Probleme mit der endgültigen Versuchsanordnung zu vermeiden.

Im MMS Programm werden Arbeiten in zwei neuen Bereichen gestartet: Organisationsfaktoren und Wissensmanagement. Zudem werden Simulatorversuche zur Behebung von menschlichen Fehlleistungen und zu den Auswirkungen des Prozessautomationsgrades durchgeführt. Neue, innovative Displays für die Datendarstellung für Operatoren werden untersucht. Das Projekt trägt auch zu den internationalen Entwicklungen auf dem Gebiet der Standards für das Kontrollraumdesign bei. Schliesslich wird dem wachsenden Interesse der Mitglieder an den Anwendungen der "Virtual Reality" Technologie Rechnung getragen: VR wurde als separates Teilgebiet in das Programm aufgenommen.

Vom 25. bis 29. August 2003 wird in Halden die nächste Sommer School zum Thema "Design and Evaluation of Human-System Interfaces (HSIs)" stattfinden.

ENEA, Italien wird in der neuen Programmperiode 2003-2005 nicht mehr als Unterzeichnerland teilnehmen. Die italienischen Industriepartner bleiben jedoch assoziierte Mitglieder. Die Position Argentiniens ist weiter unsicher; eine Klärung kann erst nach den Regierungswahlen im April 2003 erfolgen. Der Prozess für die Aufnahme Bulgariens als assoziiertes Mitglied im Halden Projekt wurde gestartet.

Im Jahr 2003 agiert Dr. Suk aus Süd-Korea als Chairman des Halden Reactor Project Management Committee (Dr. Löwenhielm, Schweden ist Vize-Chairman).

Herr Paul Blair, der sich zur Zeit am PSI auf seine Dissertationsarbeit vorbereitet, wird von Februar 2003 bis Januar 2004 als Secondee in Halden tätig sein. Die Bezahlung des 12-monatigen Engagements wird direkt von Halden übernommen.

Jahresbericht 2002, 13. Januar 2003

OECD HALDEN REACTOR PROJECT

NUCLEAR SAFETY AND RELIABILITY

MAN-MACHINE-SYSTEMS RESEARCH

Autor und Koautoren	W. Wiesenack, F. Øwre
beauftragte Institution	OECD Halden Reactor Project
Adresse	1750 Halden, Norwegen
Telefon, E-mail, Internetadresse	wolfgang.wiesenack@hrp.no , www.ife.no/hrp
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	2277
Dauer des Projekts (von – bis)	01.01.2000 - 31.12.2002

ZUSAMMENFASSUNG

Das OECD Halden Reactor Project ist eine Zusammenarbeit von 20 Ländern auf dem Gebiet der Forschung zur Reaktorsicherheit. Die Schweiz, federführend vertreten durch die HSK, nimmt am laufenden 3-Jahresprogramm (2000 – 2002) teil. Schwerpunkte dieses Programms sind auf der einen Seite Untersuchungen zum Verhalten von Brennstoffen und Materialien unter normalen und transienten Bedingungen und auf der anderen Seite Untersuchungen mit dem Ziel, quantitative Kenntnisse bezüglich der Leistungsfähigkeit und der Grenzen von Menschen bei der Überwachung und Steuerung komplexer Systeme zu erlangen. Dabei werden als wichtigste Einrichtungen der Halden-Reaktor und das Halden Man-Machine-Laboratory (HAMMLAB) eingesetzt.

Im Halden-Reaktor waren im Berichtszeitraum mehrere Experimente installiert, in denen keramische Brennstoffe (UO₂, MOX, inert matrix) und Hüllrohrmaterialien bezüglich ihres Betriebsverhaltens untersucht werden. Typische Messgrößen sind Brennstofftemperatur, Spaltgasfreisetzung und Dimensionsänderungen von Brennstoff und Hüllrohr. Im inert Matrix Experiment, für das das PSI den Brennstoff produziert hat, wurde eine weitere Leistungserhöhung durchgeführt. Weiterhin werden für Reaktorstrukturen verwendete rostfreie Stähle bezüglich Risswachstum unter Bestrahlung sowie strahlungsinduzierten Veränderungen der Eigenschaften untersucht.

Im Bereich „Man-Machine Systems Research“ wurde das Halden Man-Machine-Laboratory für empirische Studien zum Zusammenspiel von Operateuren und Kontroll- und Überwachungssystemen benutzt. Dabei werden unter anderem neue Technologien, neue Präsentationsmethoden und das Prinzip der „human centered automation“ bezüglich ihrer Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit der Operateure beurteilt. Die gewonnenen Daten werden auch zur Formulierung von Richtlinien verwendet. Weiterhin wurden mehrere Systeme weiterentwickelt und in Pilotinstallationen im HAMMLAB verifiziert oder mit Daten aus Kernkraftwerken getestet. Dazu gehören COPMA (computerised procedure manual), TEMPO (thermal performance monitoring and optimisation) und PEANO für die on-line Kalibrierung von Messfühlern.

Projektziele

Das OECD Halden Reactor Project ist eine internationale Zusammenarbeit mit dem Ziel, zur sicheren und wirtschaftlichen Nutzung der Kernenergie beizutragen. Experimentelle Arbeiten und Studien benutzen den Halden Reaktor (HBWR) und das Halden Mensch-Maschine Laboratorium (HAMMLAB) als wichtigste Einrichtungen.

Darauf aufbauend umfasst das Programm im Bereich der Untersuchungen zum Brennstoff- und Materialverhalten experimentelle Aktivitäten zum Verhalten verschiedener Brennstoffe im Normalbetrieb und bei Transienten mit Schwerpunkt auf Hochabbrand. Bei den Untersuchungen zu Fragen der Lebensdauer von Kernkomponenten steht das Spannungsrissskorrosionsverhalten von im Reaktorkern eingesetzten Strukturmaterialien im Vordergrund. Bezüglich dieser Untersuchungsbereiche waren im Jahr 2002 15 zum Gemeinschaftsprogramm gehörende Experimente im Halden Reaktor installiert. Dabei werden in starkem Masse vorbestrahlter, re-instrumentierter Brennstoff sowie Materialien mit hohen Neutronen-Fluenzen aus kommerziellen Leichtwasserreaktoren eingesetzt.

Die Sicherheitsforschung im Programmbereich „Man-Machine Systems Research“ hat zum Ziel, quantitative Kenntnisse bezüglich der Leistungsfähigkeit und der Grenzen von Menschen bei der Überwachung und Steuerung komplexer Systeme zu erlangen. Dazu werden Untersuchungen zum Verhalten von Operateuren in verschiedenen Situationen durchgeführt, wobei auch die Effizienz von rechnergestützten Hilfsmitteln und Arten der Informationsdarstellung beurteilt werden. Die Zuverlässigkeit automatisierter Systeme und sicherheitskritischer Software wird in diesem Zusammenhang ebenfalls untersucht und auch, wie Operateure mit dem Ausfall solcher Systeme zurechtkommen (human centered automation). Weiterhin werden Arbeiten zur Überwachung und Optimierung des Anlagenbetriebs durchgeführt.

Die geplanten Arbeiten sind allgemein im Rahmenprogramme für den Zeitraum 2000 – 2002 festgelegt und im einzelnen im detaillierten Programm für das Jahr 2002 /1/ beschrieben.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Man-Machine-Systems Research

Der Bereich „Man-Machine Systems Research“ und insbesondere die Arbeiten im HAMMLAB umfassen experimentelle Untersuchungen des Zusammenspiels zwischen Operateuren und Kontroll- und Überwachungssystemen, um den Einfluss von neuer Technologie sowie neuen Überwachungssystemen, Darstellungsformaten und Betriebsprozeduren auf die Sicherheit beim Betrieb von Kernkraftwerken zu erfassen. Unter den wichtigsten Arbeiten im Berichtszeitraum können genannt werden:

- Fertigstellung des Alarmsystems und des Man-Machine Interface (MMI) für den Druckwasserreaktorsimulator FRESH, sodass dieser für Experimente im Jahr 2003 bereit ist.
- Abschluss des Experiments über Human-centered Automation (HCA) und einer vorläufigen Analyse der gewonnenen Daten. Ein Abschlussbericht einschliesslich Richtlinien (guidelines) für das Design von MMI und HCA-Systemen ist unter Ausarbeitung.
- Beginn einer Experimentserie mit dem Ziel, die Wirkung unterschiedlicher Automatisierungsgrade der Prozessausführung mit Hilfe von computerisierten Prozeduren auf die Leistung des Operateurs und sein Situationsverständnis aufzuzeigen. Diese Experimente werden im Siedewasserreaktorsimulator HAMBO ausgeführt, wobei Operateure aus schwedischen Kernkraftwerken als Testpersonen dienen, und im Februar 2003 abgeschlossen sein. Als Teilprojekt davon ist COPMA (computerised procedure manual) durch mehrere neue Funktionen erweitert und eine neue Version dieses Systems freigegeben worden.
- Ein Experiment wurde durchgeführt um zu zeigen, dass VR-Technologie für den Abgleich eines Kontrollraumdesigns mit Human-Factors-Richtlinien benutzt werden kann. Dabei verglichen zwölf Teams ein VR-Modell des Kontrollraums des Haldenreaktors und den wirklichen Kontrollraum mit

Teilen von NUREG-0700 (50 Richtlinien). Das Experiment hat gezeigt, dass VR-Modelle für diesen Zweck geeignet sind.

- In Zusammenarbeit mit EPRI wurde das Signalvalidierungssystem PEANO mit Daten US-amerikanischer Kernkraftwerke getestet. Die Absicht dabei ist die zukünftige Anwendung von PEANO für die on-line Kalibrierung von Sensoren. Die Ergebnisse sind sehr vielversprechend, und die Entwicklung PEANOs zu einem System, das die US NRC Anforderungen an ein on-line Kalibrierungssystem erfüllt, wird weitergehen.
- Das System TEMPO (thermal performance monitoring and optimisation) wurde weiterentwickelt. Eine Version für Druckwasserreaktoren ist fertiggestellt und wurde im Simulator des Kernkraftwerks Almaraz in Spanien in Zusammenarbeit mit Tecnatom erprobt. Die Version für Siedewasserreaktoren, die im schwedischen Forsmark-3 installiert ist, wurde verbessert. Analytische Redundanz führt zu einer grösseren Genauigkeit der Messungen und einer besseren thermischen Leistung im Turbinenkreislauf.
- Die Arbeiten auf dem Gebiet der Software-Zuverlässigkeit wurden weitergeführt. Die erste Version des „Halden Prover“, der die Entwicklung sicherheitskritischer Software nach formalen Kriterien unterstützt, ist fertiggestellt. Untersuchungen zur Anwendung von Bayesian Belief Nets (BBNs) bei der Sicherheitsbeurteilung von Software haben gezeigt, dass dieses Verfahren geeignet ist, qualitative und quantitative Information (Testergebnisse) über Softwaresysteme zu integrieren, um dadurch die Zuverlässigkeit in einer ganzheitlichen Sicherheitsbewertung zu beurteilen. Diese Methode kann besonders bei Sicherheitsurteilungen sogenannter commercial-off-the-shelf Systemen (COTS) wichtig sein.

Nuclear Safety and Reliability

Das Programm im Bereich der Untersuchungen zum Brennstoff- und Materialverhalten umfasste im Berichtsjahr insgesamt 15 Experimente im Haldenreaktor. Der Reaktor hatte im Jahre 2002 eine normale Verfügbarkeit, und es konnten mehrere neue Experimente des internationalen Gemeinschaftsprogramms erstmals geladen werden. Ausserdem wurden für eine Reihe von Experimenten die Bestrahlungsbedingungen gemäss dem geplanten Programm variiert. Bei den meisten Experimenten werden dabei betriebsrelevante Grössen wie Brennstofftemperatur, Stabinnendruck, Längenänderungen und Risswachstum on-line erfasst und zur weiteren Auswertung bereitgestellt. Von der Vielzahl der so gewonnenen Ergebnisse sollen genannt werden:

- Weiterführung der kontrollierten Leistungserhöhung von MOX-Brennstoff (Abbrand 64 MWd/kg) bei gleichzeitiger Messung von Brennstoffzentraltemperatur und Stabinnendruck, um die Spaltgasfreisetzung bei verschiedenen Temperaturen und die Freisetzungskinetik bei konstanter Leistung zu ermitteln. Dieser Brennstoff wurde vorher im Haldenreaktor bei mässiger Leistung weiterbestrahlt, um bei einem höheren Abbrand als in kommerziellen LWR standardmässig erreichbar testen zu können. Ziel ist letztendlich, die erforderlichen Betriebsdaten für die Lizenzierung des erhöhten Abbrands zu erlangen. Wie schon in bei ähnlichen Experimenten mit MOX-Brennstoff konnte festgestellt werden, dass Spaltgasfreisetzung bei Erreichen von etwa der gleichen Temperatur beginnt wie bei UO_2 -Brennstoff. Weiterhin ist eine verzögerte Freisetzung zu beobachten, d.h., es müssen erst durch Leistungseniedrigung Freisetzungspfade geöffnet werden, ehe eine Druckerhöhung registriert werden kann.
- Weiterbestrahlung verschiedener Brennstoffe zur Erzeugung der sogenannten „Rimstruktur“ (Abbrandziel 100 MWd/kg). Dabei liegt der Brennstoff in Form von Scheiben vor, wobei durch die Anordnung zwischen Molybdänscheiben eine gleichmässige Temperatur erreicht wird. Das Experiment wurde im Jahre 2001 begonnen. Die Analyse von freigesetzten Spaltprodukten (gas flow measurements) erlaubt Rückschlüsse auf den Diffusionskoeffizienten in den verschiedenen Brennstoffen (UO_2 mit und ohne Zusätze zur Beeinflussung der Korngrösse, homogener und inhomogener MOX-Brennstoff). Ausserdem werden Brennstoffverdichtungs- und -schwellendaten gewonnen, die wegen der gleichmässigen Temperatur und grossen Auflagefläche wesentlich eindeutiger sind als vergleichbare Daten von Brennstoff in Tablettenform.

- Betriebsverhalten von Inertmatrix-Brennstoff. Hier werden die Bestrahlungseigenschaften von stabilisiertem Zirkoniumoxyd als Trägermaterial für Plutonium untersucht. Dieser sogenannte Inertmatrix-Brennstoff (IMF) wurde von PSI hergestellt. Während der Bestrahlung werden die Brennstofftemperatur, das Dimensionsverhalten sowie der Stabinnendruck (Spaltgasfreisetzung) gemessen. Im Dezember 2002 wurde das Testelement erneut umplatziert, um durch Leistungserhöhung den Brennstoff den hohen Anforderungen moderner Beladungsstrategien zu unterwerfen. Die Instrumentierung arbeitet weiterhin sehr zuverlässig.
- PCMI-Verhalten von Stäben mit hohem Abbrand. Daten zu diesem Themenbereich werden von mehreren Experimenten gewonnen, die mit Sensoren zur Erfassung der Längenänderung des Hüllrohrs versehen sind. Bei entsprechend hohem Abbrand liegt ein sogenanntes „bonding“ vor, d.h., Hüllrohr und Brennstoff sind durch eine Reaktionsschicht aus Spaltprodukten verbunden. Die Messung der Längenänderung des Hüllrohrs zeigen drei charakteristische Merkmale: ein Bereich freier thermischer Ausdehnung, den Beginn der Interaktion mit dem Brennstoff ungefähr am Punkt der zuletzt erreichten Leistung, und eine langfristige, permanente Längenzunahme, die dem Schwellen des Brennstoffs folgt. Während die ersten beiden Merkmale, trotz des Bondings, dem von Brennstoff mit niedrigem und mittlerem Abbrand gleichen, ist das letzte Merkmal nur typisch für Hochabbrand.
- Untersuchungen zur Rückwirkung von hohem Stabinnendruck auf die Temperaturen im Brennstoff („rod overpressure / clad lift-off“). Ziel dieser Experimentserie ist der Aufbau einer Datenbasis zur Verifizierung von Brennstabmodellen und zum Nachweis des Einhaltens von Genehmigungskriterien zu diesem Problemkreis. Im Experiment aus dieser Serie mit MOX-Brennstoff (Abbrand 62 MWd/kg) zeigte sich, dass ein etwas höherer Stabinnendruck als im früher untersuchten UO₂-Stab, erreicht werden kann, ehe eine Rückwirkung auf das Temperaturverhalten beobachtet werden kann. Für die letztere Brennstoffart konnte ein Druck von 130 bar über dem Systemdruck toleriert werden. Zusätzlich zu den Temperaturmessungen werden in dieser Experimentserie auch die Verlängerung des Hüllrohrs (PCMI) und der hydraulische Durchmesser gemessen. Ausserdem werden Power-Temperature-Elongation Noise-Messungen durchgeführt, die insgesamt ein komplexes Bild des Brennstoffverhaltens liefern.
- Untersuchungen zum Risswachstum in rostfreien Stählen mit hohen Fluenzen. Diese Art von Experiment wurde normalerweise unter Siedewasserbedingungen durchgeführt, wobei die Proben in der Form von „compact tension specimen“ mit variablen Kräften (Spannungsintensität) beaufschlagt werden können. Zur Zeit wird mit IFA-657 auch eine entsprechende Studie unter Druckwasserreaktorbedingungen durchgeführt. Wie in früheren Experimenten unter Siedewasserreaktorbedingungen hat sich auch in IFA-657 gezeigt, dass reduzierende Bedingungen das Risswachstum nur bis zu mittleren Fluenzen verhindern oder vermindern. Bei hohen Fluenzen, wie bei den Materialien in diesem Experiment vorhanden (10 bis 35 dpa, displacements per atom), verlieren reduzierende Bedingungen ihren positiven Einfluss. Von besonderem Wert sind Daten bei niedriger Spannungsintensität (Risswachstum gegen Null). Bei einer Spannungsintensität von 6 MPa m^{1/2} wurden in diesem Experiment Risswachstumsraten von 3 - 7 x10⁻⁸ mm/s gemessen (1 - 2 mm/Jahr).

Die Ergebnisse aus dem Programm des Halden Reactor Project sind im Einzelnen in den halbjährlichen Statusreporten /2, 3/ beschrieben.

Nationale Zusammenarbeit

Human Reliability Assessment (HRA) bekommt erhöhte Bedeutung in zukünftigen Experimenten im HAMMLAB, wobei man bestrebt sein wird, Daten zur Untermauerung von HRA-Modellen zu erhalten. Im Jahr 2002 veranstaltete das Halden-Projekt ein Seminar mit HRA-Spezialisten, um Empfehlungen bezüglich der Priorisierung zukünftiger Forschungsprogramme in Halden auf dem HRA-Gebiet zu erhalten. Dazu war Dr. Vinh Dang, PSI, als „key-note speaker“ eingeladen. Das Haldenprojekt plant einen Informationsaustausch mit PSI und HSK während der weiteren Forschung auf dem Gebiet HRA.

Auch im nuklearen Bereich ist die Zusammenarbeit des Halden Reactor Projects mit dem Paul Scherrer Institut zu erwähnen. Diese erstreckt sich nicht nur auf die besondere Betreuung und Auswertung des Inert Matrix Experiments, sondern umfasst auch unterstützende Rechnungen zur Planung zukünftiger Experimente. So ist vom PSI eine Vorausberechnung des geplanten LOCA-Experiments durchgeführt worden. Die Rechnungen geben Anhaltspunkte für die zu erwartenden Aufheizraten und Temperaturverhältnisse. Weiterhin besteht eine gute Zusammenarbeit mit Schweizer Kernkraftwerken bezüglich der Bereitstellung und dem Transport von vorbestrahltem Brennstoff für das LOCA-Experiment.

Internationale Zusammenarbeit

Das Halden Reactor Project ist selbst eine internationale Zusammenarbeit, an der 20 Nationen mit etwa 100 Organisationen teilnehmen. Dazu gehören Aufsichtsbehörden, Betreiber, Brennstoffhersteller und Forschungseinrichtungen.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Der im Programm /1/ definierte Arbeitsumfang für 2002 ist weitgehend abgearbeitet worden. Der Halden-Reaktor hatte im Jahre 2002 eine normale Verfügbarkeit, sodass die Bestrahlungsvorhaben im wesentlichen wie geplant fortgeführt werden konnten.

Die wesentlichen Ergebnisse für den Zeitraum 2000 – 2002, für den die internationale Vereinbarung zur Durchführung des Halden Reactor Projects gilt, wurden in einer eigenen Konferenz im September 2002 vorgetragen. Ein neues 3-Jahres-Programm für den Zeitraum 2003-2005 ist formuliert, und die Einzelheiten für 2003 sind entsprechend in /4/ definiert.

Referenzen

- [1] *Halden Reactor Project Program Proposal 2002*, HP-1005
- [2] *Status Report January – June 2002*, HP-1120
- [3] *Status Report July – December 2001*, HP-1130
- [4] *Halden Reactor Project Program Proposal 2003*, HP-1119



Datum: 14. Februar 2003
Von: Dr.-Ing. Brigitte Faust

Begutachtung zum Jahresbericht 2002 Co-operative Research Activities US-NRC & HSK

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Seit einigen Jahren beteiligt sich die Schweiz im Rahmen eines Abkommens mit der amerikanischen Sicherheitsbehörde an wichtigen Projekten zur schweren Unfallforschung. Durch detaillierte Analysen schwerer Unfälle lässt sich ein breites Wissen erarbeiten, welches die Minderung der Unfallfolgen ermöglicht. Folgende Forschungsvorhaben werden weitergeführt:

- COOPRA (Cooperative Probabilistic Risk Assessment Research): Zusammenarbeit und Austausch von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Probabilistischen Sicherheitsanalyse.
- CSARP (Cooperative Severe Accident Research Programme): analytische und experimentelle Untersuchungen des Anlageverhaltens bei schweren Unfällen (Wechselwirkung zwischen Kernschmelze, Wasser und Reaktorbehälter sowie zwischen Baustrukturen); Verbesserung des Codes *MELCOR* zum Modellieren der Schmelze selber und der sie umgebenden Betonstruktur.
- Aging Research: Untersuchung zur Materialalterung sowie deren Auswirkung

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

COOPRA – Probabilistic Risk Assessment Research

Durch die Zusammenarbeit internationaler Gruppen werden PRA/PSA Informationen ausgetauscht, wodurch die Entwicklung und Anwendung der PRA/PSA Software Werkzeuge erleichtert wird.

Momentan bestehen vier COOPRA – Arbeitsgruppen: 1) Risiken bei Teillast und Stillstand, 2) Feuerschäden an elektrischen Kabeln und Stromkreisen, 3) Risikoinformierte Entscheidungsfindung (RIDeM) und 4) Einfluss von organisatorischen Faktoren auf das Risiko. Im übrigen arbeiten zwei Gruppen auf den Gebieten "Alterung von Kabeln" und "Unsicherheitsanalyse".

Im Jahre 2002 fanden mehrere technische Meetings statt. Die Berichte der Arbeitsgruppen können von den Mitgliedern jeweils auf der COOPRA Homepage eingesehen werden. Die Arbeitsgruppe RIDeM wies auf Forschungsbedarf zur Variabilität und Unsicherheit von PSA Studien unter Anwendung von Datenbanken für Risikoinformierte Entscheidungsfindung hin. Der Lenkungsausschuss hat im Oktober 2002 empfohlen, die Gruppe 4 ("organisatorische Faktoren auf das Risiko") mit "Special Interest Group" zu bezeichnen. Im übrigen schlägt der Lenkungsausschuss vor, eine eigene Internetseite einzurichten, welche es COOPRA Mitgliedern ermöglicht, Informationen zu von ihnen gewünschten Themen auszutauschen.

CSARP – Severe Accident Research

Im jährlichen CSARP Technical Review Meeting (6. – 8. Mai 2002) mit über 60 Teilnehmern wurden die künftigen Prioritäten in der schweren Unfallforschung diskutiert. Vorgestellt wurde das OECD-LHF Projekt (Lower Head Failure) des Sandia National Laboratory zur experimentellen Untersuchung von Ort, Ausmass und Zeit eines Kriechbruchversagens der unteren Kalotte des Reaktordruckbehälters unter hoher thermo-mechanischer Belastung. OECD-MASCA (Projekt des Russischen Forschungszentrums Kurchatov) untersucht das Verhalten des Reaktordruckbehälters bei schweren Störfällen, wie sie z.B. bei thermischer Belastung aufgrund von chemischen Reaktionen oder Spaltprodukten in der Schmelze auftreten. OECD-MCCI (Projekt am Argonne National Laboratory) befasst sich mit Kühlmechanismen zur Beherrschung der Schmelzausbreitung im Behälter sowie ihrer Interaktion mit der Behälterwand aus Beton. OECD SERENA (Projekt des französischen Commissariat à l'Energie Atomique, CEA) untersucht die Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Kühlflüssigkeit. Phébus (Versuchsreaktor im Grossmassstab in Cadarache, Frankreich) dient der Untersuchung des Kernverhaltens und der Freisetzung von Spaltprodukten während Unfällen. ARTIST erprobt das Verhalten von Aerosolen bzw. Jodverbindungen bei der Dampferzeugung sowie Rückhaltemöglichkeiten,.

Beim MELCOR Meeting (9-10. Mai 2002) wurde die breite Anwendungspalette des Computer Codes *MELCOR* zum Modellieren der Kernschmelze selber und der sie umgebenden Betonstruktur aufgezeigt. Durch diese Kopplung ermöglicht er nicht nur eine wirklichkeitsnahe Darstellung der tatsächlichen Verhältnisse, sondern auch eine zuverlässige Analyse und Beurteilung der Wahrscheinlichkeit für schwere Unfälle. Unsicherheiten und qualitative Aussagen werden explizit berücksichtigt.

Aging Research

Im Jahre 2002 konzentrierten sich die Experimente auf die durch Materialermüdung ausgelöste Rissbildung in Stahlkomponenten von Siedewasserreaktoren. Es hat sich gezeigt, dass die Lebensdauer von Stahl nicht nur von Belastungsraten, Temperatur und Wasserchemie abhängt, sondern auch von seinem Materialgefüge (unlegiert, niedriglegiert, gehärtet und austenitisch). Die bereits im Jahre 2001 begonnenen Versuche zur Rissbildung an Stählen infolge Bestrahlung mit hohen Fluenzen wurden abgeschlossen. Sie zeigten, dass neben der Materialchemie auch die Strahlendosis einen erheblichen Einfluss auf die Schadensanfälligkeit von Stahl hat. Zum ersten Mal wurden Versuche zur Bildung und Ausbreitung von Rissen bei Edelstahl unter dem Einfluss des Kühlwassers hohen und niedrigen Sauerstoffgehalts durchgeführt.

Auch im Jahre 2002 beteiligte sich das Unterprojekt "Materials Reliability Project" an einem Bestrahlungstest im russischen BOR-60 Druckwasserreaktor. Die Proben aus diesem Reaktor werden wieder viel höhere Fluenzen erreichen als dies in den Halden Bestrahlungsexperimenten möglich ist. Die 10-dpa Bestrahlungsversuche wurden im Dezember 2003 beendet, die Proben für die 5 dpa und übrige Dosen werden im Jahre 2003 geliefert.

Gegen Ende des Jahres 2002 wurde auf das Vorkommnis am Druckwasserreaktor in Davis-Besse (Ohio, USA), bei dem Borsäure-Korrosionsschäden festgestellt wurden, reagiert. Es war Borsäure aus leckgeschlagenen Vorratsbehältern auf den Stahlmantel gelangt. Ein neues Programm wurde initiiert, welches die Schädigungsmechanismen von sicherheitsrelevanten Reaktorkomponenten aufgrund von konzentrierten Borsäurelösungen untersuchen soll. Über die Ergebnisse der vier Teilprogramme wird während der Jahre 2003 und 2004 berichtet:

- Bildung and Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rissen bei von Davis-Besse entnommenen Untersuchungsproben aus Stahlrohren bzw. Schweissnähten der Legierungen 600 and 182
- Modellentwicklung zur Ermittlung der Rissausbreitungsgeschwindigkeit und Inspektionshäufigkeit
- Korrosion von Stahlkomponenten in Reaktoren aufgrund von konzentrierten Borsäurelösungen
- Messung des elektrochemischen Potentials (Korrosionspotential) der Legierungen 600, 182 und A533B in konzentrierten Borsäurelösungen.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Die Beteiligung an diesem US-NRC Programm ist für die HSK von grosser Bedeutung:

COOPRA ermöglicht eine Weiterentwicklung von, für internationale PSA Standards.

CSARP untersucht verschiedene Unfallszenarien auf analytischem und experimentellen Wege, wodurch Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie Unfallfolgen vermindert werden können.

Die HSK profitiert direkt von der Weiterentwicklung des MELCOR Codes und verfügt jederzeit über die neueste Version dieses Codes.

Die Resultate des Programm "Aging Research" kann im Rahmen der Verbesserung von Sicherheitsvorschriften für schweizerische Kernanlagen genutzt werden.

Im Rahmen der Zusammenarbeitsvereinbarung zwischen der HSK und der US-NRC werden auch weitere wichtige Informationen ausgetauscht, wie zum Beispiel der Umgang mit dem Zusatzrisiko "Flugzeugabsturz"

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Die Zusammenarbeit in allen Unterprogrammen wird weitergeführt. Ein internationales Workshop zum Thema "The Effects of Deregulation on Safety" ist im Jahr 2003 vorgesehen.

Jahresbericht 2002, 11. Februar 2003

SEVERE ACCIDENT RESEARCH CO-OPERATIVE RESEARCH ACTIVITIES US-NRC & HSK

Autor und Koautoren	Andrew J. Szukiewicz, Sr. International Research Programs Coordinator
beauftragte Institution	US-NRC
Adresse	US Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C. 20555-0001, USA
Telefon, E-mail, Internetadresse	ajs2@nrc.gov
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	
Dauer des Projekts (von – bis)	

SUMMARY

The United States Nuclear Regulatory Commission (US-NRC) and the Swiss Federal Office of Energy have concluded an agreement under which they cooperate in the research areas of severe accidents, through the Cooperative Severe Accident Research Program (CSARP), probabilistic risk assessment, through its Cooperative Risk Assessment Program (COOPRA), deregulation and aging research programs. This report summarizes the achievements of the year 2002:

Aging Research: The experimental effort in 2002 was focused on the mechanism of fatigue crack initiation in carbon and low-alloy steels, and wrought and cast austenitic steels containing surface defects representative of normal processing. Slow strain rate tests on high-fluence SSs from Halden Phase-I irradiation were continued (from 2001) and concluded. Crack growth rate testing of irradiated stainless steels began during 2002. Degradation of Reactor Pressure Vessel Boundary Components in Concentrated Boric Acid Solutions is a new program, initiated late in 2002 to address issues raised by the Davis-Besse corrosion event, together with a long history of similar events of lesser proportions throughout the world.

Severe Accident Research (CSARP): The annual CSARP Technical Review covered two major themes: progress in phenomenological research and experiments, and progress in code development, assessment, and applications. The meeting highlighted the OECD-sponsored severe accident phenomenological research. Progress in severe accident code development and assessment was reported at the meeting. Status of MELCOR code consolidation activities, and applications of MELCOR to plant analysis and dry cask storage were presented. The meeting was followed by a MELCOR Code Users Workshop which highlighted the modeling features of MELCOR.

Deregulation Research: A workshop on the effects of Deregulation on safety is planned in conjunction with HSK.

Probabilistic Risk Assessment Research (COOPRA): Currently under COOPRA are the following four working groups: 1) Low Power and Shutdown Risk, 2) Fire-Induced Damage to Electrical Cables and Circuits, 3) Risk-Informed Decision Making RIDeM, and 4) Organizational Influences on Risk. In 2002, several technical reports were posted on the COOPRA web site, which continues to be a very valuable source for PRA/PSA information. Also, several technical meetings were held in 2002..

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

COOPERATIVE PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT (COOPRA) RESEARCH

During 2002, COOPRA continued to be used as a forum for collaboration between international organizations to improve the sharing of PRA/PSA information and to facilitate the efficient development and use of PRA/PSA tools. Currently under COOPRA are the following four working groups:

- 1) Low Power and Shutdown Risk,
- 2) Fire-Induced Damage to Electrical Cables and Circuits,
- 3) Risk-Informed Decision Making, and
- 4) Organizational Influences on Risk.

Under COOPRA there are also two special interest groups:

- 1) Cable Aging, and 2) Uncertainty Analysis.

Also, in 2002, several upgrades were made to the COOPRA web site.

Several technical meetings were held in 2002. Technical reports were posted in the COOPRA web site and made available to the COOPRA members. One such meeting took place in the USA in October 2002, for the working group on Low Power and Shutdown Risk. The group's status report of each country's activities in the area of Low Power and Shutdown Risk was posted on the web site.

Another such meeting was held in the United Kingdom in May 2002 for the working group on Risk-Informed Decision Making (RIDeM). Several reports from this meeting were posted on the COOPRA web site for the RIDeM working group which address research needs, database of risk informed decisions and sources of variability and uncertainty in nuclear reactor PSAs. One meeting was held on August 2002, for the working group of Fire-Induced Damage to Electrical Cables and Circuits. The meeting was held in USA. This working group completed a white paper which has also been posted in the web site. Among other items, the white paper contains definitions of the main issues, milestones, and description of future activities.

In the COOPRA Steering Committee meeting held in Washington DC, in October 2002, it was suggested that the working group of Organizational Influences on Risk might be changed to a Special Interest Group. Any countries having interest in this working group were encouraged to use the COOPRA web site to share their ideas.

In the COOPRA Steering Committee meeting it was also agreed that a general discussion page would be added to the COOPRA web site to enhance the sharing of information on any topics that the COOPRA members have interest to exchange information.

SEVERE ACCIDENT RESEARCH (CSARP)

The annual Cooperative Severe Accident Research Program (CSARP) Technical Review meeting was held on May 6-8, 2002, at Albuquerque, New Mexico. The meeting was attended by 60 participants from 15 CSARP Member countries and from the National Laboratories, Universities, and the USNRC. The technical sessions covered two major themes: progress in phenomenological research and experiments, and progress in code development, assessment, and applications. This year the CSARP meeting highlighted the OECD-sponsored severe accident phenomenological research. In particular, presentations were given on the OECD Lower Head Failure (OLHF) Project at the Sandia National Laboratories, the OECD MCCI Project on ex-vessel debris coolability at the Argonne National Laboratory, the OECD MASCA Project on material interactions in the lower head at the Russian Research Center, and the OECD SERENA Project on fuel-coolant interactions at the Commissariat Energie Atomique (CEA) in France. Melt coolability and melt-structure-

coolant interactions were previously identified as outstanding severe accident issues for current generation reactors where ongoing research would be needed to address remaining uncertainties. The above OECD-sponsored programs were launched to meet the need. Other phenomenological research presented at the meeting includes the EC-sponsored programs, the PHEBUS program in France, the QUENCH program in Germany, FCI programs in Germany and Korea, lower head failure program in Sweden, and fission product research in France.

As in previous years, progress in severe accident code development and assessment was reported at the meeting. Presentations on code development focused on integral codes MELCOR (U.S.), ASTEC (France/Germany), and SAMPSON (Japan). Status of MELCOR code consolidation activities was presented as were applications of MELCOR to plant analysis and dry cask storage. The CSARP participants expressed their views that severe accident research in the future needs to address advanced reactor issues as well. The participants also expressed a strong desire to continue the annual meeting in its current form.

The CSARP meeting this year was followed by a MELCOR Code Assessment Program (MCAP) Meeting from May 9 - 10, 2002, and by a MELCOR Users Workshop, both attended by many of the CSARP participants. The MCAP meeting presented an opportunity to discuss a wider range of MELCOR applications, while the workshop highlighted the modeling features of MELCOR.

DEREGULATION RESEARCH

Mr. Chakraborty (HSK) indicated that he would be willing to sponsor a workshop in Europe on „The Effects of Deregulation on Safety“ in order to solicit input and views from the European community. We are currently pursuing this activity with HSK.

AGING RESEARCH

Environmentally Assisted Cracking in Light Water Reactors (2002 status)

Task 1: Environmental Effects on Fatigue Crack Initiation.

The experimental effort in 2002 was focused on the mechanism of fatigue crack initiation in carbon and low-alloy steels, and wrought and cast austenitic steels containing surface defects representative of normal processing (grinding, machining, etc.). For austenitic stainless steels (SSs), the fatigue life of roughened specimens is a factor of ~3 lower than that of the smooth specimens in both air and low-Dissolved Oxygen (DO) water. In high-DO water, fatigue lives are comparable for smooth and roughened specimens. For carbon and low-alloy steels, the fatigue life of roughened specimens is lower than that of smooth specimens in air but is the same in high-DO water. In low-DO water, the fatigue life of the roughened specimens is slightly lower than that of smooth specimens. Because environmental effects on carbon and low-alloy steels are moderate in low-DO water, surface roughness is expected to influence fatigue life.

Task 2: Evaluation of the Causes and Mechanisms of IASCC in BWRs.

Slow strain rate tests on high-fluence SSs from Halden Phase-I irradiation were continued (from 2001) and concluded. These tests determined the effects of material chemistry and irradiation level on the susceptibility of SSs to IASCC. The data show that Types 304L and 316L steels tested in highly-oxygenated water (8ppm DO) can be susceptible even at very low S levels. However, heats of Types 304 and 316SS were resistant in the same environment. These data suggest that the deleterious effect of sulfur is more pronounced in the low-C types 304L or 316L than in the high-C counterparts.

Crack growth rate testing of irradiated stainless steels began during 2002. Two tests were completed, with the results commensurate with the BWRVIP-99 disposition line. These tests are conducted alternately in low-dissolved-oxygen and high-dissolved-oxygen simulated reactor coolant, and meet objectives of both Tasks 2 and 3.

Task 3: Evaluation of Causes and Mechanisms of IASCC of Austenitic SS in PWRs.

The primary activity during 2002 continues to be participation with the materials reliability project (MRP), and with the Cooperative IASCC Research (CIR) group in an irradiation in the BOR-60 reactor in Russia. The specimens in the BOR-60 reactor will reach much higher fluences than are achievable in Halden irradiations. At the ultimate, these irradiations will approximate end-of-life conditions for PWR core structural materials. The 10-dpa irradiation completed in December, and the 5 dpa and 10 dpa specimens will be shipped and received in 2003.

Task 4: Cracking of Nickel Alloys and Weldment

Crack growth tests were carried out in 2002 on 1-T fracture toughness (CT) specimens of Alloy 600 in the mill annealing (MA) and MA plus 30% cold weld (CW) conditions in high-DO (BWR) and low-DO (PWR like) environments. The rise times in the cyclic CGR tests ranged from 30–3000 s. The test facility received a substantial upgrade in 2002 in order to improve the sensitivity of the crack extension monitoring instrumentation. This is necessary as the test program objectives begin to include less susceptible materials, for which the instrumentation must be comparably more sensitive. The ICG-EAC round robin testing of nickel alloys and weld metals was deferred into 2003 because specimens could not be prepared as early as originally anticipated.

Degradation of Reactor Pressure Vessel Boundary Components in Concentrated Boric Acid Solutions:

This is a new program, initiated late in 2002 to address issues raised by the Davis-Besse corrosion event, together with a long history of similar events of lesser proportions throughout the world. The corrosion at Beznau in 1970 is a good, early, but modest example of boric acid corrosion of a pressure vessel head. There are four experimental tasks in this program, and results will be reported to HSK as they become available during 2003 and 2004.

- Task 1: Crack Initiation and Growth Rates of Alloys 600 and 182 Removed from Davis-Besse Nozzles and J-weld
- Task 2: Development of an Integrated Crack Growth Rate and Inspection Frequency Determination Model
- Task 3: Corrosion of Reactor Steels in Concentrated Boric Acid Solutions
- Task 4: Measurement of Electrochemical Potential (Corrosion Potential) of Alloy 600, Alloy 182 and A533B in Concentrated Boric Acid Solutions.



Datum: 27. Januar 2003
Von: Dr. Claude Maeder

Begutachtung zum Projektverlauf 2002 OECD CABRI-Wasserloop Project

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Im CABRI-Wasserloop-Projekt der OECD/NEA werden durch das IRSN am Forschungsreaktor CABRI in Cadarache, Frankreich Versuche zum Verhalten von Brennstäben bei Reaktivitätsstörfällen (Reactivity Initiated Accidents, RIA) durchgeführt. Dazu wird der bisher mit Natrium gekühlte Testloop auf Wasserkühlung umgeändert, so dass die Versuchsanordnung den in Leichtwasserreaktoren vorhandenen Bedingungen besser entspricht.

Im Rahmen des CABRI International Programme (CIP), an dem USA, Frankreich, Deutschland, England, Spanien, Finnland, Schweden und die Schweiz beteiligt sind, werden 12 Experimente an hochabgebrannten Brennstäben mit fortschrittlichen Brennstoff- und Hüllrohrmaterialien durchgeführt. Zur Beratung des IRSN und zur Festlegung der Versuchsrandbedingungen wurden eine Technical Advisory Group und ein Steering Committee eingesetzt, welche zwei Mal pro Jahr zusammenkommen und in welchen die Schweiz über die HSK vertreten ist.

Welche Projektziele wurden im Jahre 2002 erreicht?

Im Oktober und im November 2002 wurden die zwei Referenzversuche der Testserie CIP0 mit Brennstäben mit einem Brennstoffabbrand von rund 75 MWd/kgU und Zirkon-Niob-Hüllrohrmaterialien im bisherigen, natriumgeköhlten Testloop durchgeführt. Nach dem Umbau des CABRI-Reaktors werden diese Versuche mit identischen Brennstäben als Testserie CIP1 wiederholt.

Das IRSN hat die Aufträge an die am Umbau beteiligten Firmen erteilt. Der Beginn der Versuche im CABRI-Wasserloop ist für April 2006 geplant. Als erster Versuch ist ein Qualifikationsversuch CIPQ vorgesehen, dessen Testziele festgelegt wurden (Test der Versuchsanlage, Qualifikation der Instrumentierung und Untersuchung besonderer thermohydraulischer Phänomene im Wasserloop).

Als weitere Testserien sind die Hochabbrandtests CIP2, ein RIA-Phänomene-Test CIP3, MOX-Tests CIP4 und die Ergänzungstests CIP5 (mit BWR-Uran-, BWR-MOX- oder VVER-Brennstäben) vorgesehen. Zur Auswahl der Brennstäbe für diese Tests wurde ein Satz von Kriterien erstellt, welche den Brennstoffabbrand, Hüllrohr- und Brennstoffeigenschaften, die Beanspruchung des Brennstabes im bisherigen Betrieb, die Bereitstellung der Daten und die Verfügbarkeit der Brennstäbe umfassen.

Daten von Brennstäben, die als Kandidaten für einen der RIA-Tests in Frage kommen, wurden zusammengestellt. Alle schweizerischen Kernkraftwerke haben Teststäbe angeboten, welche je nach Eignung bei den Tests CIP2 bis CIP5 verwendet werden könnten.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Neben Forschungsanlagen in Japan (NSRR-Reaktor) und Russland ist der CABRI-Reaktor weltweit die einzige Anlage, an der das Brennstoffverhalten bei schnellen Reaktivitätsstörfällen in Leichtwasserreaktoren (Steuerstabauswurf im DWR und Steuerstabfall im SWR) realistisch simuliert werden kann. Die Ergebnisse werden es erlauben die Störfallphänomene genauer zu modellieren und die festgelegten Nachweisziele für Hochabbrandbrennstoff und fortgeschrittene Hüllrohrmaterialien zu verifizieren und nötigenfalls zu verbessern. Das Projekt wird durch das IRSN bisher effizient durchgeführt und durch die beteiligten Länder eingehend überwacht.

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Die bis zum Beginn der Versuche im Wasserloop zur Verfügung stehende Zeit von drei Jahren muss nun genutzt werden, um die Versuchsrandbedingungen und die zu verwendenden Testbrennstäbe endgültig festzulegen. Die Testbrennstäbe sind zu charakterisieren, die benötigten Versuchsdaten zusammenzustellen und der erwartete Versuchsablauf im Voraus zu berechnen. Von besonderem Interesse wären Versuche mit Brennstäben, die sowohl im CABRI- als auch im NSRR-Reaktor in Japan untersucht werden. Eine solche Möglichkeit besteht für einzelne der vorgeschlagenen schweizerischen Brennstäbe.



Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires
Divisione principale della Sicurezza degli Impianti Nucleari
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate

Datum: 29. Januar 2003
Von: Patrick Meyer

Begutachtung zum Projektverlauf 2002 OECD-FIRE

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Das Ziel des "OECD Fire Incident Record Exchange" (OECD-FIRE) Projektes ist die Sammlung und die Analyse von Daten zu Brandereignissen in Kernkraftwerken der OECD-Mitgliederstaaten. Damit sollen sowohl die phänomenologische wie auch die statistische Basis für die Brandgefährdungsanalysen der werkspezifischen PSA-Studien verbessert werden.

Im OECD-FIRE Projekt beteiligen sich verschiedene Mitgliederstaaten mit ihren Experten auf dem Gebiet der Brand-PSA, darunter Tschechien, Finnland, Frankreich, Deutschland, Japan, Schweden, USA und die Schweiz. Spanien, Kanada und England erwägen ihrerseits eine Teilnahme. Die Datenbank steht nur denjenigen Staaten zur Verfügung, die auch Daten beisteuern.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Das organisatorische Ziel für 2002, die Verpflichtung einer ausreichenden Zahl von Mitgliederstaaten für die Teilnahme am Projekt, wurde erreicht. Auch das technische Projektziel für das Jahr 2002, die Erstellung eines Leitfadens für die systematische Datenerfassung zu Brandereignissen ("coding guideline") wurde weitgehend erreicht.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

In der Schweiz unterhalten alle vier Kernkraftwerke werkspezifische Brand-PSA Studien. Diese Studien müssen auf eine ausreichende Datenbasis gestützt sein. Da Brandereignisse in Kernkraftwerken sehr selten sind, ist ein Zusammenschluss auf internationaler Basis zwingend notwendig.

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Im Jahre 2003 müssen die Verantwortlichkeiten für die Erfassung von Brandereignissen in den Schweizer KKW zwischen der HSK und den Betreibern geklärt werden. Bis zum nächsten Treffen der Projektgruppe im Herbst 2003 sollen erste Brandereignisse aus der Zeit zwischen 2000 und 2002 in die Datenbank aufgenommen werden.



Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires
Divisione principale della Sicurezza degli Impianti Nucleari
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate

Datum: 04. Februar 2003
Von: Dr.-Ing. Brigitte Faust

Begutachtung zum Projektverlauf 2002 OECD-MCCI

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Das Projekt Melt Coolability and Concrete Interaction (MCCI) hat im Januar 2002 begonnen und ist befristet bis zum Dezember 2005. Beteiligt sind die Schweiz, Belgien, tschechische Republik, Finnland, Frankreich, Deutschland, Ungarn, Japan, Korea, Norwegen, Spanien, Schweden und die USA.

Die am Argonne National Laboratory (ANL) gewonnenen experimentellen Daten sollen die Abkühlmechanismen der Kernschmelze veranschaulichen und bei schweren Unfällen zur Lösung von zwei wichtigen Problemkreisen beitragen: der erste Problemkreis betrifft den Nachweis, dass die geschmolzenen Kernschmelztrümmer am Boden des Containments stabilisiert und mit Wasser abgekühlt werden können. Der zweite behandelt die langfristige Interaktion der geschmolzenen Masse mit der Betonstruktur des Containments: die Kinetik dieser Interaktion bzw. die Erosion und Aushöhlung von Betonbestandteilen wird wiederum hauptsächlich von der übertragenen Wärmemenge bestimmt. Deshalb sind beim Beurteilen der Auswirkungen eines schweren Unfalls beide Phänomene entscheidend.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Bei den beiden Steering Committee Meetings vom 11.-12. März bzw. vom 25. Oktober in Argonne, USA wurden folgende Versuchsergebnisse besprochen (die HSK konnte nicht teilnehmen!):

Small-Scale Water Ingression and Crust Strength Tests

In den Versuchen SWISSC-1 (LCS-Beton) und SWISSC-2 (Siliziumhaltiger Beton) wurde mit einer Kernschmelzmasse von 75 kg und einer Kernschmelztiefe von 0.15 m die Wasserdurchlässigkeit der Sicherheitshülle unter atmosphärischem Druck im Hinblick auf die Kühlmöglichkeit der Bruchstücke getestet. Der Versuch SWISSC-3 zur Erkundung der Wandfestigkeit erfordert wegen dem höheren Druck von 4 bar und der hohen Wärmeentwicklung zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen und Kontrolleinrichtungen. Die Dokumentationsunterlagen hierfür wurden zur Genehmigung eingereicht.

Melt Eruption Separate Effects Tests

MESET untersucht die Ausströmungs- bzw. Ausbruchsvorgänge von Kernschmelze (ca. 400 kg) unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und unterschiedlicher Gasausblasgeschwindigkeit. Dabei wurde definiert, wie Versuchseinrichtung und Hardware beschaffen sein müssen, dass sie sowohl Art und Geschwindigkeit der Wärmeausbreitung als auch die Kühlmöglichkeit von Bruchstücken ausserhalb des Kessels naturgetreu veranschaulichen.

Large Scale Crust Failure Tests

Es wurden erste Rechnungen zur Ermittlung des massgeblichen Versagensmechanismus durchgeführt. Da Daten nur für kleinere Massstäbe vorliegen, wurde ein analytisches Verfahren zur Extrapolation der Simulationsergebnisse auf Originalmassstab entwickelt.

2D Molten Core Concrete Interaction Tests

Für die 2D MCCI Tests wurden Überschlagsrechnungen mit dem Computer Code Modul CORCON des Computerprogramms MELCOR durchgeführt. Dabei wurde nicht nur das langfristige Erosionsverhalten der Reaktorgrube gezeigt. Es wurden Unterschiede der Computercodes erläutert und Ansätze vorgestellt, wie sich Unsicherheiten bei ihrer Anwendung reduzieren lassen.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Die Resultate des Projektes OECD-MCCI sollen zeigen, wie gut die Richtlinien für das Management von schweren Unfällen im Falle eines Notfalls tatsächlich ist und wie wirksam sie ausgeführt werden können. Daraus lassen sich Empfehlungen für Verbesserungen z. B. in bezug auf das Design des Containments in zukünftigen Reaktoren ableiten. Die Schweiz erhält Informationen über Kühlmöglichkeiten von Kernschmelztrümmern im Falle eines schweren Unfalls, über das Eindringen von Wasser in Risse, über den Ausbruch der Kernschmelze und über den instationärer Bruch der Sicherheitshülle. Durch das Projekt kann man testen, wie Parameter realistisch angenommen, Computercodes evaluiert sowie Unsicherheiten zuverlässig abgeschätzt und bewertet werden können.

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Das internationale Programm wird in allen Teilbereichen fortgesetzt. Dies bedingt einen regen Austausch mit an diesem Projekt beteiligten Institutionen. Nicht nur deshalb, sondern auch um ihren gesetzlich geforderten Aufgaben nachkommen zu können, sollte die HSK an den Steering Committee Meetings in Zukunft auf jeden Fall teilnehmen.



Datum: 28. Januar 2003
Von: Dr. Susanne Schulz

Begutachtung zum Projektverlauf 2002 OECD-OPDE

Einleitung, allgemeine Bemerkungen

Das OPDE-Projekt (OECD Piping Failure Data Exchange Project) dient dem Aufbau einer internationalen Datenbank über Rohrleitungsschäden in Kernkraftwerken. Ziel ist, ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Ursachen, der Auswirkung auf den Betrieb und die Sicherheit sowie Erkenntnisse zu möglichen Vorsorgemassnahmen zu gewinnen.

Das Projekt wird von den nationalen Aufsichtsbehörden der teilnehmenden Länder durchgeführt. Neben der Schweiz beteiligen sich die USA, Kanada, Japan, Deutschland, Frankreich, Finnland, Schweden, Spanien Tschechien und Korea. Zu Beginn des Jahres 2002 enthielt die Datenbank bereits über 4000 Datensätze zu Rohrleitungsschäden in Kernkraftwerken. Nach der Verifikation der Daten steht die Datenbank allen beteiligten Organisationen zur Verfügung.

Das zweite Projekttreffen diente dem Zweck, einen Überblick über die unterschiedliche Datenlage bei den beteiligten Organisationen zu erhalten, die aus der unterschiedlichen Art der Berichterstattung in den einzelnen Ländern resultiert.

Wurden die Projektziele des Jahres 2002 erreicht?

Am 18./19. November 2002 fand in Stockholm das 2. National Coordinators Meeting des Projektes. Das Treffen diente dem Zweck, einen Überblick über die unterschiedliche Datenlage bei den beteiligten Organisationen zu erhalten, die aus der unterschiedlichen Art der Berichterstattung in den einzelnen Ländern resultiert. Die OECD-Projektleitung und das Clearinghouse (technische Leitung) informierten über den Stand des Projektes und die Teilnehmer berichteten über ihre ersten Erfahrungen mit der Validierung der Datensätze. Dabei wurden die unterschiedlichen Voraussetzungen der zur Verfügung stehenden Datenquellen (nationale Vorkommnis-Berichterstattung) diskutiert.

Die HSK konnte feststellen, dass die gemäss HSK-R-15 erforderlichen Vorkommnisberichte der Kernkraftwerke bereits den grössten Teil des Datenbedarfs für die OPDE-Datenbank deckt. Zudem treten heute in der Schweiz vergleichsweise wenig Rohrleitungsschäden an sicherheitstechnisch wichtigen Rohrleitungssystemen in Kernkraftwerken auf, so dass sich ein günstiges Verhältnis von Aufwand zu Nutzen bei der Beteiligung an der OPDE-Datenbank ergibt.

Wie schätzen Sie die Bedeutung des Projektes ein?

Der Aufbau dieser Datenbank hat bei den beteiligten Organisationen einen hohen Stellenwert. Zum Teil werden zusätzliche Personalmittel zur Bearbeitung des Projektes bereitgestellt. Teilweise wirken Betreiber-Organisationen bei der Datensammlung direkt mit, teilweise werden Betreiber nur von Fall zu Fall angesprochen, wenn die zur Verfügung stehenden Datenquellen zur Vervollständigung eines Datensatzes nicht ausreichend sind.

Das Projekt befindet sich in einer erfolgversprechenden Anfangsphase. Es wird sowohl im administrativen wie im technischen Bereich kompetent geleitet und hat das Potential, eine wichtige Grundlage für zukünftige Instandhaltungsstrategien an sicherheitsrelevanten Rohrleitungssystemen in Kernkraftwerken zu werden. Das OPDE-Projekt ist somit für die Arbeit der Sektionen MBT und PSA von besonderer Bedeutung.

Da die Ergebnisse aus dem OPDE-Projekt auch Einfluss auf die Beurteilung der Projekte der Risiko-informierten Wiederholungsprüfprogramme (RI-ISI) sowie auf Projekte der Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen an Rohrleitungssystemen haben, betreffen sie auch die Tätigkeitsbereiche des SVTI-Nuklearinspektorates.

Die Teilnehmer der Projektmeetings sind in ihren Organisationen jeweils mit ähnlichen Tätigkeitsfeldern betraut (Strukturelle Integrität, Maschinenteknik, Materialwissenschaften etc.), daher ergibt sich für die HSK die Möglichkeit eines zusätzlicher informellen Erfahrungsaustausches (z. B. mit Vertretern der NRC und GRS).

Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Das weitere Vorgehen in Phase 1 besteht in der weiteren Aufarbeitung der bereits vorhandenen Datensätze seit den 90er Jahren. In Phase 2 ab Mitte 2003 werden auch ältere Datensätze bearbeitet sowie gegebenenfalls neue hinzugefügt.

Der Zeitplan für Phase 1 erscheint etwas zu ehrgeizig, da einige Teilnehmer (Finnland, USA und Frankreich) aufgrund der grossen Anzahl der zu behandelnden Fälle oder aufgrund anderer Prioritätensetzung mit der Bearbeitung im Rückstand sind. Insgesamt läuft die internationale Zusammenarbeit in diesem Projekt aber ausgesprochen gut, so dass kleine Verzögerungen tolerierbar sind.

Der Projektfortschritt und die Protokolle der Projekttreffen werden auf einer Passwort-geschützten Web-Site der OECD-NEA dokumentiert. Die nationalen Koordinatoren sind berechtigt, auf diese Informationen zuzugreifen und diese im Rahmen des Agreements in ihren Ländern zu verwenden.