

**Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
(MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut, (FMPA))**

Direktion:

Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht, Geschäftsführender Direktor
Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Maile, komm. Leiter, kaufm. Direktor
Dr. rer. nat. Gerhard Volland, Vertretungsweise stellv. wiss. Direktor

Pfaffenwaldring 32
70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685-63059

Fax: 0711 / 685-63046

Internet: <http://www.mpa.uni-stuttgart.de>

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Vorwort	4
2 MPA im Überblick	6
3 Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Roos	10
4 Neubesetzung Position des wissenschaftlichen Direktors	11
5 Neue Geräte, Einrichtungen und Prüfmöglichkeiten	12
6 Forschungsprojekte 2011	23
7 Ausgewählte Forschungsergebnisse	39
8 Forschungs Kooperationen	92
9 Auszeichnungen	93
10 Veranstaltungen und Veröffentlichungen	95
10.1 Veranstaltungen und Lehrgänge	95
10.2 Veröffentlichungen	99
11 Organigramm und Daten	104

1 Vorwort

Der vorliegende Jahresbericht der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart informiert über

- die Ausrichtung der MPA in der Zukunft
- strukturelle Vorgänge und Änderungen im Institut
- Arbeits- und Forschungsschwerpunkte anhand von ausgewählten Beispielen
- Kooperationen, Veranstaltungen und Veröffentlichungen.

Die Auswirkungen der Ereignisse um Fukushima haben sich nicht nur in der Gesellschaft und Wirtschaft niedergeschlagen, sondern auch in der Forschungslandschaft. Im Zeichen der Energiewende stehen Begriffe wie Effizienz und Nachhaltigkeit im Vordergrund. Diesen gesamtgesellschaftlichen Forderungen hat sich die MPA Universität Stuttgart im zurückliegenden Jahr gestellt.

Die Darstellungen der Arbeits- und Forschungsschwerpunkte im vorliegenden Jahresbericht zeigen, dass das Portfolio der MPA einen weiten Bogen über unterschiedliche Bereiche spannt:

- grundlagenorientierte Materialforschung und Bauteilentwicklung,
- Prüfung und Zertifizierung von Komponenten und Bauteilen,
- Schadensanalyse und -prävention durch die Anwendung angepasster
- zerstörungsfreier Methoden zur Charakterisierung des Zustands von Werkstoff und Konstruktion und Gebäuden
- Berechnungsverfahren zur Modellierung komplexer Strukturen mit skalenübergreifenden Beschreibungs- und Simulationstechniken.

Dieses breite Kompetenzfeld kann als ein MPA-spezifisches Alleinstellungsmerkmal angesehen werden und stellt für die notwendigen Anpassungen an die Zukunft eine hervorragende Ausgangsposition dar.

Folgerichtig werden in der Entwicklungsplanung 2013 – 2017 Vertiefungen in den Bereichen

- Ressourceneffizienz
- Ökosystem-Qualität

- Werkstoffverbünde und Werkstoffsysteme (Leichtbau)
- Gewährleistung von Zuverlässigkeit und Integrität
- Skalenübergreifende Simulationstechniken im Zusammenhang mit der mechanismenbasierten Beschreibung der Schädigung
- Innovative zerstörungsfreie Prüfmethode
- energieoptimiertes Bauen bzw. energetische Altbausanierung
- Bauen mit Holz als nachwachsender Rohstoff

gesetzt werden.

Das Jahr 2011 war ein Jahr des Übergangs und der Veränderungen. Der geschäftsführende Direktor der MPA Universität Stuttgart ist am 1. Oktober 2011 in Ruhestand getreten. Herr Prof. Roos wurde 1996 zum Direktor der damaligen Staatlichen Materialprüfungsanstalt (MPA Stuttgart) berufen. Nach der Zusammenlegung mit dem Otto-Graf-Institut (OGI, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt FMFA) im Jahr 2003 bis zu seinem Eintritt in den Ruhestand war er geschäftsführender Direktor. Bis zur Berufung von Herrn Prof. Garrecht im Frühjahr 2012 als neuer geschäftsführender Direktor wurde die MPA Universität Stuttgart von einem Direktorium bestehend aus: Frau Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann (komm. Wiss. Direktorin) und Herrn Dr. G. Volland (stellvertr. wiss. Direktor) für den Bereich Bauwesen im Maschinenbau (Otto-Graf-Institut) sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K. Maile (komm. Leiter) für den Bereich Maschinenbau (MPA Stuttgart) geleitet.

Die Abteilung Geotechnik wurde zum 01. 04. 2011 verwaltungstechnisch aus der MPA ausgegliedert und in die Verantwortung des Instituts für Geotechnik überführt.

Das Arbeitsfeld der zerstörungsfreien Prüfmethode (ZfP) in der MPA, dessen Bedeutung in allen Prüffeldern ständig zunimmt, wurde zur Optimierung der apparativen und personellen Ressourcen in zwei neuen Abteilungen, „ZfP und Bauwerksmonitoring“ und „ZfP im Anlagen- und Maschinenbau“

in einem neuen Fachbereich gebündelt. Diese organisatorische Maßnahme erlaubt eine, an den besonderen Kundenanforderungen aus dem Maschinenbau und dem Bauwesen orientierte, Bearbeitung von Industrieaufträgen sowie die Identifikation spezifischer Forschungsfelder. In diesem Rahmen wird die Verknüpfung einer Professur für „Zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung“ mit der Stelle des Fachbereichsleiters in der MPA angestrebt.

Der Transfer und Austausch neuester Forschungsergebnisse der MPA wurde auch im vergangenen Jahr über Kolloquien, Workshops und Fortbildungsveranstaltungen fortgesetzt.

Die gute Kooperation mit der Industrie und öffentlichen Institutionen konnte weiter ausgebaut werden: Im vergangenen Jahr konnte die MPA ihre Umsätze im Bereich öffentlich geförderter Forschungsprojekte weiter steigern. Ebenso zeigt die Steigerung im Bereich der direkten Industriekooperation, dass die MPA ein attraktiver und kompetenter Partner ist.

Wir möchten uns bei allen Partnern aus Industrie, Forschung und öffentlichen Institutionen für das uns entgegengebrachte Vertrauen und die gute Kooperation bedanken und freuen uns auf eine weiterhin gute Zusammenarbeit.



Kommissarischer Leiter



Vertretungsweise wiss. Direktorin

2 MPA im Überblick

Einrichtung und Aufgabe

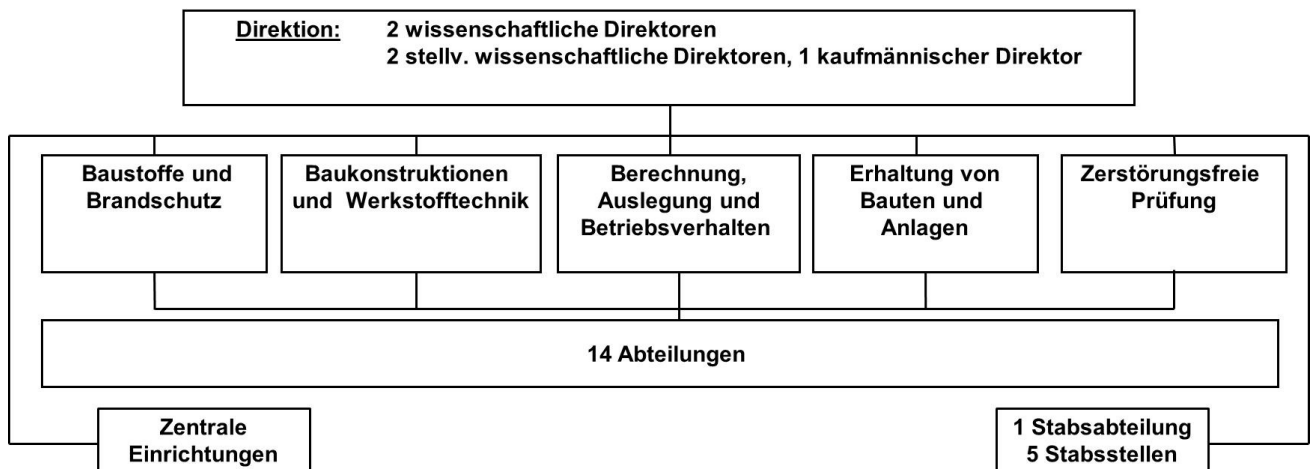
Die Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), entstanden aus der Fusion der „Staatlichen Materialprüfungsanstalt - Universität Stuttgart“ und der „Forschungs- und Materialprüfungsanstalt (FMPA – Otto-Graf-Institut)“ ist interdisziplinär an der Schnittstelle der beiden ingenieurwissenschaftlichen Fakultäten (Fakultät 4: Energie-, Verfahrens- und Biotechnik und Fakultät 2: Bau- und Umweltingenieurwissenschaften) der Universität Stuttgart tätig. Durch diese fakultätsübergreifende Stellung als Zentralinstitut werden Synergieeffekte bei materialwissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten realisiert.

Die Zusammenarbeit von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern an der MPA erlaubt einen fachübergreifenden Blick auf neue Aspekte der Materialforschung und ist Grundlage für eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie. Dadurch konnten in den letzten Jahren die Voraussetzungen für die Entwicklung neuer Arbeitsfelder in den Bereichen der Optimierung von Verfahren zur Energieerzeugung und -wandlung, erneuerbarer Energien, ressourcenschonender und nachwachsender Werkstoffe des energieoptimierten Bauens sowie bei der innovati-

ven Weiterentwicklung von Konstruktionselementen und Materialverbindungen geschaffen werden. Im Fokus des Aufgabenbereichs liegt die Beschäftigung mit allen relevanten Werkstoffen und den daraus gefertigten Bauteilen des Maschinen- und Anlagenbaus sowie des Bauwesens. Basierend auf einer hohen Kompetenz im Bereich der grundlegenden Charakterisierung von Werkstoffen bzw. Baustoffen sowie der Prüfung und Zertifizierung von Komponenten und Bauteilen werden bei der MPA umfangreiche Arbeiten zur anwendungs- und grundlagenorientierten Materialforschung und Bauteilentwicklung durchgeführt. Neben der Schaffung von Grundlagen für die bauaufsichtliche Zulassung neuer Werkstoffe und Bauarten ist die Überwachung von Herstellung und Verarbeitung ein wesentlicher Aspekt der Qualitätssicherung bei unseren Kunden und eröffnet die Möglichkeit für einen Technologietransfer insbesondere mit innovativen klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU).

Struktur und Organisation

Die MPA ist in Fachbereiche und Abteilungen gegliedert. Sie sind Organisationseinheiten für ein sachlich abgegrenztes Aufgabengebiet. Zudem werden fachübergreifende Projektgruppen eingesetzt.



Die MPA wird in ihrer Tätigkeit durch einen wissenschaftlichen Beirat beraten und unterstützt. Der Beirat wird gebildet aus fünf Professoren und Professorinnen der Universität Stuttgart, die dem Nutzerkreis der MPA angehören, und sechs hochrangigen Personen aus Industrie und Verwaltung, die auch wichtige Kunden vertreten. Die MPA wird von einem Direktorium geleitet. Die wissenschaftlichen Direktoren sind in Personalunion Leiter der Fakultäten für „Bau- und Umweltingenieurwissenschaften“ bzw. „Energie-, Verfahrens- und Biotechnik“ zugeordneten Institute „Werkstoffe im Bauwesen“ und „Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre“. Die MPA verfügt über ein Qualitätsmanagementsystem nach DIN EN ISO 17025 und wird ein System zum Betrieb von Zertifizierungsstellen von Bauprodukten nach DIN EN ISO 17065 einführen.

Einbindung in die Universität Stuttgart

Die MPA ist ein Zentralinstitut der Universität und führt im Auftrag auch experimentelle Arbeiten für andere Institute der Universität durch. Traditionell werden die Einrichtungen des Otto-Graf-Instituts in der MPA von den konstruktiven Lehrstühlen der Fakultät 2 für experimentelle Forschungsarbeiten genutzt. Das IMWF (Fakultät 4) greift vollständig auf die Prüfgeräte und Personalressourcen der MPA zurück. Die MPA verfügt in weiten Teilen über modernste Prüfeinrichtungen und setzt Berechnungs- und Simulationsmethoden in Verbindung mit Großrechenanlagen ein. Die vorhandenen personellen und gerätetechnischen Ressourcen der MPA machen die Universität Stuttgart interessant für Sonderforschungsbereiche und Verbundprojekte mit anderen Hochschulen.

Insbesondere die Fakultäten für „Energie-, Verfahrens- und Biotechnik“ und „Bau- und Umweltingenieurwissenschaften“ können diese technischen Einrichtungen auch für experimentelle Forschung sowie Ausbildung von Studenten nutzen. Leitende Mitarbeiter der MPA sind Mitglieder des Lehrkörpers der Fakultäten. Damit wird der Erfahrungstransfer aus den Forschungs- und Entwicklungspro-

jekten in die Lehre gewährleistet. Über die Durchführung von Studienarbeiten bzw. Master-/Diplomarbeiten wird ein Bezug zur Praxis ermöglicht.

Entwicklungsplanung 2013 - 2017

Die Analyse von Auswirkungen und Risiken von neuen Technologien, Produkten bzw. Werkstoffen bekommt vor dem Hintergrund der **Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz** eine immer größere Bedeutung. Die Akzeptanz von Technologien, Produkten bzw. Werkstoffen kann nicht mehr ausschließlich an den technischen Eigenschaften beurteilt werden, sondern muss im Sinne einer „Ökosystem-Qualität“ bewertet werden. Im Rahmen des **Life Cycle Assessment (LCA)** wird die gesamte Produktgeschichte erfasst. Das Kompetenzspektrum der MPA mit den Tätigkeiten der produktorientierten Werkstoffentwicklung/-qualifizierung, der Produktzulassung und Herstellungsüberwachung, der Qualitätssicherung und Lebensdauerüberwachung stellt die Basis für eine Ausweitung auf den Bereich LCA dar. Basierend auf den einschlägigen ISO Standards werden neue Methoden des LCA mit methodischen ingenieur- und naturwissenschaftlichen Ansätzen entwickelt. Mit diesen geplanten Arbeiten werden einzelne Produkte/Werkstoffe/Werkstoffsysteme sowie Technologien (Herstellungsprozesse) ganzheitlich bilanziert, sodass eine vergleichende Darstellung der Ökobilanz bzw. von Ökoindikatoren von Produkten mit ähnlicher technischer Verwendung/Einsatz möglich wird.

Neue Werkstoffe sind der Schlüssel zur Gewährleistung und Optimierung von Mobilität und Energieerzeugung unter Berücksichtigung der Forderungen nach Reduzierung des Ressourceneinsatzes und des Schadstoffausstoßes. Sie sind Voraussetzung zur Entwicklung und Verbesserung von Technologien oder Anlagen. Die Kompetenz der MPA in der Charakterisierung und Optimierung von Werkstoffen und Werkstoffsystemen wie z.B. Fügeverbindungen, Beschichtungen, gradierten und faser-

verstärkten Werkstoffsystemen, der numerischen Beschreibung der Eigenschaften von Werkstoffen, **Werkstoffverbänden und Werkstoffsystemen** und der Berechnung von Bauteilen ist durch langjährige Verbundprojekte mit Instituten und der Industrie gesichert. Schwerpunkte der zukünftigen Arbeit sind: Charakterisierung, Qualifizierung und Optimierung von **Leichtbauwerkstoffen**, Weiterentwicklung von Verbindungstechnologien und Technologien zur Herstellung von Werkstoffverbänden, Einsatz und Weiterentwicklung genauerer Charakterisierungsverfahren zur Beschreibung der Werkstoffstruktur mit fortgeschrittenen elektronenmikroskopischen Verfahren, der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften mit fortgeschrittenen zerstörenden Prüfverfahren und der Gewährleistung von **Zuverlässigkeit und Integrität** mit hochauflösenden oder angepassten zerstörungsfreien Prüfverfahren. Die Anwendungsbereiche reichen dabei vom Automobil- und Flugzeugbau über die Verfahrenstechnik bis hin zur ressourcenschonenden Energieerzeugung mit konventionellen Techniken durch Verbesserung der Effizienz im Bau fossiler Dampf- und Gasturbinenkraftwerke, „Combined Cycle“- Anlagen und dem Einsatz erneuerbarer Energien in Windkraft- und thermischen Solaranlagen.

Zerstörungsfreie Methoden zur Charakterisierung des Zustands von Werkstoff und Konstruktion sind in der modernen Werkstoff- und Bauteilprüfung unabdingbar. Die wesentlichen Ziele sind dabei einerseits die Neu- und Weiterentwicklung der Werkstoffe zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften und andererseits die zuverlässige Quantifizierung der Sicherheit von Komponenten und Anlagen in den verschiedenen Anwendungsbereichen zur Erhöhung der Verfügbarkeit und als Grundlage der Schadensfrüherkennung und für zustandsorientierte Instandhaltungsmaßnahmen. Dem soll die neu geschaffene Stelle "Zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung" in der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik bzw. der Fakultät Bau-

und Umweltwissenschaften in Lehre und Forschung Rechnung tragen.

Erhöhte Anforderungen an Gesundheit und Nachhaltigkeit an Bauprodukte und Bauwerke haben, basierend auf den Kernkompetenzen der MPA - Bereich Bauwesen (OGI), zur Entwicklung strategischer Forschungsschwerpunkte in den Bereichen **energieoptimiertes Bauen** sowie Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen (Holzbau) geführt. Im Zeitraum bis 2017 liegen in diesen Arbeitsgebieten eine Reihe genehmigter nationaler und internationaler Forschungsvorhaben vor. Die Einhaltung der nationalen Klimaziele ist wesentlich mit der **energetischen Altbausanierung** verknüpft. Die MPA befasst sich mit der Entwicklung dauerhafter und nutzungssicherer Wärmedämmverbundsysteme auf Basis nachwachsender Rohstoffe und Dämmstoffen mit „embodied energy“ ebenso wie mit der Entwicklung von Kriterien für das objektive und subjektive Wohlbefinden der Nutzer in sanierten Altbauten. Die grundlegenden Arbeiten dazu werden in Zusammenarbeit mit Instituten der Universität Stuttgart und mehreren europäischen Partnern durchgeführt und der „**Know-How-Transfer**“ in Zusammenarbeit mit dem „European Institute of Technology“ (EIT) sichergestellt. Erkenntnisse aus diesem Schwerpunkt werden zudem in den Bereich Denkmalschutz überführt. Parallel werden Verfahren zur Sanierung historischer Bausubstanz unter schwierigen, dauerfeuchten Bedingungen entwickelt. Im Bereich „erneuerbare Energien“ ist das strategische Ziel die Untersuchung der grundlegenden **Korrosionsmechanismen** in heißen Salzschmelzen als Wärmespeichermedium bei einer Temperaturobergrenze von > 600 °C.

Im Forschungsschwerpunkt „**Bauen mit Holz als nachwachsender Rohstoff**“ ist die Entwicklung neuer **innovativer Brettsperrholz- und Brett-schichtholzprodukte** zu Weiterentwicklungen im Ingenieurholzbau erforderlich. Hierzu ist der Einfluss struktureller und chemischer Verklebungs- und Oberflächenparameter auf die Festigkeit und Beständigkeit von Holzverklebungen ebenso wie

die Optimierung der Rohstoffausbeute, der Tragfähigkeit und Steifigkeit, des Brandverhaltens und der bauphysikalischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Dies beinhaltet Untersuchungen zum Zeitstand- und Ermüdungsverhalten von Holzverklebungen und zu Verklebungen bislang nicht eingesetzter Holzarten wie Laubhölzer ebenso wie Untersuchungen zu ausgewählten Bemessungsproblemen des Holzbaus und zur Entwicklung spezieller Anwendungs- und Bemessungsvorschriften. Für Anwendungen im Bereich Fassaden auch mit Glas und Keramik werden die Kompetenzen bezüglich mechanische Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Brandschutz gebündelt.

Innovative Technologien erfordern bessere und genauere Werkzeuge zur Berechnung und Voraussage von Eigenschaften der Werkstoffe und Werkstoffverbunden und der daraus hergestellten Bauteile zur Gewährleistung von Haltbarkeit und Integrität sowie zur Ermittlung der Lebensdauer. Neue Möglichkeiten der Modellierung komplexer Strukturen und des Einsatzes **skalenübergreifender Beschreibungs- und Simulationstechniken** werden entwickelt und angewendet. Ausgangsbasis stellt die erworbene Kompetenz in der Anwendung strukturmechanischer Berechnungsverfahren für

komplexe Bauteile, auch unter Verwendung komplexer inelastischer Werkstoffmodelle dar. Schwerpunkt ist Entwicklung und Anwendung skalenübergreifender Berechnungswerkzeuge einschließlich Nutzung problemangepasster Berechnungswerkzeuge unterschiedlicher Komplexität für die Charakterisierung, Qualifizierung und Optimierung von Bauteilen, die strukturmechanische Berechnung und Optimierung im Design-Prozess sowie die Berechnung von Lebensdauer und Bauteilschädigung mit genauer Abbildung verschiedener Beanspruchungen und Belastungsverläufe unter Verwendung einer **mechanismenbasierten Beschreibung der Schädigung** bis hin zur vollständigen Simulation der Lebensdauer von Bauteilen.

Der MPA sind damit wesentliche Schritte zu einem Zentrum für anwendungsorientierte Materialforschung und materialgerechte Bauteilentwicklung gelungen. Als zentrale Universitätseinrichtung verfolgt die MPA das Ziel, die vorhandenen Ressourcen zu bündeln und die Effizienz und Effektivität auf dem Gebiet der Materialprüfung und -forschung durch Nutzung von Synergien zu steigern.

3 Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Eberhard Roos

Im Rahmen des MPA Seminars fand am 6. Oktober 2011 die Abschiedsvorlesung von Prof. Roos statt, der nach 16 Jahren als Geschäftsführender Direktor der MPA Universität Stuttgart zum 1. Oktober in den Ruhestand getreten ist.

In seiner Abschiedsvorlesung hob er nochmals die Kernkompetenz der MPA als anwendungsorientiertes, werkstofftechnisches Forschungsinstitut hervor. Dabei ist das zentrale Arbeitsfeld die werkstofforientierte Integritätsanalyse von Komponenten

und Systemen, ein für die Nachhaltigkeit aber auch Wirtschaftlichkeit entscheidender Faktor. Dies wurde von ihm mit zahlreichen Beispielen untermauert.

Vom Präsidenten der German University in Cairo (GUC), Herrn Prof. Mahmoud Abdelkader, wurde ihm in Anerkennung für die fruchtbare und konstruktive Kooperation eine Silberschale mit persönlicher Widmung überreicht.



Abb. 1: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Roos

4 Neubesetzung der Position des wissenschaftlichen Direktors



Herr Prof. Dr. Ing. Harald Garrecht, vormals Leiter des Fachgebietes Werkstoffe im Bauwesen des Instituts für Massivbau der TU Darmstadt, hat den Ruf an die Universität Stuttgart angenommen. Er leitet seit dem Sommersemester 2012 den Lehrstuhl Werkstoffe im Bauwesen und das Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB). Gleichzeitig wurde er zum geschäftsführenden Direktor der MPA Universität Stuttgart bestellt.

Herr Prof. Garrecht hat in den Jahren 1985 bis 1992 an der Universität Karlsruhe Bauingenieurwesen studiert und war nach seiner Promotion bis 1999 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau und u.a. im Sonderforschungsbereich „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“ tätig. 1999 wurde er zum Professor für Baustoffkunde, Bauphysik und Baukonstruktion an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft (HsKA) berufen. Im Rahmen seiner Tätigkeiten war er zudem Wissenschaftlicher Leiter des IAF - Institut für Angewandte Forschung der HsKA und Wissenschaftlicher Leiter der Öffentlichen Baustoffprüfstelle der HsKA. In den Jahren 2005 bis 2006 war Herr Prof. Garrecht zudem Prorektor der HsKA. Zum Wintersemester 2006 wurde er als Professor

für Werkstoffe im Bauwesen am Institut für Massivbau im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der TU Darmstadt berufen.

Im Rahmen seiner Forschungstätigkeit hat sich Herr Prof. Garrecht mit einer Vielzahl von Themen der Betontechnologie wie Beton für außergewöhnliche Beanspruchungen, faserbewehrter Beton, hochfester und ultrahochfester Beton, selbstverdichtender Beton, Leichtbeton und selbstverdichtender Leichtbeton und Prognosemodellen zur Dauerhaftigkeit von Beton befasst. Sein besonderes wissenschaftliches Interesse gilt den rheologischen Eigenschaften von Frischbeton und der Optimierung von Frisch- und Festbetoneigenschaften. Dazu gehört das Themenfeld Stoffgesetze mit den Aspekten Bruchverhalten heterogener Werkstoffe, Rissbildung in jungem und thermisch beanspruchtem Beton, sowie Kriechen und Schwinden bzw. Ermüdung von Beton.

In seinem zweiten Schwerpunkt der Bauwerkserhaltung bzw. des Lifecycle-Managements stehen Lebensdauerprognosen und Maßnahmen zum Bautenschutz ebenso wie Restaurierung von historischem Mauerwerk in Verbindung mit bauphysikalischen Aspekten einschließlich der Entwicklung energetischer Sanierungskonzepte im Fokus.

Neben diesen Schwerpunktthemen hat sich Herr Prof. Garrecht mit einer Vielzahl von Einzelfragen der Werkstoffe und Werkstoffverbünde beschäftigt.

5 Neue Geräte, Einrichtungen und Prüfmöglichkeiten

Abteilung Holzkonstruktionen

Fluoreszenzlampe, Durchlicht- und Auflichteinheit sowie Digitalkamera für das Stereomikroskop

Mit der Modernisierung des vorhandenen Stereo-Mikroskops mittels einer neuen, softwaregesteuerten Digitalkamera und LED-Auf- und Durchlichteinheiten können hochwertige quantitativ auswertbare Bilder an Holz-Mikrotomschnitten gemacht werden.

Die mikroskopische Charakterisierung von Holz-Klebstofffugen, insbesondere zur digitalen Analyse / Quantifizierung mittels Hell-Dunkel-Pixelzählung und Flächenintegrationen der mikroskopischen

Aufnahmen erfordert einen sehr guten Kontrast zwischen Klebstoff und Holz. Um dies zu erreichen, wird der Klebstoff vor der Verklebung mit einem Fluoreszenzmarker versetzt und bei den mikroskopischen Aufnahmen mit einer leistungsstarken Fluoreszenzlampe sichtbar gemacht, vergleiche Abb. 1.

Die Fluoreszenzlampe wurde aus den Mitteln der AiF beschafft.

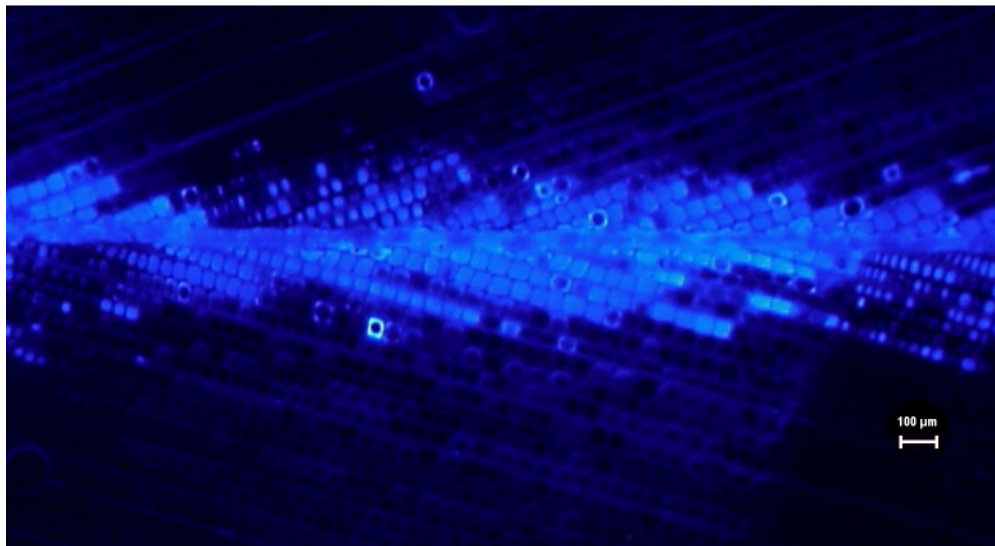


Abb. 1: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme einer Holz-Klebefuge zur Bestimmung des Eindringverhaltens von Klebstoffen

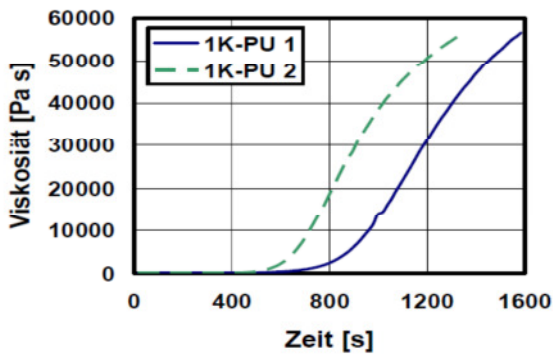
Plattenrheometer

Das Ende 2011 bestellte Plattenrheometer (Abb. 2) ermöglicht durch die Verwendung von Messplatten aus Holz die realitätsnahe Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Viskosität eines Holzklebstoffs bei der Verklebung. Durch die eingebaute Normkraftregelung und -messung kann der Einfluss verschiedener Pressdrücke auf die Viskositätseigenschaften ermittelt werden. Die Normkraftaufzeichnung während der Viskositätsmessung bietet zusätzlich die Möglichkeit, den bei der Polyadditionsreaktion von 1K-PUR-Klebstoffen entstehenden CO₂-Gasdruck sowie Schwindspannungen, die typischerweise zum Ende von Klebstoffaushärtereaktionen entstehen, zu messen. In den nachstehenden Abbildungen 3 a, b sind die Versuchsergebnisse an zwei unterschiedlich reaktiven feuchtehärtenden Einkomponenten-Klebstoffen dargestellt. Bild 2a veranschaulicht die Viskositätsverläufe der beiden Klebstoffe über der Zeit, die eindeutig die unterschiedlichen Reaktivitäten widerspiegeln. In Bild 3b

sind die zeitgleich gemessenen zeitabhängigen Normkraftverläufe dargestellt.

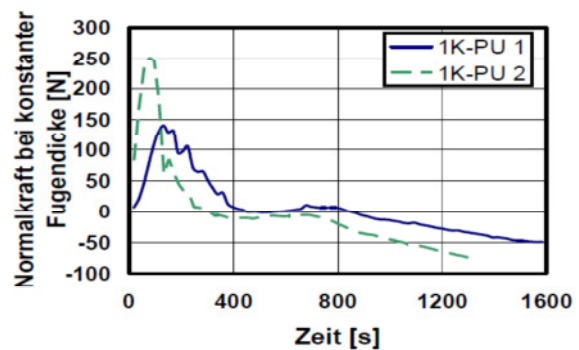


Abb.:2: Ansicht des Plattenrheometers mit eingebauten Holzplatten



(a)

Abb. 3a: Zeitabhängigkeit der Viskosität von zwei typischen Einkomponenten-Polyurethanklebstoffen.



(b)

Abb. 3b: Zeitabhängigkeit der Normkräfte von zwei typischen Einkomponenten-Polyurethanklebstoffen.

Mobiles Rauigkeitsmessgerät MarSurf M 400

Das im Jahr 2011 beschaffte mobile Rauigkeitsmessgerät MarSurf M400 besteht aus zwei Komponenten – Steuergerät und Vorschubgerät – die wahlweise schnurlos über Bluetooth oder über ein

USB-Kabel miteinander verbunden werden. Das Vorschubgerät verfügt über eine eigene Bezugsebene, die eine Trennung der gemessenen Daten in Rauigkeiten und Welligkeiten ermöglicht. Das

Steuergerät kann als stand-alone Gerät verwendet werden und die üblichen Rauigkeitskenngrößen zurückgeben und die gemessenen Profile auf Thermopapier ausdrucken. Die ermittelten Rauigkeitsprofile können zudem abgespeichert und

später auf einen Rechner exportiert werden, um mittels mitgelieferter Software weiterbearbeitet und archiviert zu werden. Mittels des mitgelieferten Messständers kann ein quasi-stationärer Messplatz eingerichtet werden.



Abb. 4: Mobiles Rauigkeitsmessgerät MARSurf M 400

Abteilung Werkstoffverhalten

Bauteilversuche zur Simulation bewegter Radlasten

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens zum Ermüdungsverhalten von Stahlkonstruktionen unter multiaxialer Beanspruchung durch Radlasten soll ein Bemessungsvorschlag für die Bewertung der Materialermüdung unter Radlasten, wie sie im Kranbau, Hochbau, Brückenbau etc. auftreten, entwickelt werden. Der sich unter einer bewegten Radlast einstellende multiaxiale Spannungszustand aus Längs-, Quer- und Schubspannungen kann realitätsnah nur in Bauteilversuchen untersucht werden. Dazu werden Überrollversuche an Walzträgern mit aufgeschweißter Flachstahlschiene durchgeführt. In diesen Versuchen wird der Versuchsträger durch eine wandernde Radlast von maximal 400 kN beansprucht, die über einen vertikalen Hydraulikzylinder aufgebracht und über einen Radblock einge-

leitet wird, Abb.4. Der Prüfträger wird durch einen zweiten, horizontalen Prüfzylinder entlang seiner Längsachse um einen Weg von ± 300 mm aus der Trägermitte verschoben, während der Radblock ortsfest positioniert ist. Der dazu eingerichtete Versuchsstand ist in Abb.6 dargestellt.

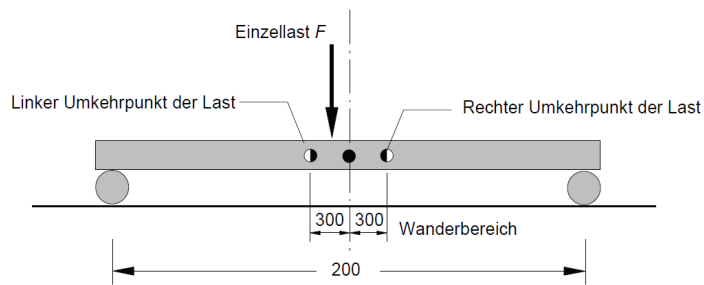


Abb. 5: Versuchskonzept



Abb.6: Überrollprüfstand

Zeitstandprüfanlagen

Dem erhöhten Bedarf an zuverlässigen Daten zum langzeitigen Verhalten von Werkstoffen bei erhöhten Temperaturen wurde mit einer weiteren Reihe von Zeitstandprüfanlagen Rechnung getragen. Die in Zusammenarbeit mit einem Hersteller von Prüfsystemen entwickelten Prüfrahmen erlauben einen einfachen Austausch von Prüfsträngen, die bis zu 5 Zeitstandproben umfassen können. Damit stehen 50 neue Prüfplätze zur Verfügung. Die zugehörigen Widerstandsöfen werden einzeln geregelt und sind in die automatische Temperaturüberwachung des Zeitstandlabors integriert.

Für Einzelprüfmaschinen für Zeitstandversuche wurde ein neues System zur laufenden Dehnungsmessung entwickelt und in Zusammenarbeit mit dem Hersteller optimiert. Ein Prototyp wurde ausführlich erprobt und entsprechende Verbesserungsvorschläge erarbeitet. Das System erlaubt eine digitale Erfassung der gemessenen Dehnung und erleichtert damit die Entwicklung von Stoffgesetzen für bewährte und neue Werkstoffe, die in zunehmendem Maße für die Werkstoffcharakterisierung und numerische Auslegungsmethoden benötigt werden.



Abb.7: Neue Zeitstandprüfsysteme und Messeinrichtung zur laufenden Dehnungsmessung

Membranwandprüfstand und universelle servohydraulische Großprüfeinrichtungen

In der Abteilung Werkstoffverhalten stehen eine Reihe von großen servohydraulischen Prüfeinrichtungen mit Belastungskapazitäten zwischen 500 kN und 5 MN zur Verfügung, die im Jahr 2011 mit neuen Regeleinrichtungen ausgerüstet wurden. In diesen Prüfeinrichtungen können Kriech- und Kriechermüdungsversuche sowie Bauteilversuche bei Temperaturen bis 800°C durchgeführt werden. So ist es beispielsweise möglich, komplexere Bauteile wie Turbinenschaufeln auch von Mittel- und Niederdruckturbinen und andere Bauteile unter realistischen Belastungsbedingungen zu prüfen. Eine dieser Prüfmaschinen beherbergt auch den im Forschungsvorhaben MARCKO700 für langzeitige

Versuche an Membranwandausschnitten unter Dampfbedingungen konzipierten Prüfstand. Dort wurde eine spezielle Wasseraufbereitungsanlage angeschlossen, die Versuche unter Dampfbedingungen bei Innendrücken bis 300 bar erlaubt. Diese Anlage wurde ergänzt durch eine spezielle Wasserkonditionierung mit Einstellung des Sauerstoffgehalts und pH-Wertes. Diese Anlage erlaubte beispielsweise Versuche an Membranwänden zur Ermittlung der Sensitivität von Membranwandwerkstoffen auf Rissbildungen durch spannungs- bzw. dehnungsinduzierte Risskorrosion.

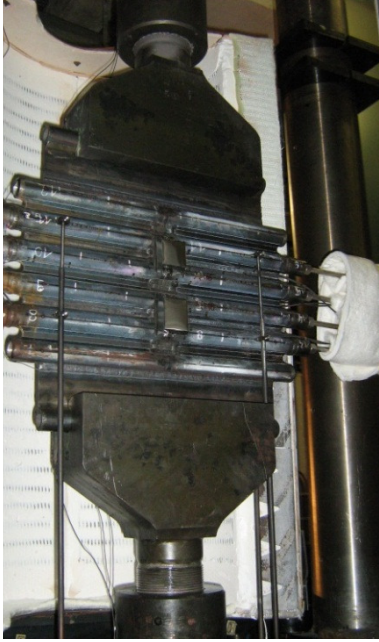


Abb.8: Servohydraulische Großprüfeinrichtung, Membranwandprüfung unter Innendruck und Zusatzbelastung

Lokale Dehnungsmessung bei hohen Temperaturen

Bei Dehnungen bei hohen Temperaturen in Prüfeinrichtungen und in Anlagen eignen sich fast ausschließlich kapazitive Hochtemperaturdehnungsaufnehmer. In diesen wird im Prinzip die Abstandsänderung zwischen den Platten eines Kondensators für die Messung von kleinen Längenänderungen genutzt. Robuste Ausführungen dieser Aufnehmer sind auch für den Einsatz zum Beispiel an Rohrleitungen oder Armaturen in Kraftwerksanlagen geeignet. Die Herausforderung dieser Messeinrichtungen ist die zuverlässige Messung von sehr kleinen Kapazitätsänderungen. In Zusammenarbeit mit der Fa. Genotec, einem Hersteller von Regelungs- und Messtechnik, wurde dieser Herausforderung durch Entwicklung eines

präzisen digitalen Messverstärkers für diese Messaufgabe begegnet. Die Messtechnik wird nun nicht nur bei nahezu allen Prüfeinrichtungen für Bauteile und bauteilähnliche Proben sondern auch auf den im Großkraftwerk Mannheim (GKM) eingesetzten Kesselrohrabschnitten eingesetzt. Diese Messtechnik wird auch in der neu geplanten Teststrecke für dickwandige Rohrleitungen eingesetzt.



Abb. 9: Kapazitiver Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmer zur Messung der Rissöffnungsverschiebung an großen Bruchmechanikproben

Abteilung Beanspruchungsanalysen

Eigen Spannungsmesstechnik



Abb. 10: Erodieranlage

In 2011 wurde eine neue leistungsfähigere Erodieranlage mit effektiverer Steuerung für die Eigen spannungsanalyse nach der Ring-Kern-Methode beschafft. Mit dieser Einrichtung wird die Prüfkapazität erhöht und eine schnellere und kosteneffizientere Durchführung ermöglicht.

Die Vorrichtung für Eigen spannungsanalysen nach der Bohrloch-Methode wurde um die integrierte und automatisierte Erfassung und Registrierung der Bohrlochtiefe erweitert. Auf diese Weise wird eine schnellere, vollständige und automatisierte

Datenerfassung gewährleistet, Übertragungsfehler bei der Übertragung von Hand sind ausgeschlossen.

Dynamische Erfassung von Messsignalen wie Dehnungen, Beschleunigungen, Verschiebungen u.a.m. In 2011 wurde ein Esam Traveller CF Datenerfassungssystem mit 24 Kanälen in 16 bit Architektur (Signalbandbreite bis 25 kHz, interner Speicher 2 GB) beschafft u. a. für Schwingungsanalysen an Komponenten des Anlagenbaus (Kraftwerkstechnik (Rohrleitungen, Armaturen, Halterungen), Windenergieanlagen usw.) und anderen dynamisch beanspruchten Bauelementen. Für die Erfassung von Dehnungen bei extremen Beanspruchungsgeschwindigkeiten wurde, weil auf dem Markt kein geeignetes Messsystem angeboten wird, ein DMS-Verstärker (DMS: Dehnungsmessstreifen) mit 2 X 8 Kanälen in Eigenbau konzipiert, erstellt und erprobt. Der Frequenzbereich ist nach rückgeführter Kalibrierung 0 bis 350 kHz (-1dB) bzw. 450 kHz (-3dB), d. h. Es können bis zu 450.000 Messwerte pro Sekunde mit hinreichender Messgenauigkeit registriert werden. Diese Messeinrichtung wird zunächst im Rahmen eines Forschungsvorhabens eingesetzt, das sich mit der Untersuchung von Radiolysegasdetonationen befasst.



Abb. 11: ESAM Traveller CF Datenerfassungssystem

Esam Traveller StrainMaster SGIT

DMS-Installationstester mit integrierter Dehnungsmessbrücke

Es können bei der Installation von DMS die Ergebnisse erforderlicher Überprüfungen (Isolationswiderstand, DMS-Widerstand und Abweichung) direkt in einen Messrechner eingelesen werden und automatisch in Installationsprotokolle der MPA Stuttgart oder des jeweiligen Auftraggebers eingefügt werden. Damit entfallen handschriftliche Protokolle und zeitaufwändige Übertragungen in Rechner-Protokolle.

Abteilung ZfP und Bauwerksmonitoring

Ultraschallmesseinrichtung zur zerstörungsfreien Untersuchung von Werkstoffen während der Erhärtung (Beton, Mörtel, Kunststoffe)

Bedarf an modernen Prüfmethoden

Die derzeit in der Bauindustrie verwendeten Methoden zur Charakterisierung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens von Beton und damit der Qualitätssicherung sind seit vielen Jahren im Einsatz und können als etabliert angesehen werden, wenngleich ihre messtechnischen Möglichkeiten stark begrenzt sind. Beispiele für diese etablierten Methoden sind: Ermittlung von Erstarrungsanfang und -ende bei Zementleim mit dem Vicat-Nadelversuch (DIN EN 196-3) und Penetrationsverfahren nach ASTM C-403 bei Beton. Die Anwendung dieser Verfahren entspricht allerdings nicht mehr den Möglichkeiten der modernen Technik. Der wesentliche Nachteil der meisten etablierten Verfahren ist, dass sie nur eine Momentaufnahme der Werkstoffeigenschaften ergeben und sich mit ihnen der Hydratationsverlauf nicht kontinuierlich untersuchen lässt. Zuverlässige Aussagen, z. B. über die Wirkungsweise von Betonzusatzmitteln, können mit diesen Verfahren in der Regel nicht gewonnen werden. Die heutige Betontechnik erfordert häufig eine genaue und zeitnahe Verfolgung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens von Beton.

Kontinuierliche Prüfung mittels Ultraschall

An diesem Punkt können Ultraschallbasierte Verfahren ansetzen. Auf der Grundlage der Ultraschallmesstechnik lassen sich – zerstörungsfrei, reproduzierbar und weitgehend objektiv messbar – die Eigenschaften von handelsüblichen Beton- und Mörtelmischungen analysieren. Ultraschallmessungen sind hierzu besonders geeignet, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die Dämpfung und der Frequenzgehalt der Wellen vom Medium abhängen und damit vom Hydratationszustand des Betons. Somit sind die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen direkt mit den mechanischen und chemischen Eigenschaften des Materials verbunden. Beispielsweise kann der Einfluss des Wasserzementwerts, der Zementart, von Zusatzmitteln, etc. auf den Hydratationsverlauf untersucht werden. Dabei ist man sowohl in der Lage, einzelne Messwerte (Geschwindigkeit, Energie, Frequenz) kontinuierlich aufzuzeichnen und darzustellen, als auch sofort die daraus ableitbaren Betonparameter (z. B. Erstarrungsbeginn, Erstarrungsende) zu extrahieren. Im April 2011 wurde bezüglich der Ultraschallprüfung von Frischbeton eine Empfehlung seitens RILEM veröffentlicht, die eine quasi standardisierte Prüfung mittels Ultraschall beschreibt (Recommendation of RILEM TC 218-SFC:

Sonic methods for quality control of fresh cementitious materials). Dabei beruhen die Empfehlungen weitgehend auf den Ergebnissen der umfangrei-

chen Forschungstätigkeiten an der Universität Stuttgart.

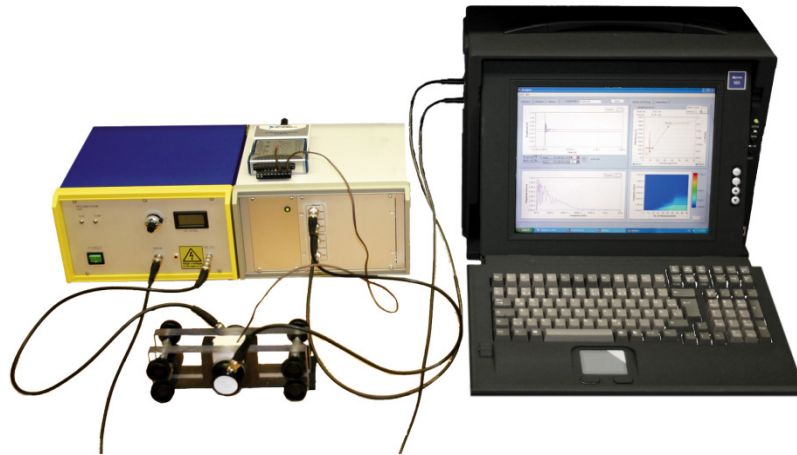


Abb. 12: Ultraschall-Untersuchungssystem zur Charakterisierung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens von Baustoffen.

Schallgeschwindigkeiten als Basisparameter Einer der wichtigsten Parameter zur Beurteilung des Erhärtungszustands und anderer Materialkenngrößen ist die Ultraschallgeschwindigkeit. Misst man die Laufzeiten kontinuierlich bzw. in festgelegten Intervallen und bestimmt daraus die Wellengeschwindigkeit, so erhält man charakteristische, oft S-förmige Kurven, die die Erhärtung und Erstarrung kontinuierlich und bildhaft festhalten. Vergleichbare Kurven lassen sich für alle zementgebundenen

Materialien (z. B. Mörtel oder Beton) und Materialzusammensetzungen erstellen wie auch für Kunststoffe und andere kalt erhärtende Werkstoffe. Abb. 13 zeigt beispielhaft die Wirkung von verschiedenen Betonzusatzmitteln; hier ist die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Betonalter für Mischungen mit Verzögerer, Beschleuniger und Luftporenbildner im Vergleich zu einer Mischung ohne Zusatzmittel dargestellt.

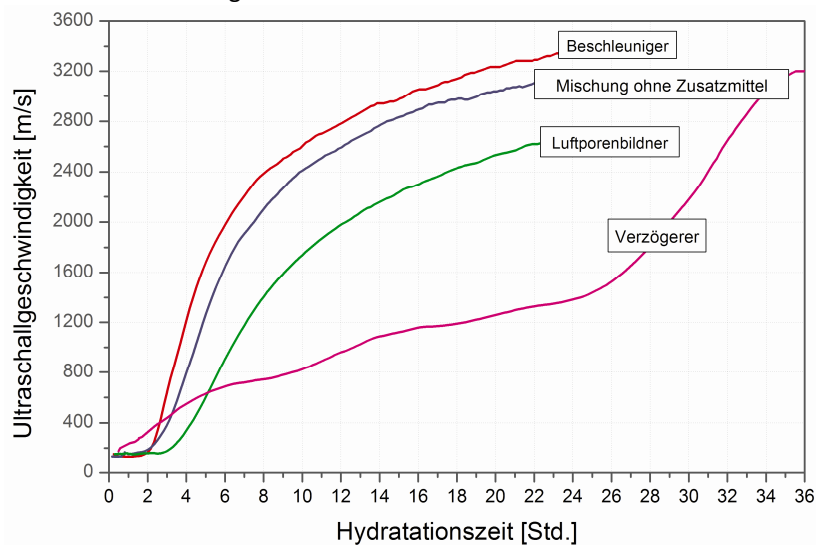


Abb. 13: Beispiel der Wirkungsweise verschiedener Betonzusatzmittel auf den Geschwindigkeitsverlauf der Kompressionswelle während der Frischbetonerhärtung.

Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende

Für die Anwendung des Verfahrens in der Baupraxis ist die Korrelation mit etablierten Materialparametern interessant. Aus der automatischen Echtzeitbestimmung von Geschwindigkeit und Energie lässt sich im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit des Betons ebenfalls Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende automatisiert bestimmen.

Elastische Materialparameter zerstörungsfrei bestimmbar

Zudem lassen sich aus den Schallgeschwindigkeiten

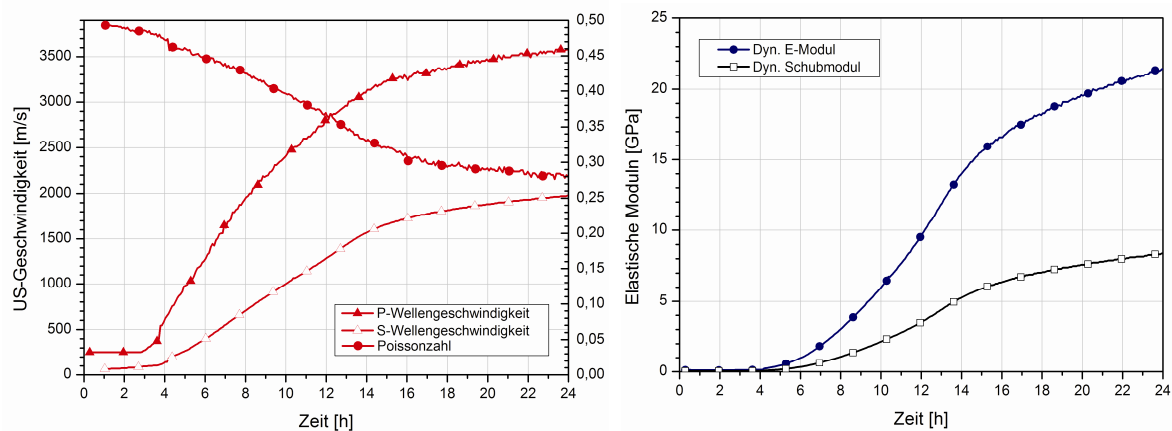


Abb. 14 Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeiten und der elastischen Materialparameter während der Erstarrung und Erhärtung eines Zementmörtels.

Ultraschalluntersuchungen an der MPA Universität Stuttgart

Mit der an der MPA Universität Stuttgart verfügbaren Apparatur ist ein effizienteres Qualitätsmanagement von erhärtenden Materialien im Vergleich zu den derzeit angewandten Verfahren möglich. Dabei können Materialparameter im Rahmen der Werkstoffentwicklung und der Qualitätssicherung zerstörungsfrei und quasi kontinuierlich bestimmt werden. Anwendungsmöglichkeiten sind der Einsatz bei der Werkstoffentwicklung und -optimierung sowie der Entwicklung neuer Betonzusatzmittel, der In-Situ-Qualitätskontrolle auf der Baustelle, dem Gleitschalungsbau oder dem Betonfertigteilbau.

Drahtlose Sensornetze zur Bauwerksüberwachung Smarte Sensortechnologien

Die MPA Universität Stuttgart verfügt in Kooperation mit mehreren Industriepartnern über ein

der Kompressionswelle und der Scherwelle weitere elastische Materialparameter berechnen. Abb. 1 zeigt in einem Beispiel die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen an einer Mörtelmischung mit 480 kg/m^3 Zement (CEM II/A-LL 42,5R), $1662,5 \text{ kg/m}^3$ Sand (0-2 mm) und einem w/z-Wert von 0,6 über einen Zeitraum von 24 Stunden. Dargestellt sind die aus dem Versuch direkt ermittelten Schallgeschwindigkeiten sowie die mit einer Rohdichte von 2145 kg/m^3 berechneten elastischen Materialparameter.

breites Portfolio von Sensortechnologien für die drahtlose Dauerüberwachung von Bauwerken. Hierzu gehören Sensoren für die Temperatur- und Feuchtebestimmung (sowohl Luft als auch Bauteil), für die kombinierte Feuchte- und Salzgehaltsbestimmung in mineralischen Baustoffen, Naturstein oder Holz, für die Bestimmung von Bauteildehnungen bzw. Verformungen, Vibrationen, Neigung, Schadgasen, Licht und Lichtspektrum, Windgeschwindigkeit oder die Regendetektion. In Verbindung mit dem Wissen um die werkstofftechnischen Eigenschaften der meisten Baumaterialien ist das Referat Dauerüberwachung im Bauwesen damit in der Lage, für vielfältige Anforderungen geeignete Lösungen anzubieten, die neben der reinen Messdatenerfassung insbesondere auch die Messdatenanalyse und -interpretation umfasst.

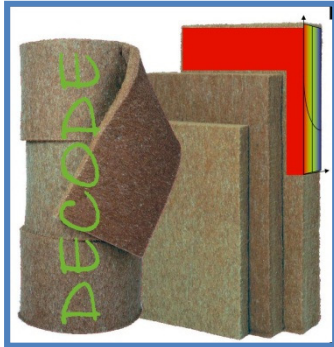


Abb. 15: Mit drahtloser Sensorik instrumentierter Ersatzprobekörper aus Naturstein für die kontinuierliche Erfassung von Feuchte- und Temperaturzuständen und deren Einfluss auf die Steinschädigung am Heilig-Kreuz-Münster in Schwäbisch Gmünd.

6 Forschungsprojekte 2011

Abteilung Mineralische Baustoffe

DECODE (DEvelopment of a CONvergent DEsign tool to improve simultaneously hygrothermal and aero-thermal simulation of building)



Im Rahmen dieses EU-Verbundforschungsprojekts galt es, die Entwicklung bzw. Verbesserung eines Simulationsmodells für gleichzeitige Einwirkung von Feuchte und Temperatur sowie die Entwicklung von Wärme- bzw. Schalldämmplatten aus erneuerbaren Rohstoffen voranzutreiben. In der ersten Projektstufe wurde eine Marktanalyse mit verschiedenen Wärmedämmstoffherstellern, Ingenieurbüros und Architekten durchgeführt, um einen globalen Überblick über den Softwaremarkt zu erhalten, Stärken und Schwächen der Simulationsprogramme zu klären und die Erwartungen der Kunden zu verstehen.

Außerdem wurde eine ausführliche Recherche über Dämmstoffe durchgeführt, um die Ziele für die optimierten Dämmplatten aus nachwachsenden Stoffen zu bestimmen. Die Hauptaufgabe des bearbeitenden Referats Dämmstoffe in diesem Projekt besteht darin, die Materialeigenschaften von Holzwole-Platten, welche bei der Firma Mödinger hergestellt werden, zu ermitteln. Nebenbei führen wir eigene Versuche mit verschiedenen Bindemitteln durch. Es werden Holzwole-Platten mit Zementen und mit einem Bindemittel auf biologischer Basis, das beim Instituto Superior Técnico (IST) in Portugal entwickelt wurde, hergestellt. Die Materialeigenschaften der mit IST-Binder hergestellten Holzwole-Platten sehen vielversprechend aus. Es besteht noch Bedarf an weiterer Forschung. Bei der Entwicklung der Holzwoleplatten kamen u.a. auch Perlite in Frage, wobei die Versuche sich momentan auf die Aktivierung der Perlite beschränken.

Laufzeit: 01.01.2011-30.06.13

Partner: Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA, Coordinator), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), Grenoble Alpes Innovation et Incubation, Instituto Superior Técnico (IST), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Robcork-Valorização de Produtos de cortiça SA, Termo Fluids S.L., Mödinger GmbH & Co. KG, TTI GmbH – TGU Smartmote

Projektträger: EU, Programm KIC-InnoEnergy des EIT

Abteilung Holzkonstruktionen

Einfluss struktureller und chemischer, herstelltechnisch einstellbarer Verklebungs- und Oberflächenparameter auf die Festigkeit und Beständigkeit von Holzverklebungen

Die Einflüsse wesentlicher Verklebungsparameter – Holzart, Oberflächenrauigkeit und -energie sowie Klebstoffviskosität und -molmasse – und deren Interaktion betreffend die Verklebungsfestigkeiten und -beständigkeiten bei Holzverklebungen sind bislang nicht quantifiziert.

Es sollen die Auswirkungen der mittels Produktions- und Maschineneinstellungen beeinflussbaren Verklebungs- und Oberflächenparameter zur Erzielung hoher Verklebungsfestigkeiten und -beständigkeiten aufgezeigt und Grenzwerte im Hinblick auf Schadensvermeidungen bestimmt werden. Die Ermittlung von Rauigkeiten industriell hergestellter Holzoberflächen ist unproblematisch vor Ort mittels mobiler Tastschnittgeräte möglich. In Verbindung mit den zu ermittelnden Grenzwerten ist eine gezielte qualitätsorientierte Produktionssteuerung möglich.

Alle Untersuchungen werden bezüglich der Oberflächenbearbeitung, der Holzart und des Klebstoffs parametrisiert. Die Ergebnisse der mechanischen, mikroskopischen und analytischen Versuche werden multivariat mit dem Ziel der Bestimmung von Optimalkonfigurationen ausgewertet.

Der Nutzen für die (kmU) der deutschen Holzleimbau-, Brettsperrholz- und Fensterkantelindustrie besteht in der Kenntnis um die Einflussfaktoren für feste und dauerhafte Verklebungen zur Vermeidung von Mängeln und Schäden. Falls sich die heute normativ festgelegten, nicht empirisch/theoretisch abgesicherten Grenzwerte als zu restriktiv herausstellen, ergeben sich größere Gestaltungsmöglichkeiten für wirtschaftlichere Fertigungsprozesse.

Abb. 1: Kontaktwinkelmessung zur Bestimmung der Oberflächenspannung von Holzklebstoffen

Laufzeit: 01.03.2011-28.02.2013

Projekträger: AiF

Einfluss des Pressdrucks – Möglichkeiten und Grenzen der Niedrigdruck-Vakuumverpressung bei der Herstellung von geklebten Holzbauteilen

Die Pressdrücke bei dem in der Holzbauindustrie vergleichsweise neuen Vakuum-Pressverfahren (siehe Abb. 2) zur Verklebung tragender Holzbauteile liegen deutlich (rd. 10fach) unter den Pressdrücken bei langzeiterprobten Hydraulikpressen und bei Klebstoffzulassungsprüfungen. Diese Abweichung vom bewährten Stand der Technik führte zwischenzeitlich mehrfach zu bisher in dieser Ausprägung unbekanntem gravierenden Verklebungsfehlern, insbesondere bei der Herstellung von Brettsperrholz.

Das Projekt soll die Auswirkung des Pressdrucks auf die Verklebungsqualität von Holzverklebungen grundlegend klären und zeigen, unter welchen Voraussetzungen Massivholz auch bei sehr niedrigen Pressdrücken sicher verklebt werden kann.

Der Einfluss des Pressdrucks und damit wechselwirkender Verklebungsparameter wie Klebstoffvis-

kosität und Fügepart-Oberflächentopologie auf die Klebfugenstruktur (Fugendicke, Eindringtiefe, Porenbild...) wird experimentell parametrisch untersucht und durch strömungsmechanische Simulationen modelliert. Aus der Klebfugenstruktur werden sodann in einem zweiten Simulationsschritt die mechanischen Eigenschaften der Verklebung abgeleitet. Die Simulationsergebnisse werden mittels umfangreicher mechanischer, mikroskopischer und analytischer Versuche abgeglichen und kalibriert.

Die genaue Kenntnis der Einflussparameter und der Randbedingungen mittels derer auch mit sehr geringen Pressdrücken langfristig beständige Holzverklebung erzielbar sind, ermöglicht kmUs das Produktions-Sicherheitsniveau zu erhöhen und gleichzeitig Betriebs- und Investitionskosten für Pressen zu optimieren.



Abb. 2: Herstellung des verklebten Vollholz-Werkstoffes Brettsperrholz in einer Vakuumpresse

Laufzeit: 01.01.2011-31.10.2013

Projektträger: AiF

Abteilung Werkstoffeigenschaften

Hocheffiziente und lastwechselsichere Kraftwerke:

Untersuchung des Betriebs- und Versagensverhaltens dickwandiger Bauteile für hocheffiziente Kraftwerke

Energieversorgungssicherung, Ressourcenschonung und Umweltschonung.

Nach der Energiewende ergeben sich mit der zunehmenden Einspeisung von Wind- und Solarstrom neue Belastungsprofile für bestehende bzw. zukünftige Großkraftwerke. Deren Aufgabe ist es, die Verfügbarkeit an Energie im Verbund mit möglichen Speichern zu sichern, wenn ungünstige klimatische Bedingungen vorliegen und die Einspeisung alternativer Energien nicht ausreichend ist. Es ist nicht sinnvoll, d.h. wirtschaftlich und ökologisch nicht vertretbar, alte Blöcke von Kohlekraftwerken mit schlechten Wirkungsgraden ans Netz zu bringen. Abgesehen davon, sind sie für diese Fahrweisen nicht konzipiert, was zu Lasten des Lebensdauerverbrauchs, d.h. zur erhöhten Anfälligkeit für das Eintreten von Schadensfällen führt. Dies bedeutet wiederum, dass ein erhöhter Aufwand an Überwachung und Instandhaltung getrieben werden muss bzw. die Verfügbarkeit herabgesetzt wird, sodass das Ziel „Energieversorgungssicherung“ gefährdet ist. Neue Konzepte für die verbleibenden Kohlekraftwerke sind den geänderten Anforderungen angepasst. Sie zeigen signifikante Steigerungen des Wirkungsgrades und tragen damit zur Reduzierung des CO₂-Ausstosses im Verbund mit alternativen Energien wesentlich bei. Diese Konzepte beruhen auf der Steigerung der Betriebstemperaturen und -drucks unter Verwendung von innovativen Hochleistungswerkstoffen. In Ländern wie China, Indien oder auch USA nimmt die Zahl der Kohlekraftwerke ständig zu. Es bestehen bereits internationale Kooperationen über die Erforschung der technischen Möglichkeiten, den mit dem Zuwachs an Kohlekraftwerken sich ergebenden CO₂-Ausstoss zu begrenzen bzw. unter den jetzigen Stand abzusenken. Im Rahmen dieses Verbundprojektes bieten sich der deutschen Industrie und Wissenschaft

Möglichkeiten und Chancen erfolgreiche Technologien zu entwickeln und zu exportieren.

Belastungsprofile und Forschungsziel

Die Einspeisung von Wind- und Solarenergie ist klimatischen Abhängigkeiten unterworfen. Je nach Einspeisungsvolumen ergeben sich Mehr- oder Mindermengen an Gesamtenergie, die über das Netz zur Verfügung gestellt werden muss. Bei Einspeisung von Mehrmengen müssen Anlagen vom Netz genommen werden, bei Mindermengen müssen Anlagen schnell hochgefahren werden. Diese vereinfachte Darstellung der Problematik der Netzstabilität wirkt sich auf die hochbelasteten Bauteile in einem Wärmekraftwerk (Gaskraftwerk, Kohlekraftwerk, Solarrinnenkraftwerk) signifikant aus. Sowohl beim Hochfahren als auch beim Herabfahren stellen sich Temperatur- und Druckwechsel in den tragenden Strukturen ein, die eine Schädigung bis hin zur Bildung eines Anrisses und letztlich zum Versagen/Ausfall des Bauteils führen. Die Vermeidung dieser komplexen Ermüdungsschädigung ist über die Konstruktion des Bauteils, die Dimensionierung, d.h. Festlegung der Werkstoffdicke, über die Werkstoffauswahl und Betriebs- bzw. Fahrweise („Anfahrgradienten“) möglich. Die Aufklärung und Quantifizierung dieser Zusammenhänge ist Ziel des Projekts.

Weltweit einzigartiger Feldversuch

Im Rahmen des Vorhabens wird im Block 6 im Großkraftwerk Mannheim eine dickwandige Rohrleitung. Diese Rohrleitung bildet den Teil zukünftiger hocheffizienter Kraftwerke ab, der - wie oben geschildert - den höchsten Belastungen, ausgesetzt ist. Als Werkstoffe werden die Nickelbasis-Legierungen Alloy 617 und Alloy 263 eingesetzt. Diese Werkstoffe sind geeignet, bei höchsten Temperaturen in allen oben geschilderten Anlagen eingesetzt zu werden.

Der Teststreckenbetrieb orientiert sich am eingangs geschilderten Anforderungsprofil zukünftiger Kraftwerksanlagen, mit denen eine flexible Fahrweise zum Ausgleich von Schwankungen bei der Nutzung von regenerativen Energiequellen möglich sein muss.

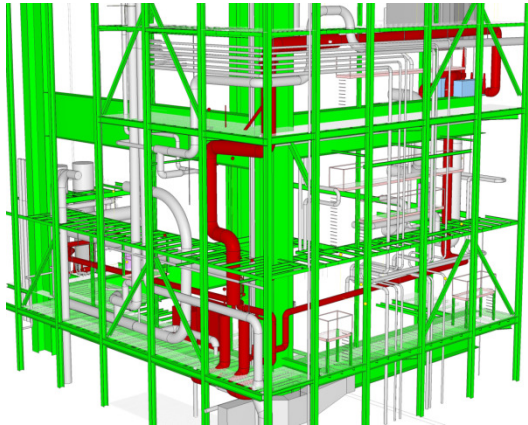


Abb. 3: Rohrleitungsverlauf der Teststrecke im Block 6 des GKM

Der Dampf wird aus der Frischdampfleitung des Blocks 6 bei 530 °C entnommen und mittels einer Überhitzerstrecke auf 725 °C aufgeheizt. Der Dampf wird zunächst durch einen Bereich der Teststrecke geleitet, in dem eine primäre stationäre Belastung aus dem Innendruck und Temperatur vorliegt. Über eine Behinderung der Wärmedehnung wird der Einfluss von Sekundärspannungen auf die Schädigungsentwicklung im Werkstoff untersucht. Hinter dem stationären Bereich wird die Dampftemperatur zweistufig über Kühldampfbeimischung und Wassereinspritzung zyklisch zwischen 400 °C und 725 °C variiert. Dadurch ergibt sich die beschriebene Ermüdungsbeanspruchung als Folge der sich einstellenden Temperaturgradienten über der Wanddicke. Um den Einfluss von Lochrandspannungen bei flexibler Fahrweise zu untersuchen wird in einem Bereich der Rohrleitung der Durchfluss mittels einer Blende gedrosselt und durch dort angebrachte Überströmleitungen geführt. Für die Temperaturregelung des 725 °C-Dampfes werden Hochtemperaturregelventile eingesetzt, für die im Vorhaben der Nachweis der

Funktionsfähigkeit in diesem Temperaturbereich erbracht werden soll.

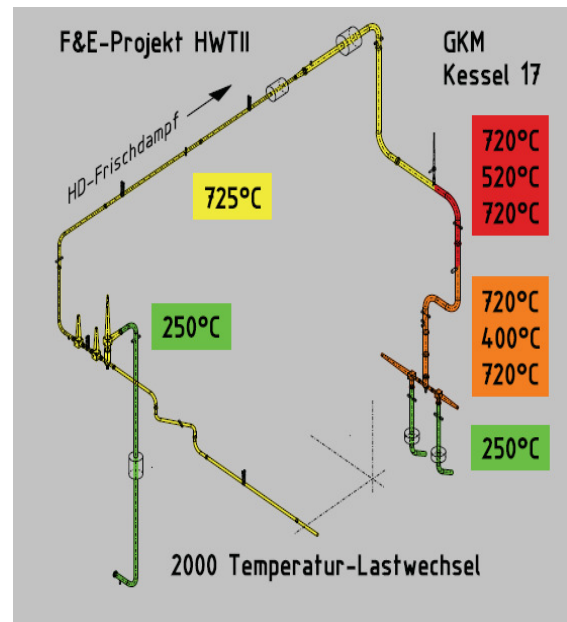


Abb. 4: Teststrecken-isometrie mit Temperaturzyklen

Simulation der Beanspruchung und Schädigungsentwicklung Ein wichtiger wissenschaftlicher, grundlagenorientierter Aspekt des Projekts ist die ganzheitliche skalenübergreifende Simulation der Schädigungsentwicklung in Bauteilen.

Abb. 5: Vergleich der gemessenen und berechneten Kriechdehnung am Beispiel des Alloy 617

Sie vermitteln die für die weitere Werkstoffentwicklung notwendigen Kenntnisse über die Interaktion der Schädigung – eine Folge der auf das Bauteil funktionsbedingten wirkenden Beanspruchungen – mit der herstellungsbedingten Mikrostruktur

und deren thermodynamischen Stabilität. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind auch unverzichtbar zur Überwachung des Betriebs von hochbelasteten Bauteilen um eine vorzeitige Schädigung/Ausfall auszuschließen und sichere und ökonomische Ausnutzung zu erreichen. Damit werden weitere Nachhaltigkeitseffekte bei Werkstoffen

Laufzeit: 01.01.2011-31.12.2014

Projekträger: PTJ/BMWi

Abteilung Werkstoffverhalten

Evaluation von Extrapolationsverfahren zum Zeitstandverhalten von warmfesten Stählen

Für die Auslegung von bei hohen Temperaturen betriebenen Bauteilen werden Kennwerte für die Zeitstandfestigkeit für Betriebszeiten bis zu 200.000 Stunden benötigt. Um diese Kennwerte ermitteln zu können, ist man auf zuverlässige Verfahren zur Extrapolation der Zeitstandbruchkurve angewiesen. Das in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstoffkunde der TU Darmstadt (IfW) bearbeitete Vorhaben **Evaluation von Extrapolationsverfahren zum Zeitstandverhalten von warmfesten Stählen** hat die Entwicklung und Verifizierung von Methoden zur Extrapolation des Zeitdehn- und Zeitstandverhaltens im Hinblick auf die Verkürzung von Entwicklungszeiten insbesondere bei der Werkstoffentwicklung und -optimierung zum Ziel. Anhand von repräsentativen Beispielen in

erreicht, die hoch wertschöpfend sind bzw. deren Herstellung energieintensiv ist.

Form eines niedriglegierten Chromstahls, verschiedenen 9-10%Cr-Stählen und einer Nickelbasis-Legierung werden für in Komponenten thermischer Maschinen und Anlagen eingesetzte Werkstoffe neue Verfahren bereits eingeführten Methoden wie z.B. graphische Auswertung bzw. parametergestützte Verfahren gegenübergestellt und unter Heranziehung besonders langfristig abgesicherter Daten untersucht. Der Beitrag der MPA zu diesem Vorhaben konzentriert sich auf die Untersuchung einer Methode, die Daten aus mehrachsiger Beanspruchung mitberücksichtigt sowie auf die Einbeziehung von Erkenntnissen zur Schädigungsentwicklung aus metallografischen und elektronenmikroskopischen Untersuchungen.

Laufzeit: 01.01.2011-31.12.2013

Partner: Institut für Werkstoffkunde der TU Darmstadt (IfW)

Projekträger: AVIF

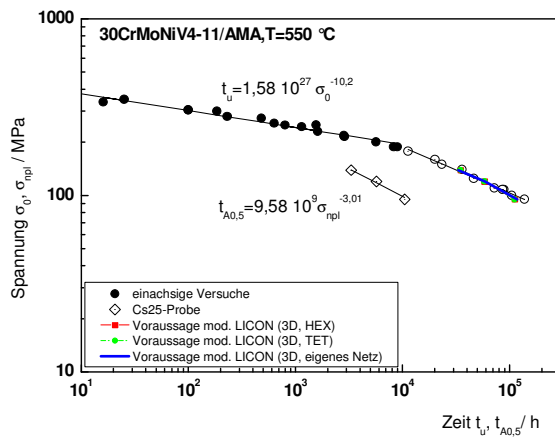


Abb. 6: Vorhersage für die Zeitstandfestigkeit auf der Basis von kurzzeitigen mehrachsigen Versuchen (in diesem Fall Versuche an bruchmechanischen Kompaktzugproben) im Vergleich zu langzeitigen Versuchen an einachsigen beanspruchten Proben (LICON-Methode)

Material-Component-Performance-driven Solutions for Long-Term Efficiency Increase in Ultra Supercritical Power Plants (MACPLUS®)

Das von einem großen europäischen Konsortium bearbeitete Vorhaben „Material-Component Performance-driven Solutions for Long-Term Efficiency Increase in Ultra Supercritical Power Plants“ (MACPLUS®) hat die Bereitstellung von Werkstoffdaten und Methoden zur Beschreibung des Werkstoff- und Komponentenverhaltens zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Energieerzeugungsanlagen mit hohem **Wirkungsgrad** zum Ziel. Ein besonderer Schwerpunkt der Arbeiten der MPA bildet das Kriechermüdungsverhalten insbesondere die Interaktion der Schädigung aus Kriechen und Ermüden wie sie beim Betrieb mit langen Haltezeiten und hohen sich wie-

derholenden kurzzeitigen Beanspruchungen aus Lastwechseln und An- und Abfahrten von Anlagen. Die Beschlüsse zur Energiewende und die damit verbundene Anforderung an schnellere und häufigere An- und Abfahrten von Anlagen machen die Kenntnis über das Werkstoff- und Komponentenverhalten bei dieser Beanspruchung notwendig. An der MPA werden hierzu Daten bei ein- und mehrachsiger Beanspruchung für warmfeste martensitische Stähle ermittelt und Berechnungsverfahren durch Nachrechnungen eines im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Bauteilversuchs verifiziert.

Laufzeit: 01.01.2011-30.06.2015

Partner: Centro Sviluppo Materiali SpA, Italy, RWE Power, Germany, EON New Build & Technology Ltd, United Kingdom, Doosan Babcock, United Kingdom, Foster Wheeler Energia Oy, Finland, Tubacex S.A., Spain, TÜV Rheinland Werkstoffprüfung GmbH, Germany, Cogne Acciai Speciali S.p.a., Italy, Flame Spray Hungary Kft, Hungary, Graz University of Technology, Austria, Welding Research Institute, Slovakia, National Physical Laboratories, United Kingdom, Royal Technical University, Sweden, Loughborough University, United Kingdom, Fraunhofer Institute of Freiburg, Germany, Research Centre Juelich, Germany, Endesa, Spain, Technical University of Denmark, Denmark, Imperial College, United Kingdom, Fundación Ciudad de la Energía, Spain, Technical Research Centre of Finland, Finland, Alstom Ltd, United Kingdom, Goodwin Steel Castings Ltd, United Kingdom

Projekträger: EU

Rissverhalten von ein- und polykristallinen Nickelbasiswerkstoffen

Im ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem IfW Darmstadt bearbeiteten Vorhaben „**Rissverhalten von ein- und polykristallinen Nickelbasiswerkstoffen**“ geht es um die Ermittlung des Rissverhaltens der Nickelbasisgusslegierung M-247 in der konventionell erstarrten heiß-isostatisch gepressten Version sowie in der einkristallin erstarrten Version M-247 LC SX für Gasturbinenschaufeln. Die Untersuchungen erfolgen unter statischer und zyklischer Beanspruchung. Generell sollen auch hier für beide Werkstoffzustände insbesondere Methoden zur Überlagerung von **Ermüden und Kriechen** analy-

siert und weiterentwickelt werden. Die Mikrostruktur der im Zuge dieses Vorhabens geprüften Proben sollen mit Hilfe raster- und transmissionselektronischer Methoden untersucht werden und die Ergebnisse als Grundlage für die realgefügebasierte FE-Modelle dienen, um den Einfluss der Kornstruktur berücksichtigen zu können. Aus dem Vorhaben werden Erkenntnisse und Regeln für die Übertragbarkeit von Rissbefunden an Laborproben auf Bauteile zur direkten Anwendung für Werkstoffhersteller, Anlagenbauer und Zulieferer abgeleitet.

Laufzeit: 01.06.11.30.11.13

Partner: Institut für Werkstoffkunde der TU Darmstadt (IfW)

Projekträger: AiF

Abteilung Berechnung

Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der austenitischen Plattierung von kerntechnischen Komponenten

Gemäß kerntechnischem Regelwerk ist nachzuweisen, dass die druckführenden Wandungen allen spezifizierten Belastungen (mechanisch, thermisch und korrosiv) im Rahmen der spezifizierten Eintrittshäufigkeiten in zulässiger Weise standhalten. Zur Bewertung der Plattierung austenitisch plattierter Bauteile im Rahmen der Ermüdungsanalyse für den Fall einer schwingenden Beanspruchung werden in der Regel die Kennwerte des Austenits ermittelt an Proben aus Platten, Rohr oder Stabmaterial verwendet. Aufgrund der raschen Wärmeableitung in den ferritischen Trägerwerkstoff besitzt die Plattierung, bedingt durch den Herstellungsprozess, jedoch einen ausgeprägt anisotropen Aufbau. Somit kann nicht a priori davon ausgegangen werden, dass die dem Regelwerk zugrundeliegende Anrisskurve für austenitische Erzeugnisformen auch für die austenitische Plattierung repräsentativ ist. Aus diesem Grunde wurden Versuche zur experimentellen Absicherung einer Anrisskenn-

linie für den Plattierungswerkstoff kerntechnischer Komponenten durchgeführt.

Als Versuchswerkstoff stand ein Teilbereich des zylindrischen Schusses vom Reaktordruckbehälter (RDB) des seinerzeit nicht realisierten Kernkraftwerks Biblis Block C mit einer 2-lagigen UP Bandplattierung (1. Lage: Thermanit 23/11 ENb; 2. Lage: Thermanit 22/11 ENb) mit einer Plattierungsdicke von ca. 7 mm zur Verfügung, [Abb. 7](#). Der zweiten (äußeren) Plattierungslage wurden Kleinstproben von zwei mm Dicke, [Abb. 8](#), für Ermüdungsversuche entnommen und in dehnungskontrollierten uniaxialen Schwingversuchen (Dehnung-Wöhlerkurven, $R_{\sigma} = -1$) in Luftumgebung bei Raumtemperatur (RT) geprüft. Untersucht wurden vier Lasthorizonte, die zur statistischen Absicherung mit jeweils 6 Proben belegt wurden. Die Untersuchungsergebnisse, [Abb. 9](#), zeigen, dass der Plattierungswerkstoff prinzipiell ein ähnliches Verhalten wie der austenitische Rohrwerkstoff aufweist.

Dabei treten bei hohen Dehnungsamplituden (0.8%) etwas höhere und bei niedrigen Dehnungsamplituden (0.22%) etwas niedrigere Anrisslastspielzahlen auf als beim Rohrwerkstoff. Vergleichsversuche zum Einfluss der Probenform (Flachprobe

/ Rundprobe) an Rohrwerkstoff deuten darauf hin, dass letzteres durch die Probenform bedingt sein könnte.

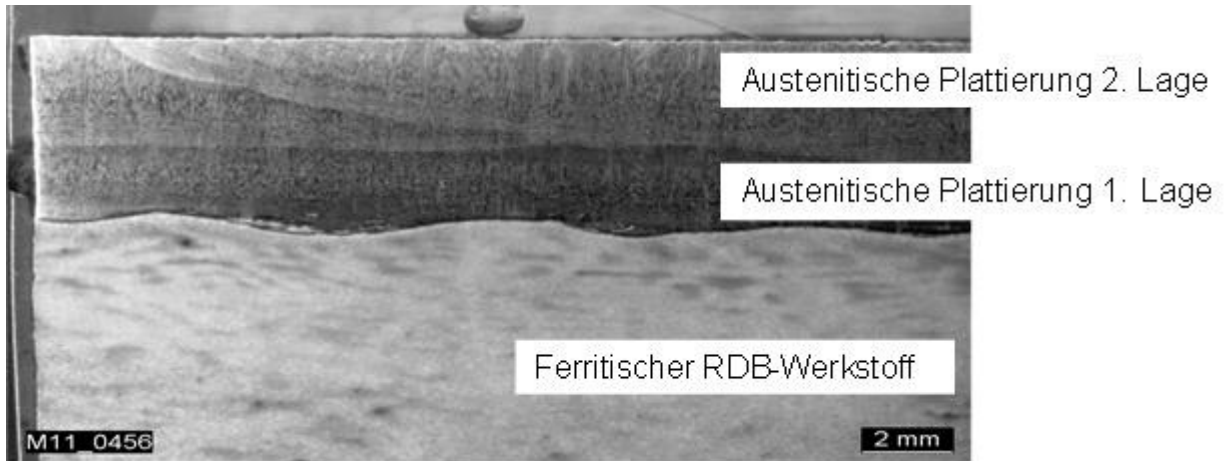


Abb. 7: Aufbau der zweilagigen Plattierung

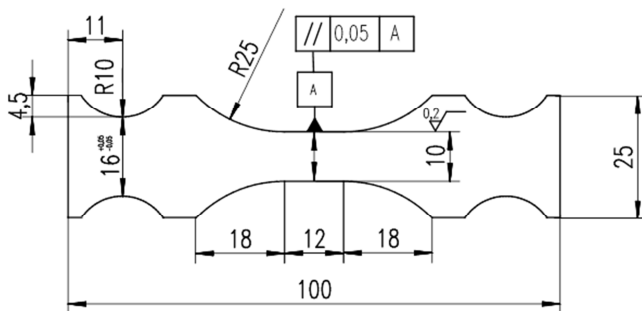


Abb. 8: Kleinstprobe (Flachprobe) für Ermüdungsversuche, Dicke 2mm, Probenlage in Plattierung 2. Lage

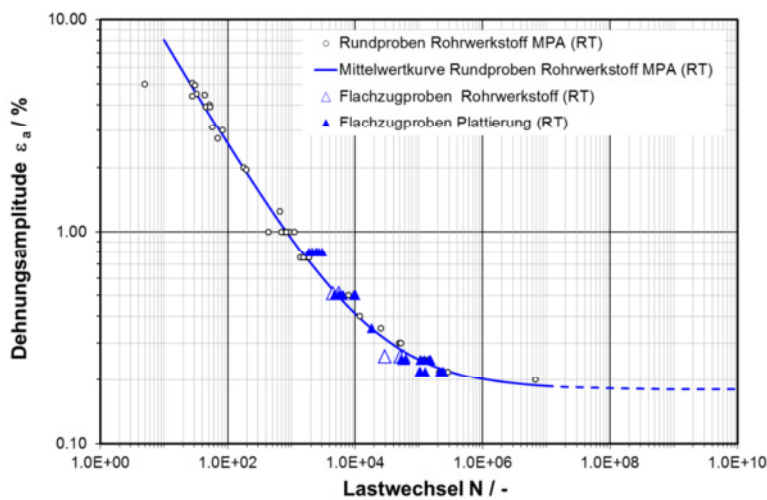


Abb. 9: Ergebnisse der Ermüdungsversuche am Werkstoff der austenitischen Plattierung im Vergleich zum austenitischen Rohrwerkstoff

Ermüdungsverhalten von Stahlkonstruktionen unter multiaxialer Beanspruchung durch Radlasten

Das Forschungsvorhaben verfolgt das Ziel, einen Bemessungsvorschlag für die Bewertung der Materialermüdung unter Radlasten, wie sie im Kranbau, Hochbau, Brückenbau etc. auftreten, zu entwickeln. Der multiaxiale Spannungszustand unter einer bewegten Radlast besteht aus globaler Biegespannung und lokalen Druck- und Schubspannungen und wird in Bauteilversuchen an Kranbahnträgern realitätsnah abgebildet. Der Einfluss der Überrollung soll durch verschiedene zyklische Versuche systematisch untersucht werden:

- Trägerversuche mit bewegter Radlast (Überrollversuche), Abb. 10
- Trägerversuche mit ortsfester Radlast



Abb. 10 Überrollprüfstand

Bei der Überrollung des Trägers kommt es zu einer Überlagerung aller Spannungskomponenten, die zu einer multiaxialen Ermüdungsbeanspruchung führt. Zusätzlich zu den Ermüdungsversuchen soll die Größenordnung der herstellungsbedingt auftretenden Schweißeigenspannungen sowohl numerisch als auch experimentell ermittelt werden. Numerische Modelle zur Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit sollen anhand der Versuchsergebnisse validiert werden. Anhand dieser Modelle sollen verschiedene Festigkeitshypothesen zur Bewertung der Bauteilermüdung verglichen werden.

Abteilung Beanspruchungsanalysen

Verbesserte Bauteil- und Betriebssicherheit:

Erhöhung der Komponentensicherheit durch verbesserte Verfahren zur Eigenspannungsanalyse – Berücksichtigung der elastisch-plastischen Materialeigenschaften

Eigenspannungen sind Spannungen, die in einem Bauteil vorhanden sind, ohne dass äußere Kräfte und Momente wirken oder Temperaturdifferenzen vorhanden sind. Bei nahezu jedem Fertigungsprozess ist mit dem Entstehen von Eigenspannungen zu rechnen: Sie entstehen beispielsweise infolge örtlicher plastischer Verformung, als thermische Eigenspannungen oder Schrumpfspannungen beim

Abkühlen als Folge von Temperaturdifferenzen sowie als Schrumpfspannungen oder Umwandlungsspannungen bei Phasenänderungen. Sie überlagern sich den eigentlichen betrieblichen Spannungen und können dadurch maßgeblich ein früheres oder unerwartetes Versagen bewirken. Für die Quantifizierung werden analytische und experimentelle Methoden eingesetzt. Die Genau-

igkeit der Ermittlung beeinflusst die Betriebssicherheit von Anlagen.

Einschränkungen bei der Ermittlung

Sowohl die analytische als auch die bestehenden experimentellen Methoden sind mit Unsicherheiten verbunden. Diese sind meist Folgen von Annahmen bzw. festzulegenden Randbedingungen. Bei den experimentellen Methoden betrifft dies z. B. den Plastifizierungseffekt. Wenn die Eigenspannungen die Streckgrenze überschreiten, ergeben sich lokale plastische Verformungen, die schwierig abzuschätzen sind.

Verbesserte experimentelle Verfahren Mit den nachfolgend beschriebenen Arbeiten sollen bestehende wesentliche Einschränkung der Bohrloch- und der Ring-Kern-Methode zur Ermittlung von Eigenspannungen behoben werden:

- Entwicklung einer Auswertemethode für die Bohrloch- und die Ring-Kern-Methode zur Berücksichtigung bzw. Korrektur plastischer Dehnungsanteile bei der Auslösung hoher Eigenspannungen
- Entwicklung alternativer Eigenspannungsmessmethoden (Nut- bzw. Doppelnutverfahren), von denen zu erwarten ist, dass Plastifizierungseffekte bei der Anwendung der Verfahren nur einen vernachlässigbaren Einfluss haben
- Bewertung der entwickelten Vorgehensweisen und alternativen Eigenspannungsmessmethoden hinsichtlich der angestrebten Reduktion der Mess- und Verfahrensunsicherheit und Gewährleistung der Reproduzierbarkeit, sowie Festlegung der Anwendungsgrenzen der Verfahren
- Experimentelle Validierung der Vorgehensweisen zur Korrektur von Plastifizierungseffekten und der alternativen Eigenspannungsmessmethoden (Anwendung auf Schweißverbindungen und Plattierungen - Fallstudien)



Abb. 11: Vorrichtung für die Bohrlochmethode und spezieller Dehnungsmessstreifen (DMS): Einsatz an mechanisch verfestigter Kerbstelle

Laufzeit: Phase 1: 01.08.2011-31.07.2013, Phase 2: 01.08.2013-31.01.2015

Partner: Institut für Werkstofftechnik – Metallische Werkstoffe, Universität Kassel

Projekträger: BMWi-Forschungsvorhaben 150 1423A

Beurteilung der Sicherheit bei Störfällen:

Untersuchungen zur Analyse von Radiolysegasdetonationen im Hinblick auf Nachrüstungen und zukünftige Auslegungen von Rohrleitungen

Störfälle

Die Wahrscheinlichkeit, dass Betriebsstörfälle oder auslegungüberschreitende Belastungen auftreten, muss im Rahmen von Risiko- und Gefährdungsanalysen erfasst und beurteilt werden. In einem weiteren Schritt muss das Verhalten der Bauteile unter diesen nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen untersucht und beurteilt werden, damit eventuell Maßnahmen zur Eingrenzung des Schadens oder der verursachenden Bedingungen ergriffen werden können.

Radiolysegas und Knallgasexplosionen

In Siedewasserreaktoren entsteht während des Betriebs durch strahlungsbedingte Spaltung von

Wasser Radiolysegas ($2H_2 + O_2$). Die Entstehung von elementarem Wasserstoff und Sauerstoff birgt die Gefahr einer Rohrexpllosion durch die Knallgasreaktion in sich. Risiken, dass u. U. zündfähige Mischungen von Wasserstoff und Sauerstoff entstehen, liegen auch bei anderen technischen Prozessen vor, z. B. bei der Nutzung von Wasserstoff als alternativen Energieträger im Zuge der Erzeugung, des Transportes und der energetischen Umsetzung. Da Werkstoffe bei hohen Energiefreisetzungsraten ein anderes Versagensverhalten haben als unter langsamer Drucksteigerungen, müssen für diese Störfälle besondere Untersuchungen durchgeführt werden, um das Bauteilverhalten z.

B. im Hinblick auf ein katastrophales Versagensverhalten („Bruch vor Leck“) zu beurteilen.

Bauteilversuche und Analyse des Werkstoffverhaltens

Aufbauend auf vorhergehende Untersuchungen werden gezielt spezifische Bauteile untersucht. Damit sollen in Bezug auf die Deckelsprühleitungen von Siedewasserreaktoren Ansatzpunkte für mögliche notwendige Nachrüstungen und Neuauslegungen geschaffen werden mit dem Ziel, das Berstrisiko infolge von Radiolysegasdetonationen mit den dabei nicht auszuschließenden Sekundärschäden zu minimieren. Ein Ansatzpunkt hierbei ist die Rohrwanddicke. Derzeitige Deckelsprühleitungen sind in der Regel mit einer Nennweite um 100 mm

ausgeführt und besitzen eine Wanddicke um 6 mm. Eine wichtige Fragestellung ist, ab welcher noch realistischen Wanddicke sich die Rohrreaktion infolge einer Detonation auf plastische Verformungen reduzieren lässt und die Gefahr des Berstens weitgehend ausgeschlossen werden kann. Ein weiterer Gesichtspunkt sind die derzeit gegebenen Anbauten von Deckelsprühleitungen wie zum Beispiel Abzweigleitungen oder Messstutzen. Es gilt exemplarisch zu untersuchen, welchen Einfluss diese Komponenten auf die Entwicklung einer Radiolysegasdetonation im Rohr ausüben und in welchem Ausmaß das Rohrleitungsverhalten im Falle einer Detonation beeinflusst wird.



Bruchstücke eines dünnwandigen Rohres $D_a \times s = (114,3 \times 6,02)$ mm aus X10CrNiTi18-9 (1.4541) nach Radiolysegasdetonation (60 % Radiolysegas, 40 % Stickstoff)

Laufzeit: 01.04.2011-31.03.2014

Partner: keine

Projektträger: BMWi-Forschungsvorhaben 1501 412

Abteilung ZfP und Bauwerksmonitoring

CETIEB (Cost-Effective Tools for Better Indoor Environment in Retrofitted Energy Efficient Buildings)

Unter der Leitung der MPA startete im Oktober 2011 das europäische Forschungsprojekt „CETIEB – Cost-Effective Tools for Better Indoor Environment in Retrofitted Energy Efficient Buildings“ (www.cetieb.eu). Insgesamt 14 Partner aus Industrie und Forschung aus 6 europäischen Ländern sind beteiligt.

Energieeffizienz kontra Innenraumluftqualität Die Instandsetzung von Gebäuden auf einen energieeffizienten Standard führt zu dichteren Gebäudehüllen (Fenster, Dach, Wände, etc.) und beeinflusst durch einen verringerten Luftaustausch das Innenraumklima. Nach der Renovierung von Bestandsgebäuden sind die Bewohner nicht an die neue Situation adaptiert. Deshalb können die Luftaustauschraten zu niedrig werden, wenn keine künstliche Belüftung installiert wird, oder das System nicht optimal betrieben wird. D.h., das Bestreben die Energieeffizienz von Gebäuden zu erhöhen, kann zu einer verminderten Innenraumluftqualität führen, aufgrund des verminderten Luftaustausches mit der freien Umgebung. In Europa verbringen die Menschen mehr als 90 % ihrer Zeit in geschlossenen Räumen (Wohnen, Arbeiten und Transport). In mehr als 40 % dieser Innenraumumgebungen treten gesundheits- oder komfortbedingte Beschwerden bis hin zu Krankheiten auf. Bereits 1984 berichtete die WHO über eine erhöhte Anzahl von Beschwerden in Gebäuden mit klimatischen Problemen. Die Komplexität des Problems und der Zusammenhang mit gebäudebezogenen Symptomclustern fand als „Sick-Building-Syndrom“ Einzug in die Literatur.

Kosteneffiziente Methoden zur Verbesserung von Komfort- und Luftqualitätsparametern Zielsetzung des Forschungsprojektes ist die Entwicklung von innovativen Methoden für eine bessere Überwachung von Innenräumen sowie von aktiven und passiven Maßnahmen zu ihrer Verbesserung. Der Fokus liegt auf kosteneffektiven Lösungen, um eine breite Anwendung der entwickelten Systeme sicherzustellen. Das Projekt basiert auf drei Zielrichtungen:

- Entwicklung von Monitoringsystemen (drahtlos und/oder netzgebunden) zur Detektion von unzulänglichen Komfort- und Gesundheitsparametern. Vorgesehen sind modular aufgebaute Systeme, die in ihrer Basisversion auch dem normalen Endkunden die schnelle Überprüfung der Innenraumqualität erlauben.
- Entwicklung von Kontrollsystemen für das Innenraumklima, die auf passiven Elementen wie photokatalytischen Materialien oder sogenannten „Phase Changing Materials - PCMs“ basieren und aktiven Systemen, die die Luftzufuhr anhand von Monitoringdaten steuern.
- Modellierung und Simulation von Innenraumumgebungen für die Überprüfung und Validierung von Monitoringdaten sowie für die Optimierung von Steuerparametern und -systemen in Bezug auf Energieeffizienz und Komfort.

Abb. 13: Infrared absorption spectra of typical VOCs and water vapor (high concentrations). The most interesting bands are marked.

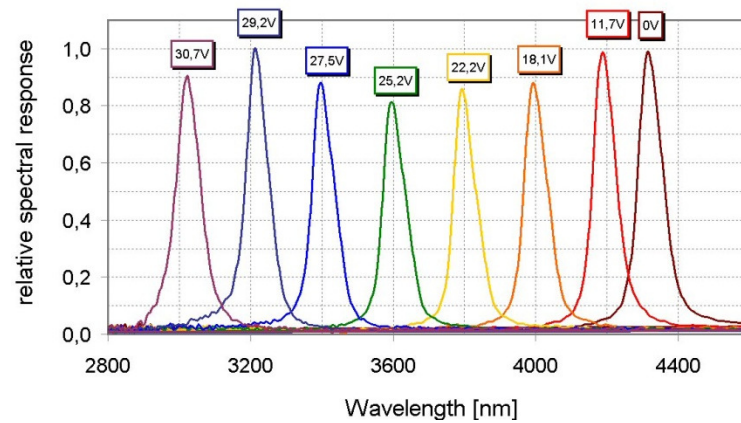
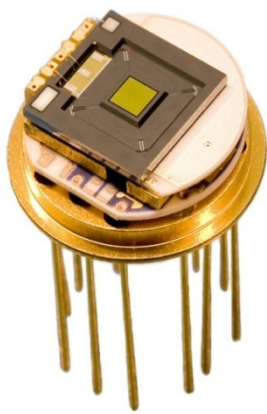


Abb. 14: Photograph (left) and spectral response (right) of the micro spectrometer module from InfraTec.

Laufzeit: 01.10.2011-30.09.2014

Partner: Institut für Gebäudeenergetik Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik Universität Stuttgart, DW EcoCo, S&B Industrial Minerals S. A., Solintel, Università Politecnica delle Marche, RED S.r.l., Rersearch and Environmental Devices, TTI GmbH, TGU Smartmote, Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., InfraRec GmbH, CEA INES Institut National de L'Énergie Solaire, Stam S.R.L., Schwenk Putz und Mörteltechnik GmbH, Consorzio TRE

Projektträger: EU

Abteilung Dauerhaftigkeit und Schutz von Bauten und Anlagen

Musterkonservierung der Felsenkapellen vom Sankt Salvator, Schwäbisch Gmünd (Kooperationsprojekt)

In Fels gehauene Kapelle zeigt starken Zerfall Der Zustand der Felsenkapellen vom Sankt Salvator in Schwäbisch Gmünd hat sich insbesondere in den letzten Jahrzehnten dramatisch verschlechtert. Verwitterungsvorgänge, die überwiegend durch das natürliche, dauerfeuchte Milieu des Felsens bestimmt werden, haben zu einem starken Kornbindungsverlust geführt. In Teilbereichen haben sich schwarze Krustenbildungen mit dahinter liegenden Auflockerungszonen sowie mikrobieller Befall entwickelt. Ein fortschreitender Verlust der originalen Oberflächen ist festzustellen und eine baldige konservierende Behandlung ist unumgänglich. Aufgrund der natürlichen, hohen Bergfeuchte, die jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt, gibt es bis heute keine geeigneten Gesteinsfestigungsmittel bzw. Konservierungsverfahren, die gefahrlos für das Objekt eingesetzt werden können. Ein Aus-

trocknen des Reliefs birgt die Gefahr, dass es zu verstärkten und schnellen Materialverlusten kommt. Hier setzt das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) und der Denkmalpflege geförderte Forschungsprojekt der Universität Stuttgart an, das sich zum einen der Entwicklung eines Steinfestigungsmittels für dauerfeuchte Untergründe und zum anderen der damit möglichen Musterkonservierung der Felsenkapellen widmet. Besonderes Augenmerk wird auf die Problematik Salzbelastung und mikrobieller Befall gelegt. Das Konsortium aus universitärer Forschungseinrichtung, dem Eigentümer, fünf kleinen und mittleren Unternehmen sowie dem Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart bietet die Gewährleistung der Verbreitung der Ergebnisse in Forschung, Praxis und Denkmalpflege.



Abb. 15: Wallfahrtsort St. Salvator Schwäbisch Gmünd

Laufzeit: 01.01.2011-30.12.2012

Partner: Landesamt für Denkmalschutz Baden-Württemberg

Projekträger: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)



Abb. 16: Felsenkapelle Schwäbisch Gmünd

7 Ausgewählte Forschungsergebnisse

Studies on the Behaviour of Heat Affected zones in 9-10Cr steels and their Influence on Stress State in Components

Klenk, C. Feuillette, T. Klein, K. Maile

Abstract

Welding is one of the most important joining technologies in modern power and process plant construction. In martensitic and ferritic steels which are used for components in ultra super critical fossil power plants the heat input during welding produces a zone with reduced creep strength. This is especially the case in modern steels with alloying elements like Vanadium, tungsten, Niobium and Boron to enhance creep strength by precipitates since precipitation is mainly influenced by the heat treatment and the heat affected zone is exhibited to an irregular heat treatment by the welding process. The reduced creep strength of this zone has

Kurzfassung

Schweißen ist eine der wichtigsten Verbindungstechnologien im modernen Kraftwerks- und Anlagenbau. In martensitischen und ferritischen Stählen, die für Komponenten in überkritischen fossilen Kraftwerksanlagen eingesetzt werden führt der Wärmeeintrag während des Schweißens zur Ausbildung einer Zone mit reduzierter Kriechfestigkeit. Dies gilt insbesondere für moderne Stähle, die infolge des Zulegierens von bestimmten Elementen wie z.B. Vanadium, Wolfram, Niob und Bor eine zu höherer Kriechfestigkeit führende spezielle Ausscheidungscharakteristik aufweisen, die aber hauptsächlich durch die spezifische Wärmebehandlung beeinflusst wird. Die Wärmeeinflusszone erfährt jedoch eine irreguläre Wärmebehandlung durch den Schweißprozess. Bei festigkeitstechnischer Betrachtung von Schweißnähten muss die reduzierte Kriechfestigkeit in der Wärmeeinflusszone berücksichtigt werden. Eigenschaften von Schweißverbindungen werden in der Regel durch die Prüfung von Schweißverbindungsproben ermittelt, die quer zur Naht entnommen werden und

to be considered in structural assessments of components with welds. Properties of welded joints are determined by tests on crossweld specimens which represent a fully loaded weld and heat affected zone (HAZ). From the test results weld reduction factors can be derived. In this paper a description of properties of welded joints and the derivation of weld strength factors for a couple of steels are given. The effect on welded joints in components is studied by numerical analyses in which different material properties are assigned to base material, weld material and three different heat affected zones. Examples for various components are given.

damit eine voll beanspruchte Naht und Wärmeeinflusszone (WEZ) repräsentieren. Mit Hilfe der Ergebnisse solcher Versuche können Schweißnahtfaktoren bestimmt werden. In diesem Beitrag werden die Eigenschaften von Schweißverbindungen aus martensitischen und ferritischen Stählen beschrieben und die Schweißnahtfaktoren für eine Reihe von Stählen angegeben. Der Effekt der reduzierten Kriechfestigkeit in der Wärmeeinflusszone von geschweißten Komponenten und deren Auswirkung auf das Verhalten einer Komponente wurde mittels numerischer Analysen untersucht, bei denen dem Grundwerkstoff, dem Schweißzusatzwerkstoff und der durch drei Bereiche charakterisierten Wärmeeinflusszone unterschiedliche Werkstoffeigenschaften zugewiesen werden. Beispiele von Ergebnissen für verschiedene Komponenten werden gezeigt.

Introduction

Martensitic 9-11% chromium steels are mainly used in ultra-supercritical power plants for piping and manufacturing of piping, bends and components like headers, T-pieces etc. P91 as one of the

first broadly applied martensitic steels was the base for a number of further developments of martensitic steels aimed to increase service temperatures. Alloying elements like Vanadium and Niobium were used for the optimization of the steel and additional elements like tungsten and boron were investigated in order to improve creep rupture strength at temperatures higher than 600°C. With the development of steels like P92, VM12 for boiler applications and forged martensitic grades with 10 to 11% chromium for turbine applications it was possible to increase temperatures in plants currently being built to about 625°C in the reheat piping. Developments for advanced supercritical plants with temperature of 700°C need for the highest temperatures Nickel based alloys but still the application of martensitic steels is widely necessary and improvements of the behavior is necessary. One of the most severe problems in the application of martensitic steels is the fact that their weldments show a significantly weaker zone which is due to the heat input during welding changing the microstructure obtained by a well defined heat treatment of these steels. The observed cracking in the heat affected zone near to the base metal which is designated as Type IV cracking could not be avoided so far in existing components. Efforts to avoid the negative influence of the heat input during welding by improving the alloying system are under way. However, so far for fully loaded weldments the application of weld strength factors or specific material properties are necessary in the design of components. For the application of the weld strength factors it is necessary to understand the weld behavior in terms of

- Understanding the failure mechanism of welded joints under long term creep loading (material dependent)
- Specific design of welded pipes
- Extrapolation of creep data of welded joints
- Derivation of weld creep strength factors
- Development of procedures to introduce the behaviour of welded joints and heat affected zones in inelastic finite element analyses
- Consideration of transferability of weld creep strength and weld creep strength factors on components.

Studies on the influence of weld metals of different strength were carried out in 0 and yielded experimental and numerical results on the influence of heat affected zones on stress and strain distribution in welded joints and joints in components.

Characterization of weld behaviour

The behavior of welds in ferritic and martensitic steels is strongly influenced by changes in the microstructure due to the heat input during welding. In contrast to ordinary plastic deformation, thermally and mechanically loaded materials benefit from coarse grain sizes because the coarse structure lowers the influence of diffusional creep. This effect plays an important role in the welding process of many steels and their creep rupture strength as well. Due to heat conduction during the weld process, material properties in this area change (grain size, strength, hardness etc.). In the literature, the area of a weld seam influenced by heat conduction is designated as heat affected zone (HAZ) and can be separated in three regions (HAZ1, 2, 3), Figure 1.

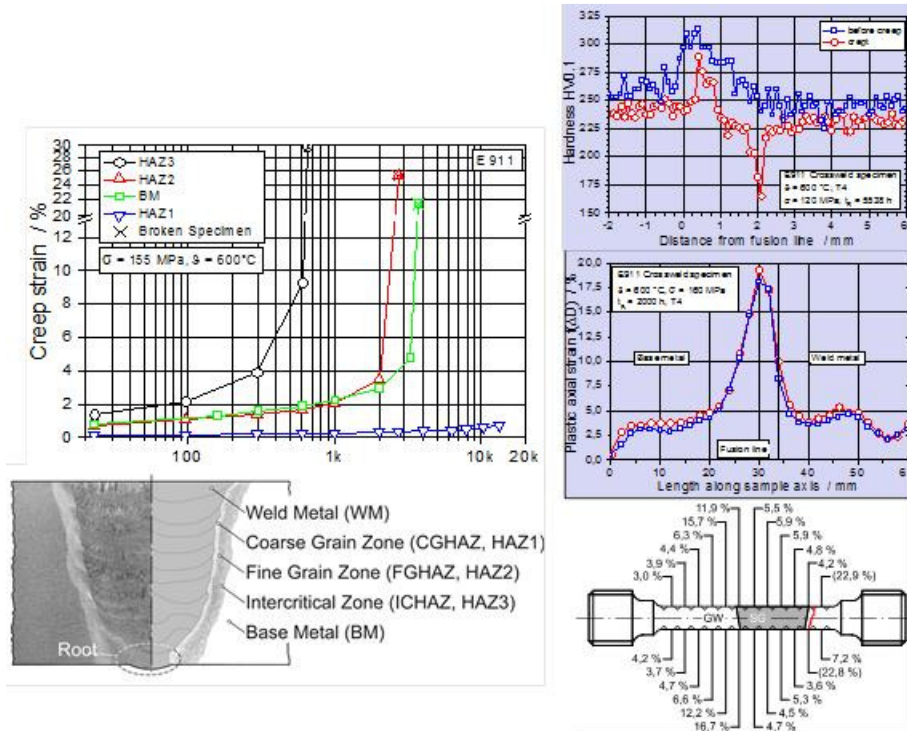


Figure 1: characterization of Weld Behavior

These zones are a coarse grain zone (HAZ1), fine grain zone (HAZ2) and intercritical zone (HAZ3). The coarse grain zone shows the best creep properties which are usually better than the creep properties of base material. The weakest link is usually set by the intercritical zone (HAZ3). Just like in HAZ2, HAZ3 shows very fine grain sizes and causes a reduction in creep resistance of a weld. In addition precipitations are not completely dissolved by the welding process and a coarsening of the precipitations can be identified.

In 0 investigations on the characterization of the different heat affected zones and especially determination of their sizes in weldments are described which gave the base for the numerical modeling described in the following sections.

Determination of properties of welded joints

Usually designers are interested in the time and temperature dependent mean and minimum of the creep rupture strength and the mean weld strength factor, respectively. Usually the weld strength factor for 100.000 h and 200.000 h is needed. Am method to determine weld creep

strength and weld strength factors was developed in 0. To determine the weld strength factors the procedures depicted in Figure 2 may be applied. If there is no change in fracture location within the temperature range of interest the procedures known for base materials can be applied. A change in fracture location is to be regarded in a special way. Hence in the pre-assessment it has to be proven that a proper evaluation of fracture location is available for the tests. From these assessments mean creep rupture curves a minimum creep rupture curve can be derived. The weld strength factors for 100.000 h and if necessary 200.000 h for the welded joint are derived. If sufficient data for parent material and the welded joint are available weld and joint specific WSFs can be determined. Mean weld strength factors are factors derived as the quotient of mean weld creep rupture strength for crosswelds and the base material mean values given e.g. in a standard or in ECC data sheets. Extrapolation of weld strength factors is generally not recommended and only possible in a very limited time range. The weld strength factors are determined on the basis of

100,000 h – creep rupture strength of parent metal and welds.

In Figure 3 results from tests on P92 material are shown as an example showing a reasonable de-

crease in creep rupture strength after changing in fracture location. A summary of weld strength factors from recent research projects compared to factors given in 0 are shown in Figure 4.

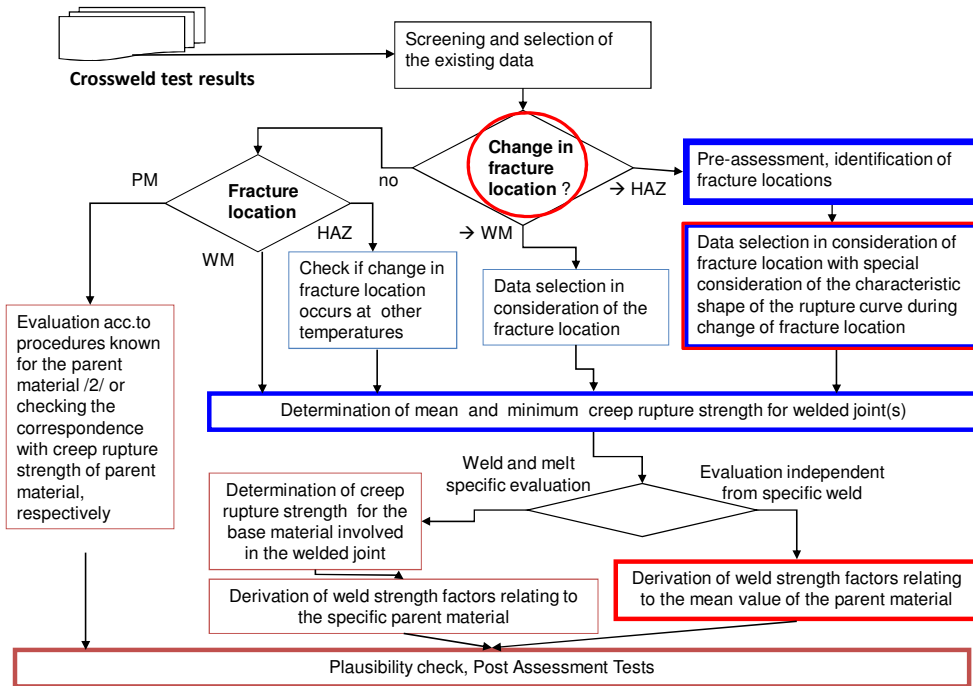


Figure 2: Determination of Weld Strength Factors

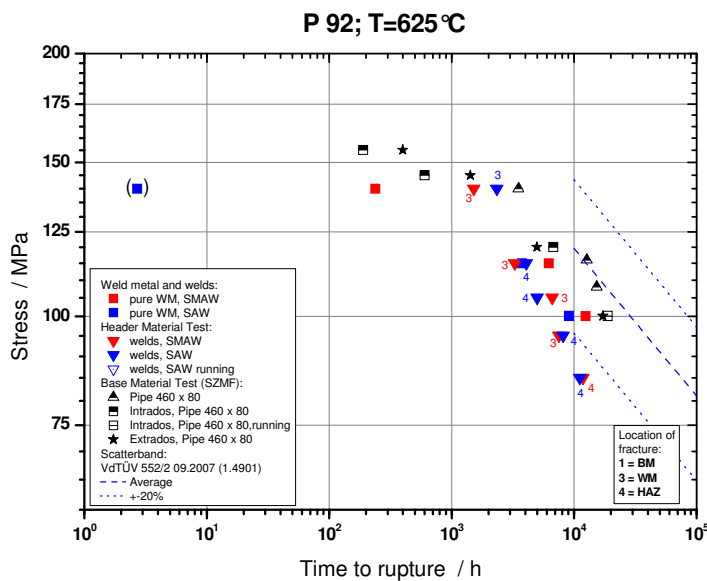


Figure 3: Results from crossweld creep tests on P92 material

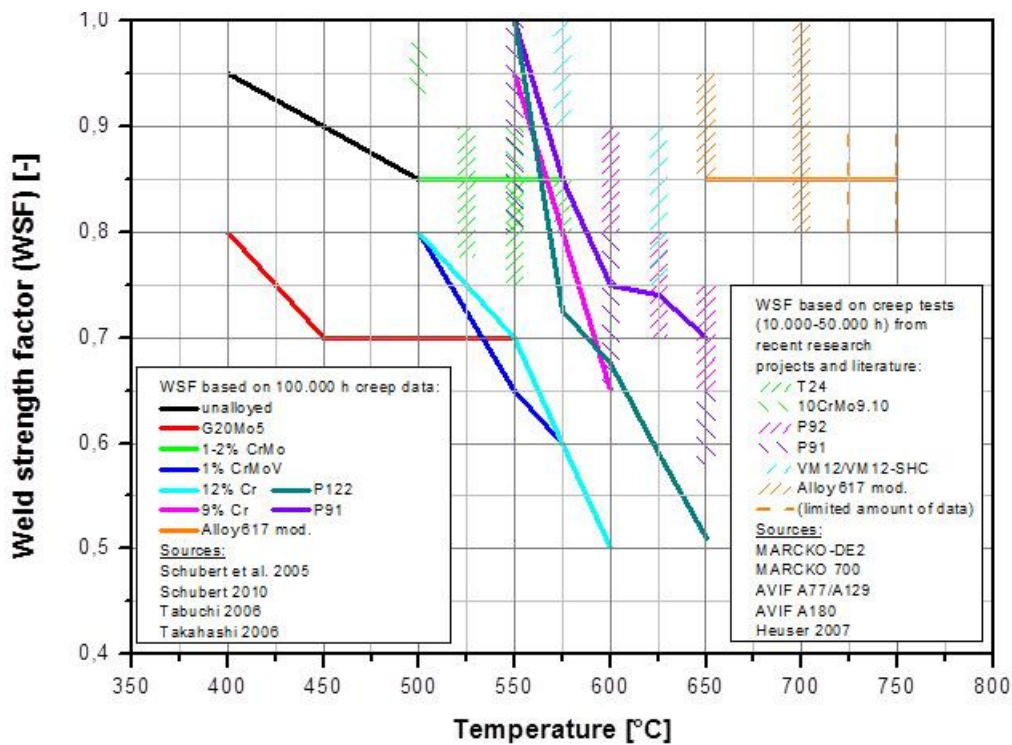


Figure 4: Weld strength factors for various steels and Ni based alloys

Assessment of welded joints

Beside the assessment using existing standards and codes a more advanced tool is the description by numerical methods. A prerequisite is the proper modeling of the creep behavior of all material zones involved: Base metal, weld metal and heat affected zones. In order to describe creep and relaxation behaviour of materials under high temperature loading - with the aim of advanced life time assessment - an incrementally formulated constitutive equation covering all three creep stages is needed. An incremental formulation allows the implementation in a user subroutine of modern FE-codes. The creep equation formulated by Graham and Walles 0 is an excellent base for a modern user subroutine to calculate stress relaxation behaviour as well as creep strains. The mentioned equation is listed below

$$\dot{\epsilon}_{Cr} = A_1 \sigma^{n_1} \epsilon_{Cr}^{m_1} + A_2 \sigma^{n_2} \epsilon_{Cr}^{m_2} + A_3 \sigma^{n_3} \epsilon_{Cr}^{m_3} \tag{1}$$

For the usage in modern R&D projects, this creep law was modified at MPA Stuttgart. This modifica-

tion includes the implementation of a damage parameter D to model tertiary creep by replacing the third term of the original Graham and Walles equation with an effective stress concept. With the help of the quotient of multiaxiality q 0 and a power law a multiaxial stress state is taken into account. The complete constitutive formulation of the modified Graham-Walles creep law is given below [3]:

$$\dot{\epsilon} = 10^{A1} \cdot \left(\frac{\sigma_{VM}}{(1-D)} \right)^{n1} \cdot \epsilon_{eq}^{m1} + 10^{A2} \cdot \left(\frac{\sigma_{VM}}{(1-D)} \right)^{n2} \cdot \epsilon_{eq}^{m2} \tag{2}$$

with:

$$\dot{D} = 10^{AD1} \cdot \left(\left(\frac{\sqrt{3}}{q} \right)^\alpha \cdot \sigma_{VM} \right)^{nD1} \cdot \tilde{\epsilon}^{mD1} + 10^{AD2} \cdot \left(\left(\frac{\sqrt{3}}{q} \right)^\alpha \cdot \sigma_{VM} \right)^{nD2} \cdot \tilde{\epsilon}^{mD2} \tag{3}$$

and:

$$\tilde{\epsilon} = \sqrt{\langle \epsilon_1 \rangle^2 + \langle \epsilon_2 \rangle^2 + \langle \epsilon_3 \rangle^2} \tag{4}$$

and the factor of multiaxiality q of the stress state:

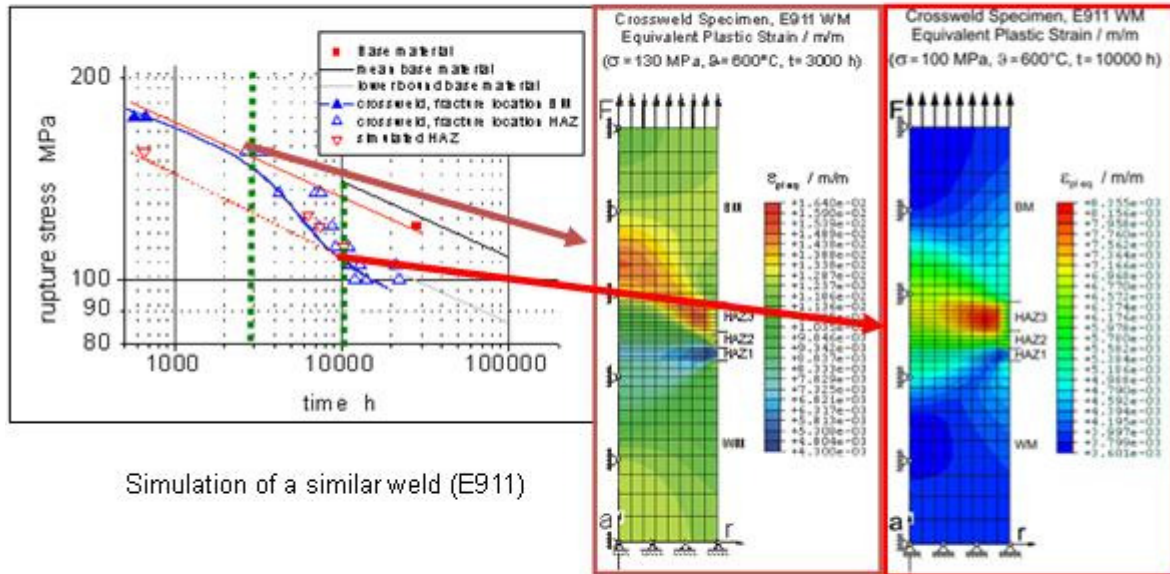
$$q = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\tau_{\text{okt}}}{\sigma_{\text{okt}}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_{\text{vM}}}{\sigma_{\text{hyd}}} \quad \text{with}$$

$$\sigma_{\text{hyd}} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

The influence of a weld seam on the creep deformation and stress relaxation behaviour of a component is investigated. In contradiction to ordinary plastic deformation, thermally and mechanically loaded materials benefit from coarse grain sizes because the coarse structure lowers the influence of diffusional creep. This effect plays an important role in the welding process of many steels and their creep rupture strength as well. Due to heat conduction during the weld process, material properties in this area change (grain size, strength, hardness etc.). In literature, the area of a weld seam influenced by heat conduction is designated as heat affected zone (HAZ) and can be separated in three areas (HAZ1, 2, 3). These zones are called coarse grain zone (HAZ1), fine grain zone (HAZ2) and intercritical or soft zone (HAZ3). Coarse grain zone (HAZ1) shows the best creep properties which are usually better than the creep properties of base material. The weakest link is usually set by the intercritical zone (HAZ3). Just like in HAZ2, HAZ3 shows very fine grain sizes and causes a reduction in creep resistance of a weld. In addition to that precipitations are not completely dissolved by the welding process and a coarsening of the precipitations can be identified. During creep exposure the dislocation density and sub grain size increases.

The capabilities of the model is shown by the numerical simulation of a crossweld test. A simulation of two tests with different stress levels on E911 cross-weld specimens are shown in Figure 5. The change of fracture location is obvious in this picture and gives the mean curve (dotted blue line) an "S-type" shape. This effect can be explained with the help of numerical investigations. Due to this, two FE-simulations at different stress levels representing fracture location in base material (BM,

130 MPa) and in heat affected zone (HAZ, 100 MPa) under consideration of three heat affected zones with different creep properties were accomplished. During creep relaxation processes, influenced by the different creep properties of the different material types in the heat affected zones, take place. This leads to a stress peak in coarse grain zone (HAZ1) which usually shows best creep properties. A stress peak in this area of the weld does not accumulate a large amount of creep strains. As it is demonstrated in simulation this stress redistribution causes a strain peak in base material (BM) at 130 MPa and 3.000 h of simulation time. In the second simulation representing 100 MPa and 10.000 h of simulation time, a large peak in creep strains can be identified in the intercritical zone (HAZ3). This demonstrates, that for higher stress levels, stress redistribution leads to a fracture or rupture in base material (BM) with delayed rupture time due to the supporting effect of this stress redistribution. At low stress levels, the influence of stress redistribution is less which means that the weak creep properties of the intercritical zone preponderate. Fracture location changes from base material (BM) to the heat affected zone (HAZ).



Simulation of a similar weld (E911)

Figure 5: Simulation of crossweld creep tests

This model can be also applied to components. Examples are shown in Figure 6 and 7. From these assessments more detailed and accurate conclusions can be drawn for the real time dependent creep and rupture behaviour of the components.

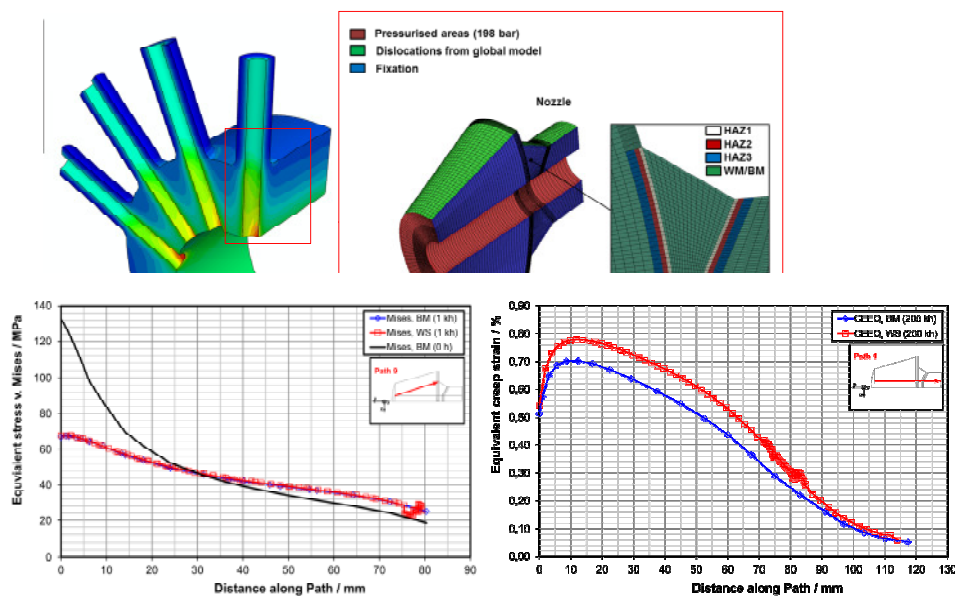


Figure 6: Simulation of nozzle weld in a header

In Figure 6 it could be shown that there is only little influence of the weld on the overall behaviour of the component.

Since the creep equation uses a damage parameter to describe the tertiary creep this damage parameter D can be evaluated as well as stress and strain state in the specimen. In Figure 7 the results of a

simulation of a tube fin weld in a water wall made of the new martensitic oxidation resistant steel VM12 is shown. It is visible that the simulation

show a reasonably good agreement in the localisation of the damage which is proven by metallographic examination.

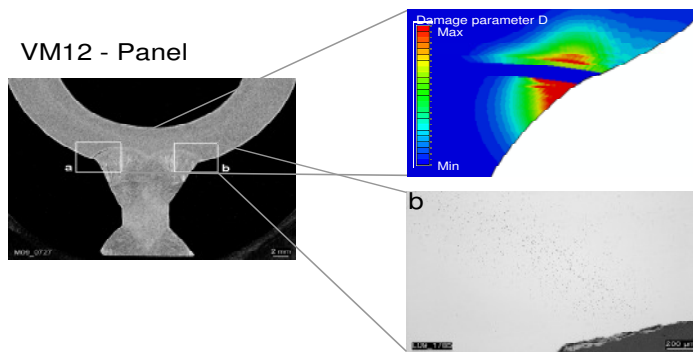


Figure 7: Simulation of a tube-fin weld of a VM12 water wall

Summary and Conclusions

- Despite strong efforts to avoid specific heat affected zone microstructure provoking Type IV character, behavior of martensitic welds has to be considered in weldments, i.e. the Weld produces its own stresses and stress states.
- Creep tests on P92 and VM12 show the well-known change of fracture location
- WSF have been determined for T/P92 and VM12/VM12-SHC (scatter bands, with data up to 30.000 h) ranging from 0.65 to 0.9.
- Numerical simulations of the deformation and relaxation behaviour of components including a weld can be evaluated using modified Graham-Walles Creep equation and show good correlation with the deformation behavior of the component.
- Specific component assessments by inelastic calculations may help to overcome deficiencies in component assessments with standards using weld strength factors
- Areas of high damage and high multi-axiality of the stress state can be determined, the results can be correlated with the microstruc-

tural findings on location of high damage accumulation.

8. Acknowledgements

Parts of the results reported in this paper were obtained in projects supported by the AVIF (Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metallverarbeitenden Industrie e.V.) under contract number A215 and by the Federal Ministry for Economy and Technology (BMWi) under contracts No 0326894 and 0327754B. This support is acknowledged.

9. References

- Abe, F., T.U. Kern and R. Viswanathan (Eds):** Creep resistant steels, Woodhead Publishing Limited Cambridge, 2008
- Abe, F. et al.:** Suppression of Type IV fracture and improvement of creep strength of 9 Cr welded joints by boron addition. *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, 84, pp. 44-52, 2007

Mayr, P. and H. Cerjak: New steel grade to overcome Type IV cracking, 33. MPA-Seminar, Stuttgart, 2007

Schubert, J., A. Klenk, and K. Maile: Determination of Weld Strength Factors for the Creep Rupture Strength of Welded Joints, Proceedings of the ECCC Creep Conference "Creep & Fatigue in High Temperature Components – Design & Life Assessment Issues", September 12-14 (2005), London, UK, pp. 792-805.

Bauer, M., A. Klenk, K. Maile and E. Roos: On the Application of Weld Strength Factors on Welded Components, Proceedings of the IIW International Conference "Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry", July 10-11 (2008), Graz, Austria.

Bauer, M.: Optimisation of weld creep performance in martensitic steels under high temperature loading. Ph.D. thesis, University of Stuttgart, 2009

Graham, A. and K. F. A. Walles: Relationships between Long- and Short-Time Creep and Tensile Properties of a Commercial Alloy, Journal of The Iron and Steel Institute, Vol. 179, pp. 104-121, 1955

Clausmeyer, H., K. Kußmaul und E. Roos: Influence of Stress State on the failure behaviour of cracked components made of steel, Appl. Mech. Rev. Vol. 44, 2, February 1991, ASME

Nachweis der Ausblassicherheit von Dichtungen im Zuge der Auslegung von Flanschverbindungen

Rolf Hahn, Hans Kockelmann und Eberhard Roos, Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart
Hariolf Kurz, Hecker Werke GmbH, Weil im Schönbuch

Technischer Hintergrund

Dichtungen sind in der Technik ein unverzichtbares Konstruktionselement. Sie garantieren die Funktion der Anlage sowie die Sicherheit bezüglich Mensch und Umwelt. Da in vielen technischen Bereichen mit mehr oder weniger gefährlichen Medien umzugehen ist, stellt die Dichtheit ein besonderes Kriterium dar. Als Beispiel kann die Energietechnik genannt werden: Wasserstoff, Erdgas und Biogas als wichtige zukünftige Energieträger stellen potenzielle „Klimakiller“ dar, sofern diese in die Atmosphäre gelangen. Angesichts der Vielzahl von Verbindungselementen in Tanks und Leitungen stellen schon geringste Undichten ein nicht zu unterschätzendes Problem dar. Die Einhaltung gesetzlich vorgeschriebener Dichtheitsanforderungen ist daher eine technische Herausforderung. Der Nachweis der Ausblassicherheit dient diesem Zweck.

Einleitung und Problemstellung

In den Technischen Regeln für die Handhabung von Gefahrstoffen wird der Begriff "Ausblassicherheit" verbunden mit der Forderung, dass „die Dichtungen nicht aus dem Sitz gedrückt werden können“. Ziel der Ausblassicherheit ist nach allgemeinem Verständnis die Verhinderung einer plötzlichen großen Leckage z.B. durch das Aufreißen einer Dichtung. Die Ausblassicherheit ist hauptsächlich bei glatten Flanschdichtleisten (beispielsweise bei emaillierten Flanschen) und bei geringer Dichtungspressung (z. B. bei Flanschverbindungen mit Kunststoffflanschen und demzufolge geringen Schraubenkräften sowie warmgehenden Flanschverbindungen mit Dichtungen, die zur Kriechrelaxation und damit zum Verlust der Dichtungsflächenpressung neigen) von Bedeutung.

Es gibt weltweit keine Normen und Richtlinien, die den Nachweis der Ausblassicherheit von Dichtungen für Flanschverbindungen regeln /1/. Andererseits fordern aber u. a.

- die Berufsgenossenschaftlichen Vorschriften (BGV),
- die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV),
- die DIN 8975 Teil 6 Kälteanlagen und
- die Richtlinie für Rohrleitungen zum Befördern wassergefährdender Stoffe (RRwS)

mit dem Ziel der Ausblassicherheit Dichtungen, die nicht aus dem Sitz gepresst werden können oder kammprofilierte, metallinnenrandgefasste, metall-armierte, metallummantelte oder metallische Dichtungen /1/.

Nach VDI 2200 /1/ wird bei den Flanschformen mit Nut und Feder oder Vor- und Rücksprung angenommen, dass Ausblassicherheit aufgrund der konstruktiven Gestaltung grundsätzlich gegeben ist. Bei einem Dichtsystem mit glatten Flanschen besteht dagegen die Vorstellung, dass Ausblassicherheit durch Dichtungsarten erreicht werden muss, die eine hohe mechanische Festigkeit aufweisen, z. B. aufgrund metallischer Verstärkungselemente. Als ausblassicher werden im Allgemeinen Metall- oder Metall-Weichstoff-Dichtungen angesehen, wie z. B. Kammprofil-Dichtungen, Spiraldichtungen, Wellringdichtungen, gebördelte Dichtungen, Graphitdichtungen mit Metalleinlagen, Gummi-Stahl-Dichtungen und PTFE-Lochblech-Dichtungen. Dieser Ansicht widersprechen allerdings Schadensfälle mit Ausblasen von Dichtungen der o. g. Arten.

Bei Gefahrstoffen kann aber auch eine plötzliche Änderung der Leckagerate um mehrere Größen-

ordnungen die Betriebssicherheit von Anlagen beeinträchtigen, was auch ohne Aufreißen der Dichtung auftreten kann. Dieser Aspekt ist deshalb auch in die Thematik Ausblassicherheit einzubeziehen. Bei Flanschverbindungen, die sicherheitsrelevant sind, für die dauerhaft Verfügbarkeit gefordert ist und für die aufgrund des Betriebsmediums (toxisch, entflammbar, umweltschädlich usw.) besondere Anforderungen bestehen, ist im Rahmen der Auslegung sowohl der Festigkeits- als auch der Dichtheitsnachweis zu führen. Der Dichtheitsnachweis gewährleistet u. a. die Einhaltung der Mindestflächenpressung der Dichtung im Einbauzustand ($Q_{\min(L)}$) und in allen Betriebszuständen ($Q_{S \min(L)}$) für den gegebenen Betriebsdruck und die geforderte Dichtheitsklasse L. Letztere hängt wiederum vom Gefahrenpotenzial des geförderten Mediums ab. Diesem Sachverhalt muss bei der Festlegung des Begriffs "Ausblassicherheit von Dichtungen in Flanschverbindungen" Rechnung getragen werden.

Durchgeführte Arbeiten / Lösungsweg

Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Ausblassicherheit von Flanschverbindungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Art der Dichtung (Werkstoff(e), Aufbau, Struktur)
- Höhe des Innendrucks
- Höhe der Dichtungsflächenpressung
- Temperatur (thermische Auslagerung)
- Betriebszeit bzw. Dauer der Innendruckbelastung
- Medium (abhängig von der Art der Dichtung)
- geforderte Dichtheitsklasse für das abgedichtete Medium
- Art der Flansche und Schrauben (Steifigkeit, Dichtleistenart u. a.)
- Montageverfahren (insbesondere Streuung der Schraubenkraft)
- Alterung der Dichtung

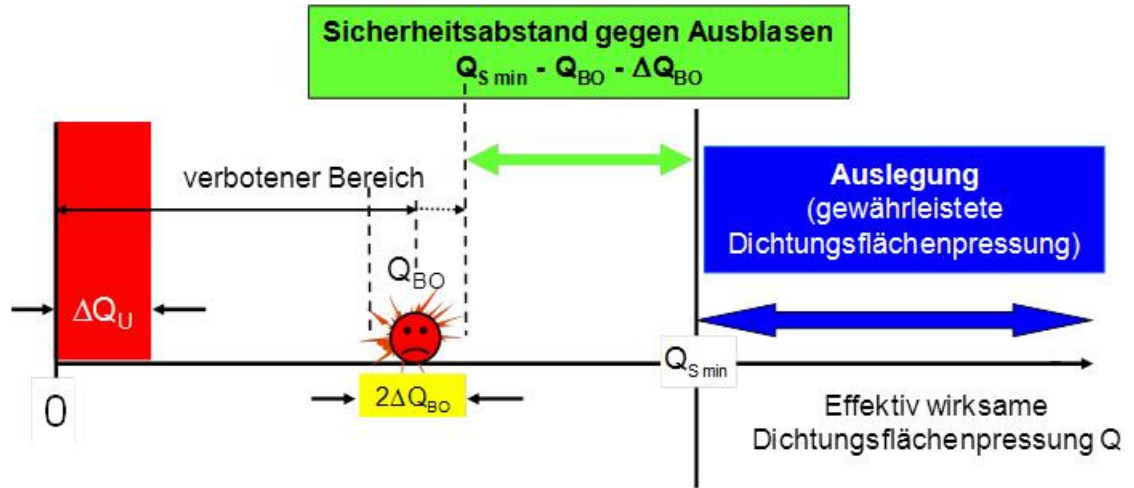
Die oben fett gedruckten wichtigsten Einflussgrößen wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens an der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart /2/ detailliert analysiert. Auszugsweise wird nachfolgend über die Ergebnisse berichtet.

Ergebnisse

Definition der Ausblassicherheit

Im Rahmen des Dichtheitsnachweises wird bei der Auslegung von Flanschverbindungen nachgewiesen, dass die Dichtungsflächenpressung in allen Betriebszuständen die geforderte Mindestflächenpressung $Q_{S \min(L)}$ für Dichtheitsklasse L nicht unterschreitet. Dieser Sachverhalt bildet die Basis für die Definition der Ausblassicherheit: als ausblassicher gilt eine Flanschverbindung, wenn die Dichtungsflächenpressung deutlich unterhalb von $Q_{S \min(L)}$ für den gegebenen Betriebsüberdruck abgesenkt werden oder abfallen darf, ohne dass

- A die Dichtung aufreißt bzw. Teile der Dichtung aus der Verbindung heraus gedrückt werden oder
- B eine grobe Leckage eintritt, die um mehr als 2 Größenordnungen größer ist, als es der geforderten Dichtheitsklasse L entspricht, wobei die Dichtung als Ganzes zwischen den Flanschdichtleisten verbleibt



- ΔQ_U : Unsicherheit in der Einstellung der Dichtungsflächenpressung bei der Montage
- Q_{BO} : Dichtungsflächenpressung bei Ausblasen
- ΔQ_{BO} : Unsicherheit in der Bestimmung von Q_{BO}

Bild 1: Sicherheit von Flanschverbindungen gegen Ausblasen

In Bild 1 sind auf der Skala der effektiv wirksamen Dichtungsflächenpressung Q (d. h. unter Berücksichtigung des Entlastungseffekts durch den Innendruck und äußere Zusatzlasten) der Dichtungskennwert $Q_{S\ min}$ und die Dichtungsflächenpressung Q_{BO} , bei der Ausblasen eintritt, eingetragen. Der Flächenpressungsbereich $Q < Q_{BO}$ bzw. $Q < Q_{BO} + \Delta Q_{BO}$, wenn die Unsicherheit ΔQ_{BO} in der Bestimmung von Q_{BO} berücksichtigt wird, ist nicht zulässig, da Ausblasen zu erwarten ist. Die Sicherheit gegen Ausblasen spiegelt sich in der Differenz zwischen $Q_{S\ min}$, dem nach der Auslegung in allen Betriebszuständen gewährleisteten Mindestwert der Dichtungsflächenpressung, und Q_{BO} wider. Wird der Sicherheitsbeiwert gegen Ausblasen S_{BO} gleich 1 gesetzt, wenn Q_{BO} bzw. $Q_{BO} + \Delta Q_{BO}$ (unter Berücksichtigung der Unsicherheit ΔQ_{BO}) = $\frac{1}{2} Q_{S\ min}$ ist, dann gilt allgemein für den Sicherheitsbeiwert S_{BO} gegen Ausblasen:

$$S_{BO} = \frac{Q_{S\ min}}{2 \cdot Q_{BO}} \quad \text{bzw.}$$

$$S_{BO} = \frac{Q_{S\ min}}{2 \cdot (Q_{BO} + \Delta Q_{BO})} \quad (1)$$

Bei sehr kleinen Werten für Q_{BO} , ermittelt unter idealen Bedingungen in einer Dichtungsprüfpresse (siehe Kap. 3.2), kann die Unsicherheit bei der Einstellung der Dichtungsflächenpressung bei der Montage realer Flanschverbindungen (ΔQ_U in Bild 1) größer sein als $Q_{BO} + \Delta Q_{BO}$. In diesem Fall ist dann der Flächenpressungsbereich $Q < \Delta Q_U$ nicht zulässig, s. Bild 1.

Die Ermittlung der Flächenpressung für Ausblasen ist in Kap. 3.2 beschrieben und erfolgt ähnlich wie bei der Ermittlung der Mindestflächenpressung im Betrieb $Q_{S\ min(L)}$ zur Einhaltung der Dichtheitsklasse L in einer Dichtungsprüfpresse unter gezielt herbeigeführter Reduktion der Flächenpressung, ausgehend von der Ausgangsflächenpressung Q_A (A: Assembly = Montagezustand). Dabei wird Q_{BO} als der Schnittpunkt des Entlastungsverlaufs mit der hundertfachen Leckagerate der einzuhaltenden Dichtheitsklasse L (100·L) definiert, Bild 2.

Der oben beschriebene Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsbeiwert gegen Ausblasen S_{BO} und dem Quotienten von $Q_{S\ min}$ und Q_{BO} erscheint zunächst einfach, wird allerdings dadurch kompliziert, dass sowohl der Dichtungskennwert ($Q_{S\ min}$) als auch die Dichtungsflächenpressung bei Ausblasen

Q_{BO} von der Ausgangsflächenpressung bzw. Einbaufächenpressung der Dichtung bei der Montage Q_A abhängen. Zur Erläuterung ist in Bild 3 beispielhaft das Ergebnis des Leckageversuchs nach

DIN EN 13555 /3/ für eine gummigebundene Faserdichtung in Form der Leckagerate in logarithmischer Skalierung als Funktion der Ausgangsflächenpressung Q_A dargestellt.

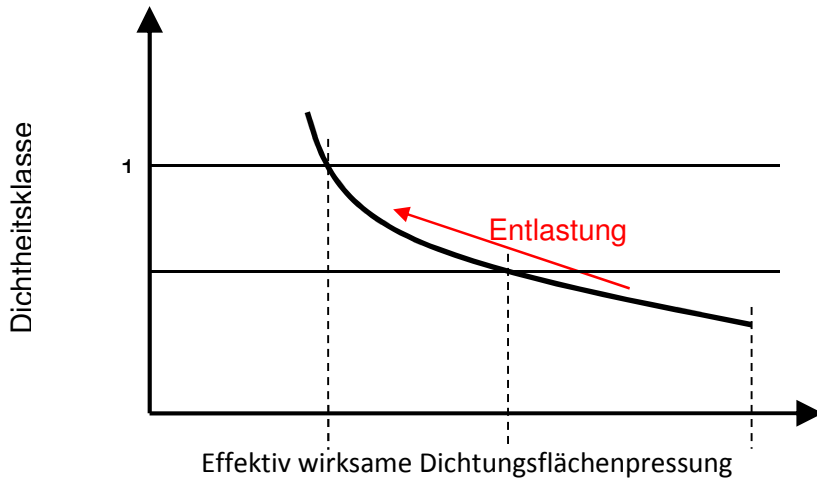


Bild 2: Ermittlung der Flächenpressung für Ausblasen Q_{BO} im Entlastungsversuch

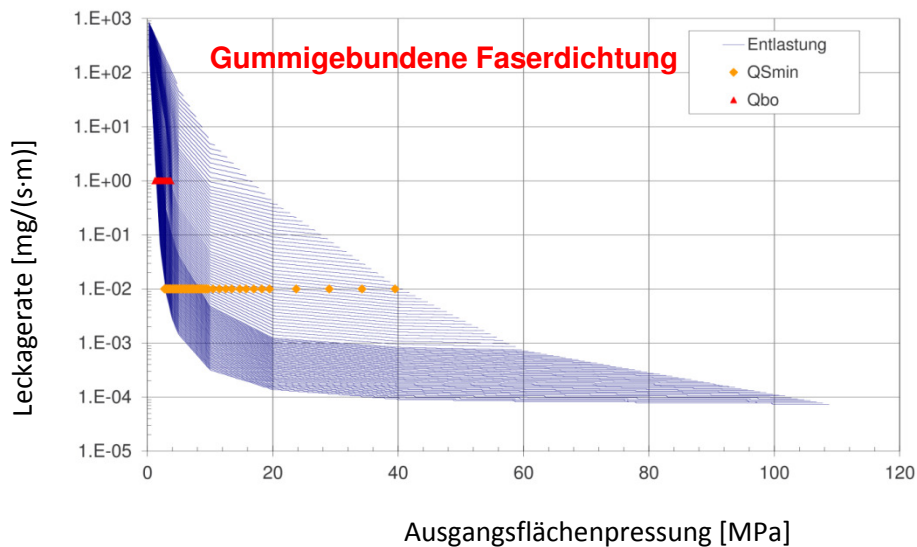


Bild 3: Erweitertes Leckagediagramm (Leckagerate als Funktion der Einbaufächenpressung Q_A ; Versuchsdaten und interpolierte Entlastungsfunktionen) sowie abgeleitete Werte für $Q_{S\min(0,01)}$ und Q_{BO}

In diesem Versuch werden nacheinander die Pressungsstufen 10, 20, 40, 60, 80, 100 MPa usw. eingestellt und jeweils stufenweise Zwischenentlastungen vorgenommen. Bei jeder Pressungsstufe wird die Leckagerate ermittelt. Für eine verdichtete Datenbasis wurde in /2/ ein Interpolationsalgo-

rithmus entwickelt, mit Hilfe dessen auch die Daten für Zwischenwerte der diskreten Pressungsstufen generiert werden können. Die Kombination der Versuchsdaten mit interpolierten Daten führt zu dem in Bild 3 dargestellten sogenannten Leckagediagramm (Leckagerate in Abhängigkeit von der

Einbaufächenpressung Q_A). Aus dieser Darstellung lassen sich Wertepaare Q_A und $Q_{S\ min\ (L)}$ ermitteln und zusätzlich auch die zugehörige Flächenpressung bei Ausblasen Q_{BO} . In Bild 3 sind die Werte $Q_{S\ min\ (0,01)}$ (Dichtheitsklasse $L_{0,01}$) und die zugehörigen Werte für Q_{BO} bei L_1 ($100 \cdot L_{0,01}$) eingetragen. Die Abhängigkeit des Dichtungskennwertes $Q_{S\ min\ (L)}$ (hier $Q_{S\ min\ (0,01)}$ für $L_{0,01}$), Q_{BO} und damit auch des Ausblassicherheitsbeiwertes S_{BO} von der Anfangspressung Q_A ist in Bild 4 dargestellt. Die Dichtheitsklasse $L_{0,01}$ wird im Montagezustand bei 40 MPa Dichtungsflächenpressung erreicht. Da die Leckagerate bei den Entlastungen steigt, eine deutliche Zunahme der Leckagerate bis hin zum Ausblasen allerdings erst bei sehr geringen Flächenpressungen eintritt, kommt es zu dem in Bild 4 dargestellten Verlauf der Ausblassicherheit. Beginnend bei 40 MPa Anfangspressung (Q_A) mit einem Ausblassicherheitsbeiwert S_{BO} von etwa 5 sinkt letzterer bei 50 MPa Anfangspressung auf 2 und endet bei 110 MPa Anfangspressung bei etwa 1. Dieser Sachverhalt, der zunächst paradox erscheint, wird dadurch

hervorgerufen, dass $Q_{S\ min}$ sehr stark mit steigendem Q_A abfällt, Q_{BO} hingegen nur schwach. Hieraus resultiert der starke Abfall des Ausblassicherheitsbeiwertes S_{BO} , sofern die Absenkung der $Q_{S\ min}$ -Werte mit steigendem Q_A in vollem Umfang in Anspruch genommen wird. Für hinreichende Sicherheit gegen Ausblasen kann es deshalb ratsam sein, bei der Auslegung von Flanschverbindungen einen höheren Wert für $Q_{S\ min}$ anzusetzen, als die Dichtungsprüfung nach DIN EN 13555 /3/ ausweist.

Entlastungsversuch zur Ermittlung der Ausblassicherheit

In Bild 5 ist der zeitliche Ablauf der Flächenpressung, des Innendrucks und der Dichtungsdicke beim Entlastungsversuch zur Ermittlung der Ausblassicherheit exemplarisch dargestellt. Die Flächenpressung wird, ausgehend von Q_A , stufenweise reduziert. Bei jeder Flächenpressungsstufe wird die Leckagerate mittels der Differenzdruckmethode ermittelt.

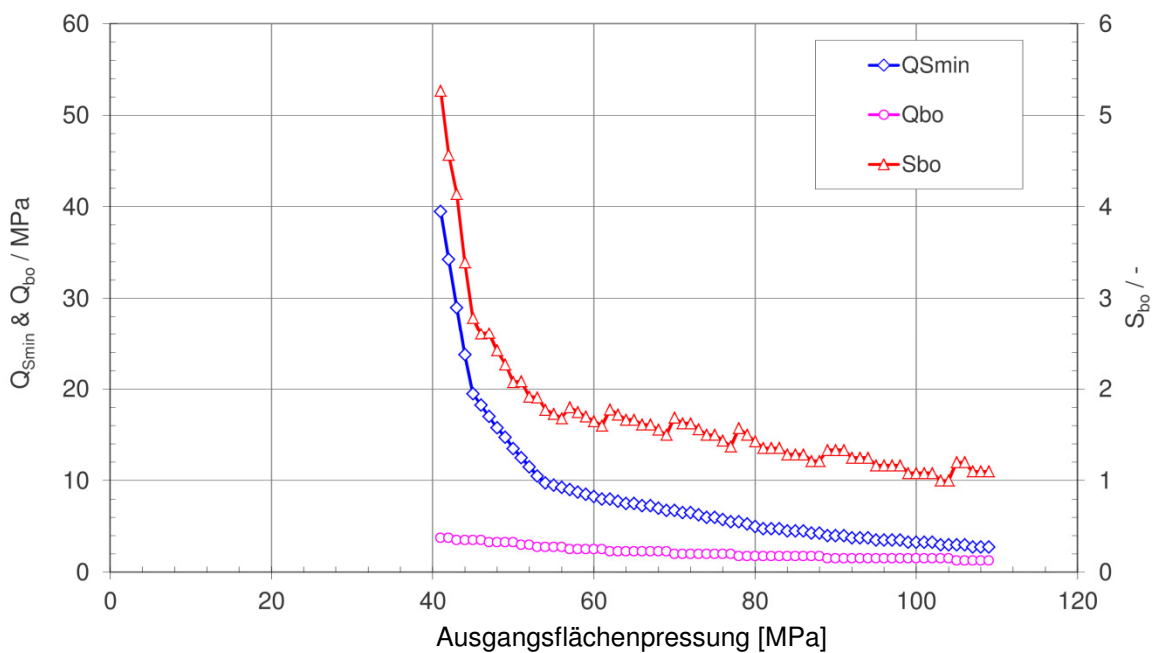


Bild 4: Einfluss der Anfangspressung Q_A auf $Q_{S\ min\ (0,01)}$, Q_{BO} und den resultierenden Ausblassicherheitsbeiwert S_{BO}

Die Ergebnisse der Prüfung einer Dichtung auf der Basis von PTFE entsprechend Bild 5 sind in Bild 6 als Leckagerate über der Dichtungsflächenpressung für die Dichtheitsklasse $L_{0,01}$ dargestellt. Bei einer Ausgangsflächenpressung Q_A von 14 MPa ergibt sich der Dichtungskennwert $Q_{S \min(0,01)}$ zu 4 MPa. Nach der oben erläuterten Definition der Ausblas-

sicherheit wird die Flächenpressung beim Ausblasen Q_{B0} als Schnittpunkt der Funktion mit der Dichtheitsklasse L_1 , dem Hundertfachen der im Dichtheitsnachweis einzuhaltenden Dichtheitsklasse $L_{0,01}$, durch lineare Interpolation zu etwa 2,6 MPa bestimmt.

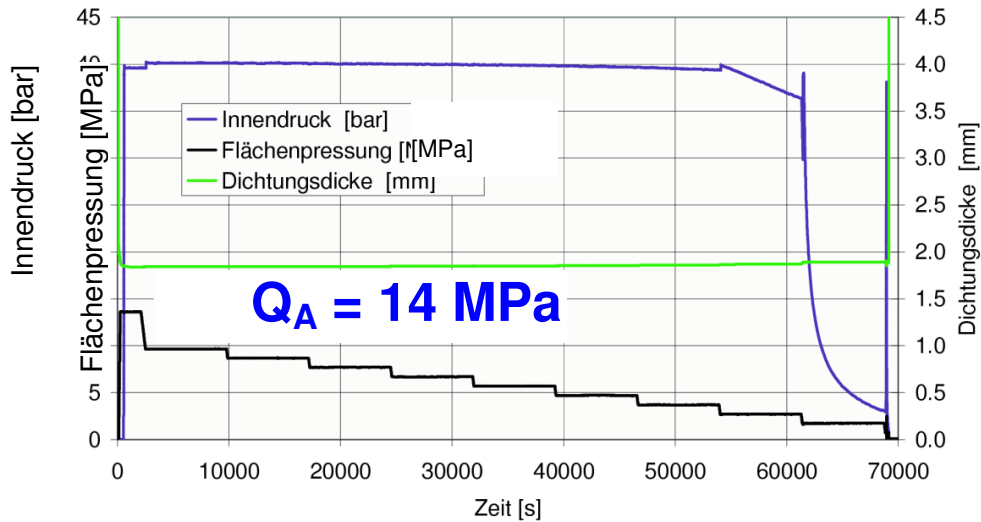


Bild 5: Versuchsablauf mit stufenweiser Entlastung: zeitlicher Verlauf von Dichtungsflächenpressung, Innendruck und Dichtungsdicke (PTFE-Dichtung)

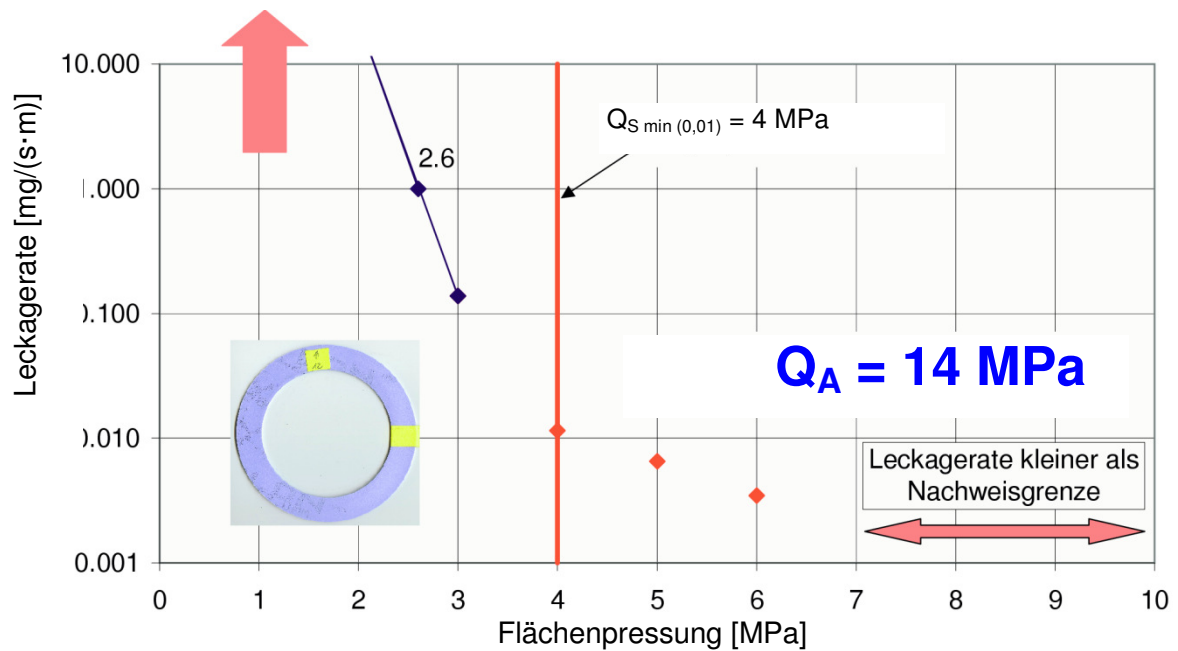


Bild 6: Versuch mit stufenweiser Entlastung: Ermittlung der Leckagerate aus Bild 5 (PTFE-Dichtung)

Der Umfang der in /2/ durchgeführten Untersuchungen lässt sich im Wesentlichen wie folgt kurz zusammenfassen:

- Es wurden 12 unterschiedliche Dichtungstypen in die Untersuchungen einbezogen: PTFE-Dichtungen in verschiedenen Ausführungen und Vorbehandlungen, Graphit-Spiralringdichtungen, Graphitdichtungen mit Glattblecheinlage und Innenbördel, gummigebundene Faserdichtungen, Kammprofil-dichtungen mit Graphitauflagen, Wellringdichtungen mit Graphitauflagen und Innenbördel.
- An unterschiedlich steifen Flanschverbindungen (DN100 PN16 und DN100 PN160) wurden systematische und statistisch abgesicherte Untersuchungen zum Einfluss der Flanschblattneigung, des Innendrucks und einer langzeitigen thermischen Auslagerung durchgeführt.
- Die Ausblassicherheit von emaillierten Bunden mit Losflanschen und PTFE-Hüllendichtung mit Graphiteinlage sowie Flanschverbindungen mit GFK-Flanschen als besonders kritische Anwendungen hinsichtlich Ausblasgefahr wurde untersucht.

Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen lassen sich die nachfolgend aufgeführten Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Sinnfälligkeit der Definition der Ausblassicherheit und der entsprechenden Nachweisführung im Zuge der Auslegung ist bestätigt.
- Unabdingbare Voraussetzung für die Bewertung einer Flanschverbindung hinsichtlich Ausblassicherheit ist die Kenntnis der Dich-

tungskennwerte (Abdicht- und Kriech-Relaxations-Eigenschaften).

- Die entwickelte experimentelle Vorgehensweise zum Nachweis der Ausblassicherheit ermöglicht die Ermittlung des Einflusses der relevanten Einflussgrößen.
- Die Prüfung der Ausblassicherheit in einer Dichtungsprüfmaschine deckt das Ausblasverhalten realer Flanschverbindungen konservativ ab; dies gilt insbesondere auch für emaillierte Bunde mit Losflanschen sowie Flanschverbindungen mit GFK-Flanschen.
- Die Ermittlung der Ausblassicherheit in der Prüfmaschine bei Raumtemperatur ist in allen untersuchten Fällen abdeckend für die Ausblassicherheit einer unter Temperatur ausgelagerten Flanschverbindung.
- Bei Weichstoffdichtungen auf der Basis von PTFE wurden vier unterschiedliche Verhaltenstypen hinsichtlich Ausblassicherheit festgestellt, die das Gefährdungspotenzial in Form von Ausblasen charakterisieren, siehe schematische Darstellung in Bild 7 mit der nachfolgend diskutierten Einteilung nach Verhaltenstypen.

Typ 0:

Die Leckagerate bleibt bei Entlastung bis herab auf die niedrigste Pressungsstufe 1 MPa auf nahezu gleichbleibendem niedrigem Niveau unterhalb von 0,01 mg/(s·m). Es gibt keinerlei Anzeichen für ein beginnendes Ausblasen. Die übliche Auslegung (Nachweis der Einhaltung der Mindestpressung $Q_{S \min (L)}$) deckt auch den Aspekt „Ausblassicherheit“ ab, sofern $Q_{S \min (0,01)} > 2 \text{ MPa}$ ist.

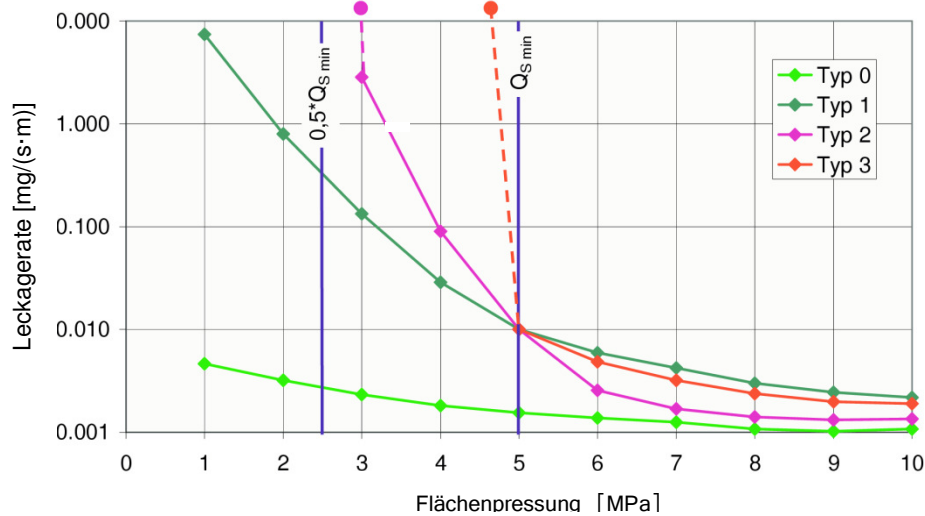


Bild 7: Schematische Darstellung der Ausblasverhaltenstypen bei PTFE-Dichtungen

Typ 1:

Die Leckagerate steigt mit abnehmender Dichtungspressung stetig, gleichmäßig und in begrenztem Maße an. Das Ausblaskriterium (100-fache Erhöhung der Leckagerate) wird erst nach einer Absenkung der Dichtungspressung um mehr als 50 % des Wertes für $Q_{S \min(0,01)}$ erreicht. Ein tatsächliches Ausblasen tritt bis dahin nicht auf. Dieses Verhalten kann als „gutmütig“ und „kalkulierbar“ hinsichtlich Ausblassicherheit angesehen werden. Die übliche Auslegung (Nachweis der Einhaltung der Mindestpressung $Q_{S \min(L)}$) deckt auch den Aspekt „Ausblassicherheit“ ab.

Typ 2:

Eine Unterschreitung von $Q_{S \min(0,01)}$ auf einen Wert oberhalb von $Q_{S \min(0,01)} / 2$ führt zum Ausblasen der Dichtung. In diesem Fall ist der Ansatz einer höheren Mindestflächenpressung in der Auslegung, als es $Q_{S \min(0,01)}$ entspricht, bzw. die Verwendung eines höheren Sicherheitsbeiwerts zur Gewährleistung der Ausblassicherheit erforderlich.

Typ 3:

Bei Entlastung minimal unterhalb von $Q_{S \min(0,01)}$ tritt schlagartig Ausblasen auf. Ein hinreichender Sicherheitsabstand zur kritischen Dichtungspressung in Form einer entsprechend hohen Mindestflächenpressung bei der Auslegung ist geboten.

Ausblassicherheitsnachweis im Rahmen der Auslegung von Flanschverbindungen

Zum Nachweis der Ausblassicherheit ist die Kenntnis des Dichtungskennwertes $Q_{S \min(L)}$ für die zugrunde zu legende Dichtheitsklasse L und der zugehörigen Flächenpressung für Ausblasen Q_{BO} erforderlich. Beide Kennwerte sind von der Anfangsflächenpressung (Q_A ; entspricht der Einbauflächenpressung bei der Montage) abhängig und werden im Leckageversuch ermittelt. Hierzu muss der Standard-Leckageversuch nach DIN EN 13555 /3/, in dem die Flächenpressung auf minimal 10 MPa nach unten begrenzt ist und bei der Ausblasen in der Regel nicht auftritt, auf den Bereich niedrigerer Flächenpressungen (bis herab auf 1 MPa) erweitert werden. Ein Vorschlag für ein neues Prüfkonzept ist in /2/ ausgearbeitet und führt zu dem in Bild 3 dargestellten erweiterten Leckagediagramm.

Die Ermittlung des Ausblassicherheitsbeiwertes erfolgt nach Gl. 1 in Kapitel 3.1, welche als Abfrage in den Ablauf der Flanschverbindungsrechnung integriert werden kann. Die Anfangsflächenpressung Q_A und die Flächenpressung im Betrieb bzw. deren nachgewiesener Mindestwert wird iterativ bestimmt.

In Bild 8 ist ein Flussdiagramm zum Ablauf der Flanschverbindungsrechnung in Anlehnung an

KTA 3211.2 /4/ dargestellt, in welches die Abfrage zur Ausblassicherheit integriert ist.

Nachweis der Ausblassicherheit für Flanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss

Zur Bewertung der Ausblassicherheit von Flanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss (KNS), Bild 9, wird auf die Definition der Ausblassicherheit von Kraftauptschlussverbindungen zurückgegriffen. Ausblasen ist demnach gegeben, wenn die Leckagerate die geforderte Dichtheitsklasse um den Faktor 100 übersteigt

oder wenn die Dichtung versagt und aus dem Sitz gepresst wird, so dass grobe Leckage eintritt.

Anders als bei Kraftauptschlussverbindungen wird die Flächenpressung der KNS-Dichtung im Betrieb bei der Auslegung nicht ausgewiesen. Die Dichtheit der Flanschverbindung wird mit der Spalthöhe in der Dichtungsmittte bewertet, Bild 10. Im Rahmen der Dichtungsprüfung wird die maximal zulässige Rückfederung der Dichtung $R_{zul(L)}$ für die Einhaltung der geforderten Dichtheitsklasse L ermittelt. Die Spalthöhe resultiert aus der gegensinnigen Rotation der beiden Flansche um den Kontaktpunkt.

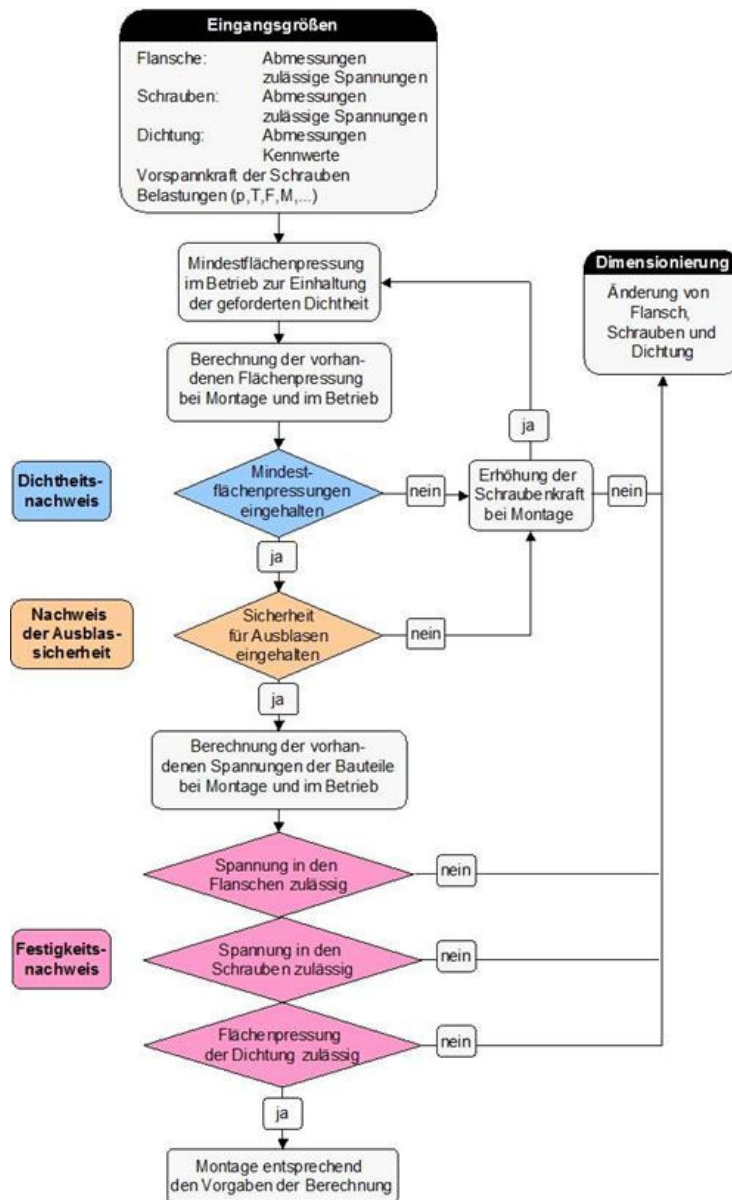


Bild 8: Schema des Berechnungsganges bei der Flanschverbindungsrechnung nach KTA 3211.2 /4/ mit integriertem Nachweis der Ausblassicherheit

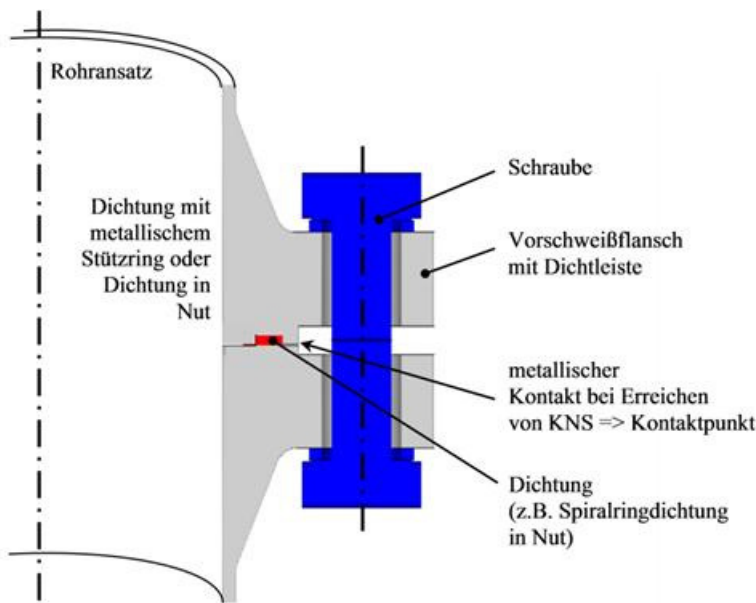


Bild 9: KNS-Flanschverbindung im Schnitt (schematisch)

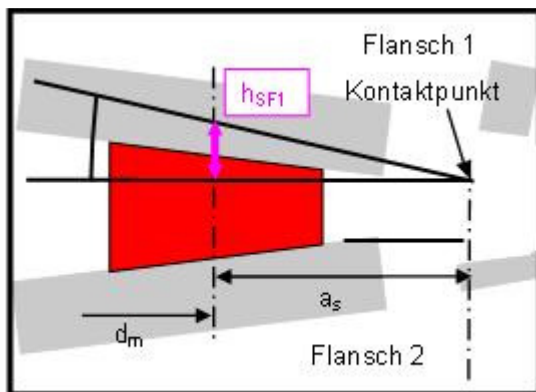


Bild 10: Ermittlung der Spalthöhe in Dichtungsmitte als Maß für die Dichtheit von KNS-Flanschverbindungen

Wird die Flanschblattneigung über dem Querschnitt als konstant angenommen, so berechnet sich die Spalthöhe h_s in der Dichtungsmitte konservativ (die Neigung der Dichtleiste ist immer kleiner als die Flanschblattneigung) nach:

$$h_s = h_{SF1} + h_{SF2} = a_s (\tan \gamma_{F1} + \tan \gamma_{F2}) \quad (2)$$

mit

- h_{SF1} : Spalthöhe Flansch 1
- h_{SF2} : Spalthöhe Flansch 2
- a_s : Abstand Kontaktpunkt - Dichtungsmitte
- γ_{F1} : Flanschblattneigung Flansch 1
- γ_{F2} : Flanschblattneigung Flansch 2

Die Flanschblattneigung wird nach Gleichung A 2.10-25 (Entwurf KTA 3211.2 (2003) /4/) berechnet:

$$\gamma = \frac{\sigma_{A-A} \cdot 0,75 \cdot (d_F + d_i) \cdot 180}{E_{FRT} \cdot (h_F + h_B) \cdot \pi} \quad (3)$$

Dabei stellt σ_{A-A} die resultierende Primärspannung im Schnitt A-A dar:

$$\sigma_{A-A} = \frac{M_E}{W_{A-A}} \quad (4)$$

mit dem wirkenden Einbaumoment M_E und dem Widerstandsmoment W_{A-A} im Schnitt A-A nach Gleichung A 2.10-13 des Entwurfs KTA 3211.2

(2003) /4/. Die restlichen Größen in Gl. 3 sind in /4/ wie folgt definiert:

- E_{FRT} : Elastizitätsmodul des Flanschwerkstoffs bei Raumtemperatur
- d_f : Flanschaußendurchmesser
- d_i : Flanschinnendurchmesser
- h_B : Wirksamer Anteil der Flanschzarge an der Steifigkeit des Flanschanschlusses
- h_f : Wirksame Höhe des Flanschblattes

Die Dichtheit der Flanschverbindung ist eingehalten, wenn gilt:

$$h_S \leq R_{zul(L)} \tag{5}$$

bzw. mit dem Grenzwert für Ausblasen $R_{BO(L)}$:

$$h_S \leq 2 \cdot R_{BO(L)} \tag{6}$$

Die Definition der Ausblassicherheit erfolgt sinngemäß in Anlehnung an Gleichung 1:

$$S_{BO} = \frac{R_{BO(L)}}{2 \cdot R_{zul(L)}} \tag{7}$$

Diese Forderung ist nur gültig, sofern die Einhaltung der Blocklage rechnerisch nachgewiesen ist. Die prüftechnische Ermittlung der zulässigen Spalthöhe für die Dichtheitsklasse L und die Spalthöhe bei Ausblasen ist in /2/ beschrieben.

Das vorgestellte neue Konzept für den Nachweis der Ausblassicherheit von Flanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss wurde in /2/ am Beispiel einer Graphit-Spiralringdichtung in einer Nut erprobt und validiert.

Theoretische Analyse der Ausblassicherheit

Zur theoretischen Analyse der Ausblassicherheit wird die Kräftebilanz bzw. der Zusammenhang zwischen der Belastung der Dichtung (Innendruckkraft und Dichtungskraft) und der Dichtungsreibungskraft beziehungsweise der Beanspruchung der Dichtung in Umfangsrichtung bei radialer Aufweitung hergeleitet, Bild 11.

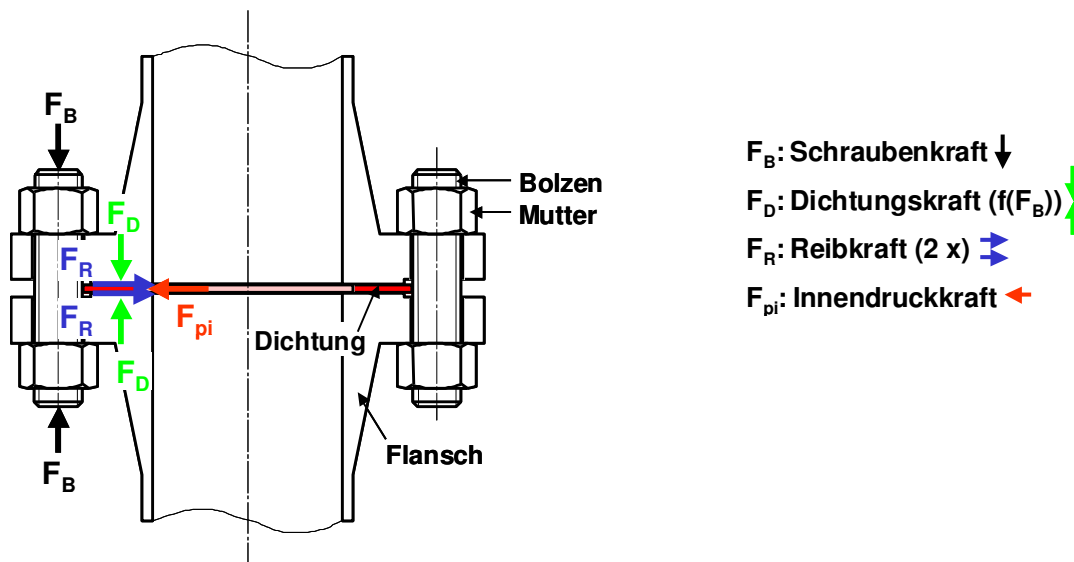


Bild 11: Belastungssituation der Dichtung unter Innendruck

- Ausblassicherheit durch Eigenfestigkeit der Dichtung

Die tangentielle Zugkraft F_z in der Dichtung infolge des Innendrucks p_i beträgt:

$$F_z = \frac{1}{2} h_D \cdot d_D \cdot p_i \quad (8)$$

mit h_D : Dichtungsdicke
 d_D : mittlerer Dichtungsdurchmesser

Ausblassicherheit durch Eigenfestigkeit der Dichtung ist gegeben, wenn die Tangentialspannung in der Dichtung σ_z kleiner ist als die Zugfestigkeit der Dichtung R_{mD} (z. B. nach DIN 52910):

$$\sigma_z = \frac{1}{2} \frac{d_D}{b_D} \cdot p_i \leq R_{mD} \quad (9)$$

mit b_D : Dichtungsbreite

- Ausblassicherheit durch Reibkraft infolge Dichtungskraft

Die Reibkraft F_R wirkt in beiden Kontaktflächen „obere Flanschdichtleiste - Dichtungsobenseite“ und „Dichtungsunterseite - untere Flanschdichtleiste“. Für Ausblassicherheit muss die Gesamtreibkraft $2 \cdot F_R$ größer sein als die austreibende Innendruckkraft F_{pi} :

$$2 \cdot F_R \geq F_{pi} = \pi \cdot h_D \cdot d_D \cdot p_i \quad (10)$$

Für die Dichtungskraft F_D ergibt sich mit

$$F_R = \mu \cdot F_D$$

$$F_D \geq \frac{\pi}{2\mu} \cdot h_D \cdot d_D \cdot p_i \quad (11)$$

- Ausblassicherheit durch Eigenfestigkeit und Reibkraft

Zur Ausblassicherheit tragen sowohl die Reibkraft als auch die Kraft entsprechend der Eigenfestigkeit der Dichtung bei. Für die Dichtungskraft F_D ergibt sich damit die Forderung (modifizierte Gleichung (15) aus /5/):

$$F_D \geq \frac{1}{2 \cdot \mu} (\pi h_D \cdot d_D \cdot p_i - 2 h_D \cdot b_D \cdot R_{mD}) \quad (12)$$

Zur Bestimmung der Reibkoeffizienten μ der Paarung Dichtung - Flanschdichtleiste werden die Gleichungen 11 oder 12 nach μ aufgelöst. Ergebnisse für verschiedene Dichtungen auf der Basis von PTFE - ermittelt in Ausblasversuchen im Moment des Ausblasens, also bei Gleichheit der beiden Terme in den Gleichungen 11 und 12 - sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Angaben stimmen gut mit dem Wert $\mu = 0,05$ für PTFE-Dichtungen in KTA 3211.2 /4/ überein.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Voraussetzung für den Nachweis der Ausblassicherheit von Flanschverbindungen ist die Auslegung mit Festigkeits- und Dichtheitsnachweis, da die Ausblassicherheit insbesondere von der Dichtungspressung bei der Montage und im Betrieb abhängt, die wiederum bei der Berechnung der Flanschverbindung bestimmt werden. In diesem Beitrag wurde ein Weg aufgezeigt, wie der Aspekt Ausblassicherheit in die bestehenden Regelwerke zur Auslegung von Flanschverbindungen integriert werden kann. Weiterhin wurde ein neues Konzept für den Nachweis der Ausblassicherheit von Flanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss vorgestellt. Der theoretische Hintergrund des Ausblasens einer Flanschverbindung wurde durchleuchtet. Die Grundzusammenhänge wurden analytisch formuliert als Zusammenhang zwischen der ausblasfördernden Innendruckkraft auf die Dichtung und der ausblashemmenden Reibkraft sowie Festigkeit der Dichtung in Umfangsrichtung (Widerstand gegen radiale Aufweitung).

Schließlich wurde auf der Basis experimenteller Dichtungsprüfungen gezeigt, dass die Untersuchung der Ausblassicherheit von Dichtungen in einer Dichtungsprüfpresse mit biegesteifen Prüfplatten bei Raumtemperatur abdeckend ist für

- reale Flanschverbindungen mit Flanschblattnähe und endlicher Schraubenteilung,
- Flanschverbindungen unter betrieblichen Randbedingungen (Temperatur / Innendruck / Betriebsdauer),

Flanschverbindungen mit emaillierten Flanschen mit besonders glatter Dichtleiste und

- Flanschverbindungen mit GFK-Flanschen mit geringer Dichtungspressung.

Literatur

/1/ VDI-Richtlinie 2200: Dichte Flanschverbindungen - Auswahl, Auslegung, Gestaltung und Montage von verschraubten Flanschverbindungen (2007)

/2/ AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15935 „Ausblassichere Dichtungen für Flanschverbindungen mit emaillierten und glasfaserverstärkten Kunststoffflanschen in der chemischen Industrie“; Abschlussbericht April 2011, MPA Stuttgart

/3/ DIN EN 13555: Flansche und ihre Verbindungen, Dichtungskennwerte und Prüfverfahren für die Anwendung der Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtungen (Februar 2005)

/4/ KTA 3211.2 (6/1992): Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung
Regeländerungsentwurfsvorschlag (3/2003)

/5/ M. Becker, S. Hofmann, A. Riedl und W. Tietze, Beitrag zur Berechnung der Ausblassicherheit unverstärkter Flachdichtungen VDI Bericht 1579, Zuverlässig Abdichten, Baden-Baden, 2000

Tabelle 1: Reibkoeffizienten entsprechend Gleichung 11, ermittelt aus Entlastungsversuchen an vier verschiedenen PTFE-Dichtungen

Maße Dichtung / mm Maße Dichtleiste / mm	Material	Reibkoeffizient μ
161,4 x 139,4 x 3,07 160 x 140 (Stahl)	PTFE gefüllt	0,05
160,6 x 140,0 x 2,31 160 x 140 (Stahl)	PTFE gefüllt mit Glaskugeln	0,045
161,0 x 140,4 x 2,39 160 x 140 (Stahl)	PTFE gefüllt mit Glaskugeln	0,04
161,3 x 119,3 x 3,25 160 x 120 (Stahl)	PTFE gefüllt	0,04

Beitrag zum Nachweis auswaschbarer organischer Verbindungen aus Baustoffen.

Vergleich der Ergebnisse von Untersuchungen mit Kernresonanzspektrometrie ($^1\text{H-NMR}$) mit den Gehalten an Total Organic Carbon (TOC) wässriger Lösungen und Eluate

Volland G., Vollpracht A*, Krause G. und Knjasev V., Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart

* Institut für Bauforschung IBAC RWTH Aachen

Einleitung

Im Grundsatzpapier des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser werden die im Zusammenhang mit dem Grundwasserschutz notwendigen Vorgaben für die Zulassung von Bauprodukten beschrieben. Für einer Reihe anorganischer und organischer Parameter wie z.B. Schwermetalle oder polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe liegen genormte Prüfmethoden und Richt- bzw. Grenzwerte (Geringfügigkeitsschwellen) vor und sind im Grundsatzpapier beschrieben [1].

Für zahlreiche organische Parameter, die von Bauprodukten beim Kontakt mit Grundwasser ausgewaschen werden können liegen jedoch keine Geringfügigkeitsschwellen vor. Parallel dazu sind die eluierten organischen Verbindungen in der Regel nicht bekannt. In diesen Fällen ist vorgesehen, die Beurteilung über den Gehalt an TOC (Total Organic Carbon) im Eluat in Verbindung mit biologischen Testverfahren durchzuführen. Je nachdem ob das Produkt während oder nach der Aushärtungsphase mit dem Grundwasser in Kontakt kommt, sollte ein Richtwert von 200 mg TOC/l Eluat (Kontakt mit Grundwasser während der Aushärtungsphase) bzw. 20 mg/l beim Kontakt mit dem Grundwasser nach der Aushärtungsphase gelten. Da die Beurteilung der Toxizität nur anhand des TOC nicht möglich ist, wurde diese Formulierung bei der Überarbeitung des Grundsatzpapiers herausgenommen. In den Kapiteln zu Schleierinjektionen und Kanalrohrsanierungsmitteln (in Bearbeitung) wird nun eine andere Herangehensweise gewählt: Bei einer

Erhöhung des TOC im Vergleich zum Prüfwasser müssen ökotoxikologische Untersuchungen durchgeführt werden. In jedem Fall muss der TOC des Eluats nach einer Versuchszeit von längsten 4 Wochen wieder dem TOC Prüfwassers (Leitungswasser) entsprechen. Das dargestellte Verfahren zwingt zu biologischen Test, wenn nicht für alle Inhaltsstoffe die ökotoxikologische Unbedenklichkeit belegt ist [1].

Die ökotoxikologische Unbedenklichkeit ist wie alle Dosis-Wirkungsbeziehungen eine Funktion der Konzentration des Stoffe und der Wirkzeit. Es erscheint daher von wesentlichem Interesse, die real in Eluaten gegebenen Konzentrationen einzelner Inhaltsstoffe zu ermitteln und damit zu beurteilen. Soweit diese Stoffe bekannt sind und für einzelne Bauprodukte der Zusammenhang zwischen den Konzentrationen dieser Verbindungen im Eluat und dem TOC bekannt ist, kann der TOC als ausreichend sicheres Kriterium zur Beurteilung einer potentiellen Grundwassergefährdung herangezogen werden.

Für die wasserlöslichen und damit auswaschbaren Inhaltsstoffe von Betonen konnte gezeigt werden, dass die Kernresonanzspektrometrie ($^1\text{H-NMR}$) eine geeignete Methode ist, diese organischen Inhaltsstoffe in wässrigen Lösungen (wässrige Extrakte/Eluate) zu identifizieren und zu quantifizieren [2,3]. Im Rahmen einer Untersuchung zur Auswaschung organischer Inhaltsstoffe aus Betonen in Trogeluaten wurde primär zur Abschätzung der Plausibilität der Untersuchungsergebnisse der

NMR-Methode die Korrelation eines rechnerischen Gesamtkohlenstoffgehaltes mit dem parallel gemessenen TOC-Gehalten herangezogen. In der vorliegenden Arbeit werden Ergebnisse der Bestimmung der organischen Inhaltsstoffe in Trogeleuaten von Beton, und ausgehärtetem Acrylatgel, in ausgepressten Porenwässern, und in Säuleneluaten von Schleierinjektionsmitteln den nach DIN EN 1484 ermittelten TOC- bzw. DOC-Gehalten dieser Proben gegenübergestellt. Nach Identifikation der organischen Inhaltsstoffe mittels NMR wird der Gehalt an Gesamtkohlenstoff mittels stöchiometrischer Faktoren aus den Gehalten und den Summenformel dieser Verbindung berechnet. Die nachfolgenden Ergebnisse belegen eine, in der Regel ausreichend gute Übereinstimmung dieses errechenbaren Gesamtkohlenstoffgehalt mit den in den wässrigen Lösungen gemessenen TOC. Der Vergleich belegt, dass für die genannten Baustoffe alle relevanten organischen Verbindungen in der wässrigen Phase mittels NMR identifiziert und quantifiziert werden können. Die Bestimmung dieser Inhaltsstoffe liefert eine wesentliche zusätzliche Information zur Beurteilung des Einflusses dieser Baustoffe auf Grund- und Sickerwasser.

Material und Methoden

Im Rahmen der Untersuchungen zur Auswaschung von organischen Inhaltsstoffen aus Betonen mit unterschiedlichen Betonzusatzmitteln sowie aus einem Acrylatgel (ausgehärtet) wurden Eluate der Baustoffe und verschiedene Porenwässer geprüft. Die Herstellung und Konditionierung der Probekörper sowie das Auspressen der Porenwässer erfolgte am Institut für Bauforschung Aachen (ibac). Diese Probekörper (Würfel mit Kantenlänge 100 mm) wurden nach DAfStB-Richtlinie – „Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen“ – [4] in jeweils ausgeheizten Glaströgen in dest. Wasser eluiert. Abweichend von dieser Vorschrift wurde das Eluationsvolumen auf drei Liter begrenzt. Zu jedem der vorgegebenen Zeitpunkte wurde der Eluent entsprechend der Vorgabe gewechselt. Für

jeden Probekörper lag jeweils ein Eluat nach 1,2,3,9,16, 32 und 56. Tagen zur Analyse vor. In diesen Eluaten wurde jeweils der TOC-Gehalt nach DIN EN 1484 ermittelt. Parallel wurde jeweils 1 Liter des Eluats (1/3 des Gesamteluats) bei 80 °C im Trockenschrank unter Spülung mit Inertgas (Stickstoff) langsam bis zur Trockne eingengt. Der Rückstand wurde mit 2 – 3 ml deuteriertem Wasser (D₂O) aufgenommen und diese so angereicherten Eluate mittels Kernresonanzspektrometrie (1H-NMR) untersucht. Die Quantifizierung der identifizierten organischen Verbindungen erfolgt gegen inneren Standard (Monochloressigsäure bzw. Monochloracetat). Im Rahmen der Untersuchungen zur Auswaschung aus Schleierinjektionen wurden zudem eine Reihe von Eluaten (Säulenversuch) ebenfalls mit NMR untersucht. Basierend auf der Identifikation der eluierten Verbindung wurde aus der Bruttoformel der Anteil an organischem Kohlenstoff für diese Verbindung berechnet. Aus der Addition dieser Anteile wird ein Gesamtkohlenstoff berechnet und mit dem gemessenen TOC (bzw. DOC) verglichen.

Ergebnisse

Im ersten Teil der Untersuchungen wurden in insgesamt 5 Porenwässern die organischen Inhaltsstoffe mittels 1H-NMR identifiziert und über einen internen Standard quantifiziert sowie der TOC bestimmt. In allen 5 Porenwässern sind Formiat, Acetat und Triethanolamin als organische Inhaltsstoffe nachgewiesen worden. In den Porenwässern B, C und D ist zudem Naphtahlsulfonat (NFS – Bruttoformel C₆H₄S₂O₆) nachweisbar. Im Porenwasser D ist Tetramethyldecynol (Entschäumer) sowie weitere nicht identifizierte organische Verbindungen im 1H-NMR-Spektrum erkennbar. Daneben sind in allen Porenwässern Spuren von Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) und Polyethylenglykololigomere nachweisbar. In der Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Quantifizierung mittels NMR und die daraus abgeleiteten Gehalte an „Gesamtkohlenstoff“ (Gesamt- C) wiedergegeben und den gemessenen TOC-Werten in Porenwässern

gegenübergestellt. Mit Ausnahme der Probe IV, die im Porenwasser eine Reihe nicht identifizierter Verbindungen aufweist, sind mit der NMR die wasserlöslichen Verbindungen im Porenwasser gut erfassbar und korrelieren gut mit den TOC-Messwerten. Neben den Porenwässern standen Trogeluate von 6 verschiedenen Betonen (Würfel Kantenlänge 10 cm) sowie eines reinen ausgehär-

teten Acrylatgels (Würfel, Kantenlänge 10 cm) zur Verfügung.

Tabelle 1:

Gehalte organische Einzelverbindungen in Porenwässern (nach 1H-NMR) sowie der aus den stöchiometrischen Verhältnissen berechnete Gehalt an organischem Kohlenstoff im Vergleich mit den nach DIN EN 1484 bestimmten Gehalten an TOC

Porenwasser	Ergebnisse 1H-NMR				TOC	Gesamt-C
	Formiat	Acetat	Triethanolamin	Naphthalinsulfonat	gemessen	Berechnet aus NMR
Konzentration in mg/l im Porenwasser						
I	20	15	300	n.n.	174	155
II	195	140	300	700	602	650
III	50	60	225	275	263	310
IV *	20	30	250	n.n.	269	130*
V	30	50	150	150	244	190

n.n. = nicht nachweisbar

* = enthält nach NMR-Spektrum zusätzlich nicht identifizierte organische Verbindungen im Porenwasser

In den 7 Eluaten des Acrylatgels konnten mittels 1H-NMR neben Spuren von Formiat, Acetat und Lactat in Konzentrationen < 1 mg/l je Eluat nur Triethanolamin (TEA) in Konzentrationen zwischen 250 und 450 mg/l je Eluat und ein Acrylat(oligomer) in Konzentrationen zwischen 1 und 10 mg/l nachgewiesen werden. In der Abbildung 1 sind die Gehalte an TEA und Acrylatoligomere, die

daraus berechneten Gehalte an organischem Kohlenstoff und die Korrelationen dieser Ergebnisse mit dem TOC gegenüber gestellt. In den Eluaten 2,3 sowie 5 bis 7 des Acrylatgelwürfels zeigt sich eine gute Übereinstimmung beider Parameter (Gesamt-C, berechnet und TOC). In den Eluaten 1 und 4 sind mittels NMR deutliche Minderbefunde erkennbar (vgl. Abb. 1).

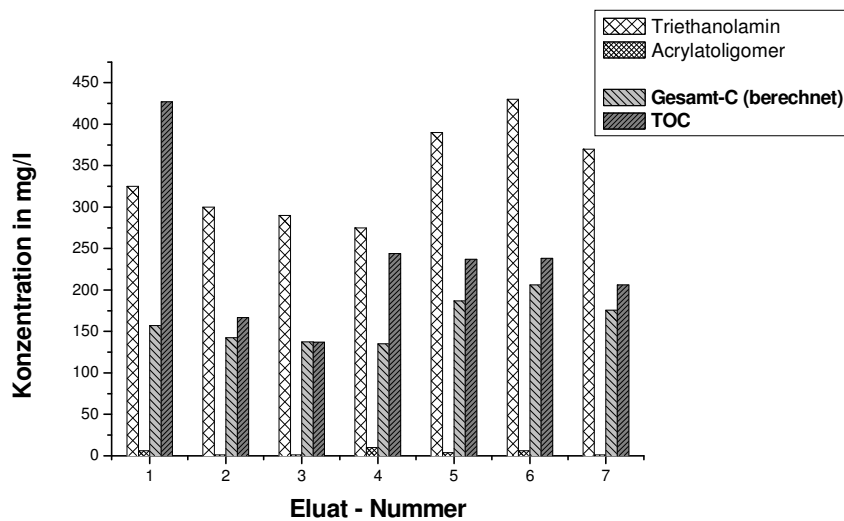


Abbildung 1: Korrelation des TOC mit dem berechneten Gehalt an Gesamt-Kohlenstoff in insgesamt 7 Trogeluaten eines ausgehärteten Acrylatgelprobekörpers (Würfel Kantenlänge 10 cm). Gehalte an TOC und Triethanolamin und Acrylatoligomer (nach NMR) in den Trogeluaten 1 bis 7.

In den Trogeluaten der Betone (mit und ohne Betonzusatzmittel) sowie dem Beton mit Bauschutt als Gesteinskörnung sind neben den löslichen Anteilen der Zusatzmittel nur Formiat, Acetat und Triethanolamin nachweisbar. In der vorliegenden Probe „Bauschutt“ sind neben sehr geringen Gehalten an Formiat und Acetat eine Reihe von nicht eindeutig identifizierten organischen Verbindungen enthalten. Die Konzentrationen der identifizierten Verbindungen liegen in den Betoneluaten deutlich unter 1 mg/l. Die TOC-Gehalte der

Eluate liegen zwischen < 0,1 und 2 mg/l. Ein unmittelbarer Vergleich beider Parameter (Gesamt-C berechnet und TOC) wird daher durch die hohen Messfehler der Verfahren im Bereich der Nachweisgrenze erschwert. Zum Vergleich der NMR-Methode mit dem gemessenen TOC wurden die ausgewaschenen Gesamtmengen dieser Verbindungen gerechnet und die Gesamtemission pro Flächeneinheit verglichen. In der Tabelle 2 sind die so errechneten Ergebnisse für die Betone 1 bis 6 und den Beton mit Bauschutt wiedergegeben.

Tabelle 2:

Vergleich der in 56 Tagen im Standest [4] emittierten/ausgewaschenen Menge an organischen Verbindungen gemessen über den TOC – Gehalt der Eluate mit dem berechneten Gesamt-Kohlenstoff, ermittelt aus den NMR-Untersuchungen der Eluate

Probe	Prüfkörper	Eluierte/ausgewaschene Menge an organischem Kohlenstoff in g/m ² über 56 Tage	
		aus TOC- Gehalte der Eluate gemessen (gerundet)	Gesamt- C aus Einzelergebnissen NMR (gerundet)
RB	Referenzbeton	0,15	0,14
B 1	Ohne Zusatzmittel (ZM) w/z = 0,55	0,07	0,09
B 1 (S)	Ohne Zusatzmittel (ZM) w/z = 0,55 mit Schalöl	0,31	0,12*
B 2	ZM Naphtalinsulfonat in M% von Z = 2,3 ; w/z = 0,5	0,26	0,16
B 3	ZM Naphtalinsulfonat in M% von Z = 1,0 ; w/z = 1,0	0,18	0,14
B 4	ZM Polycarboxylat in M% von Z = 1,0 ; w/z = 0,6	0,23	0,14
B 4 (S)	ZM Polycarboxylat in M% von Z = 1,0 ; w/z = 0,6 mit Schalöl	0,48	0,12*
B 6	Altbetonzuschlag – ohne Zusatzmittel ; w/z = 0,6	0,12	0,11
B 7	Altbetonzuschlag mit Zusatzmittel –ZM Naphthalinsulfonat in M% von Z = 1,2 ; w/z = 0,6	0,10	0,10
BS	Referenzbeton mit Bauschutt als Zuschlag	0,39	0,18

* = ohne Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)

BS = Bauschutt ; B1 (S) Beton 1 mit Schalöl; B4 (S) Beton 4 mit Schalöl

Unter den gegebenen Bedingungen ist die Übereinstimmung der Emission an organischen Verbindungen aus dem Beton gemessen mit NMR und ermittelt über den TOC der Eluate mit Ausnahme der beiden Betonproben mit Schalöl und der Probe Beton mit Bauschutt gut. In diesen drei Proben sind eine Reihe von ausgewaschenen Verbindungen mit NMR nicht identifiziert oder wie die Mineralölkohlenwasserstoffe der Proben B1(S) und B4(S) nicht erfasst worden. Der Minderbefund

gerechnet als Gesamtkohlenstoff resultiert aus diesen Bedingungen.

Für Bodeninjektionsmittel (Schleierinjektion) zeigen sich in einzelnen Fraktionen der Säulenelution im Rahmen der Zulassungsprüfung Eluate mit deutlich höheren TOC- bzw. DOC-Gehalten. In 7 Einzeleluaten verschiedener Produkte wurden die organischen Inhaltsstoffe mit NMR identifiziert und quantifiziert, der Gehalt an organischem Kohlenstoff berechnet und mit den DOC bzw. TOC-

Gehalten verglichen. In der Tabelle 3 sind die Ergebnisse für 4 Eluate mit DOC- bzw. TOC-Gehalten > 50 mg/l wiedergegeben. Für diese Eluate ist eine

sehr gute Übereinstimmung beider Ergebnisse erkennbar.

Tabelle 3:

Gehalte organische Einzelverbindungen in Säuleneluaten von Schleierinjektionen (nach ¹H-NMR) sowie der aus den stöchiometrischen Verhältnissen berechnete Gehalt an organischem Kohlenstoff im Vergleich mit den Gehalten an DOC bzw. TOC

Verbindung NMR	Probe							
	A*		B*		C*		G	
	Gehalt	org. C	Gehalt	org. C	Gehalt	org. C	Gehalt	org. C
	mg/l							
Triethanolamin	7	4	15	7	12	6	n.n.	
Diethanolamin	< 1		< 1		< 1		n.n.	
Ethanolamin	n.n.		n.n.		n.n.		9	4
Formiat	< 1		< 1		6,5	3	16	4
Acetat	< 1		< 1		6,3	3	n.n.	
Hydroxipropionsäure	n.n.		n.n.		n.n.		21	8
Glykolsäure	n.n.		n.n.		n.n.		15	5
(Poly)ethylenglykol(e)	95	38	130	50	90	35	88	34
Acrylsäure/Acrylat	430	216	580	290	240	98	n.n.	
Summe C								
Organischer Kohlenstoff (Rechenwert)		258		347		145		55
DOC /TOC (Messwert/Mittelwert n= 3)		266 (DOC)		343 (DOC)		173 (DOC)		63 (TOC)

n.n. = nicht nachgewiesen

* Proben und DOC-Ergebnisse dankenswerterweise zur Verfügung gestellt aus dem Vorhaben "Laborvergleichstest zur Normierung der inversen Säulenelution nach Schössner und Validierung der Parameter und Kriterien für die ökotoxikologische Bewertung von Bauprodukten mittels Ammoni-

umoxidations- und Bodenatmungstest als Bestandteil einer ökotoxikologischen Testbatterie zur Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten auf Böden (Bewertung der ökotoxikologischen Auswirkungen von Bauprodukten auf Böden - Teil III)", Prof. Dr. K. Terytze Fachbereich Geowissenschaften Institut für Physische Geographie AG Organische Umweltgeochemie [6]

In Eluaten mit geringem DOC-Gehalte werden auch mittels NMR nur geringe Mengen an ausgewaschenen organischen Verbindungen nachgewiesen. Die Abweichung von DOC ist jedoch mit ca. 50 % vergleichsweise hoch (vgl. Abb. 2).

Diskussion

Die hier vorgestellten Ergebnisse zum Zusammenhang des TOC mit einem aus identifizierten und quantifizierten organischen Einzelverbindungen

und den entsprechenden stöchiometrischen Umrechnungen ableitbaren Gesamtkohlenstoff wurden ursprünglich zur Betrachtung der Plausibilität der Ergebnisse der NMR-spektrometrischen Identifizierung und Quantifizierung auswaschbarer Verbindungen aus Beton beim Trogeluattest abgeleitet.

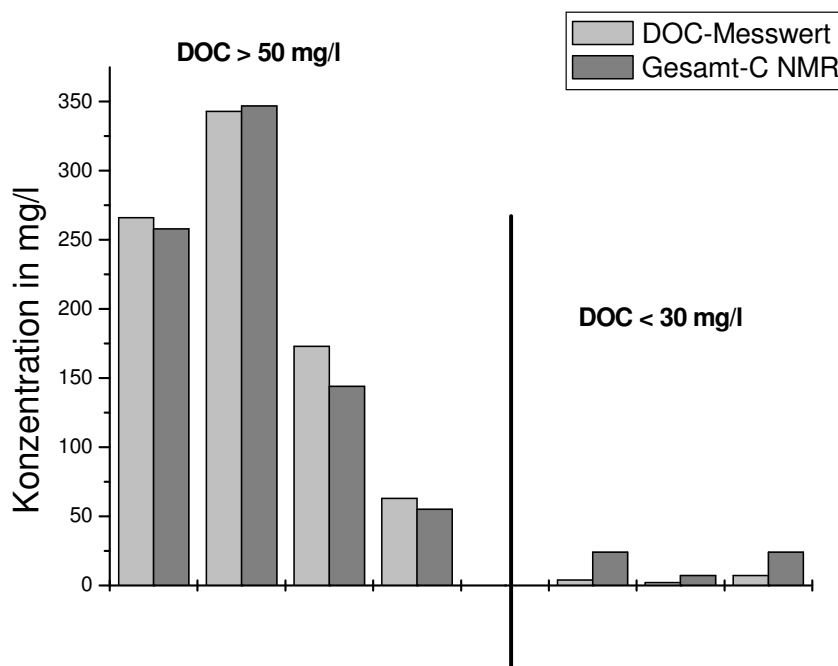


Abbildung 2: Korrelation des TOC mit dem berechneten Gehalt an Gesamt-Kohlenstoff in insgesamt 7 Eluaten von Bodeninjektionsmitteln, Gegenüberstellung der Ergebnisse für Eluate mit einem DOC- bzw. TOC-Gehalt von < 30 mg/l und > 50 mg/l

Die Ergebnisse belegen, dass Auswaschungen organischer Verbindungen aus Beton bei Betrachtungen der Wirkung auf Boden und Grundwasser keine Rolle spielen (vgl. Tab. 3). Im Rahmen der Untersuchungen zur Eignung der Kernresonanzspektrometrie (NMR) zur Identifizierung und Quantifizierung wasserlöslicher Inhaltsstoffe aus Baustoffen wurden jedoch auch Bauprodukte mit betrachtet, die in deutlich höheren Mengen organische Verbindungen über den Wasserpfad emittieren (vgl. Abb. 1 und 2 und Tabelle 3). Die vorliegenden Er-

gebnisse zu den Produkten Acrylatgel (ausgehärtet) und Bodeninjektionsmittel belegen, ebenso wie Ergebnisse der Untersuchungen der Porenwässer (vgl. Tab. 1), dass mit der Kernresonanzspektrometrie ein Verfahren zur Verfügung steht, dass in definierten Fällen eine verlässliche Aussage über Art und Menge der auswaschbaren Inhaltsstoffe liefert.

Es kann gezeigt werden, dass ein aus der Quantifizierung der identifizierten organischen Verbindungen in wässrigen Eluaten und Porenwässern ableit-

barer Gesamt-Kohlenstoff-gehalt in Abhängigkeit von der Qualität der Identifizierung in guter bis sehr guter Übereinstimmung mit dem gemessenen TOC gegeben ist. Dies bedeutet auch, dass die wesentlichen Inhaltsstoffe in diesen Eluaten erfasst wurden und eine Einzelstoffbetrachtung in Bezug auf deren Wirkung auf Boden und Grundwasser zugänglich sind. Dies gelingt nicht, wenn wesentliche Inhaltsstoffe nicht identifiziert wurden oder nicht identifizierbar sind (vgl. z.B. Porenwasser D Tab. 1 und BS Tab. 3). Es ist anzumerken, dass die Identifizierung der auswaschbaren (eluierbaren) organischen Verbindungen mittels ¹H-NMR einen nicht unerheblichen Aufwand bedeutet. Prinzipiell kann durch geeignete Methodenkombination der NMR mit weiteren analytischen Verfahren wie z.B. Hochdruckflüssigchromatographie mit massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS) und/oder Size Exclusion Chromatographie (SEC) [5] die Identifizierung und Quantifizierung optimiert werden. Mit der vorliegenden Arbeit ist belegt, dass die stoffliche Zusammensetzung der Eluate analytisch zugänglich ist und eine plausible Korrelation zu dem Summenparameter TOC hergestellt werden kann. Die Kenntnis der stofflichen Zusammensetzung der Eluate erlaubt eine bessere Beurteilung möglicher ökotoxikologischer Wirkungen der vom Bauprodukt in Boden und Grundwasser auswaschbaren Stoffe.

Literatur

- [1] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser Teile 1+2 (Mai 2008). Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt, 2008. - In: Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik – neu 2009
- [2] Volland G. ; Herterich U. Betonzusatzmittel in Beton – Untersuchungen zum Nachweis von Zusatzmitteln und deren mobiler Reaktions- bzw. Abbauprodukte mittels polarer Lösemittel mit Hilfe der Kernresonanzspektrometrie Abschlussbericht DIBt – Forschungsvorhaben 32-5-20.37-1027/02 – 2003
- [3] Volland, G., Herterich, U., Krause, G., Reinhardt, H.W. Nachweis von Betonzusatzmitteln in erhärteten, zementgebundenen Baustoffen Beton+Fertigteil-Technik BFT 11, 2005 S 48 – 56
- [4] DAFStB-Richtlinie– Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen – Grundlagenversuch zur Charakterisierung des Langzeitauslaugungsverhaltens – (04.2005)
- [5] H. Herb: Zur Mobilisierung von sulfonathaltigen Betonzusatzmitteln aus Zementstein, Dissertation Universität Karlsruhe, 2001
- [6] Prof. Dr. K. Terytze Fachbereich Geowissenschaften Institut für Physische Geographie AG Organische Umweltgeochemie "Laborvergleichstest zur Normierung der inversen Säulenelution nach Schössner und Validierung der Parameter und Kriterien für die ökotoxikologische Bewertung von Bauprodukten mittels Ammoniumoxidations- und Bodenatmungstest als Bestandteil einer ökotoxikologischen Testbatterie zur Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten auf Böden (Bewertung der ökotoxikologischen Auswirkungen von Bauprodukten auf Böden - Teil III)" - Forschungsbericht für das Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin

Brandprüfungen an Fahrschachttüren nach EN 81-58

Martin Reiber, MPA Universität Stuttgart

Die brandschutztechnische Überprüfung von Öffnungsverschlüssen in Fahrschachtwänden wurde in Deutschland viele Jahre auf Grundlage der Prüfnorm DIN 4102 Teil 5 durchgeführt. Dabei gliederte sich das recht aufwändige Prüfverfahren in die Betrachtung zweier unterschiedlicher Risiken der Brandweiterleitung. Mit dem sogenannten Heißgasversuch (Brandversuch mit gegenüber der sog. Einheitstemperaturzeitkurve stark abgeminderter Aufheizkurve) wurde überprüft, ob ein im darunterliegenden Stockwerk entstandener Vollbrand in der Lage ist, die im betrachteten Stockwerk befindlichen Fahrschachttüren durch die Entstehung von heißen Rauch- und Brandgasen im Fahrschacht so zu erwärmen, dass eine Brandweiterleitung möglich ist. In einem zweiten Schritt wurde dann mit einem weiteren Brandversuch unter Zugrundelegung der Einheitstemperaturzeitkurve überprüft, welche Widerstandskräfte die im darunterliegenden Stockwerk befindliche und dem Vollbrand direkt ausgesetzte Fahrschachttür aufweist und bis zu welchen Temperaturen die heißen Rauchgase dabei innerhalb des Fahrschachts steigen.

Die Fahrschachttüren wurden dabei im Rahmen des Zulassungsverfahrens als Abschlüsse von Fahrschachtwänden der Klassifizierung F 90 und damit als „Bauteile“ betrachtet und entsprechend den angewandten Prüfnormen und -verfahren der DIN 4102 Teil 5 und DIN 4102 Teil 2 eingestuft.

Im Laufe der letzten Jahre rückte im Zuge der Harmonisierung und Anwendung europäischer Prüfverfahren und der Umsetzung der Aufzugs- und Maschinenrichtlinien im Bereich der Fahrschacht- bzw. Aufzugstüren (siehe hierzu Bild 1) die Normenreihe EN 81 immer mehr in den Vordergrund. Die Überprüfung von Fahrschachttüren auf ihre Feuerwiderstandsfähigkeit wird dabei in Teil 58 dieser Normenreihe geregelt. Bei dieser Betrachtungsweise wird die Fahrschachttür als „Teil der Aufzugsanlage“ angesehen. Als letztlich heranzu-

ziehender bauaufsichtlicher Verwendbarkeitsnachweis und die jeweils relevanten Normenteile zusammenfassendes Dokument gilt in diesem Fall die EG-Baumusterprüfbescheinigung.

Je nach Ausführungsart der Fahrschachttüren können hierbei unter Verwendung der europäischen Kennzeichnungsbuchstaben die Klassifizierungen E, EI oder EW ausgesprochen werden. Die jeweiligen Buchstaben stehen hierbei für die Erfüllung der Leistungskriterien Raumabschluss (E), Wärmedämmung (I) und Strahlung (W). Die Anforderungen in den einzelnen europäischen Staaten können hierbei durchaus deutlich voneinander abweichen; für die Erfüllung der baurechtlichen Anforderungen in Deutschland gilt das Erreichen der Klassifizierung E 90 als ausreichend.

Dem Risiko einer Brandweiterleitung durch die Entstehung von heißen Rauch- und Brandgasen im Fahrschacht wird bei diesem Prüfverfahren dadurch Rechnung getragen, dass die tatsächliche Menge der in den Fahrschacht eindringenden heißen Rauchgase ermittelt wird und einen bestimmten Grenzwert (eine Leckrate) von $3 \text{ m}^3 / (\text{min} \times \text{m}^1)$ nicht überschreiten darf.

Die Bestimmung der Leckrate erfolgt hierbei indirekt über die Messung der CO₂-Konzentration in den durch die Luftspalte und Öffnungen der Fahrschachttür ausströmenden und über einen Baldachin aufgefangenen Ofengasen. Die notwendige Prüfeinrichtung besteht hierbei aus dem Baldachin, einer Rohrleitung, die an einen Ventilator zur Erzeugung des Absaugstroms angeschlossen ist, und der zwischen Ventilator und Baldachin zwischengeschalteten CO₂-Messstrecke (siehe hierzu Bild 2 bis 6).

Um diesen Prüfsektor weiterhin ausreichend abdecken zu können, hat die Brandprüfstelle der MPA Stuttgart seit einiger Zeit die genannten zusätzlich

¹ Breite der Türöffnung

erforderlichen technischen Prüfeinrichtungen angeschafft und in Betrieb genommen.

Seither wurden im Referat Feuerwiderstand von Bauteilen schon mehr als 20 Brandversuche nach EN 81-58 erfolgreich durchgeführt. Die dadurch gesammelten Prüferfahrungen machen die MPA Stuttgart hinsichtlich brandschutztechnischer Fra-

gestellungen auch auf diesem neu erschlossenen Prüfgebiet zu einem fachkundigen Berater und Ansprechpartner für Firmen, Ingenieurbüros, den TÜV oder Bauaufsichtsbehörden.



Bild 1: Ansicht einer Fahrschachttür (Schachtseite) im eingebauten Zustand.



Bild 2: Ansicht einer Fahrschachttür (Schwellenbereich) mit montiertem Baldachin vor dem Brandversuch. Die Tür ist durch die Schürze des Baldachins teilweise verdeckt. Links ist noch ein Teil des Mess-Systems (Rohrleitung und Messstrecke) zu erkennen



Bild 3: Ansicht der Prüfeinrichtung (Ventilator und Messstrecke) während eines Brandversuchs



Bild 4: Ansicht der Messstrecke (CO₂ und Volumenstrom)



Bild 5: Ansicht des mobilen Mess-Schranks zur Messdatenerfassung und -auswertung



Bild 6: Ansicht des Ventilator-Systems zur Erzeugung des Volumenstroms

Sichere Abstützung mobiler Baumaschinen Teil II

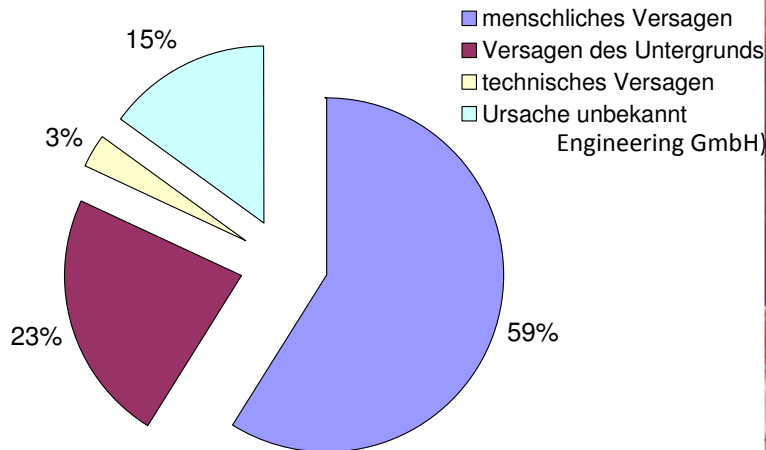
Dr. rer. Nat. Jürgen Frick, Abt. Zerstörungsfreie Prüfung und Bauwerksmonitoring

Einleitung

Bei der Abwicklung von Bauvorhaben kommen weltweit täglich mobile Baumaschinen, wie Betonpumpen, LKW-Aufbaukrane und Hubarbeitsbühnen zum Einsatz. Die Standsicherheit dieser Maschinen am Einsatzort wird dabei durch Stützbeine gewährleistet, die die aus dem Arbeitsbetrieb resultierenden Momente aufnehmen und die zugehörigen Kräfte in den Untergrund einleiten.

Wie eine Studie im Rahmen des ersten Vorhabens Teil I [1], [2] ergeben hat, kommt es durch nicht sachgemäßen Betrieb, unvorhergesehenes Nach-

geben des Untergrunds oder technisches Versagen immer wieder dazu, dass Maschinen umstürzen und erheblichen Sach- und Personenschaden zur Folge haben. Mit 23 % stellt das Versagen des Untergrunds nach menschlichem Versagen die zweithäufigste Unfallursache dar (Abb. 1). Um dieses Unfallrisiko signifikant zu verringern, muss die Tragfähigkeit des jeweiligen Untergrunds für den sicheren Betrieb von mobilen Baumaschinen an ständig wechselnden Einsatzorten laufend beurteilt werden.



Im vorliegenden Vorhaben wurde besonderes Augenmerk auf die Überwindung der Problemfelder, des im ersten Vorhaben entwickelten bezugspunktunabhängigen Verfahren und Messsystems zum Erfassen von Setzungen, gelegt. Diese waren zum einen die sichere Voraussage von Bruchlasten und unsicheren Zuständen während des gesamten Betriebs und zum anderen die Detektion von Hohlräumen auch bei ungünstigen Bodenverhältnissen. Zu letzterem wurde eine neue Messmethodik auf der Basis von Georadarverfahren entwickelt.

Ziel war die Entwicklung eines anwendungsorientierten Überwachungssystems für mobile Baumaschinen zum automatisierten Erfassen, Beurteilen

und kontinuierlichen Überwachen der Bodentragfähigkeit zum Verhindern von Unfällen aufgrund von Untergrundversagen.

Das von der MPA koordinierte Projekt wurde mit Mitteln des BMWi über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) gefördert (AiF-Nr. 15848 N). Kooperationspartner war das Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) der Universität Siegen. Die Arbeiten wurden von einem industriegeführten projektbegleitenden Ausschuss der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen (FVB) begleitet.

Grundbruchdetektion

Wie Erfahrungen aus dem Vorgängervorhaben [1] gezeigt haben, müssen abhängig von der Beschaffenheit des Untergrunds (z.B. bindig, nicht-bindig, locker, dicht) 40 bis 90 % der Arbeitslinie bekannt sein, um eine sichere Abschätzung für die Bruchlast zu erhalten. Dies wird beim Aufstellvorgang der Baumaschine nicht immer erreicht. Zudem können bei längeren Aufstellauern Kriechsetzungen auftreten und sich bei Wetteränderungen (z.B. Regen) die Bodeneigenschaften ändern. Über Parameterstudien im realen Einsatz, verfeinerte Materialmodelle und die Entwicklung eines neuronalen Netzes zur Steigerung der Prognosefähigkeit sollte das automatisierte Erkennen unsicherer Zustände während des gesamten Betriebs erreicht werden. Dies ist trotz verbesserter Sensor- und Filtertechnik nur teilweise gelungen, da die Stabilität des Messsystems über die gesamte Aufstelldauer nicht erreicht werden konnte. Ursache hierfür ist die Be-

stimmung der Setzung aus der Beschleunigung, für die eine zweifache Integration der Beschleunigung erforderlich ist. Dies gelingt nur für kurze Zeiträume von bis zu 20 s. Danach summieren sich die Fehler aus der Drift des Messsystems auf und eine sichere Vorhersage ist nicht mehr möglich.

Dieses Problem wurde durch die Implementierung eines neuen Messansatzes gelöst. Aus der Änderung der differentiellen Steifigkeit des Untergrundes, die durch den dynamischen Verformungsmodul beschrieben wird, kann in Abhängigkeit von der jeweiligen statischen Bodenpressung auf den Versagenszustand geschlossen werden. Die Bestimmung erfolgt durch kurze Stoßbelastungen bei unterschiedlichen Lastzuständen. Durch Vergleich mit einem Bodenmodell nach Ohde [3], [4] kann bei Abweichungen von diesem Modell der Versagenszustand erkannt werden

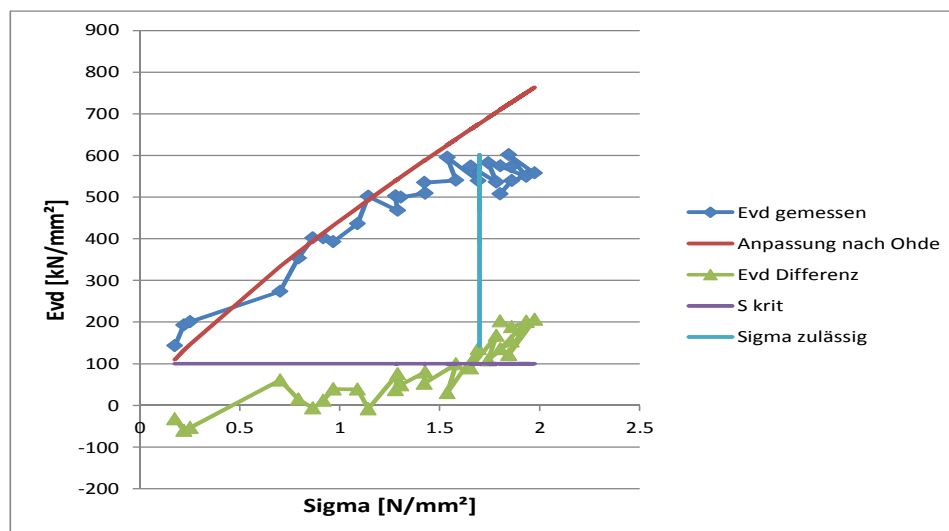


Abb. 2: Abweichung der gemessenen Steifigkeiten vom extrapolierten Ansatz nach Ohde [3], [4].

Da bei einer kurzzeitigen dynamischen Belastung die Integrationszeit sehr klein ist, und außerdem die Beschleunigungen hinreichend groß sind, wird das Rauschen aus Störsignalen hinreichend unterdrückt. Ein ähnliches Vorgehen findet bei der Verdichtungskontrolle mit dem dynamischen Lastplattenversuch statt [5]. Die dynamische Steifigkeit korreliert mit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Boden.

Der Vorteil des neuen Verfahrens ist, dass es selbstkalibrierend ist, d.h. man braucht keine Vorkenntnisse über die Bodenkennwerte. Weiterhin kann das Verfahren zu beliebigen Zeitpunkten und Laststufen erfolgen, so dass der gesamte Aufstell- und Arbeitsvorgang erfasst werden kann und auch langfristige Änderungen, z.B. ein Aufweichen des Bodens bei Regen, erkannt werden können. Ein weiterer Vorteil der dynamischen Messung ist,

dass geringere messtechnische Anforderungen an die Beschleunigungsmessung gestellt werden, so dass insgesamt günstigere Systemkomponenten verwendet werden können.

Hohlraumdetektion

Das zweite Problemfeld aus dem ersten Vorhaben war das Erkennen von Hohlräumen. Dies ist mit dem oben beschriebenen Verfahren nicht möglich. Deshalb wurde ein neues Verfahren basierend auf Georadarmessungen zum Erkennen von tiefliegenden Hohlräumen erprobt, und die Eignung für die Integration in mobile Baumaschinen untersucht.

Wie Feldversuche zeigten, hat das entwickelte System gutes Potential zur erfolgreichen Detektion tiefgelagerter Hohlräume. Es kann jedoch zum jetzigen Entwicklungsstand nicht direkt in der Sicherheitskontrolle und -auswertung unter realen Bedingungen angewandt werden.

Zum einen sollte die Montagefähigkeit des Systems untersucht werden z.B. im Hinblick auf Adaption an bzw. Integration in die Stützbeine. Mögliche Verbesserungen im Antennendesign beinhalten den Einsatz eines Mikrowellenabsorbers, um Nachschwingen zu reduzieren. Dies kann zur Reduzierung des beobachteten Nachschwingens an den Zielobjekten beitragen.

Zum anderen kann die Sendeleistung des Pulsgenerators durch geeignete Maßnahmen erhöht werden, was das Signal Rausch Verhältnis und somit die Eindringtiefe erhöht. Da im aktuellen System ein kommerzieller Signalgenerator zur Triggerung verwendet wird, bietet es sich an, einen Signalgenerator auf Grundlage eines Mikrocontrollers zu entwickeln. Ferner kann mit einer besseren Impedanzanpassung der Antenne an den Pulsgenerator der Signalverlauf verbessert werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin die Antennen auf einem Substrat mit hoher Permittivität zu entwickeln.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es gelungen ist, ein System zu entwickeln, das in der Lage ist, Hohlräume mit Hilfe von kurzen Impulsen zu

detektieren. Um das System zur Marktreife zu bringen, ist es jedoch notwendig einige Weiterentwicklungen vorzunehmen die im Rahmen dieses Projekts aufgrund finanzieller, terminlicher und technischer Beschränkungen nicht mehr erschöpfend untersucht werden konnten.

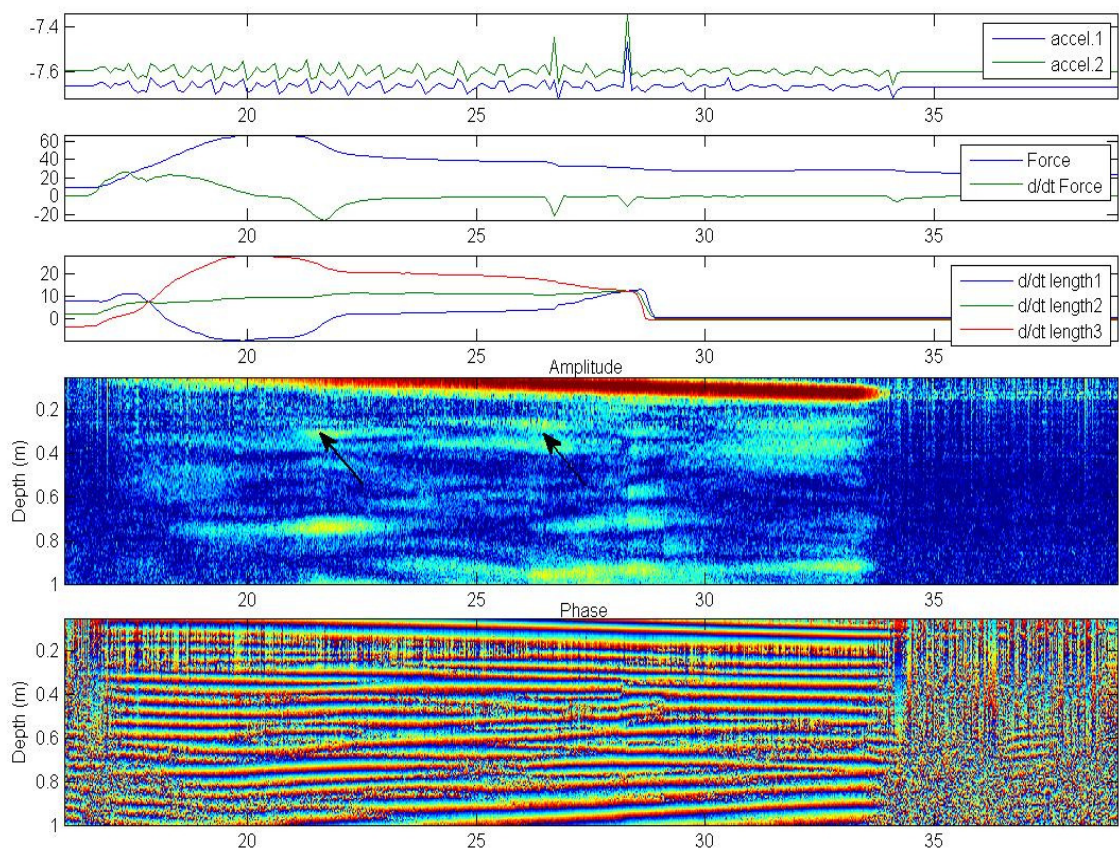
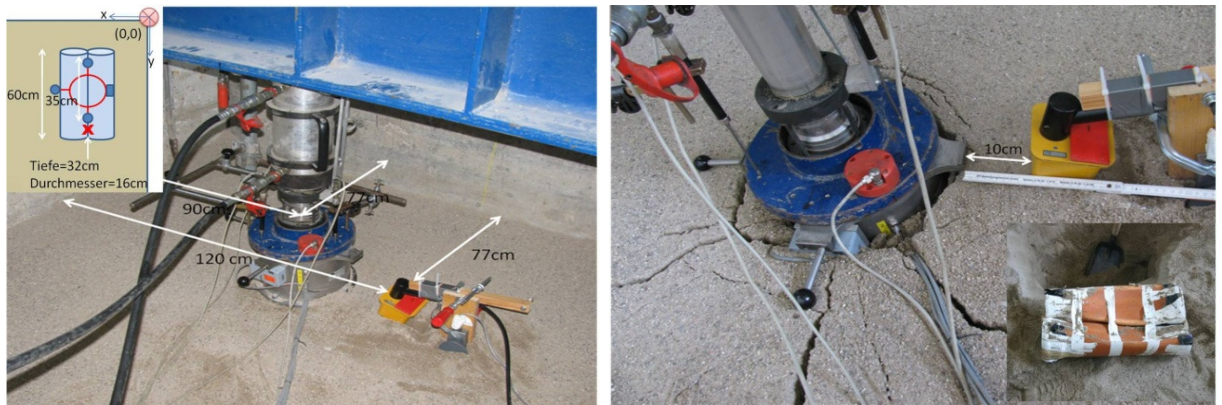


Abb. 3: Kombiniertes Versuchsverfahren mittels Lastsetzungssensor und Georadar im Labor der MPA. Oben: Messanordnung vor (links) und nach (rechts) dem Versuch. Unten: Kontinuierliches Monitoring während der Druckanwendung [6].

Literatur

[1] Vermeer, P.A.; Sawade, G.; Beutinger, P.H., *AiF-Nr.: 12949 N, Schlussbericht: Entwicklung eines Verfahrens zur Vorbeugung des Umstürens mobiler Baumaschinen durch Nachgeben der Bodenschichten unter den Stützfüßen*, 2007.

[2] Beutinger, P.H., *Ein geotechnischer Beitrag zur Standsicherheit mobiler Baumaschinen: Dissertation, Institut für Geotechnik*, 2005.

[3] Ohde, J., *Grundbaumechanik*, Vol. 3. Hütte, 1951.

[4] Ohde, J., *Der Bauingenieur, Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund*, 1939.

- [5] Dynamischer Lastplattenversuch nach DIN 18134, 2001.
- [6] Frick, J.; Schreiner, M.; Sawade, G.; Gonzalez-Huici, M.A.; Uschkerat, U.: *Sensor supported surveillance of ground to control the*

stability of mobile construction machines, Proceedings of the 3rd International Conference on Machine Control & Guidance, March 27-29, 2012, (in press).

Ultraschallprüfung an Schweißnähten aus Nickellegierung mit realistischen Testfehlern

S. Dugan¹, U. Völz², F. Walte³

¹Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), ²Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), ³Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren Saarbrücken (IZFP)

Kurzfassung

Im Rahmen der Förderinitiative COORETEC (CO₂-Reduktionstechnologien) zur Entwicklung und Erprobung neuer Hochtemperaturwerkstoffe für hocheffiziente Kohlekraftwerke wurde im Teilvorhaben TD1 die Prüfbarkeit von artgleichen und artungleichen Schweißverbindungen der modernen austenitischen Nickellegierungen Alloy 617 und Alloy 625 mit zerstörungsfreien Prüfverfahren untersucht. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Ultraschallprüfung. Zur Untersuchung der Eignung von Prüftechniken wurden geschweißte Testkörper hergestellt mit künstlichen und natürlichen Testfehlern. Auf Basis der Erkenntnisse und Erfahrungen an Schweißnähten aus austenitischem Cr-Ni-Stahl, welche ähnliche Herausforderungen an die Ultraschallprüfung stellen, wurden für die Schweißnähte aus Nickellegierungen erfolgversprechende Prüftechniken ausgewählt und erprobt, zunächst Standardtechniken und in einem zweiten Schritt weitergehende Prüf- und Analysetechniken. Die Verfahrensgrenzen wurden anhand des Nachweisvermögens für künstliche und realistische Fehler abgeschätzt. Für eine Bewertung der Verfahren im Hinblick auf die Anwendung an Bauteilen sowie für eine gezielte Optimierung wurde die für die Gewährleistung der Bauteilintegrität zulässige Fehlergröße für verschiedene Fehlertypen an einer Modellkomponente ermittelt. Zusätz-

lich wurde eine Rahmenprüfanweisung erstellt, in der die grundsätzliche Vorgehensweise für die Prüfung an einer Schweißnaht aus Nickellegierung unter Verwendung eines geeigneten Vergleichskörpers beschrieben wird.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Ultraschallprüfungen an zwei Testkörpern mit realistischen (quasi-natürlichen) Fehlern dargestellt. Die Testkörper wurden an der MPA unter Einbringung von Fehlern beim Schweißen hergestellt. Es wurden Ultraschallprüfungen mit konventioneller und Phased Array Technik durchgeführt und teilweise die SAFT Technik zur Datenanalyse angewendet. Nach Abschluss der Ultraschallprüfungen wurde einer der beiden Testkörper zerlegt und an ausgewählten Stellen metallografische Schliffe quer zur Naht erstellt.

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen, dass man trotz fortschrittlicher Prüftechniken die von ferritischen Schweißnähten bekannten Nachweisgrenzen bei den Schweißnähten aus Nickellegierungen noch nicht erreicht. Der sichere Nachweis kleiner Fehler und die Unterscheidung von Fehleranzeigen zu Gefügeanzeigen oder Interface-Reflexionen bleiben nach wie vor schwierig. Eine weitere Herausforderung liegt in der Größenbestimmung von Fehlstellen. Dazu wird im Allgemeinen die Anwendung spezieller Prüf- und -analysetechniken zur

Größenbestimmung zusätzlich zu den Fehler-suchtechniken erforderlich sein. Eine einfache Größenabschätzung anhand der reflektierten Ultraschallamplitude wie bei ferritischen Schweißungen ist nicht möglich.

Einleitung

Ziele der Untersuchungen

Die Untersuchungen im COORETEC TD1 Vorhaben sollten einen Beitrag leisten zur Entwicklung einer geeigneten Vorgehensweise zur Qualitätssicherung bei dickwandigen Komponenten aus Nickellegierungen inklusive deren Schweißverbindungen und es ermöglichen, zuverlässige Aussagen über die Fehlertolerierbarkeit zu machen, somit in Abhängigkeit von der betrieblichen Beanspruchung eine werkstoffangepasste wiederkehrende Prüfung zu planen, um die Sicherheit und Verfügbarkeit der Anlagen im Betrieb zu gewährleisten. Ein ausreichendes Nachweisvermögen der zur Verfügung stehenden zerstörungsfreien Prüftechniken ist dafür eine wesentliche Voraussetzung. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Untersuchungen an Schweißnähten aus austenitischem Cr-Ni-Stahl wurden Prüftechniken ausgewählt und erprobt.

Problemstellungen bei der ZfP von dickwandigen Schweißnähten aus Nickellegierungen

Dickwandige Komponenten aus Nickellegierungen stellen besondere Herausforderungen an die zerstörungsfreie Prüfung. Die Oberflächenverfahren Eindringprüfung und Wirbelstromprüfung sind – Zugänglichkeit der zu prüfenden Oberflächen vorausgesetzt – uneingeschränkt anwendbar. Bei den Volumenprüfverfahren Durchstrahlungsprüfung und Ultraschallprüfung sind einige Einschränkungen zu erwarten. Die Durchstrahlungsprüfung von Schweißnähten aus Nickellegierungen unterscheidet sich nicht grundsätzlich von der Prüfung ferritischer Nähte abgesehen von einem leicht unterschiedlichen Schwächungsverhalten und gefügebedingten Besonderheiten wie das mögliche Auftreten von Scheinanzeigen durch Röntgenbeugung im grobkörnigen Gefüge, sowie teilweise etwas

unscharf und grobkörnig wirkende Aufnahmen ("Mottling"). Eine Unterscheidung echter Fehleranzeigen von Scheinanzeigen ist meist durch die Anfertigung einer zweiten Aufnahme mit leicht unterschiedlicher Einstrahlrichtung und/oder geänderter Strahlungsenergie möglich. Die größte Herausforderung bei der Durchstrahlungsprüfung liegt in den zu durchstrahlenden Wanddicken. Mit zunehmender zu durchstrahlender Wanddicke nimmt die Fehlererkennbarkeit ab. Hierdurch wird die Möglichkeit, die Durchstrahlungsprüfung einzusetzen, eingeschränkt. Insbesondere bei der wiederkehrenden Prüfung im Kraftwerk muss die Prüfung aufgrund von Abmessungen und Zugänglichkeit meist als Doppelwanddurchstrahlung durchgeführt werden. Bei zu durchstrahlenden Wanddicken von 80 mm und mehr wird man an die Grenzen der Durchstrahlungsprüfung mit Röntgenröhren oder Isotopen gelangen. Im Rahmen der Herstellung können Linearbeschleuniger mit höheren Strahlungsenergien eingesetzt werden, so dass auch dickere Komponenten geprüft werden können. Ziel des Vorhabens war die Entwicklung von Prüftechniken, die sowohl bei der Herstellung als auch bei wiederkehrenden Prüfungen eingesetzt werden können. Der Fokus wurde daher auf die Ultraschallprüfung gelegt.

Die besonderen Herausforderungen bei der Ultraschallprüfung von Schweißnähten aus austenitischen Stählen und Nickellegierungen ergeben sich aufgrund der akustischen Anisotropie dieser Werkstoffe in Kombination mit der inhomogenen Gefügeausbildung in der Schweißnaht. Solange die Körner ohne Vorzugsrichtung orientiert und im Vergleich zur Ultraschallwellenlänge hinreichend klein sind, wirkt sich die akustische Anisotropie makroskopisch nicht aus. Dies ist bei Gusskomponenten und Schweißnähten aus diesen Werkstoffen im Allgemeinen nicht der Fall. Bei der Erstarrung bilden sich in der Schweißnaht große Körner, so genannte Stängelkristalle, welche in Abhängigkeit von den Abkühlbedingungen in Vorzugsrichtung orientiert sind. Durch dieses inhomogene, anisotrope Gefüge in der Schweißnaht wird die

Schallausbreitung stark beeinflusst und erfolgt im Allgemeinen nicht geradlinig wie im homogenen isotropen Medium. An den Korngrenzen und auch im Bereich der Schmelzlinie bei Schweißungen kommt es zu Schall-Rückstreuungen sowie Reflexionen, Brechungen und Wellenabspaltungen. Die hieraus entstehenden Schwierigkeiten bei der Ultraschallprüfung sind: Vermindertes Fehler-nachweisvermögen durch ein ungünstigeres Signal-Rauschverhältnis, Schwierigkeiten bei der Interpretation der Ultraschallsignale, Auftreten von "Scheinfehleranzeigen", Abweichungen bei der Lagebestimmung von Anzeigen. Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Abschätzung der Fehlergrößen – die Bestimmung einer Ersatzfehlergröße über die bekannte AVG-Methode (Abstand-Verstärkung-Größe) ist nicht anwendbar. Die genannten Effekte sind bekannt von der Ultraschallprüfung an Schweißnähten und Gusskomponenten aus austenitischen Cr-Ni-Stählen. Bei den dickwandigen Komponenten aus Nickellegierungen war zu erwarten, dass durch die größeren Wanddicken der Fehlernachweis zusätzlich erschwert wird.

Neben dem negativen Einfluss des Schweißgutgefüges auf die Ultraschallprüfung können weitere Faktoren die Prüfbarkeit beeinträchtigen. Dies sind insbesondere die Ausführung der Schweißnaht und die Bauteilgeometrie im Bereich der Naht sowie die Zugänglichkeit für die Prüfung. Unbeschiffene Schweißnahtwurzeln können zu Formanzeigen führen, welche aufgrund der komplexen Schallausbreitung im Schweißnahtgefüge oft nicht eindeutig von Anzeigen durch Fehlstellen unterschieden werden können. Ist die Schweißnaht nur von einer Seite für die Ultraschallprüfung zugänglich, so ist der Nachweis von Fehlern auf der dem Prüfkopf abgewandten Seite erschwert, da mehr Schweißnahtvolumen im Schallaufweg liegt und sich somit die oben genannten Gefügeeinflüsse auf die Schallausbreitung stärker auswirken. Derartige geometrische Einflüsse sollten wann immer möglich ausgeräumt werden, indem bereits bei der Konstruktion von Komponenten auf eine ausreichende Prüfbarkeit geachtet wird. Ein umfassender

Überblick zur Problematik bei der Ultraschallprüfung inhomogener anisotroper Werkstoffe findet sich in [1] und den darin enthaltenen Referenzen.

Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Schweißverbindungen zwischen austenitischen Stählen und Mischschweißnähte mit Wanddicken größer 20 mm wurden in den letzten Jahrzehnten hauptsächlich in kerntechnischen Anlagen eingesetzt. Bei den großen Wanddicken ist die Durchstrahlungsprüfung für die wiederkehrende Prüfung nicht einsetzbar, so dass die Prüfung der inneren Oberfläche meist mittels Ultraschallprüfung erfolgt. Demnach ist die Problematik der Ultraschallprüfung an austenitischen Schweißnähten seit langem bekannt und es wurden zahlreiche Untersuchungen zur Verbesserung der Prüfaussage durchgeführt. Arbeiten zur Modellierung der Schallausbreitung in anisotropen inhomogenen Werkstoffen haben zum besseren Verständnis der Problematik beigetragen (z.B. [2-7]), konnten aber für den Einsatz in der Prüfpraxis nicht umgesetzt werden. Die für eine zuverlässige Anwendung erforderliche genaue Kenntnis der Kornstruktur in der Schweißnaht ist in vielen Fällen nicht gegeben. In Untersuchungen zur Optimierung der Prüftechnik für konnten Fortschritte erzielt werden. Die Ergebnisse hängen stark ab von den individuellen Eigenschaften der untersuchten Schweißnähte [8-12]. Im Wanddickenbereich größer 30 mm können flächige Fehler (Nuten) mit einer Tiefe kleiner 3 mm bei Anschallung durch das Schweißgut in der Regel nicht nachgewiesen werden. Die Auswahl optimierter Prüffrequenzen und Einschallwinkel anhand von Vergleichskörper-Untersuchungen ist eine wichtige Voraussetzung für eine aussagefähige Prüfung und wird daher auch vom Regelwerk gefordert [13, 14]. Eine Übersicht zum internationalen Kenntnisstand bezüglich der zerstörungsfreien Prüfung von Austenit- und Mischnähten in kerntechnischen Anlagen ist in [15] und [16] gegeben.

Testkörper mit realistischen Fehlern

Für die Untersuchungen zur Prüfbarkeit dickwandiger Schweißnähte aus Nickellegierungen wurden im Vorhaben TD1 mehrere Testkörper gefertigt, welche künstliche Testreflektoren wie Bohrungen und Nuten oder auch quasi-natürliche, beim Schweißen eingebrachte Fehler enthielten. Hier sollen einige der Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen an zwei mit realistischen Fehlern geschweißten Testkörpern dargestellt werden.

Die beiden Testkörper mit den Bezeichnungen PK03a und PK03b wurden im Schweißlabor der MPA Stuttgart gefertigt. Zunächst wurden mehrere Testschweißungen durchgeführt, wobei Methoden zur Fehlererzeugung, die in der Vergangenheit an der MPA für Schweißungen ferritischer und austenitischer Stähle entwickelt worden waren, erfolgreich auf die Schweißnähte aus Nickellegierungen übertragen werden konnten. Für die beiden Ultraschall-Testkörper wurden Plattensegmente aus Alloy 617 (PK03a) bzw. Alloy 625 (PK03b) mit einer Dicke von je 50 mm mit einer Stumpfschweißnaht

verbunden (Schweißzusatzwerkstoff jeweils Alloy 617). Bei der Schweißung wurden an mehreren Stellen in der Schweißnaht Fehler eingebracht. Vier Fehlertypen wurden ausgewählt: stark ausgeprägte Erstarrungsrisse (klaffend und teilweise stark verzweigt), natürlich ausgeprägte Erstarrungsrisse, Flankenbindefehler und Wurzelfehler. Beispiele für die unterschiedlich ausgebildeten Erstarrungsrisse sind Abb. 1 dargestellt. Die Abmessungen der beiden Testkörper sind vergleichbar, die Lagen der Fehler in der Schweißnaht unterscheiden sich. Abbildung zeigt Skizzen der beiden Testkörper PK03a und PK03b mit der Lage und Art der Testfehler.

Einer der beiden mit Fehlern geschweißten Testkörper (PK03a) wurde im Anschluss an die Ultraschalluntersuchungen zerlegt und die eingebrachten Fehler wurden anhand von Schlifflinien dokumentiert. Ein Vergleich der Anzeigen aus der Ultraschallprüfung mit den zerstörend dokumentierten Fehlern wurde durchgeführt.

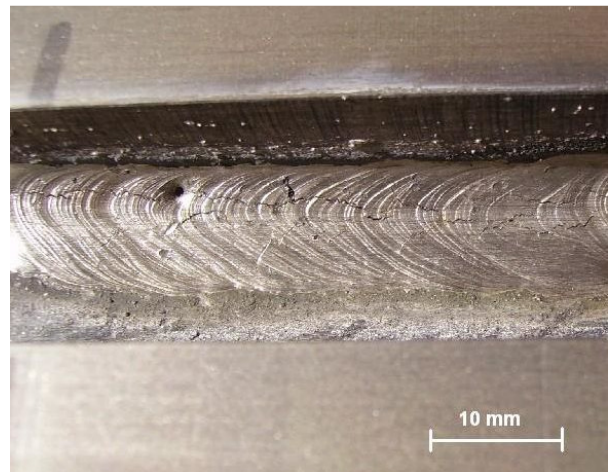
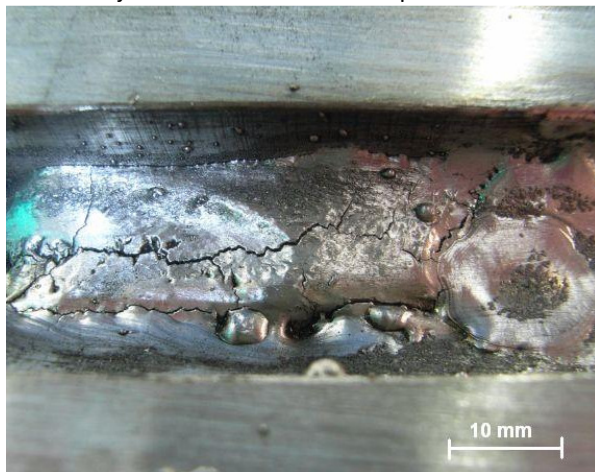


Abb. 1: Beispiele für Erstarrungsrisse in Testschweißungen; links: stark ausgeprägt, rechts: natürlich ausgeprägt

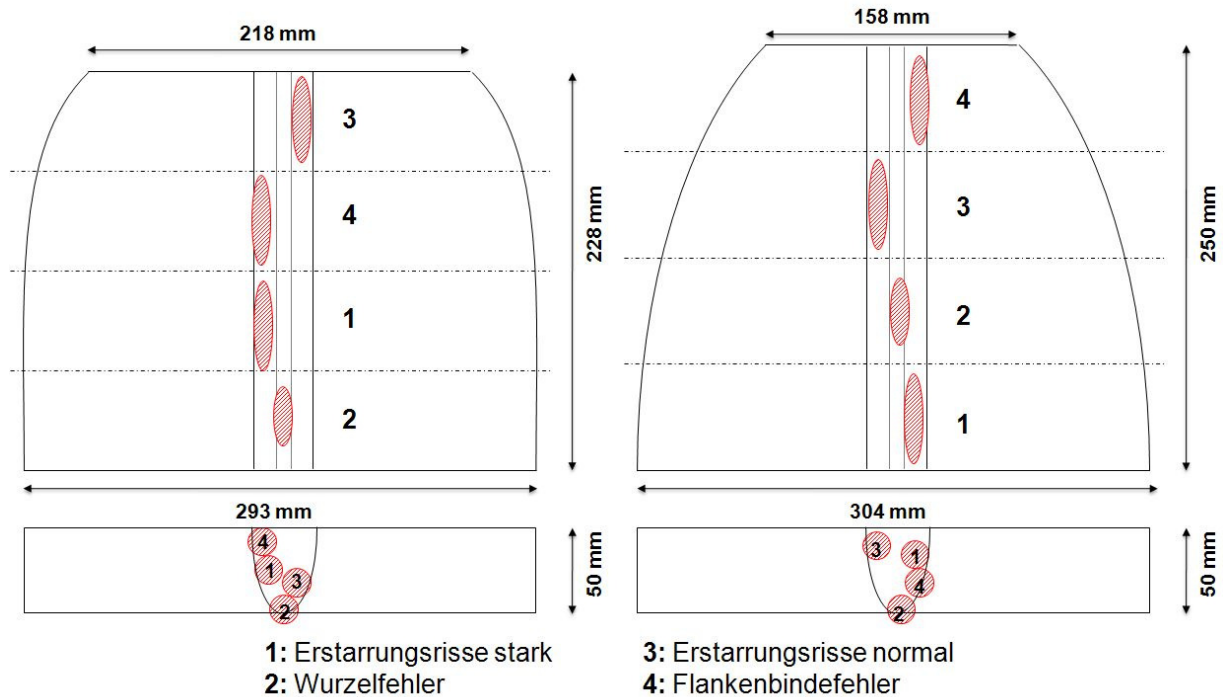


Abbildung 2: Testkörper PK03a (links) und PK03b (rechts) – Abmessungen und Fehlerlagen

Durchgeführte Untersuchungen

In einem ersten Schritt wurden von den drei Forschungsstellen BAM Berlin, Fraunhofer IZFP Saarbrücken und MPA Universität Stuttgart verschiedene Standard-Ultraschallprüf-techniken angewandt. Dazu gehörten die konventionelle Ultraschallprüfung mit piezoelektrischen Einschwingerköpfen, Elektromagnetischer-Ultraschall(EMUS)-Technik sowie kommerziell verfügbare Gruppenstrahler (Phased Array) Technik. Die Prüfungen wurden im Wesentlichen mechanisiert durchgeführt, an der BAM Berlin wurden zusätzlich auch manuelle Prüfungen durchgeführt. Bei der mechanisierten Prüfung erfolgte die Auswertung der Daten über die Darstellung in Projektions- und Schnittbildern (C- und B-Bilder). In der zweiten Projektphase wurden fortschrittliche Prüf- und Analysetechniken erprobt. Am IZFP wurde die Synthetische-Apertur-Fokussierungs-Technik (SAFT) eingesetzt und bei der BAM die Gruppenstrahlertechnik in Sende-Empfangs(SE)-Anordnung.

Prüfungen mit Standard-Techniken

Am IZFP Saarbrücken wurden piezoelektrische Einschwinger-Prüfköpfe eingesetzt mit 45° und 60°

Transversalwellen und 60° und 70° Longitudinalwellen bei je 2 MHz und 45° Transversalwellen bei 1 MHz, sowie elektromagnetische Ultraschallwandler (EMUS), welche horizontal polarisierte Scherwellen mit einer Frequenz von etwa 700 kHz und Einschallwinkel von 45° bis 75° erzeugten. Die Prüfungen wurden mechanisiert durchgeführt mit einem Spurbstand von 2 mm und einem Schussabstand von 0,3 mm. Für die piezoelektrischen Prüfköpfe wurde eine Fließwasserankopplung realisiert.

An der BAM Berlin wurde die mechanisierte Ultraschallprüfung mit piezoelektrischen Einschwinger-Prüfköpfen mit Frequenz 2 MHz durchgeführt, einmal mit 45° Transversalwelle und einmal 60° Longitudinalwelle. Die Ankopplung erfolgte mit Fließwasser, der Spurbstand betrug 2 mm, Schussabstand 1 mm. Zusätzlich erfolgte eine manuelle Prüfung mit denselben Prüfköpfen sowie mit 80° Longitudinalwelle zur Anregung von Kriechwellen. Für die manuelle Prüfung wurde Öl als Koppelmittel verwendet.

An der MPA Stuttgart wurde eine mechanisierte Prüfung mittels Phased Array Technik mit einem 32-elementigen 2,25 MHz Prüfkopf und verschie-

denen Vorsatzkeilen zur Realisierung von Sektor-Scans im Winkelbereich von 35° bis 70° mit Transversal und Longitudinalwellen durchgeführt. Spurbestand und Schussabstand wurden zu je 1 mm gewählt, die Ankopplung erfolgte mit Fließwasser.

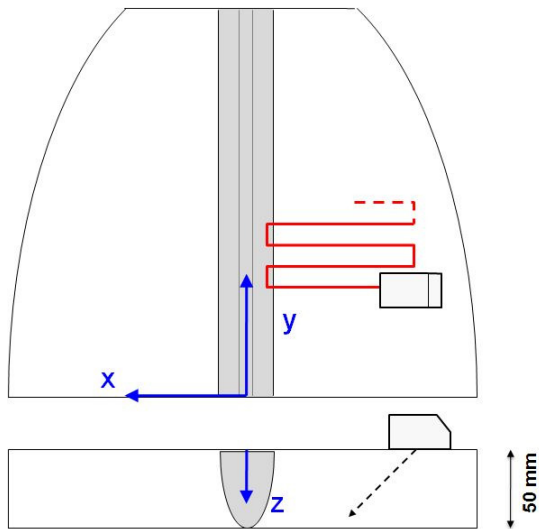


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Ultraschall-Scans

Sowohl bei der Handprüfung als auch bei den mechanisierten Prüfungen werden durch die Kombination mehrerer Einschallwinkel und Wellenarten in allen 4 Fehlerbereichen Anzeigen gefunden, welche sich anhand ihrer Lage den eingebrachten Fehlern zuordnen lassen. Die Einschallung von beiden Seiten der Schweißnaht ist erforderlich zum Nachweis aller Fehler. Fehlstellen im Bereich der Schweißnahtflanke sind bei Anschallung durch die Schweißnaht nicht nachweisbar.

Für die Wurzelfehler liefert die Technik mit 45° Transversalwellen die größten Anzeigenamplituden, Formanzeigen aus der unbeschleunigten Wurzel

Ergebnisse der Prüfungen mit Standard-Techniken

Abbildung 3 zeigt schematisch die Vorgehensweise bei der mechanisierten Prüfung mit Mäander-Scan entlang der Schweißnaht sowie die Definition des bei der Darstellung der Ergebnisse verwendeten Koordinatensystems.

werden ebenfalls mit großen Amplituden detektiert und die Unterscheidung zwischen Formanzeigen und Wurzelfehler ist nicht möglich. Deutlich erkennbar sind die Anzeigen des Wurzelfehlers und die Formanzeigen aus dem Wurzelbereich im C-Bild. In Abbildung 4 bis Abbildung 6 sind die C-Bilder der Prüfungen von IZFP, BAM und MPA mit Transversalwelle unter 45° am PK03a gezeigt. Die Darstellung beinhaltet die Ultraschallamplituden aus den Tiefenbereichen 44-60 mm (IZFP), 40-50 mm (BAM), bzw. aus dem gesamten Tiefenbereich (MPA).

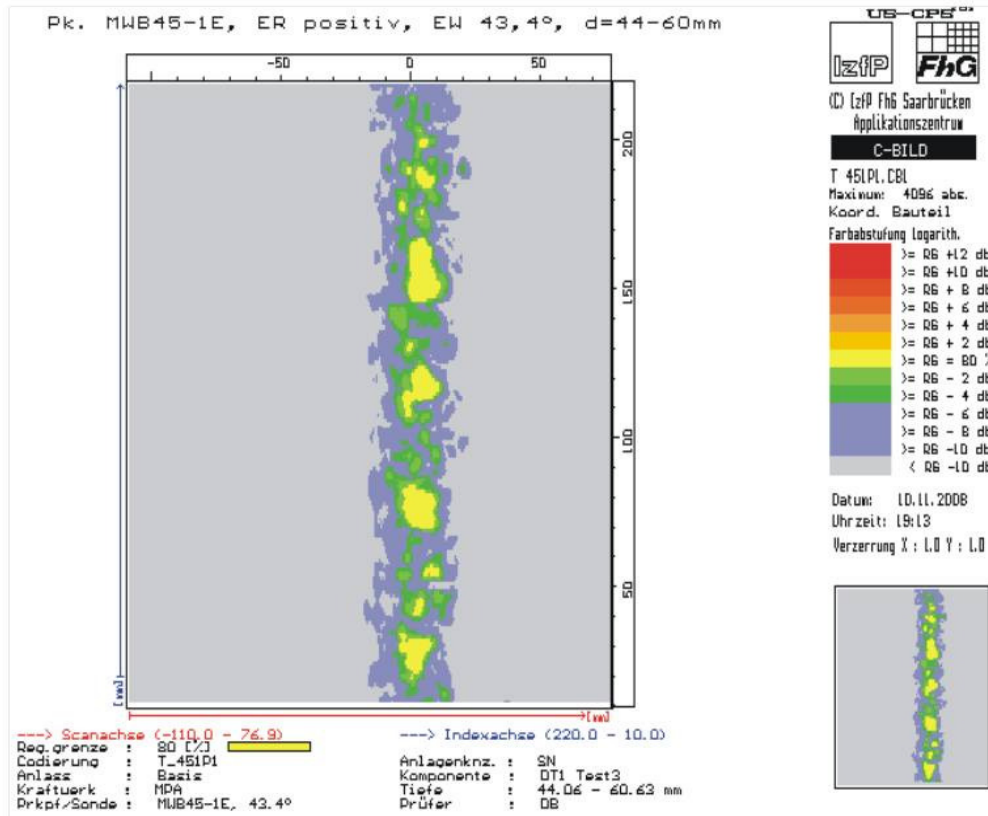


Abbildung 4: C-Bild der Prüfung mit 1 MHz T-Welle unter 45° (ESR -x) am PK03a (IZFP)

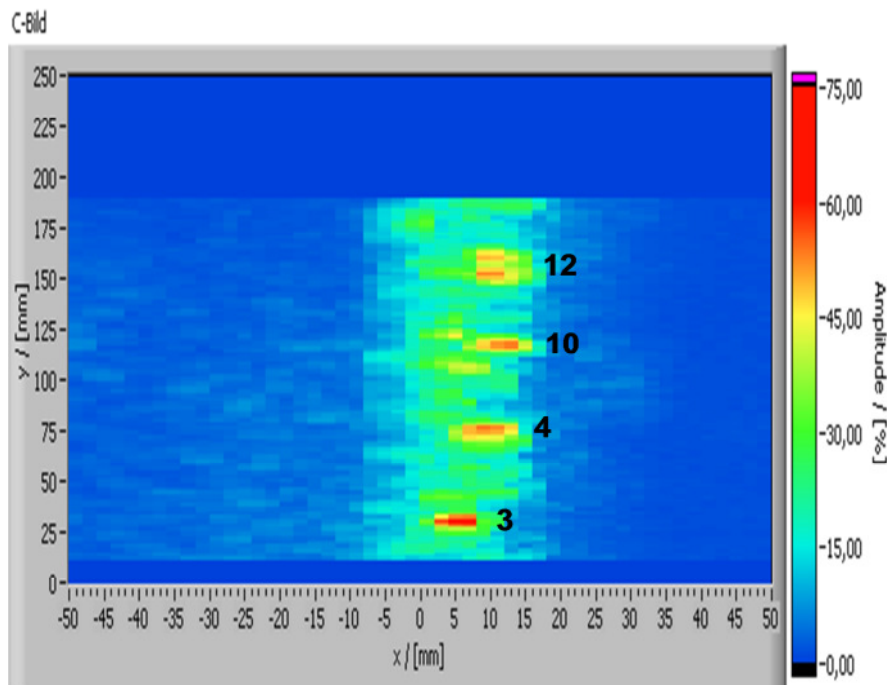


Abbildung 5: C-Bild der Prüfung mit 2 MHz T-Welle unter 45° (ESR -x) am PK03a (BAM)

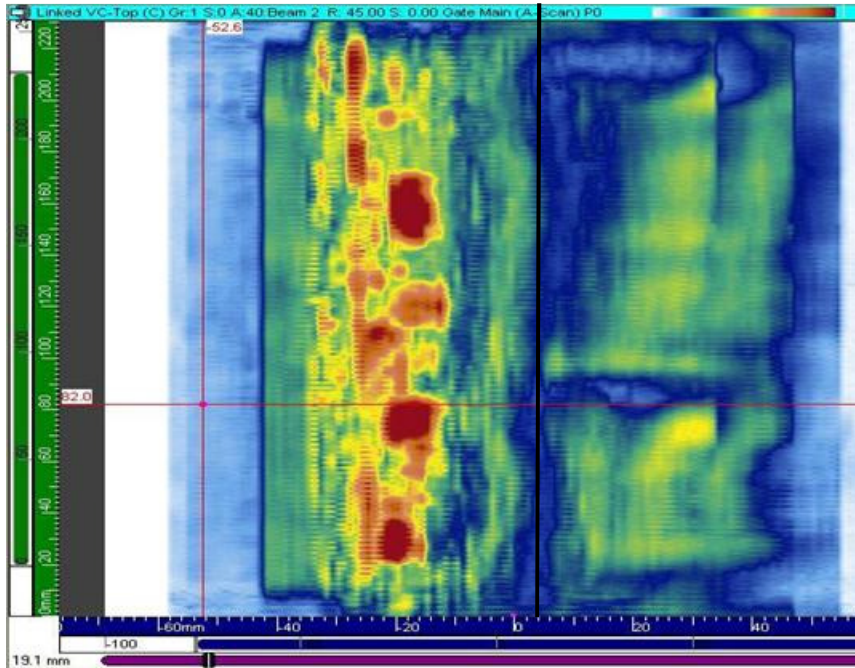


Abbildung 6: C-Bild der Prüfung mit 2,25 MHz T-Welle unter 45° (ESR -x) am PK03a (MPA)

Die Fehler, die sich außerhalb des Wurzelbereiches befinden sind jeweils zumindest von einer Seite mit gutem Signal-Rausch-Abstand nachweisbar, d.h. gut als echte Reflektoren im umgebenden Gefügerauschen der Schweißnaht zu erkennen.

Abbildung 7 zeigt die B-Bild-Auswertung des Bereichs mit Erstarrungsrissen am PK03a (Schweißnahtposition $y = 115$ mm) der Prüfung mit 1 MHz Transversalwelle bei 45° Einschallwinkel (IZFP). Neben der Anzeige aus der Schweißnahtwurzel ist auch die Volumenanzeige des Rissfeldes deutlich zu erkennen. Mit der 2,25 MHz Transversalwelle bei einem Einschallwinkel von 60° (MPA, Abbildung 8) sind in diesem Bereich ebenfalls Anzeigen mit gutem Signal-Rausch-Abstand nachweisbar, man erkennt ein Feld von Einzelanzeigen, das sich dem Rissfeld zuordnen lässt. Der Vergleich mit dem Schlibfbild des PK03a bei $y = 115$ mm (Abbildung 9)

zeigt eine gute Übereinstimmung der Ultraschallanzeigen mit dem vorhandenen Fehler.

Die vom IZFP verwendete EMUS-Technik wird für die Prüfung austenitischer Schweißnähte gerne herangezogen, da im Allgemeinen für die horizontal polarisierte Transversalwelle die Beeinflussung der Ausbreitungsrichtung durch das Stängelkristallgefüge weniger ausgeprägt ist als bei der vertikal polarisierten Transversalwelle. Bei der Untersuchung der Testkörper PK03a und PK03b lieferte die EMUS-Technik die besten Ergebnisse für den Einschallwinkel 75° bei 640 kHz, allerdings werden bei keinem der Testkörper alle Fehler gefunden. Die Technik bringt in diesem Fall also keine wesentlichen Vorteile. In Abbildung 10 ist ein Beispiel für die Prüfung mit EMUS-Technik mit 75° Einschallwinkel am PK03b dargestellt.

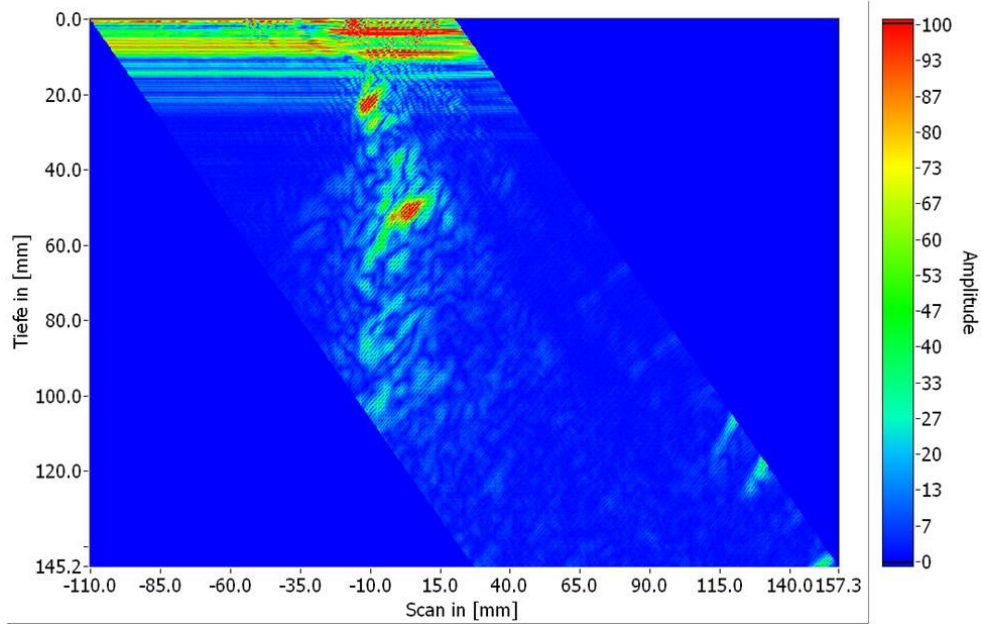


Abbildung 7: B-Bild der Prüfung mit 1 MHz 45° T-Welle (ESR -x) am PK03a im Bereich mit Erstarrungsrissen (IZFP)

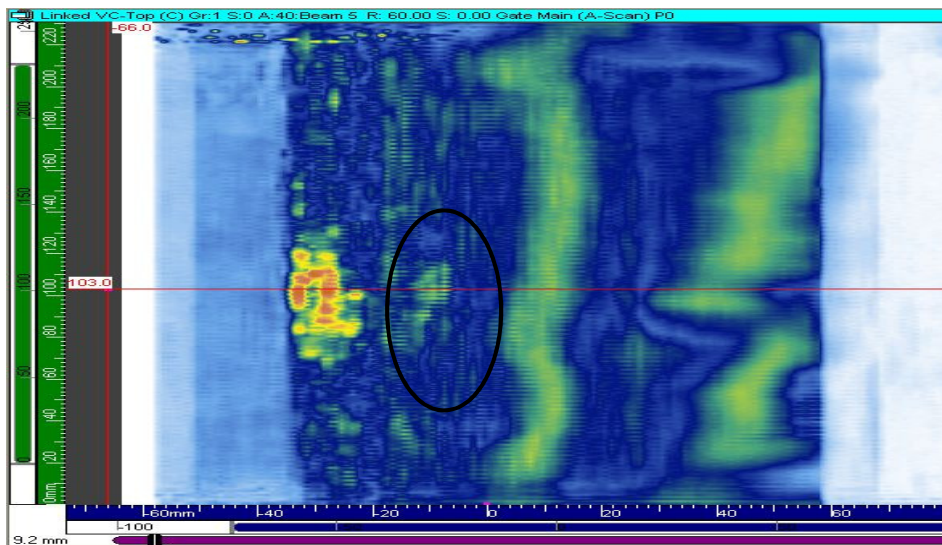


Abbildung 8: C-Bild (z = 5-80 mm, oben) und B-Bild (unten) der Prüfung mit 2,25 MHz 60° T-Welle (ESR -x) am PK03a im Bereich mit Erstarrungsrissen (MPA)

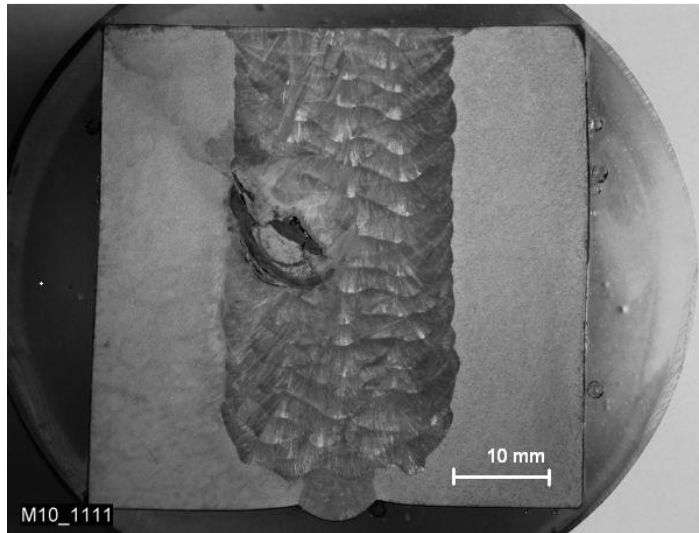


Abbildung 9: Schliffbild PK03a bei Position $y = 115$ mm

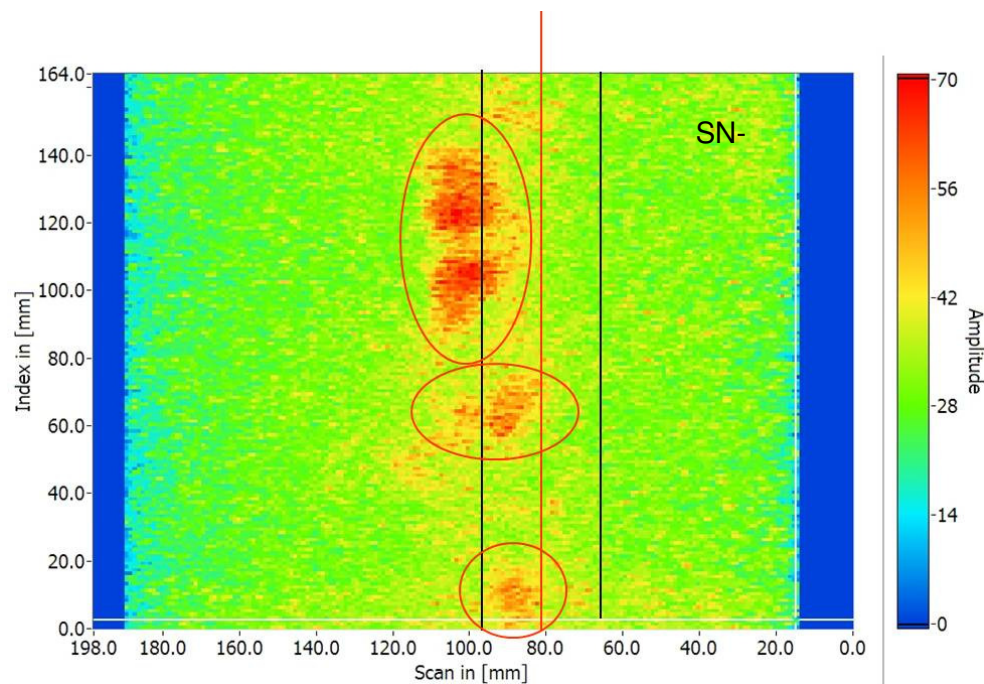


Abbildung 10: C-Bild der EMUS-Prüfung mit 640 kHz 75° T_H -Welle (ESR +x) am PK03b (IZFP)

Ergebnisse mit angepassten Prüf- und Analysetechniken

In der zweiten Phase des Vorhabens wurde ermittelt ob sich mit fortschrittlicheren Prüf- und/oder Analysetechniken Verbesserungen beim Fehler nachweis ergeben. Dazu wurde vom IZFP Saarbrücken die Prüfung mit SAFT-Analyse eingesetzt und bei der BAM Berlin die Gruppenstrahlertechnik (Phased Array) in Kombination mit einem angepassten Sendempfangs(SE)-Prüfkopf. Die SAFT-Technik zeigt deutliche Verbesserungen beim Sig-

nal-Rausch-Abstand. Teilweise sind Anzeigen vom oberen und unteren Ende des Fehlers deutlich getrennt zu erkennen, so dass eine Abschätzung der Tiefenausdehnung des Fehlers möglich wird. Abbildung 11 zeigt das SAFT-C-Bild der Prüfung am PK03a mit 1 MHz 45° Transversalwelle (Daten aus Tiefenbereich $z = 2-40$ mm), Abbildung 12 das B-Bild an Position $y = 115$ mm mit den Anzeigen des Feldes von Erstarrungsrissen. Bei beiden Testkörpern finden sich auch bei Anwendung der SAFT-Analyse weiterhin im Bereich der Schweißnahtwur-

zel Anzeigen über die gesamte Schweißnahtlänge,
Abbildung 13 (PK03b, Daten aus dem Bereich z =

40-60 mm). Auch hier kann nicht zwischen Form-
anzeige und Fehler unterschieden werden.

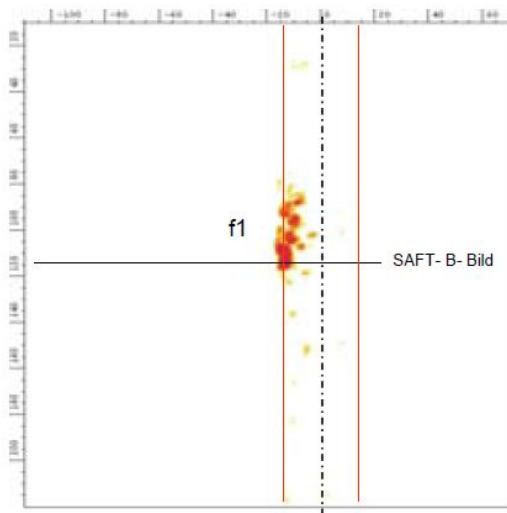


Abbildung 11: SAFT-C-Bild der Prüfung mit 1 MHz 45° T-Welle (ESR -x) am PK03a (IZFP)

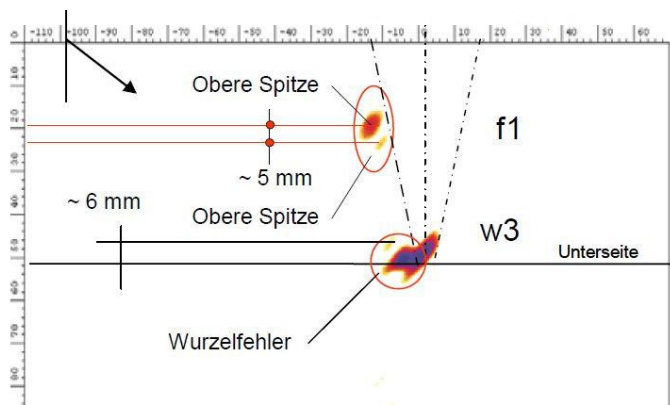


Abbildung 12: SAFT-B-Bild der Prüfung mit 1 MHz 45° T-Welle (ESR -x) am PK03a bei y = 115 mm (IZFP)

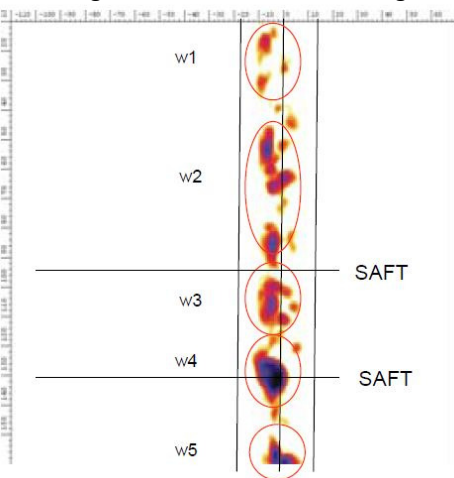


Abbildung 13: SAFT-C-Bild (z = 40-60 mm) der Prüfung mit 1 MHz 45° T-Welle (ESR -x) am PK03b, Darstellung
des Bereichs der Schweißnahtwurzel (IZFP)

Die an der BAM eingesetzte Gruppenstrahler-SE-Technik wurde realisiert indem zwei handelsübliche Gruppenstrahler-Prüfköpfe mit Linear-Array mit angepassten Vorlaufkeilen zu einem SE-Prüfkopf zusammengesetzt wurden.

Auch hier zeigt sich eine leichte Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands durch die Verwendung des Gruppenstrahler-SE-Prüfkopfes. Es können wie schon beim Einsatz der konventionellen Technik

alle den geplant eingebrachten Fehlern zuzuordnenden Anzeigen gefunden werden, sowie weitere Anzeigen ungeklärter Ursache. Abbildung 14 zeigt eine Übersicht der im PK03a gefundenen Anzeigen. Im Vergleich mit den Schlißbildern vom PK03a zeigt sich für einige der zusätzlich gefundenen Anzeigen eine Ursache in Form einer zusätzlichen unbeabsichtigten Fehlstelle in der Schweißnaht, Abbildung 15.

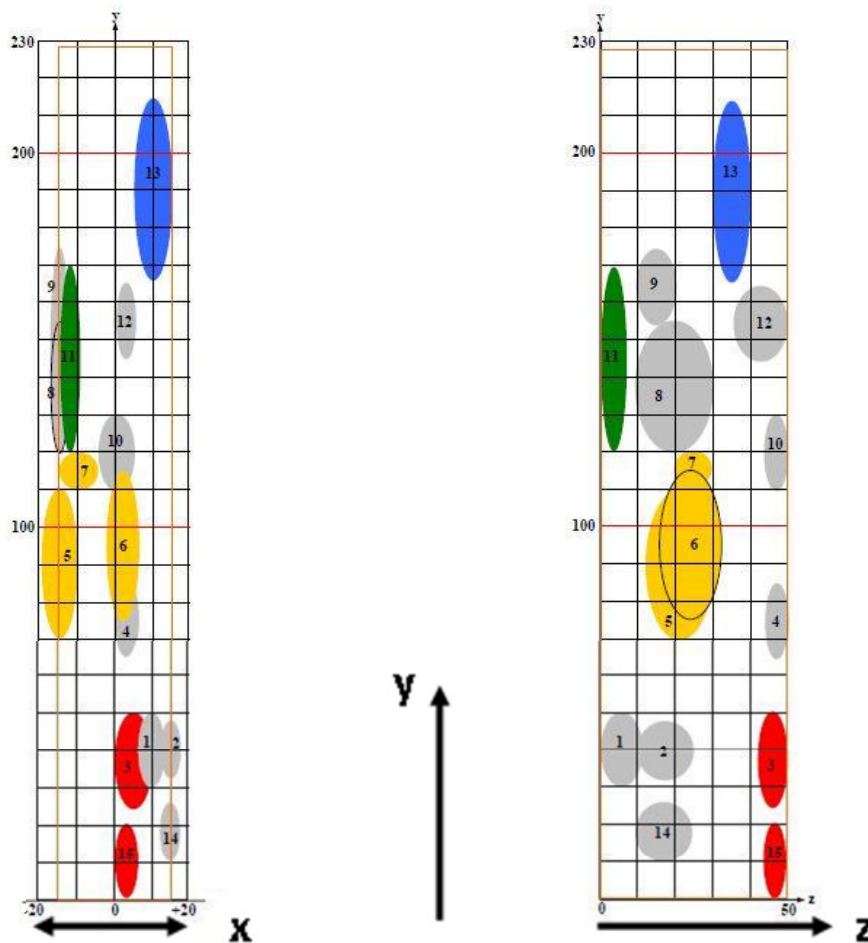


Abb. 14: Übersicht Prüfergebnisse am PK03a mit Phased-Array-SE-Technik bei 2 MHz (BAM); links: Draufsicht auf die Schweißnaht, rechts Tiefenlage; grau: Anzeigen unbekannter Ursache

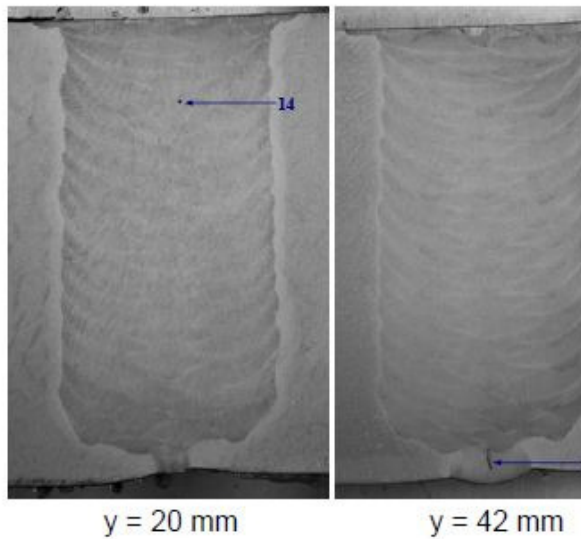


Abbildung 15: Vergleich der bei der Prüfung am PK03a gefundenen Ultraschallanzeigen mit den Schlibfbildern (Anzeigennummern aus Abbildung 5 bzw. 14)

Zusammenfassung

Im Teilvorhaben TD1 der COORETEC Initiative wurden zerstörungsfreie Ultraschall-Prüftechniken auf Ihre Leistungsfähigkeit beim Nachweis von künstlichen und realistischen Testfehlern untersucht. Die hier dargestellten Ergebnisse an den Testkörpern PK03a und PK03b mit beim Schweißen eingebrachten Fehlern haben gezeigt, dass auch natürliche Fehler nachweisbar sind sofern von beiden Seiten der Schweißnaht und mit mehreren Einschallwinkeln und Wellenarten geprüft wird.

Mit den Ergebnissen an den hier vorgestellten sowie den anderen im Projekt untersuchten Testkörpern konnte gezeigt werden, dass der Einsatz der SAFT- sowie der Gruppenstrahlertechnik Vorteile gegenüber der konventionellen Ultraschallprüfung von nickelbasierten Schweißverbindungen auf Längsfehler bringt. Dazu gehören die schärfere Abbildung der Konturen von Fehleranzeigen in der B-, C-Bild-Darstellung, ein verbessertes Signal/Rausch-Verhältnis und die Möglichkeit zur Fehlertiefenbestimmung, da Rissspitzenanzeigen gegebenenfalls besser zu erkennen sind. Ein wesentlicher Vorteil der Gruppenstrahler-Technik ist die Möglichkeit, mit relativ wenig Aufwand viele

Einschallwinkel zu realisieren und damit die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen Fehler optimal zu treffen. Trotz fortschrittlicher Prüftechniken ist man noch weit davon entfernt, die bei der Ultraschallprüfung ferritischer Bauteile und Schweißnähte typischen Nachweisgrenzen auch bei den nickellegierten Schweißnähten zu erreichen. Der sichere Nachweis kleiner Fehler und die Unterscheidung zwischen Fehleranzeigen und Gefügeanzeigen oder Interface-Reflexionen bleiben nach wie vor schwierig. Generelle Aussagen zur nachweisbaren Fehlergröße in nickelbasierten Schweißnähten werden sich auch zukünftig nicht treffen lassen. Aufgrund des großen Einflusses der Gefügestruktur der Schweißnaht auf die Ultraschallausbreitung ist für jeden Schweißnahttyp ein Nachweis der Eignung der Prüftechnik an einem Vergleichskörper zu führen, wie auch von den entsprechenden Regelwerken gefordert [13, 14].

Eine weitere Herausforderung liegt in der Größenbestimmung von Fehlstellen. Eine einfache Größenabschätzung anhand der reflektierten Ultraschallamplitude wie bei ferritischen Schweißungen ist nicht möglich. Die bekannte AVG-Methode kann wegen der akustischen Anisotropie und den damit verbundenen schallphysikalischen Phänomenen nicht angewendet werden. Im Allgemeinen wird die Anwendung spezieller Prüf- und Analysetechniken zur Größenbestimmung von Fehlstellen in Nickelbasisschweißungen erforderlich sein (z. B. Analyse von Rissspitzensignalen). Diese müssen unter Umständen zusätzlich zu den Fehler-suchtechniken eingesetzt werden. Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse an Fehlern bekannter Größe haben gezeigt, dass die Fehlergrößenbestimmung in einigen Fällen möglich ist, sich aber auch hier keine allgemeinen, für alle Schweißnaht-typen gültigen Aussagen treffen lassen.

Bei der Ultraschallprüfung von dickwandigen Bauteilen mit Schweißnähten aus Nickellegierungen ist zu empfehlen, die Vorteile einer vergleichenden Prüfung zu nutzen. Das bedeutet, dass bei einer wiederkehrenden Prüfung die Ergebnisse mit denen der Fertigungs- und Endprüfung bzw. der vorherge-

henden Prüfung verglichen werden. Dadurch sind Veränderungen der Anzeigen oder neu entstandene Anzeigen erkennbar, die somit Aufschluss über ein betriebsbedingtes Wachstum oder eine betriebsbedingte Entstehung von Fehlstellen geben können. Voraussetzung dafür ist, dass die Prüfung mechanisiert durchgeführt wird und die bei der Fertigungsendprüfung geforderten Prüfungen zur Qualitätssicherung auch eine Basisprüfung als Referenz für die wiederkehrenden Prüfungen beinhalten. Die Vergleichbarkeit aufeinanderfolgender Prüfungen muss durch eine entsprechende Auswahl der Prüftechnik und der Prüfparameter gewährleistet sein. Außerdem ist es empfehlenswert, bei der Fertigungsendprüfung zusätzliche Prüfverfahren, wie z. B. die Radiographie einzusetzen, um ergänzende Informationen für die Bewertung der Prüfergebnisse der Ultraschallbasisprüfung zu gewinnen. Insbesondere für neu zu fertigende Komponenten bietet sich eine solche Vorgehensweise an.

Umsetzung in die industrielle Praxis und weiterer Untersuchungsbedarf

Einige der Erkenntnisse aus den Arbeiten im Vorhaben COORETEC-TD1 lassen sich unmittelbar umsetzen bei der Prüfung von Schweißnähten aus Nickellegierungen in der industriellen Praxis. Die Phased-Array-Technik wird inzwischen bereits an vielen Stellen eingesetzt. Durch die Realisierung mehrerer Einschallwinkel mit nur einem Prüfkopf kann die Anzahl der für eine umfassende Prüfung erforderlichen Prüfköpfe reduziert und so die Prüfung zeit- bzw. platzsparend durchgeführt werden. Der Einsatz der SAFT-Analyse ist noch nicht so weit verbreitet, wäre aber bei der heutigen Rechenleistung der verfügbaren Ultraschall-Prüfsysteme ohne allzu großen Einfluss auf die Prüfzeiten möglich. So kann die Aussagefähigkeit der Prüfung verbessert werden und in günstigen Fällen ggf. eine Bewertung in Bezug auf die Fehlergröße erfolgen. Die Ergebnisse zur eingeschränkten Prüfaussage bei nur einseitig zugänglicher Schweißnaht oder bei nicht beschliffener Schweißnahtwurzel und die

daraus resultierende Empfehlung zur Berücksichtigung der Prüfbarkeit bei der konstruktiven Gestaltung von Komponenten und Anlagen können unmittelbar bei der Herstellung neuer Komponenten zur Anwendung kommen.

Weiterer Untersuchungs- und Entwicklungsbedarf besteht noch zur Verbesserung der Nachweissicherheit bei kleinen Fehlstellen und insbesondere zum Themenkomplex der Größenbestimmung von Fehlstellen in Schweißnähten aus Nickellegierungen anhand von Ultraschallsignalen und den dabei zu erwartenden Einschränkungen und Grenzen. Die Bestimmung der Fehlergröße oder zumindest die Ermittlung einer aussagefähigen Ersatzfehlergröße bei der zerstörungsfreien Prüfung stellt das Bindeglied zur Bruchmechanik dar, welche zuverlässige Aussagen zur Tolerierbarkeit von Fehlstellen für den späteren Einsatz einer Komponente treffen muss. Erst durch diese Schnittstelle entsteht ein tragfähiges Gesamtkonzept von Konstruktion, Fertigung und Prüfung sowie ggf. bruchmechanischer Tolerierung.

Hinweis

Die hier dargestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Untersuchungsvorhabens COORETEC-TD1 durchgeführt, einem Teilvorhaben der COORETEC-Förderinitiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Die Autoren danken dem BMWi und den Industriepartnern für die Förderung. Ein besonderer Dank gilt dem von VGB PowerTech e.V. koordinierten Lenkungskreis zur fachlichen Unterstützung des Vorhabens durch die beteiligten Industriepartner: Alstom Ltd. (Schweiz), Alstom Power Systems GmbH, Babcock Borsig Steinmüller GmbH, BHR Hochdruck-Rohrleitungsbau GmbH, E.ON Anlagenservice GmbH, E.ON New Build & Technology GmbH, EnBW Kraftwerke AG, GKM Großkraftwerk Mannheim AG, Hitachi Power Europe GmbH, MAN Diesel & Turbo SE, RWE Power AG, RWE Technology GmbH, Siemens AG Energy Sector, STEAG Energy Services GmbH, Vattenfall Europe Generation AG, VGB PowerTech e.V. Der Firma MuM Müller und

Medenbach GmbH danken wir für die Mitarbeit in der aus dem Lenkungskreis gebildeten Fachgruppe, insbesondere im Zuge der Erstellung der Prüfanweisung.

Literatur

- [1] K. Matthies u.a.: „Ultraschallprüfung von austenitischen Werkstoffen“, DGZfP e.V. Berlin, DVS-Media GmbH 1.Auflage 2009
- [2] J.A. Ogilvy “The Influence of Austenitic Weld Geometry and Manufacture on Ultrasonic Inspection of Welded Joints“, British Journal of NDT (May 1987)
- [3] M. Spies “Transducer-Modeling in General Transversely Isotropic Media via Point-Source-Synthesis: Theory“, J. Nondestr. Eval. 13 No. 2 (1994)
- [4] M. Spies “Semi-analytical elastic wave-field modeling applied to arbitrarily oriented orthotropic media “J. Acoust. Soc. Am. 110 (1), July 2001
- [5] A. Erhard, V. Munikoti, G. Brekow, U. Tessaro, D. Tscharnke “Modeling the improvement of dissimilar weld inspection“, World Conf. on NDT (2004)
- [6] K.J. Langenberg, R. Marklein “Transient elastic waves applied to nondestructive testing of transversely isotropic lossless materials: a coordinate-free approach “, Wave Motion 41 (2005)
- [7] B. Köhler, W. Müller, M. Spies, V. Schmitz, A. Zimmer, K.J. Langenberg, U. Mletzko „Ultraschallprüfung dickwandiger austenitischer Schweißnähte: Modellierung der Prüfsituation und experimentelle Ergebnisse“, DGZfP-Jahrestagung 2005
- [8] C. Flotte, D. Chaveau “New approach to optimize ultrasonic testing of austenitic welds“, World Conf. on NDT (2000)
- [9] J. Wessels, R. Reimann, G. Engelhard, K.H. Durst „Ultraschallprüfung von austenitischen Schweiß- und Mischverbindungen als Ergebnis einer prüfop-
timierten Herstellungstechnik am Beispiel von Rohrleitungsrundnähten für Kraftwerkskomponenten sowie deren Qualifizierung“, DGZfP Jahrestagung 2000
- [10] O. Dupond, D. Villard, M. Mayos “Towards an improvement of ultrasonic examination of austenitic stainless steel welds“, 3rd Int. Conf. On NDE in Relation to Structural Integrity of Nuclear and Pressurized Components, 2001
- [11] G. Brekow, A. Erhard, E. Schulz, F. Siebelmann, H. Kiechle „Optimierung der Ultraschallprüftechnik bei Engspaltschweißnähten“, DGZfP Jahrestagung 2001
- [12] E. Schulz, A. Erhard, H.J. Montag, U. Beine, B. Lucht „Fehleranalyse an einer austenitischen Rohrschweißnaht“, DGZfP Jahrestagung 2001
- [13] KTA 3201.4 (Fassung 2010-11 und frühere Fassung 06/99), Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung), Sicherheitstechnische Regel des KTA
- [14] DIN EN ISO 22825:2006-10 „Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Ultraschallprüfung – Prüfung von Schweißverbindungen in austenitischen Stählen und Nickellegierungen“
- [15] H. Waidele „Zerstörungsfreie Prüfung von Mischnähten, austenitischen Schweißnähten, Plattierungen und Kerneinbauten“, 4. Technischer Bericht zum BMU-Vorhaben SR 2426, Stuttgart 2004
- [16] H. Waidele „Zerstörungsfreie Prüfung von austenitischen Schweißnähten, Kerneinbauten und Plattierungen“, 4. Technischer Bericht zum BMU-Vorhaben SR 2291, Stuttgart 2000

8 Forschungsk Kooperationen

Zerstörungsfreie Prüfung im Anlagen- und Maschinenbau

Das Referat ZfP im Anlagen- und Maschinenbau arbeitet schon seit vielen Jahren erfolgreich mit Projektpartnern am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) in Saarbrücken und in Dresden, sowie mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung zusammen. Derzeit gibt es drei aktuelle Forschungsk Kooperationen, die sich vor allem mit der Verbesserung der Prüfaussage

von Ultraschallprüfungen an Komponenten in kerntechnischen Anlagen befassen: Untersuchungen zur Bewertung und Verbesserung von Ultraschallprüf- und Analysetechniken für austenitische Schweißnähte und Mischschweißnähte, sowie Arbeiten zur experimentellen Ermittlung der Auffindwahrscheinlichkeit (POD) an ferritischen, austenitischen und plattierten Komponenten

Kooperation mit indischem Kraftwerkshersteller

Nach vorbereitenden Gesprächen im Februar 2011 wurde mit dem indischen Kraftwerkshersteller Bharat Heavy Electric Ltd. (BHEL) ein Memorandum of Understanding (MOU) unterzeichnet, indem ein wissenschaftlicher Austausch zu Fragestellung der Werkstoffqualifizierung und zur Entwicklung und Anwendung neuer Berechnungsmethoden für Kraftwerkskomponenten vereinbart wurde. BHEL beschäftigt sich im Auftrag der indischen Regierung mit der Entwicklung von fossil befeuerten Hochef-

fizienz-Kraftwerken. Ein gemeinsames Arbeitsprogramm wurde während eines ersten Besuches im Forschungs- und Entwicklungszentrum in Hyderabad vereinbart.

Eine langjährige Zusammenarbeit im Bereich Hochtemperaturwerkstoffe und Technologie für fossile Kraftwerke verbindet die MPA auch mit einem wissenschaftlichen Partner in Indien, dem Indira Ghandi Center (IGCAR) in Kalpakkam bei Chennai.



9 Auszeichnungen

Anerkennung für Dr. Oliver Mielich



Bild 1: 2. von links: Prof. Nußbaumer, 2. von rechts: Dr. Mielich

Der deutsche Beton- und Bautechnik-Verein e. V. (DBV) hat Herrn Dr. Oliver Mielich (Abteilung Mineralische Baustoffe) als Anerkennung für seine Dissertation „Beitrag zu den Schädigungsmechanismen in Betonen mit langsam reagierender alkaliempfindlicher Gesteinskörnung“ am 18. Mai 2011

einen Preis verliehen. Diese Anerkennung wurde ihm an Stelle des Rüsck-Forschungspreises zusammen mit zwei weiteren Preisträgern in Berlin vom Vorsitzenden des DBV, Herrn Professor Nußbaumer, in Berlin überreicht.

Schweighofer-Preis für Dr. Simon Aicher



Bild 2: v. l. n. r.: Prof. Matti Kairi, Mathias Hofmann, Dr. Simon Aicher, Gerald Schweighofer
(Foto: Thomas Preiss, APA Foto Service)

Dr. Simon Aicher (Leiter der Abteilung Holzkonstruktionen) wurde am 16. Juni in Wien der Schweighofer Innovationspreis verliehen. Dieser Europäische Innovationspreis für Forstwirtschaft, Holztechnologie und Holzprodukte prämiiert innovative Ideen, Technologien, Produkte und Services entlang der gesamten Wertschöpfungskette mit

dem Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit der Europäischen Forst- und Holzwirtschaft zu steigern.

Dr. Simon Aicher erhielt den Preis zusammen mit Mathias Hofmann (Hess Timber) für die Entwicklung des Keilstoßsystems HESS LIMITLESS für die Vor-Ort-Montage von überlangen Brettschichtholzträgern.

10 Veranstaltungen und Veröffentlichungen

10.1 Veranstaltungen und Lehrgänge

MPA Seminar

Das diesjährige MPA-Seminar wurde von über 320 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern besucht. Auch dieses Jahr war das übergeordnete Thema „Werkstoffe und Bauteilverhalten in der Energie- und Anlagentechnik“, das für alle Anlagen zur Energiewandlung gleichermaßen wichtig ist. Die grundsätzliche Strukturierung ist für alle Anlagentypen gleichwertig, die Vorgehensweise in der Bewertung der Komponenten und der Anforderung an den Werkstoff ergibt sich aus den unterschiedlichen Umgebungs- und Belastungsrandbedingungen.

Zu diesen Themenfeldern wurden in 40 Vorträgen über neueste Forschungsergebnisse und Erfahrungen aus dem Betrieb berichtet. Diese Interaktion Wissenschaft – Praxis ist ein zentrales Anliegen des MPA Seminars, das in diesem Jahr wiederum in hervorragender Weise umgesetzt wurde.

Neben nuklearen, fossilen und regenerativen Energiewandlungssystemen wurde erstmalig auch das Thema „Transport- und Lagerbehälter“ umfassend behandelt

MPA-Workshop "Ermüdungsverhalten von Bauteilen unter Berücksichtigung des Mediumseinflusses"

Am 8. Juni 2011 wurde von der MPA der Workshop "Ermüdungsverhalten von Bauteilen unter Berücksichtigung des Mediumseinflusses" veranstaltet. Die Veranstaltung stieß auf großes Interesse beim Fachpublikum, so dass sich knapp 160 Teilnehmer aus allen Branchen die nachfolgenden Vorträge anhörten:

- "Ermüdungsbewertung komplex beanspruchter Komponenten unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen", E. Roos, T. Fesich, K.-H. Herter, D. Krättschmer, X. Schuler, T. Weißenberg MPA Universität Stuttgart
- "Berücksichtigung des Mediumseinflusses bei Ermüdungsanalysen nach aktuellen Regelwerken", C. Hüttner, G. Stellmach, TÜV Süd Industrie Service GmbH, München

- "Einbindung des Mediumseinflusses (EAF) in die Module des AREVA Fatigue Concept (AFC)", S. Bergholz, J. Rudolph, H. Lang, B. Heinz, AREVA NP GmbH, Erlangen)

In den Vorträgen wurde der aktuelle Stand der Forschung auf dem wichtigen Gebiet der Ermüdungsfestigkeit dargestellt. Sie umfassten sowohl die Ermittlung repräsentativer Spannungen bei komplexer mehrachsiger Schwingbeanspruchung bis zu dem Einfluss des Mediums bei dieser Beanspruchung auf den Werkstoff und die Ableitung zuverlässiger Werkstoffgesetze und Kennwerte, die im Vergleich mit der repräsentativen Spannung die Lebensdauer eines Bauteils oder den aktuellen Sicherheitsabstand liefern.

Anschließend nahmen einige Teilnehmer an einer Führung durch die MPA teil.

EWCHP 2011 - European Workshop on Cultural Heritage Preservation

Vom 26. Bis 28. September 2011 fand in Berlin der erste von der MPA Universität Stuttgart und dem Rathgen-Forschungslabor organisierte Europäische Workshop zum Erhalt historischer Bausubstanz

statt. An zwei Tagen wurden hier aktuelle Forschungsergebnisse aus verschiedenen Europäischen und nationalen Forschungsvorhaben präsentiert und diskutiert. Darunter insbesondere auch

Ergebnisse vom Forschungsprojekt „SMooHS“ (www.smoohs.eu), welches von der MPA Universität Stuttgart koordiniert wird. In einer eigens organisierten Ausstellung wurden zudem innerhalb der Forschungsprojekte entwickelte Messsysteme und

-verfahren demonstriert und erläutert. Nahezu 100 Teilnehmer aus den verschiedensten Disziplinen (Forschung, Entwicklung, Restaurierung, Denkmalpflege) trugen durch ihre intensive Diskussion und Beteiligung zu einer gelungenen Veranstaltung bei.



Bild 1: Bilder vom Workshop (links: Dr. Lutz Töpfer von der DBU)



Bild 2: Erläuterungen über Einsatzmöglichkeiten zerstörungsfreier Prüfmethode für die Untersuchung und Dauerüberwachung historischer Bauwerke am Trainingday

Erster Kurs "Bauteilfestigkeit" im Rahmen der "AREVA Nuclear Professional School" von MPA / IMWF an der MPA durchgeführt (4.4.-8.4.2011)

Die „AREVA Nuclear Professional School“ wurde gegründet, um berufsbegleitend in kontinuierlichen Lehrangeboten die kerntechnische Kompetenz zu sichern und zu verbessern. Im Rahmen des Kurses „Bauteilfestigkeit“ wurde den Teilnehmern das Spezialwissen der MPA bei der Sicherheitsbewertung von Komponenten unter komplexen Belastungsfällen vermittelt. Neben den spezifischen Kenntnissen kombiniert aus Werkstoffwissenschaft und Festigkeitslehre wurde die Übertragbarkeit an

den Komponentenversuchen der MPA demonstriert. Zum Abschluss des viertägigen Kurses hatten die Teilnehmer die Gelegenheit, die Prüfeinrichtungen der MPA zu besichtigen. Beeindruckt waren sie insbesondere vom MPAGroßbehälter, ein original SWR-Reaktordruckbehälter, der zur Qualifizierung der zerstörungsfreien Prüftechnik und zu Berstversuchen an Rohren mit Knallgasatmosphäre benutzt wird. Ein derzeit aktuelles Thema



Bild 3: Die Teilnehmer und Dozenten der „AREVA Nuclear Professional School“

DVM-Fortbildungsseminar „Bruchmechanische Prüfmethoden“

24. und 25. März 2011 in Stuttgart

Im Rahmen des Fortbildungsseminars wurden die theoretischen Grundlagen der bruchmechanischen Prüfmethoden dargestellt und die unterschiedlichen Prüfstandards sowie die daraus resultierenden Kennwerte erläutert und bewertet. Experimentelle Ermittlungen der jeweiligen Kennwerte hierzu rundeten das Programm ab, welches die folgenden Vorträge beinhaltete:

- Wozu bruchmechanische Kennwerte? Charakteristik, Übertragbarkeit, Sicherheitsphilosophie.
E. Roos, MPA Universität Stuttgart
- Linear-Elastische Bruchmechanik. Versagensprozess, Kennwerte, Ermittlung.
H. Silcher, MPA Universität Stuttgart
- Werkstoffverhalten unter zyklischer Belastung. Prüfmethoden zur Charakterisierung des Risswachstums.
U. Zerbst, BAM, Berlin
- Elastisch-Plastische Bruchmechanik. Versagensprozess (Risseinleitung, Risswachstum, Instabilität), Kennwerte, Ermittlung.
P. Hübner, Hochschule Mittweida (FH)
- Bruchmechanisches Werkstoffverhalten bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Kennwerte, Prüfverfahren.
W. Böhme, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM)
- Berücksichtigung der Messunsicherheit bei Bruchmechanikversuchen
S. Gerber, MPA Universität Stuttgart

Kurse für den Lagereinbau im Brücken- und Hochbau

In den Kursen werden Aufbau und Leistungsmerkmale heute zugelassener Lagertypen, wesentliche Inhalte gültiger Regelwerke, das Verständnis über deren Erfordernisse, die Konzeption der Qualitäts-

sicherung sowie die erforderlichen Grundkenntnisse für den sachgerechten Transport und Einbau im Bauwerk vermittelt. Die Schulung wird durch praktische Übungen für den Einbau von Lagern ergänzt.

Festigkeitssortierung von Holz nach EN 14081 und DIN 4074

Vom 07.02.2011 bis 08.02.2011 und vom 09.02. bis 10.02.2011

Der im Jahre 2011 aufgrund der hohen Nachfrage doppelt durchgeführte Lehrgang richtete sich an Mitarbeiter aller Betriebe, die Schnittholz für tragende Zwecke im Bauwesen herstellen, weiterverarbeiten oder in Holzbauwerken einsetzen. Neben dem Hauptschwerpunkt der wissenschaftlichen

Hintergründe und praktischen Umsetzung der visuellen Holzsortierung nach DIN 4074 wurden auch die technischen und organisatorischen Voraussetzungen für die maschinelle Festigkeitssortierung nach DIN 4074 und DIN EN 14081 sowie die Vorgehensweise bei der werkseigenen Produktionskontrolle und der Zertifizierung behandelt.

Kleben tragender Holzbauteile – Grundlagen der Herstellung und Qualitätssicherung

vom 21.02.2011 bis 24.02.2011

Der zur Erlangung des Eignungsnachweise zum Kleben tragender Holzbauteile verbindliche Verklebungslehrgang vermittelt die grundlegenden Kenntnisse, die zur Befähigung zum Kleben struktureller Bauprodukte und Bauweisen (keilgezinktes Vollholz, Duo-/Trio-Balken, Brettschichtholz, geklebte Verbundbauteile, geklebte Tafелеlemente, geklebte zugelassene Konstruktionen) führen.

Neben den wissenschaftlichen und praktischen Grundlagen der Holzverklebung standen die nationale und europäischen Normung, die Qualitätssicherung und die Zertifizierung tragender Holzverklebungen im Mittelpunkt des umfangreichen, 4-tägigen Lehrgangs.

Durchführung der werkseigenen Produktionskontrolle nach DIN 1052 und EN 14080

am 25.02.2011

Der Lehrgang vermittelt die normativen Hintergründe und die grundlegenden Kenntnisse, die zur Durchführung von Druckscherprüfungen nach DIN EN 392, Biegeprüfung von Keilzinkenverbindungen nach EN 385 und DIN 1052 sowie zur Durchführung

von Delaminierungsprüfungen nach DIN EN 391 erforderlich sind. Ein besonderer Schwerpunkt wurde auf die Anforderungen der Qualitätssicherung von CE-gekennzeichneten Bauprodukten nach DIN EN 14080 gelegt.

Sanierung und Ertüchtigung tragender Holzbauteile

vom 30.03.2011 bis 31.03.2011

Der Sanierungslehrgang umfasst theoretische und praktische Schulungen zur Sanierung und Ertüchtigung tragender Holzbauteile mittels Verklebungen. Es wurde ein breites Themenspektrum von den

baurechtlichen Aspekten der Sanierung über unterschiedliche Sanierungskonzepte, die exemplarische Sanierungsdurchführung bis hin zur Qualitätssicherung und Überwachung behandelt.

10.2 Veröffentlichungen

Aicher, S.: Glulam Beams with Internally and Externally Reinforced Holes – Test Detailing and Design. In: International Council For Research And Innovation In Building And Construction, Working Commission W18 – Timber Structures, Alghero, Italy', pp. 44-12-4.

Aicher, S.: Geklebte Vollstöße großformatiger Brettschichtholzträger. In: Internationales Holzbau-Forum (IHF 2011), Band I.

Bachmaier, S.A., Gordt, A., Jungmann, S., Krüger, M.: Wireless Long-Term Monitoring of Asphalt Layer on a Motorway Bridge and Comparative Testing of displacement. International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Bookseries Vol. 6 (eds. Buyukozturk, O., Tasdemir, M.A., Gunes, O., Akkaya, Y.).

Bachmaier, S.A., Krüger, M.: Wireless Monitoring of Cultural Heritage – Demonstration of Usability on Selected Case Studies. International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Bookseries Vol. 6 (eds. Buyukozturk, O., Tasdemir, M.A., Gunes, O., Akkaya, Y.).

Baldracchi, P., Pamplona, M., Krüger, M., Troi, A., Aibéo, C., Bachmaier, S.A., Buczynski, B., Simon, S., Chapuis, J.: Museum Environment: Monitoring fully and partially conditioned rooms within SMooHS project. In: M. Krüger (Ed.), Cultural Heritage Preservation – EWCHP 2011, Proc. of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Berlin, Sept. 26-27, 2011, pp. 224-231.

Bauer, M., Roos, E., Klenk, A., Maile, K.: On the Application of Weld Strength Factors on Welded Components. International Journal of Microstructure and Materials Properties, Vol. 6, Nos. 1 of 2, pp. 54-71.

Frolova, O., Maile, K., Müller, W.: Representation of the Heat Specific Creep Rupture Behavior of

Colla, C., Grüner, F., Gabrielli, E., Frick, J.: Monitoring of salt content and mobility in masonry materials, In: M. Krüger (Ed.), Cultural Heritage Preservation – EWCHP 2011, Proc. of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Berlin, Sept. 26-27, 2011, pp. 210-217.

Dugan, S., Udoh, A., Speicher, M., Klenk, A.: Prüfbarkeit von dickwandigen Bauteilen aus Nickellegerungen und Schweißverbindungen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren. Abschlussbericht BMWi-PTJ, Förderkennzeichen 0327705R.

Dugan, S., Völz, U., Walte, F.: Ultraschallprüfung an Schweißnähten aus Nickellegierung mit realistischen Testfehlern. 37. MPA-Seminar, 6.-7.10.2011, Stuttgart.

Fesich, T.M., Roos, E., Schuler, X., Herter, K.-H., Krätschmer, D.: Das MPA AIM-Life Konzept zur Ermüdungsbewertung bei komplexen Beanspruchungen, 37. MPA-Seminar, 06. - 07. Oktober 2011, Stuttgart.

Fey, P.; Döring, D.; Busse, G.; Frick, J.; Grüner, F.: Preliminary results on non-contact characterisation of weathered mineral materials by surface acoustic waves. Proceedings of the 5th Conference on Emerging Technologies in Non Destructive Testing, Ioannina, Greece, September 19th - 21st 2011, Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V (eds. Paipetis, A.S., Matikas, T.E., Aggelis, D.G., v.Hemelrijck, D.).

Frick, J., Lehmann, F., Menzel, K., Pakdel, H., Krüger, M.: Monitoring of salt content in mineral materials using wireless sensor networks. International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Bookseries vol. 6 (eds. Oral Buyukozturk, Mehmet Ali Tasdemir, Oguz Gunes and Yilmaz Akkaya).

9%Cr Steels Using Neural Networks. Transactions on Machine Learning and Data Mining, Vol. 4 – Number 1, S. 1-16, July 2011.

Gerber, S.: Berücksichtigung der Messunsicherheit bei Bruchmechanikversuchen. DVM-Fortbildungseminar Bruchmechanische Prüfmethoden, 24.-25.März 2011, Stuttgart.

Kinder, J.: Rissbehaftete Polendplatten im Hochleistungsgenerator eines Pumpspeicher-Wasserkraftwerks, 5. GWP-Werkstoffsymposium, 27. Mai 2011, München.

Kinder, J., Diem, H., Kastner, D.: Rissbildungen in Polendplatten von Hochleistungsgeneratoren eines Pumpspeicherkraftwerkes – Ursachen und Abhilfemöglichkeiten. 37. VDI-Jahrestagung Schadensanalyse – Produktverbesserung durch Schadensanalyse, Würzburg 19. - 20.10.2011, VDI-Berichte 2150, Düsseldorf.

Klenk, A.: Progress in the Development of Materials for Advanced Ultra Supercritical Power Plants. 8th Indo-German Theme Meeting on Advanced Power Plant Materials, February 16-17, 2011, Kalpakkam, India.

Klenk, A., Feuillette, C., Bussmann, J., Maile, K., Dogan, B.: Investigation of the creep-fatigue behavior of ferritic and martensitic steels by tests with long hold times. International Symposium on Creep-Fatigue Interactions: Test Methods and Models, 18.11.2010, San Antonio (USA).

Klenk, A., Feuillette, C., Schmidt, K., Klein, T.: Untersuchungen zum Verhalten von Wärmeeinflusszonen in 9-10%-Chromstählen und deren Auswirkung auf Spannungszustände in Bauteilen. Studies on the Behaviour of Heat Affected Zones in 9-10 Cr Steels and their Influence on Stress State in Components. 37. MPA-Seminar, 5.-6. Oktober 2011, Stuttgart.

Klenk, A., Feuillette, C., Maile, K.: Experimental and numerical investigations on multi-axial creep-fatigue. International Symposium on Creep-Fatigue

Interactions: Test Methods and Models 18.11.2010, San Antonio (USA).

Klenk, A., Hobt, A., Roos, E., Mao, T.S., Müller, F., Scholz, A., Oechsner, M., Berger, C., Sheng, S., Ewald, J.: Bewertung von Bauteilen mit Fehlstellen in Abhängigkeit vom Kriechverformungsvermögen 34. Vortragsveranstaltung „Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe“, Düsseldorf, 25.11.2011.

Klenk, A., Maile, K., Roos, E.: Advance Research for Developing and Qualifying Materials for Components. Clean Coal India 2010, December 7, 2010, New Delhi.

Klenk, A., Maile, K., Schmidt, K.: Component Lifetime Evaluation based on Longterm Behaviour of Martensitic Steels and Weldments. New High Temperature Materials Seminar, ETD, IOM, London, June 22, 2011.

Klenk, A., Maile, K., Schmidt, K.: Assessment of weldment behaviour and weld reduction in 9-11 Cr steels. New High Temperature Materials, International Conference, Chicago, 4.-5. August 2011.

Klenk, A., Schmidt, K., Speicher, M., Maile, K.: Gebrauchseigenschaften des Werkstoffs Alloy 617 – Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt MARCKO 700. 26. FDBR-Fachtagung Rohrleitungstechnik, 22. – 23. März 2011 in Stuttgart.

Klenk, A., Speicher, M., Maile, K.: Weld behaviour of martensitic steels and Ni-based alloys for high temperature components. 6th International Conference on Creep-Fatigue and Creep-Fatigue Interaction, January 22-25, 2012, Mamallapuram, India.

Klenk, A., Speicher, M., Udoh, A., Sasikala, G.: Consideration of Integrity Behaviour of Structures in the Creep Regime by Fracture and Damage Mechanics Methods. 8th Indo-German Theme Meeting on Advanced Power Plant Materials, February 16-17, 2011, Kalpakkam, India.

Kockelmann, H.: VDI 2290 – was ist ihre Botschaft? 1. VPCM Vessel-Pipe-Connection-Meeting, 28.1.2011, Hamburg.

Kockelmann, H.: Nachweis der Einhaltung von Leckageratengrenzkriterien für Flanschverbindungen. 9. Europäische Druckgerätetage, 08.-09.6.2011, Fürstenfeldbruck.

Kockelmann, H.: Ausblasen einer „ausblässicheren“ Kammprofilabdichtung – eine Schadensanalyse. 5. Münchener Forum Verbindungstechnologie, 01.-02. Dezember 2011, München-Unterhaching.

Krüger, M. (Hrsg.): Cultural Heritage Preservation – EWCHP 2011, Proc. of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Sept. 26-27, Berlin.

Krüger, M., Grosse, C.U., Lehmann, F.: Automated shear-wave techniques to investigate the setting and hardening of concrete in through-transmission. International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Bookseries Vol. 6 (eds. Buyukozturk, O., Tasdemir, M.A., Gunes, O., Akkaya, Y).

Krüger, M., Samuels, J.M., Bachmaier, S.A., Lehmann, F., Willeke, J.: Condensation risk analysis and indoor climate manipulation assisted by continuous monitoring at Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd. In: M. Krüger (Ed.), Cultural Heritage Preservation – EWCHP 2011, Proc. of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Sept. 26-27 2011, Berlin, pp. 53-61.

Kurz, J., Jüngert, A., Dugan, S., Dobmann, G., Roos, E.: Experimentelle POD-Bestimmung mittels Ultraschall Phased Array zur Einbeziehung zerstörungsfreier Prüfungen in probabilistische Versagensanalysen. Berichtsband DGZfP-Jahrestagung, 30.5.-1.6.2011, Bremen.

Lehmann, F., Frick, J., Krüger, M., Menzel, K.: Monitoring of moisture content by complex impedance measurements. International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey, RILEM Bookseries Vol. 6 (eds. Buyukozturk, O., Tasdemir, M.A., Gunes, O., Akkaya, Y).

Lehmann, F., Krüger, M.: Wireless impedance measurements to monitor moisture and salt migration in natural stone. In: M. Krüger (Ed.), Cultural Heritage Preservation – EWCHP 2011, Proc. of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Sept. 26-27, 2011, Berlin, pp. 62-69.

Maile, K.: Werkstofftechnische Herausforderungen und Konsequenzen bei der Realisierung neuer hocheffizienter Kraftwerke. EagleBurgmann - Fachtagung Dichtungstechnik für Kraftwerke. Berlin 2011.

Maile, K.: Untersuchungen zum langzeitigen Betriebsverhalten von Rohren aus neuen Werkstoffen für zukünftige hocheffiziente 700°C Kraftwerke. VDI Fachkonferenz „Werkstoffe in der Kraftwerkstechnik“, Mannheim 06.-07. 09. 2011. Vortragsband S. 37 - 46, VDI Wissensforum Düsseldorf.

Maile, K., Klenk, A., Metzger, K.: Studies on Creep Damage development in 9 Cr steels. New High Temperature Materials, International Conference, Chicago, 4-5 August 2011.

Maile, K., Roos, E., Klenk, A., Hoffmann, M.: Optimization of Ni-based Alloy 617. Second International Workshop on Structural Materials for Innovative Nuclear Systems (SMINS-2), Daejeon, Korea, 31 August to 3 September 2010, Workshop Proceedings (Erscheinungstermin ist nicht bekannt)

Maile, K., Scheck, R., Willer, D., Ruoff, H.: Schadensmerkmale dargestellt mittels FIB-Schnitte. Sonderbände der Praktischen Metallographie 43 (2011) p. 135 - 140.

Mielich, O., Reinhardt, H.W.: Festigkeitseigenschaften als Beurteilungskriterium bei der Schadensanalyse eines AKR-geschädigten Labor- und Bauwerkbetons. In: Raupach, M. (Hrsg.) „2. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken“, TA Esslingen, 25.-26.01.2011, S. 223-230.

Mielich, O., Reinhardt, H.W.: Festigkeitseigenschaften als Beurteilungskriterium bei der Schadensanalyse eines AKR-geschädigten Labor- und

Bauwerkbetons. Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege 17 (2011), Nr. 3/4, S. 1-14.

Mielich, O., Reinhardt, H.W.: Phonolith unterdrückt Alkali-Kieselsäure-Reaktion / Phonolite suppresses alkali-silica-reaction. IWB Mitteilungen, Jahresbericht 2008/10 Activities, S. 135-142.

Mücke, R., Feuillet, C., Klenk, A., Schweizer, C., Seifert, T.: Optimierung der numerischen Verformungs- und Schädigungsberechnung zur Lebensdauerbestimmung bei Kriechermüdungsbeanspruchung (Lebensdauerkonzept). Zwischenbericht über das Vorhaben Nr. 1033, Informationstagung Turbomaschinen, Frühjahr 2011, Bad Neuenahr, Heft R554 (2011).

Naga, S.M., Kenawy, S.H., Awaad, M., Roos, E., Lyutovich, A., Ruoff, H., Krisch, R.: Combined zirconia toughened alumina (ZTA) stacks obtained by electron beam physical vapour deposition. Ceramics International, Nr. 37, pp. 771-777.

Offermanns, S., Kockelmann, H., Mayer, U., Roos, E.: Dichtheitsnachweis für Transport- und Lagerbehälter unter Störfallbedingungen mittels numerischer Simulation. 37. MPA-Seminar, 6. und 7. Oktober 2011, Stuttgart.

Ottens, W., Hahn, R., Kockelmann, H.: Stopfbuchsabdichtungen durch Oberflächenbehandlung und -beschichtung optimieren. Dichtungstechnik Jahrbuch 2011, Berger/Kiefer (Hrsg.) ISGATEC, S. 310–323.

Reinhardt, H.-W., Grosse, C.U., Aggelis, D., De Belie, N., Krüger, M., Ohtsu, M., Robeyst, N., Shah, S.P., Tatarin, R.: Recommendation of RILEM TC 218-SFC: Sonic methods for quality control of fresh cementitious materials. Testing of fresh concrete by ultrasound transmission. RILEM TC 218-SFC, In: Materials and Structures (2011) 44:1047–1062. DOI 10.1617/s11527-011-9734-9.

Reinhardt, H.W., Mielich, O.: A fracture mechanics approach to the crack formation in alkali-sensitive grains. Cement and Concrete Res. 41 (2011), No. 3, pp. 255-262.

Reinhardt, H.W., Mielich, O.: Static vs. dynamic Young's modulus as indicator for ASR degradation.

In C. Leung and K.T. Wan (Eds.) "Advances in Construction Materials through Science and Engineering", RILEM PRO 79, 2011, S. 104 (Abstract book).

Roos, E., Wackenhut, G., Lammert, R., Schuler, X.: Probabilistic safety assessment of components. International Journal of Pressure Vessels and Piping – Volume 88, number 1, January 2011, S. 19-25.

Samuels, J.M., Krüger, M., Bachmaier, S.A., Lehmann, F., Willeke, J.: Risk analysis Criteria to monitor Moisture Migration at Johanniskirche in Schwäbisch Gmünd, Germany. First Middle East conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, SMAR 2011, 8-10 February 2011, Dubai, UAE.

Schmidt, K., Klenk, A., Roos, E.: Weldment Behaviour of Martensitic Steels. 8th Indo-German Theme Meeting on Advanced Power Plant Materials, February 16-17, 2011, Kalpakkam, India.

Schmidt, K., Klenk, A., Roos, E.: Qualifying Materials for the 700/720°C Power Plant –Results from MARCKO 700, Part 1: Materials for the 700/720°C Power Plant, VGB Power Tech 1/2, 2012, pp. 74-84.

Schmidt, K., Klenk, A., Roos, E.: Qualifying Materials for the 700/720°C Power Plant –Results from MARCKO 700, Part 2: Component test and simulation, VGB Power Tech 3, 2012, pp. 97-103.

Schneider, Y., Soppa, E., Kohler, C., Mokso, R.; Roos, E.: Numerical and experimental investigations of the global and local behavior of an Al(6061)/Al₂O₃ metal matrix composite under low cycle fatigue. 11th International Congress on the Behavior of Materials, June 5th to 9th, Como, Procedia Engineering 10, pp. 1515-1520, Milan, Italy.

Simatos, A., D. Krätschmer, K.-H. Herter: Dehnkriterien für strukturmechanische Nachweise bei druckführenden Komponenten, 37. MPA-Seminar, 06. - 07. Oktober 2011, Stuttgart.

Speicher, M., Klenk, A., Maile, K., Roos, E.: Behaviour of Ni-based Alloys for Fossil-fired Power Plant Components in the Long-term Creep Regime. Advanced Materials Research, Vol. 278, pp 241-246.

Speicher, M., Scheck, R., Willer, D., Maile, K.: Methoden zur Quantifizierung von Gamma-Strich-Ausscheidungen in Nickelbasis-Legierungen mittels REM und TEM. Fortschritte in der Metallographie: 45. Metallographietagung in Karlsruhe 2011. Sonderband Praktische Metallographie.

Spies, M., Rieder, H., Dillhöfer, A., Dugan, S.: Abbildung und Größenbestimmung von Spannungskorrosionsrissen in austenitischen Komponenten mittels Synthetischer Apertur Fokus Technik. Berichtsband DGZfP-Jahrestagung, 30.5.-1.6.2011, Bremen.

Stapf, G. & Aicher, S.: Bending Strength of Finger Jointed Solid Lumber. In: International Council For Research And Innovation In Building And Construction, Working Commission W18 – Timber Structures, Alghero, Italy', pp. CIB-W18/Notes.

Stegmaier, Michael: Zum Einfluss der Carbonatisierung auf die Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Porenbetonplansteinen. In: Bauphysik 33 (2011), Heft 5, S. 315-317.

Volland G., Vollpracht A., Krause G. und Knjasev V.: Beitrag zum Nachweis auswaschbarer organischer Verbindungen aus Baustoffen. Vergleich der Ergebnisse von Untersuchungen mit Kernresonanzspektrometrie ($^1\text{H-NMR}$) mit den Gehalten an Total Organic Carbon (TOC) wässriger Lösungen und Eluate

Weirich, T.; Frick, J.: Untersuchung einer Natursteinsäule mittels Schallemissions- und Ultraschalltransmissionsanalyse. DGZfP-Jahrestagung 2011, Zerstörungsfreie Materialprüfung, Berichtsband 127-CD.

Zeller, M., Zeuner, E., Krimmel, O., Roos, E.: Erprobung thermischer Spritzverfahren zur Tausch- aufbereitung von Nutzfahrzeug-Motorblöcken mit strahlmittelfreier Aktivierung. Tagungsband zum

14. Werkstofftechnischen Kolloquium und zur 9. Industriefachtagung Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik, 01. und 02. September 2011 in Chemnitz, Schriftreihe: Werkstoffe und Werkstofftechnische Anwendungen, Band 43, S. 72-80.

Mitarbeiter

Die MPA Universität hat im Jahr 2011 durchschnittlich 360 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen beschäftigt. Damit ist ein leichter Rückgang der Beschäftigtenzahl um rd. 3% festzustellen. Dieser hat sich vor allem im Verwaltungsbereich ergeben. Die nachstehende Grafik zeigt die Aufteilung auf die unter-

schiedlichen Bereiche, in dieser Aufteilung hat sich eine leichte prozentuale Anhebung der Beschäftigtenzahl in den sogenannten operativen Bereichen gegenüber den nichtoperativen Bereichen ergeben.

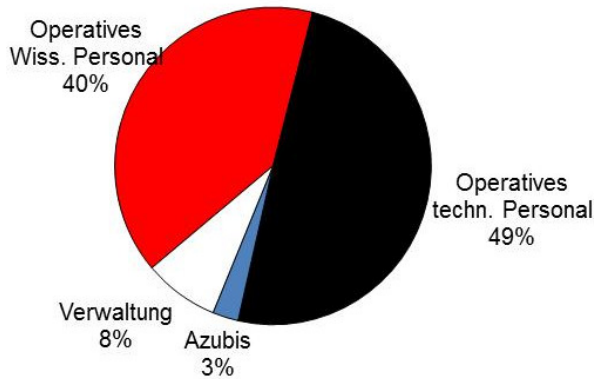


Abb.1: Personalaufteilung 2011

Die Auftragsverteilung nach Branchen ist relativ konstant. Es ergaben sich keine signifikanten Änderungen.

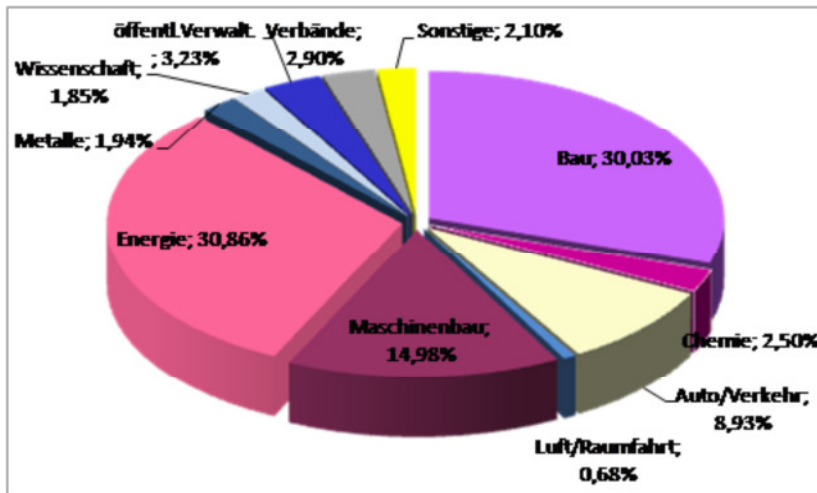


Abb. 2: Aufteilung Arbeitsgebiete 2011 (Umsatz)

Der Umsatz im Jahr 2011 stieg um rd. 14% gegenüber dem Jahr 2010. Die Sachkosten waren leicht rückläufig bei konstanten Personalkosten. Investi-

tionen wurden nur über Eigenmittel getätigt, die Summe war um rd. 13 niedriger als im Jahr 2010.

	Umsatz	Sachkosten	Personalkosten	Investitionen aus Eigenmitteln
Veränderung gegenüber 2010 in %	+14	-5	0	-13

