

Jahresbericht 2009



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

Direktion:

Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Maile

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Große

Pfaffenwaldring 32

70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685-62604

Fax: 0711 / 685-63144

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

Inhalt

	Seite
1 Vorwort	5
2 Aktuelles aus den Abteilungen	7
3 Neue Geräte, Einrichtungen	18
4 Forschungsberichte	25
5 Kooperationen	63
6 Veranstaltungen, Auszeichnungen, Ehrungen, Preise,	65
7 Gastwissenschaftler, Gastvorträge	69
8 Promotionen	71
9 Lehre	72
10 Veröffentlichungen	74

1 Vorwort

Auch in diesem Jahr möchten wir Sie gerne wieder mit unserem Jahresbericht über die durchgeführten Forschungsprojekte und Arbeiten der Abteilungen an der MPA Universität Stuttgart informieren.

Einer der Höhepunkte des vergangenen Jahres war das 125-jährige Bestehen der MPA, welches mit einem Festakt in der Staatsgalerie Stuttgart am 8. Oktober mit zahlreichen Gästen gefeiert wurde.

Es gibt nicht viele Institute an Universitäten mit der Ausrichtung der MPA, die älter sind. In den 125 Jahren ihres Bestehens hat die MPA die Entwicklung der Technik begleitet und in Bereichen auch mit beeinflusst. Diese lange Geschichte ist für uns kein Grund zum Ausruhen, sondern Motivation, die erfolgreiche Vergangenheit im positiven Sinne weiterzuführen.

Die MPA wurde durch die Wirtschaftskrise erfreulicherweise nur geringfügig tangiert. So konnten durch das Engagement der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter Arbeitsfelder, die rückläufig waren durch Zuwächse in anderen Bereichen kompensiert werden. Dies machte Investitionen in Großgeräte, wie z. B. in Rasterelektronenmikroskope, möglich. Mit diesen neuesten Analyse- und Prüfmöglichkeiten ist eine gänzlich neue Qualität der Ergebnisbildung und -darstellung verbunden, die unmittelbar in die Forschungsergebnisse einfließt und unseren Kunden zugute kommt.

Die gute Kooperation mit der Industrie und öffentlichen Institutionen wurde auch im Jahre 2009 erfolgreich weitergeführt und ausgeweitet. In zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten, Gutachten und Stellungnahmen konnte die MPA Universität Stuttgart ihre Kompetenz sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch der direkten und gezielten Umsetzung der neuesten Forschungsergebnisse aus den verschiedenen Arbeitsbereichen in die industrielle Praxis erneut unter Beweis stellen.

Im Jahre 2009 wurde in einer Vereinbarung mit der VGB Power Tech die Kooperation auf dem Bereich des Erkenntnis- und Wissenstransfers aus der anwendungsorientierten Forschung in die Praxis strukturiert und formalisiert.

Die langjährige gute Zusammenarbeit mit dem international anerkannten japanischen Materialforschungsinstitut NIMS wurde mit einem Kooperationsvertrag erneuert.

Der Austausch neuester Forschungsergebnisse der MPA wurde auch im vergangenen Jahr durch Konferenzen, Workshops und Fortbildungsveranstaltungen weiter ausgebaut.

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.



Prof. Dr.-Ing. habil. E. Roos,
Geschäftsführender Direktor

Direktion

Beirat

Baustoffe und Brandschutz

Mineralische Baustoffe
Holzkonstruktionen
Brandschutz

Erhaltung von Bauten und Anlagen

Dauerhaftigkeit und Schutz von Bauten und Anlagen
Zerst. freie Prüfung und Überwachungstechnik

Baukonstruktionen und Werkstofftechnik

Baukonstruktionen und Bauteilprüfung
Werkstoffverhalten
Werkstoffeigenschaften

Geotechnik

Geotechnik

Berechnung, Auslegung und Betriebsverhalten

Berechnung
Beanspruchungsanalysen
Lebensdauermanagement

Stabsabteilungen

Stabsstellen

Zentrale Einrichtungen

Bauwesen

Bauwesen und Maschinenbau

Maschinenbau

2 Aktuelles aus den Abteilungen

Fachbereich Baustoffe und Brandschutz

Abteilung Holzkonstruktionen: Dr. rer. nat S. Aicher / Dr.-Ing. G. Dill-Langer Tel.: 685/ -62287 bzw. -62280 E-Mail: simon.aicher@mpa.uni-stuttgart.de gerhard.dill-langer@mpa.uni-stuttgart.de
Referat Holzbau, Holzwerkstoffe, Holzschutz: Dr. rer. nat. S. Aicher, Dipl.-Ing. (FH) W. Klöck
Referat Qualitätsmanagement, Festigkeitssortierung, Modellierung: Dr.-Ing. G. Dill-Langer
Referat Verbindungstechnik, Klebstoffe: Dr. rer. nat. S. Aicher, Dipl.-Ing. (BA) C. Rothkopf

Neuerungen in der Abteilungsstruktur

Im Hinblick auf eine eindeutigere Zuordnung von Arbeits- und Kompetenzschwerpunkten zu organisatorischen und personellen Einheiten wurde die vormalige Abteilung Holzbau mit bislang zwei Referaten im Jahr 2009 in drei fachlich deutlich fokussiertere Referate gegliedert. Die neue Abteilung Holzkonstruktionen umfasst nunmehr neben dem Referat Holzbau, Holzwerkstoffe und Holzschutz das Referat Qualitätsmanagement, Festigkeitssortierung, Modellierung sowie das Referat Verbindungstechnik, Klebstoffe. In den einzelnen Referaten wurden im Jahr 2009 die folgenden exemplarisch herausgegriffenen Projekte durchgeführt:

Referat Holzbau, Holzwerkstoffe, Holzschutz

- Schadensanalysen und Tragwerksbegutachtungen an großen Dachtragwerken (u. a. Schwimmbäder, Supermärkte und große Veranstaltungshallen)
- Als besonderer Schwerpunkt entwickelte sich im Jahr 2009 die Entwicklung von Instandsetzungskonzepten insbesondere unter Einsatz von Klebstoffen und selbstbohrenden Schrauben. Zur Verifizierung der Maßnahmen wurden umfangreiche Großbauteilversuche an unterschiedlich vorgeschädigten und sodann mit verschiedenen Methoden ertüchtigten Holzbauteilen durchgeführt.
- Im Rahmen eines allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungsverfahrens zu geklebten Hochleistungsverbindungen in Brettschichtholzbauweise (patentiertes Hess-Keilstoßsystem) wurden zur Optimierung der Stoßausbildung und zur Verifizierung der rechnerischen Tragfähigkeiten Versuche an sehr großen Biegeträgern mit bis zu 20 m Länge durchgeführt.

Referat Qualitätsmanagement, Festigkeitssortierung, Modellierung:

- Zerstörungsfreie und minimalinvasive Untersuchungen an Holzbrücken:
Im Auftrag des Regierungspräsidiums Stuttgart wurden aus gegebenem Anlass in Zusammenarbeit mit der Abteilung ZfP und Überwachungstechnik insgesamt 17 Holzbrücken im

Großraum Stuttgart im Hinblick auf die Standsicherheit untersucht. Hierbei kamen neben konventionellen Verfahren auch innovative Untersuchungsmethoden zum Einsatz, die teilweise Gegenstand laufender Forschungsarbeiten im Referat sind. Unter anderem wurden Ultraschall-Echo-Methoden mit Bohrwiderstandsmessungen als komplementäre Verfahren eingesetzt. Die Untersuchungen führten teilweise zu erheblichen Neubewertungen der Standsicherheit gegenüber früheren Brückenhauptuntersuchungen, die ausschließlich mit konventionellen Untersuchungsverfahren durchgeführt worden waren. Die Erkenntnisse sollen in neu beantragten Forschungsprojekten vertieft werden.

- Modellierung gekrümmter Brettschichtholzträger mit innenliegenden Bewehrungen bzw. Oberflächenbeschichtungen im Hinblick auf die Vermeidung von Quersugschäden.
- Im Bereich Zertifizierung wurde im Berichtsjahr u. a. das erste chinesische Brettschichtholzwerk und neues großes Furnierschichtholzwerk in Russland zertifiziert.

Referat Verbindungstechnik und Klebstoffe

Der Schwerpunkt des neuen Referates liegt entsprechend der Abteilungshistorie als deutschlandweit wichtigste Prüf- und Zertifizierungsstelle für Klebstoffe in tragenden Holzbauteilen auf dem Sektor geklebter Verbindungen und Klebstoffe. Daneben werden jedoch in zunehmendem Maße auch Zulassungsuntersuchungen und Zertifizierungsaufgaben an mechanischen Verbindungsmitteln, insbesondere an selbstbohrenden Schrauben vorgenommen. In diesem Zusammenhang finden auch Produktentwicklungen und Überwachungen mit/bei führenden Schraubenherstellern in Baden-Württemberg und Taiwan statt.

Im Bereich Klebstoffe wurde in enger Kooperation mit führenden Klebstoffherstellern, hierbei insbesondere mit den Firmen Casco Adhesives (Akzo Nobel, Schweden), Purbond / Henkel (Schweiz / Deutschland) und BASF (Deutschland) mehrere neue Entwicklungen im Bereich von Flächen- und Keilzinkenklebstoffen zum Abschluss und zur Zulassungserteilung gebracht. Im Bereich von Spezialklebstoffen wurde mit einem Baden-Württembergischen Unternehmen (Wevo Chemie) nach umfangreichen Zulassungsuntersuchungen an der MPA der erste Klebstoff für eingeklebte Stahlstäbe in tragende Holzbauteile seitens des Deutschen Institutes für Bautechnik zugelassen. Hierbei wurden für künftige Entwicklungen Zulassungsstandards gesetzt.

Forschungsprojekte

- *Qualitätsprüfung von Brettschichtholz-Klebefugen mittels Ultraschall*

Im Rahmen des Projektes wurden im Berichtsjahr neue Prüfmethode zur Detektion von Fehlstellen in BSH-Flächenverklebungen entwickelt und an Modell-Fehlstellen verifiziert. Insbesondere wurde der Einsatz von Sensorclustern und die Schrägeinstrahlung von Ultraschall untersucht.

- *Verbundträger aus Kanthölzern und Brettschichtholz-Hochleistungslamellen*

Die Ergebnisse des im Berichtsjahr abgeschlossenen Forschungsvorhabens beinhalteten die Entwicklung eines hybriden Querschnittsaufbaus mit einer gegenüber konventionellen Trägern erhöhten Tragfähigkeit. Der Industriepartner beabsichtigt die Umsetzung der For-

schungsergebnisse durch die Markteinführung eines neuen Bauproduktes auf der Basis einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung in Zusammenarbeit mit der MPA Universität Stuttgart.

- *Wood Wisdom-(ERA)Net-Projekt „Improved Moisture“*

Im Berichtsjahr wurden bruchmechanische Langzeituntersuchungen an speziell entwickelten Mode II-Prüfkörpern zum Rissfortschritt unter wechselnden Klimabedingungen durchgeführt. In Kooperation mit VTT (Finnland) wurde nichtlineare Simulationsrechnungen zur Abbildung der Experimente durchgeführt.

- *Dynamische Beanspruchbarkeit von keilgezinktem Vollholz aus Kiefer*

Das im Dezember 2009 abgeschlossene Forschungsvorhaben hatte das Dauerschwingverhalten von geklebten Keilzinken-Längsstößen in Kanthölzern aus Kiefernholz in bauteilrelevanten Querschnitten (60 mm x 120 mm, 100 mm x 140 mm, 100 mm x 200 mm) zum Gegenstand. Es wurden sowohl unbehandelte als auch kesseldruckimprägnierte Hölzer in Biegeschwellversuchen mit einem Spannungsverhältnis von 0,5 und einer Grenzlastspielzahl von $2 \cdot 10^6$ Lastspielen untersucht. Die Versuche belegten einen ausgeprägten Einfluss der Anordnung der Keilzinkenverbindung im Querschnitt und der hieraus resultierenden Kerbsituation. Die erhaltenen Beiwerte für die Festigkeitsminderung infolge Ermüdung entsprechen näherungsweise den Werten, die nach EN 1995-2 für schubbeanspruchtes Holz anzusetzen sind. Ein vertiefendes Folgeprojekt ist in Beantragung.

- *Langzeitbeständigkeit von mit PU-Klebstoffen verklebten Holzverbindungen*

Das Forschungsvorhaben wurde mit finanzieller und wissenschaftlicher Unterstützung der Firma Bayer MaterialScience sowie der Firma Purbond-Henkel durchgeführt und im Berichtsjahr abgeschlossen. Im Focus standen die Beständigkeit und das Langzeitverhalten von feuchtehärtenden Einkomponenten-Polyurethanklebstoffen, die heute die wichtigste Klebstoffgruppe für die Herstellung von keilgezinkten Längsverbindungen in Bauholz darstellen. Die an unterschiedlichen Produkten (Prepolymere, Katalysatoren, Füllstoffe) durchgeführten mechanisch-technologischen und analytischen (z. B. Nanoindentprüfungen) Untersuchungen erbrachten mehrere grundlegende neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit und diesbezüglichen Einstellbarkeit dieser Klebstoffgruppe. Das betrifft auch Wechselwirkungen mit den Fügeflächen (Topologien, Oberflächenenergien), die quantifiziert wurden. Das Projekt ergab auch Anstoß zu neuen Prüfverfahren, die eine deutliche Verkürzung der Prüfzeiten in Zulassungen ermöglichen werden.

- *Langzeitbeständigkeit und Sicherheit Harnstoffharz-verklebter tragender Holzbauteile*

Das seitens des Deutschen Instituts für Bautechnik und der Industrie finanzierte Forschungsvorhaben beschäftigte sich mit der Evaluierung der Standsicherheit von Harnstoff-Formaldehydharz-verklebten Bestandsbauten. Die genannte Klebstoffgruppe ist dem Klebstofftyp 2 zuzuordnen, der heute in Deutschland als Folge des Tragwerksversagens in Bad Reichenhall nicht mehr verwendet werden darf. Im Vordergrund des Projektes standen die Fragen nach einer gegebenenfalls kritischen Degradation der Beständigkeiten der Klebefugen speziell unter erhöhten Feuchte- und Wechselklimabeanspruchungen. Im Rahmen des Vorhabens wurden mehr als rd. 500 Brett-schichtholz-Bauteile in 60 Gebäuden/Hallen an

unterschiedlichen Standorten in Deutschland untersucht sowie umfassende Klebstoff-, Delaminierungs- und Scherprüfungen an natürlich und künstlich gealterten Proben vorgenommen. Die Summe der Ergebnisse belegte für den Fall einer weitgehend bestimmungsgemäßen Bauteilherstellung und -nutzung keine überproportionale Klebstoffugendegradation. Dies gilt insbesondere auch für Bauteile, die deutlichen Nutzungsklasse 2 Klimabedingungen, für die diese Klebstoffgruppe nicht konzipiert war, ausgesetzt waren.

Abteilung Brandschutz:

Dr. rer. nat. S. Lehner / Dr. rer. nat. S. Wies

Tel.: 685/ -62713 bzw. -62710

E-Mail: stefan.lehner@mpa.uni-stuttgart.de

stefan.wies@mpa.uni-stuttgart.de

Referat Brandverhalten von Baustoffen: Dr. rer. nat. S. Lehner, Dipl.-Ing. (FH) G. Müller

Referat Feuerwiderstand von Bauteilen: Dr. rer. nat. S. Wies, Dipl.-Ing. M. Reiber

Aufgaben der Abteilung

Die Bestimmung von Brandverhalten und Feuerwiderstand als „wesentliche Anforderungen“ („essential requirements“) in der Bauproduktenrichtlinie erfuhr im gemeinsamen europäischen Markt nach wie vor eine hohe Nachfrage.

Hauptaufgabengebiet der Abteilung „Brandschutz“ war die experimentelle Bestimmung des Brandverhaltens von Bauprodukten und des Feuerwiderstands von Bauteilen und damit verbunden die Tätigkeit als national anerkannte sowie europäisch bei der Kommission der Europäischen Gemeinschaft notifizierte („notified body“). Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für das Brandverhalten und den Feuerwiderstand.

Weiterer Schwerpunkt war die Beratung von Firmen, Ingenieurbüros, Verbänden, Ministerien, Bauaufsichtsbehörden der Länder und des DIBt in brandschutztechnischen Fragen und die Beratung und brandschutztechnische Begutachtung bei Zustimmungen im Einzelfall für Sonderbauprodukte / -bauweisen oder innovative Bauprodukte, bei der Erarbeitung von Sanierungs- und Brandschutzkonzepten und Ertüchtigungsmaßnahmen sowie bei gerichtlichen Beweissicherungsverfahren oder Streitfällen.

Im Rahmen der Aus- u. Weiterbildung von Studenten und Feuerwehrleuten führte die Brandprüfstelle der MPA auch im Jahr 2009 wieder mehrfach Demonstrationsversuche durch und hielt diverse Schulungstermine ab.

Die Abteilung verfügt über sämtliche Brandprüfeinrichtungen sowohl für das nationale als auch das neue europäische Prüf- und Klassifizierungssystem für das Brandverhalten von Bauprodukten und den Feuerwiderstand von Bauarten und Bauteilen, darunter u.a.:

Verschmelungs- und Beflammungs-Rauchdichteapparaturen, Dachprüfstand, Fußbodenprüfstand, Nichtbrennbarkeitsöfen, Laboratorien für Kleinbrennerversuche, Brandschacht, SBI-Prüfstand, Polsterverbundprüfstand, Kleinprüfstand, Wandofen, Deckenofen, Kombiofen, Stützenofen, Rauchdichtheitsprüfstand, Dauerfunktionsprüfstände für Türen.

Forschungstätigkeit

- Die Abteilung Brandschutz konnte ein erstes durch das Deutsche Institut für Bautechnik, DIBt, Berlin finanziertes Forschungsprogramm zur „*Untersuchung des Alterungsverhaltens von Baustoffen/Bauprodukten im Hinblick auf das europäisch klassifizierte Brandverhalten nach DIN EN 13501-1 bei Prüfungen im SBI nach DIN EN 13823*“ erfolgreich abschließen. Hierbei wurden an verschiedenen Baustoffen vergleichende Versuche im SBI nach DIN EN 13823 und im Brandschacht nach DIN 4102 sowohl an in einem Freibewitterungsgelände über lange Jahre freibewitterten als auch an vergleichbar aktuell hergestellten Baustoffen zum Nachweis des Einflusses der natürlichen Alterung auf das Brandverhalten durchgeführt.
Aus Urheberrechten gestattet der Forschungsgeber bisher noch nicht die Veröffentlichung.
- Die Abteilung plant die Teilnahme am angekündigten EU-Forschungsvorhaben zum europäischen Nachweis des Glimmverhaltens von Baustoffen mit dem Schlyter-Test.
- Die Abteilung Brandschutz ist beteiligt am SFB-Antrag „*Adaptive textile Gebäudehüllen*“
Hierbei soll die gegenseitige Beeinflussung von Brandverhalten, mechanischen Eigenschaften und Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse wie Alterung in der Witterung bei der Anwendungen von Geweben für textile Wand- und Dachtragwerke untersucht werden.

Beschaffung neuer Prüfeinrichtungen

In 2009 konnte eine zusätzliche Rauchabzugseinrichtung am SBI für nachglimmende Probekörper in Betrieb genommen werden. Nach Installation der zentralen europäischen SBI-Prüfeinrichtung für Baustoffe sowie des Bauteil-Kombiprüfofens sind die für die weitere Ausrichtung vor allem auch auf die aktuell umgesetzten europäischen Brandprüfungen notwendigen Investitionen in neue Prüfgeräte weitgehend erfolgt. In der Brandprüfstelle der MPA Stuttgart konnte außerdem eine Prüfeinrichtung zur Durchführung von Brandversuchen an Fahrschächttüren nach EN 81-58 mit der Möglichkeit zur simultanen Mehrfachprüfung sowie eine Prüfeinrichtung zur Brandprüfung an Industrie-Schutzhelmen nach DIN EN 397 und zur Prüfung der Flammbeständigkeit nach DIN EN 13087-7 in den Standard-Prüfbetrieb genommen werden. Zur Durchführung europäisch neu hinzugekommener Brandversuche zum Nachweis des Glimmverhaltens wurde die Beschaffung einer Prüfeinrichtung nach Nordtest FIRE NT 035 (sog. Schlyter-Test) beantragt.

Fachbereich Berechnung, Auslegung und Betriebsverhalten

Abteilung Beanspruchungsanalysen: Dr.-Ing. H. Kockelmann / Dipl.-Phys. U. Mayer Tel.: 685/ -62578 bzw. 62607 E-Mail: hans.kockelmann@mpa.uni-stuttgart.de uwe.mayer@mpa.uni-stuttgart.de
Referat Dichtungstechnik: Dipl.-Ing. R. Hahn, Dipl.-Ing. H. Kurz
Referat Experimentelle Spannungsanalyse: Dr.-Ing. H. Kockelmann, Dipl.-Ing. A. Schlüter
Referat Hochgeschwindigkeitsbeanspruchung: Dipl.-Phys. U. Mayer, Dipl.-Ing. W. König

Referat 53250 Hochgeschwindigkeitsbeanspruchung

- Neues BMBF-Forschungsvorhaben** Kennzeichen 1502368 (01.04.2009 - 30.9.2011):
 „Überprüfung und Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden für dynamische Rissinitiierung und Rissarrest“ (Gemeinsames Vorhaben mit Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg)
 Ziel des Vorhabens ist die Weiterentwicklung und Validierung von Methoden zur Bestimmung der dynamischen Rissinitiierung und des Rissarrests. Insbesondere sollen die Arrestkurve durch die Ermittlung der Arrestzähigkeit K_{Ia} und der dynamischen Bruchzähigkeit K_{Id} als Funktion der Beanspruchungsgeschwindigkeit abgesichert und die Gültigkeit von empirischen Korrelationen sowie die Verwendbarkeit dynamischer Bruchzähigkeitswerte als Ersatzkennwerte für die Arrestzähigkeit untersucht werden. Zur Bestimmung der dynamischen Bruchzähigkeiten und der Arrestzähigkeiten sind Versuche an unterschiedlichen Probenotypen und bei unterschiedlichen Beanspruchungsgeschwindigkeiten erforderlich. In Ergänzung zu den am Fraunhofer IWM durchzuführenden Untersuchungen sollen an der MPA Stuttgart Versuche an Kompaktproben und Arrestversuche an CCA-Proben (auch Kleinproben) durchgeführt und durch Fraktografie sowie numerische Analysen abgesichert werden. Die Bewertungskonzepte sollen direkt für den Nachweis der Betriebssicherheit von Kraftwerken genutzt werden.

Akkreditierung der Werkstoffprüfung bei Hochgeschwindigkeitsbeanspruchung

Da das Kraftfahrtbundesamt diesen Bereich des Referats zukünftig nicht mehr begutachtet, wurde diese Prüfung bei der Reakkreditierung der Abteilung mit in den Akkreditierungsumfang durch DAP aufgenommen. Die Begutachtung verlief erfolgreich ohne jede Beanstandung.

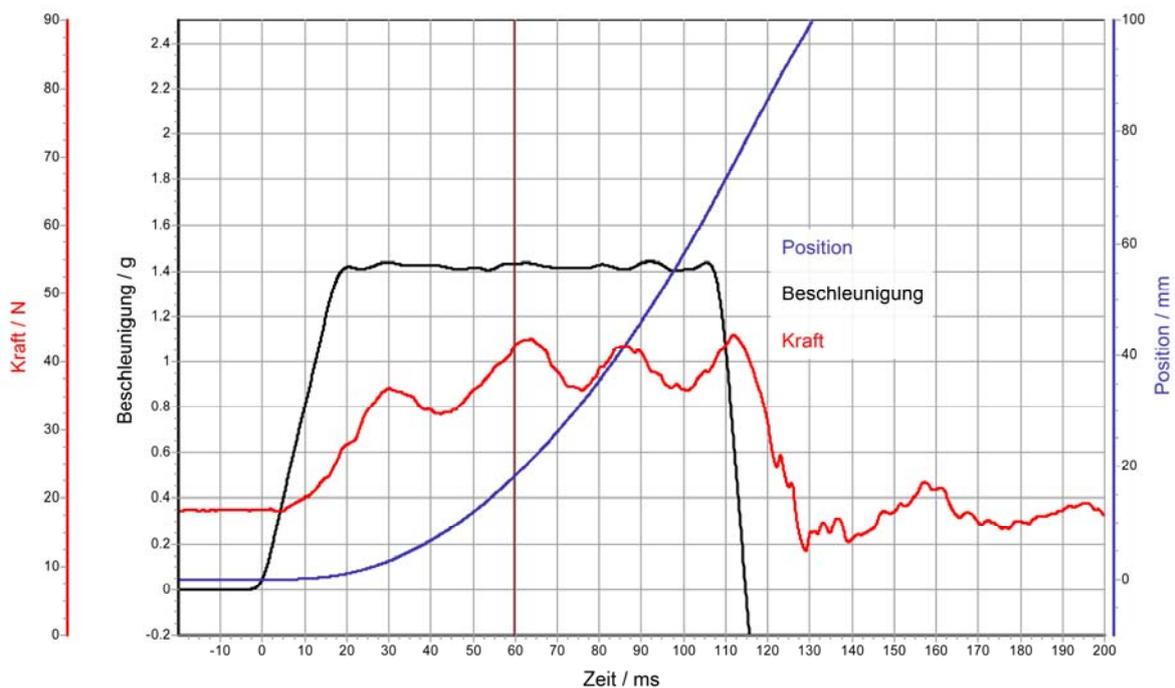
Beschaffung neuer Prüfeinrichtungen in 2009

Für den Bereich passive Sicherheit, Prüfung von Rückhaltesystemen wurde ein neuer Beschleunigungsschlitten (ATOS engineering LU-300/24S) für Beschleunigungstests an Sicher-

heitsgurtbandaufrollern beschafft, eine benutzerfreundliche und sehr flexible Prüfeinrichtung für Prüfungen nach frei programmierbaren Spezifikationen.



Beschleunigungsschlitten für Sicherheitsgurtbandaufroller



Messung des zeitlichen Verlaufs von Kraft und Beschleunigung beim Gurtbandauszug aus dem Retraktor eines Sicherheitsgurtsystems

Staubkammer

Die Staubkammer zur Konditionierung der Sicherheitsgurte wurde erneuert und mit einer neuen Steuerung (Mitsubishi) ausgestattet. Das innovative Gerät wurde vor der Auslieferung auf der Messe Motek in Stuttgart ausgestellt. Diese Gelegenheit wurde genutzt, um auch die MPA Stuttgart dort zu präsentieren.

Hochgeschwindigkeitskameras

Für den mitfahrenden Einsatz auf dem Prüfschlitten wurden zwei kompakte beschleunigungsfeste Hochgeschwindigkeitskameras mit 1024x1024 Punkten bei 4000 Bildern/Sekunde beschafft (IDT Redlake N4).



Erwachsenensicherheitsgurt mit pyrotechnischem Gurtstraffer beim Crashversuch

Referat 53220 Dichtungstechnik

▪ Neues AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15935 (Laufzeit 01.01.2009 - 31.12.2010)

„Ausblassichere Dichtungen für Flanschverbindungen mit emaillierten und glasfaserverstärkten Kunststoffflanschen in der chemischen Industrie“ (Fortsetzung zu AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14264, Laufzeit 01.07.2005 - 31.03.2007)

Wesentliche Zielsetzungen:

- Umfassende Verifikation der entwickelten Prüftechnik für den Nachweis der Ausblassicherheit von Flanschdichtungen,
- Klassifizierung aller geeigneten Dichtungswerkstoffe und -bauformen hinsichtlich Ausblassicherheit als Basis für die gezielte und verlässliche Auswahl ausblassicherer Dichtungen seitens der Anwender
- Nachweisführung für Flanschverbindungen mit GFK-Flanschen und emaillierten Bundens mit Losflanschen
- Theoretische Analyse des Ausblasverhaltens von Flanschdichtungen
- Entwicklung einer Vorgehensweise zum Nachweis der Ausblassicherheit von Flanschdichtungen im Kraftnebenschluss
- Erarbeitung eines Maßnahmenkatalogs für die Vermeidung des Ausblasens von Flanschdichtungen.

▪ Neues AiF-Forschungsvorhaben Nr.15829 (Laufzeit 01.12.2008 - 30.11.2010)

„Auslegung von Flanschverbindungen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) für die chemische Industrie“ (Fortsetzung zu AiF-Forschungsvorhaben 14235, Laufzeit 01.02.2005 - 31.07.2007)

Wesentliche Zielsetzungen:

- Übertragung der für Losflanschverbindungen aus GFK entwickelten Auslegungsvorschrift auf Fest- und Losflanschverbindungen anderer Nennweiten und Herstellungsverfahren (SMC, RTM und Wickeltechnik)
- Untersuchung des Einflusses von thermoplastischen Inlinern auf das Dichtverhalten und das mechanische Verhalten einer Flanschverbindung aus GFK

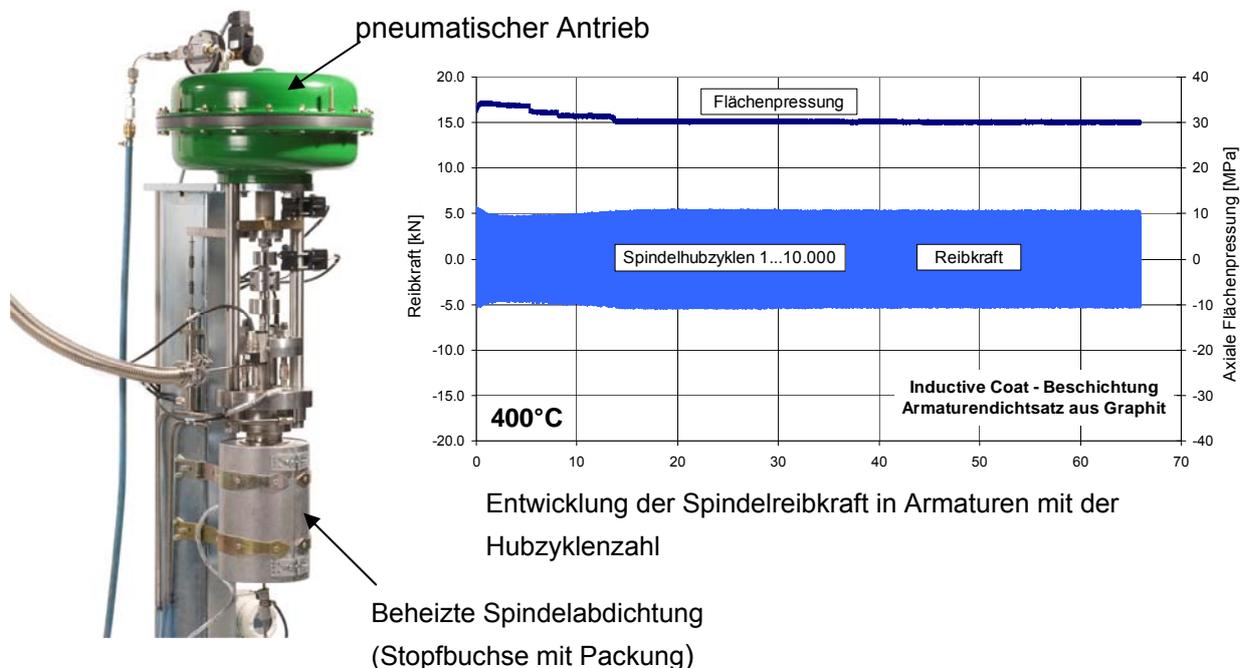
▪ **Abschluss des MPA-VGB-Forschungsvorhaben SA „AT“ 19/08**

„Experimentelle Ermittlung der zulässigen Belastungen von Rohrleitungsflanschverbindungen DN100 mit der Dichtung im Kraftnebenschluss (KNS)“ (Laufzeit 01.07.2008 – 31.09.2009; der Abschlussbericht ist in Vorbereitung)

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde in Erweiterung der Berechnungsvorschrift KTA 3211.2 ein analytisches Berechnungskonzept für Rohrleitungsflanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss entwickelt, welches die Ermittlung der Beanspruchungen in den Querschnitten A-A, B-B und C-C sowie den Dichtheitsnachweis über die Begrenzung der Spalthöhe ermöglicht. Auf der Basis eines Vergleichs der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und der FE-Simulation mit denen nach dem entwickelten Berechnungskonzept ist letzteres für den untersuchten Bereich als validiert anzusehen.

Beschaffung neuer Prüfeinrichtungen in 2009:

Prüfstand für Stopfbuchspackungen mit pneumatischem Antrieb für hohe Hubzyklenzahlen und für Temperaturen bis 600 °C.



Referat 53230 Experimentelle Spannungsanalyse

Modernisierung bestehender Prüfeinrichtungen in 2009:

Beschaffung einer neuen Steuerung für die Prüfeinrichtung zur Ermittlung von Eigen-
spannungen nach dem Ring-Kern-Verfahren

Stabsstellen

<p>Stabsstelle Qualitätsmanagement Dipl.-Ing. A. Müssig Tel.: 685/ 67675 E-Mail: andreas.muessig@mpa.uni-stuttgart.de</p>

Ein Schwerpunkt der Aktivitäten lag in der Aufrechterhaltung der bestehenden Akkreditierungen und Zertifizierungen des Instituts, wobei 2009 vier Begutachtungen durch externe Konformitätsbewertungsstellen absolviert wurden.

Akkreditierung	Bereich	Konformitätsbewertungsstelle
3 x Prüflabor	150 Prüfverfahren Druckgeräterichtlinie Persönliche Schutzausrüstungen	DAkKS ZLS ZLS
2 x Zertifizierungsstelle	Druckgeräterichtlinie Persönliche Schutzausrüstungen	ZLS ZLS
1 x Inspektionsstelle	Dichtungssysteme aus Kunststoffkomponenten beim Deponie- und Tiefbau	DAkKS
1 x Kalibrierlabor	verschiedene Messgrößen	DKD
1 x Technischer Dienst	passive Kraftfahrer-Sicherheit	KBA
Zertifizierung		
QM-System	Software-Entwicklung	TÜV

Stand der Akkreditierungen und Zertifizierungen

Bei der Reakkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 im Oktober überprüften 10 externe Fachbegutachter an mehreren Tagen die Arbeitsweise unseres Kalibrier- und Prüflabors. Die Auswertung ergab keine gravierenden Abweichungen, so dass die Akkreditierung in den Bereichen bestätigt werden konnte. Neu war die Forderung, dass für alle akkreditierten Prüfverfahren Messunsicherheitsabschätzungen vorliegen müssen. Die beschlossenen Maßnahmen wurden umgesetzt.

Zur Sicherung der Qualität der Prüfergebnisse nahm die MPA auch 2009 wieder an zahlreichen Ringversuchen teil. Die Ergebnisse lagen im Mittelwert der teilnehmenden Prüfinstitute. An Prüfungsberichten wurden regelmäßig stichprobenartig Qualitätskontrollen durchgeführt, um die Einhaltung der MPA-Standards bei Berichten zu gewährleisten. Der Erfüllungsgrad der internen Audits lag im Durchschnitt bei über 90 %. Die Fragebogenaktion zur Kundenrückmeldung hatte nur geringen Rücklauf und brachte keine neuen Erkenntnisse. Die Realisierung des Management-Handbuchs als webfähige Online-Version im Intranet wurde positiv aufgenommen.

Zur kontinuierlichen Verbesserung der betrieblichen Abläufe und Qualität der Arbeitsergebnisse wurden Qualitätsziele gesetzt und der erreichte Stand überprüft. Ziele waren beispielsweise Intensivierung von Schulungsmaßnahmen, Erhöhung der Anzahl wissenschaftlicher Publikationen, Aquisition von Drittmitteln oder Termintreue. Diese kostenintensiven Anstrengungen werden unternommen, um unseren Kunden Dienstleistungen auf qualitativ hohem Niveau und mit Kompetenzbestätigung von unparteiischer Stelle anbieten zu können.

3 Neue Geräte und Einrichtungen

Analytical Environmental Scanning Electron Microscope

Mit dem neuen Analytical Environmental Scanning Electron Microscope EVO LS 15 der Carl Zeiss SMT AG steht der MPA Universität Stuttgart ein modernes bildgebendes Verfahren zur Charakterisierung von Oberflächen elektrisch nicht leitender und wasserhaltiger Materialien/Werkstoffe zur Verfügung. Das Verfahren erlaubt die direkte Untersuchung der Oberflächenstruktur zementgebundener Baustoffe auch während des Hydrationsprozesses, von Betonen, hygroskopischen Salzen, Tonmineralien, Kunststoffbeschichtungen, Nanopartikeln auf Polymerbasis, Feinstaub, feuchtem Holz und von Biofilmen auf Werkstoffoberflächen. Es ermöglicht die Erforschung von Strukturveränderungen der Werkstoffoberflächen ebenso wie die Beobachtung von Korrosionsprozessen, die Entstehung und das Wachstum von Rissen sowie die dabei relevanten Umwandlungs- und Zerfallsprozesse. Die Prozesse können unter definierter und einstellbarer Luftfeuchtigkeit in der Probenkammer beobachtet werden. In Verbindung mit einem energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse-System (EDX) der Firma EDAX erlaubt das ESEM die Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung (Elementverteilung) der Probenoberflächen im Mikrobereich.

Arbeitsschwerpunkte bilden Untersuchungen zur Charakterisierung der Phasenbildung und des Hydrationsverhaltens nach Zugabe reaktiver Beistoffe wie Flugaschen, Gesteinsmehle und Recyclingmaterialien. Hier ist vor allem die kontinuierliche Beobachtung der eintretenden Veränderungen der Hydrationsphasen im frühen Stadium von Bedeutung. Rissausbreitung durch Veränderungen am Gesteinsgefüge bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Untersuchungen zum Wassertransport bei Verwendung von Superabsorbentpolymeren in Betonen, Untersuchungen zur Erkennung von Mineral- und Gefügeänderungen in frühen Stadien im Zusammenhang mit Smart-Monitoring an historischen Bauwerken. Untersuchungen zum Zusammenhang von Herkunft und Morphologie von Feinstaub im Innenraum sowie topografische Untersuchungen an hydrophobierten Steinoberflächen und Studium der Abbauvorgänge. Im Zusammenhang mit Korrosionsprozessen sind Untersuchungen zur Zusammensetzung und Struktur hydratisierter und gelartiger Korrosionsprodukte sowie die Wechselwirkung mit Biofilmen von besonderem Interesse.

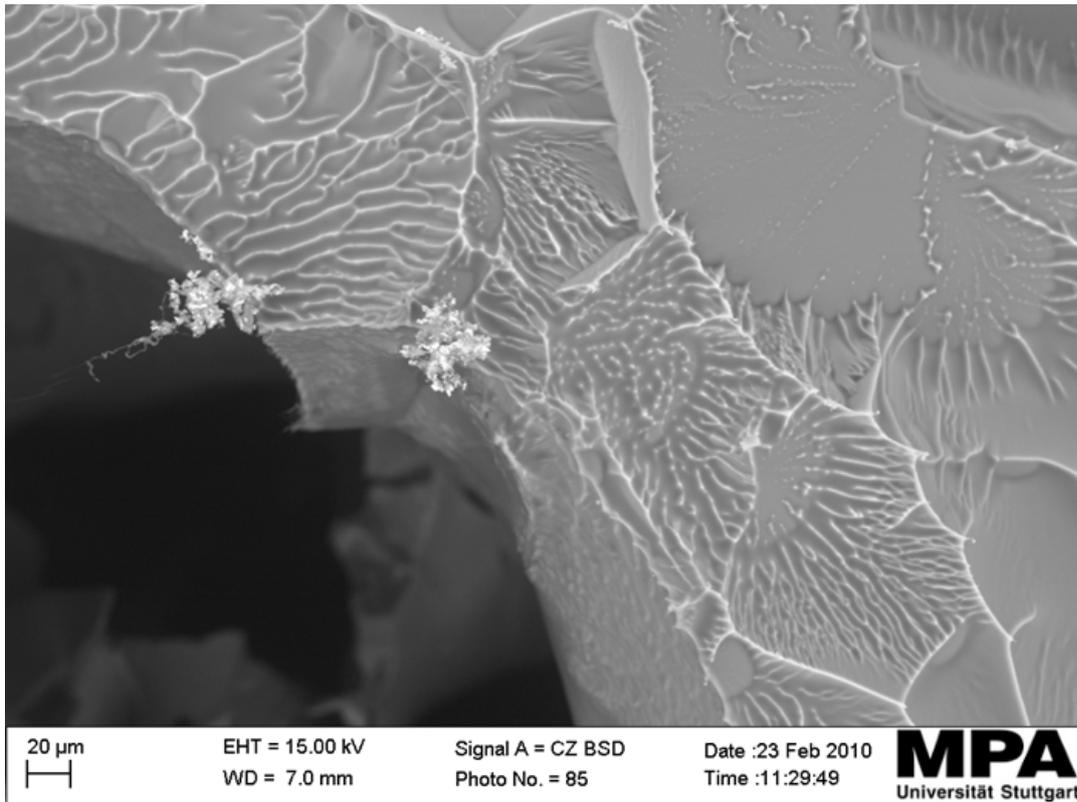


Bild 1: Struktur von Eiskristallen aufgenommen mit Kühltablett (Vakuum 500 Pa)

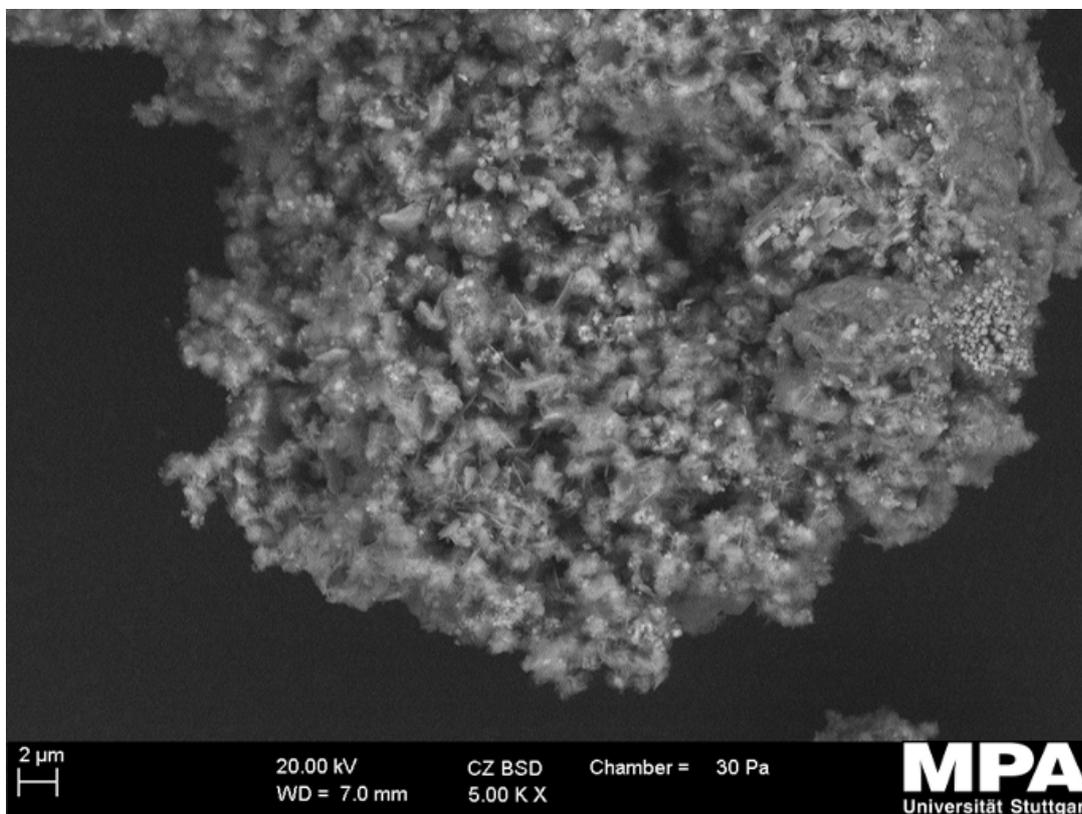


Bild 2: Struktur des Zementstein in der Hydratisierungsphase („Fixzement“ mit Wasser, 1 Teil Zement und 0,5 Teile, Wasser) Struktur nach ca. 20 Minuten (Vakuum 30 Pa)

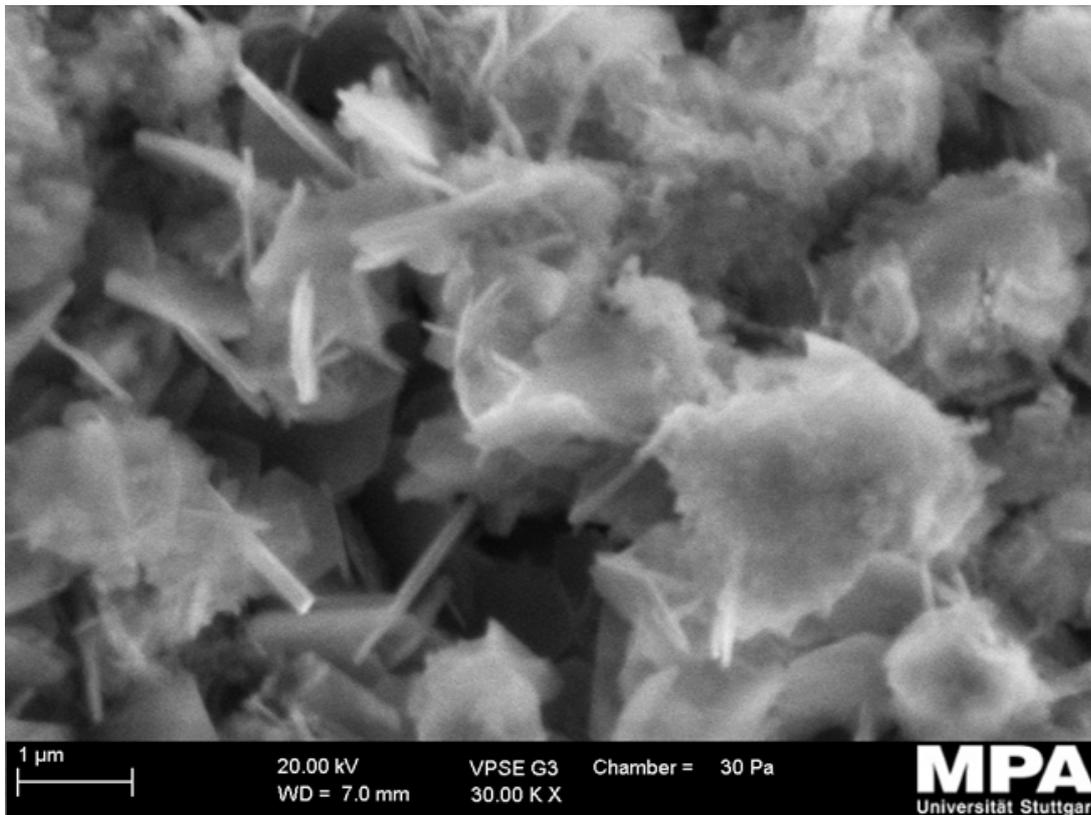


Bild 3 Struktur des Zementstein in der Hydratisierungsphase (Umsetzung von „Fixzement“ mit Wasser 1 Teil Zement und 0,5 Teile Wasser), Struktur nach ca. 45 Minuten (Vakuum 30 Pa)

Neuartiges Elektronen- und Ionenmikroskop für Werkstoffforschung und Materialuntersuchung

In 2009 wurde das neu entwickelte AURIGA CrossBeam (FIB-SEM) Elektronen- und Ionenstrahlmikroskop von Carl Zeiss an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart installiert.

In der AURIGA Workstation sind ein hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop mit einem fokussierten Ionenstrahl und eine Vielzahl von Detektionsmöglichkeiten kombiniert. Damit können Details zukünftiger Werkstoffe mit einer Auflösung von einem Nanometer abgebildet und analysiert werden. Der Ionenstrahl ermöglicht präzise Schnitte in die Tiefe des Materials, wodurch die Struktur von Werkstoffen unterhalb der Probenoberfläche zugänglich wird. Dreidimensionale Gefügeuntersuchungen werden somit möglich.

Eine Vielzahl integrierter Elektronen- und Ionendetektoren ermöglicht eine umfassende physikalisch-chemische Charakterisierung eines Werkstoffzustandes. Die von Carl Zeiss patentierten, hoch empfindlichen Inlens SE- und RE- Detektoren der GEMINI-Elektronensäule ermöglichen die kontrastreiche Abbildung von Probenoberflächen mit höchster Auflösung auch bei niedrigsten Elektronenenergien. Der Ionendetektor stellt eine zusätzliche Kontrastvariante bereit. Nahezu selbstverständlich ist auch ein EDX-Detektor (Hersteller EDAX) enthalten, mit dem mittels

Röntgenmikroanalyse die chemische Zusammensetzung von Materialien in kleinsten Bereichen ermittelt werden kann. Kristallographische und Texturinformation lassen sich über ein adaptiertes EBSD-System (Hersteller EDAX) gewinnen.

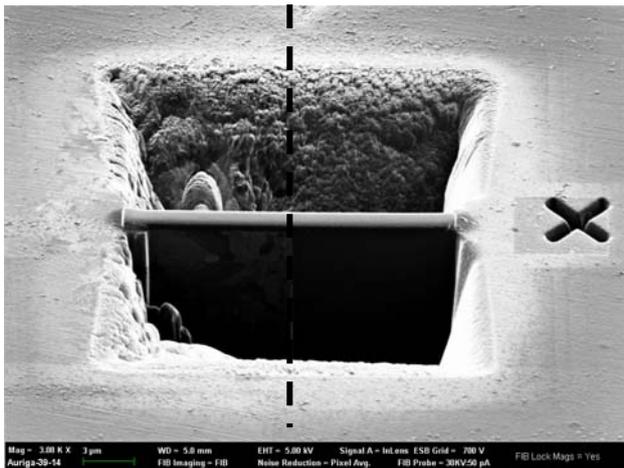


AURIGA Workstation von Carl Zeiss

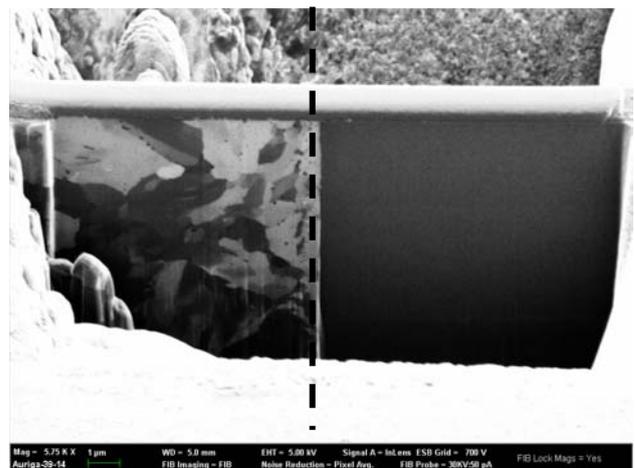
Gerade die Vielseitigkeit des neuen Geräts bietet eine neue Qualität von Oberflächen- und Strukturuntersuchungen, die über die Möglichkeiten konventioneller Rasterelektronenmikroskope weit hinausgeht. Mit dem ebenfalls eingebauten STEM-Detektor sind selbst Strukturen im Nanometerbereich zugänglich, die bisher nur mittels Transmissionselektronenmikroskop (TEM) untersucht werden konnten. Zudem eignet sich das System in hervorragender Weise zur Herstellung dünner Proben für die Transmissionselektronenmikroskopie, wobei durch die in-situ Beobachtung während der Präparation die Schnittebene für das TEM-Präparat genauestens festgelegt werden kann. Dies ermöglicht Zielpräparationen mit einer bisher unerreichbaren Präzision.

Untersuchungsbeispiel:

Entnahme einer TEM-Probe aus der Schweißverbindung eines Chromstahls (links) mit einer Nickel-Basis-Legierung (die gestrichelte Linie markiert die Schmelzlinie).



Übersicht



Detail

Neue Prüfmöglichkeiten in der Abteilung Werkstofftechnik

Im Bereich Werkstoffprüfung/Hochtemperaturprüfung wurde die Prüfkapazität für Zeitstandversuche mit zusätzlichen 50 Prüfplätzen in 10 Belastungseinrichtungen deutlich erweitert. Die neuen Anlagen sind für die Prüfung von bis zu 5 Proben in einem Strang ausgelegt. Die zugehörigen 5-Zonen-Öfen erlauben Prüftemperaturen bis 1000 °C. Eine Besonderheit der Prüfeinrichtungen liegt dabei darin, dass bei Einbau eines Probenstranges ohne erhöhten Bedienungsaufwand eine Kalibrierung der einzelnen Prüfeinrichtung erfolgt.



Um dem steigenden Bedarf an Prüfkapazität für Low-Cycle-Fatigue (LCF)-Versuche im erhöhten Temperaturbereich (mögliche Prüftemperaturen bis 1000°C) nachzukommen, wurden weitere Prüfeinrichtungen modernisiert und mit aktueller Regelungs- und Bediensoftware der Fa. Zwick ausgerüstet.



Daneben steht im Bereich Schwingprüfung/Bauteilprüfung nunmehr eine servohydraulische Prüfmaschine mit Prüflasten bis 1,6 MN zur Bestimmung von Werkstoffkennwerten unter schwingender Beanspruchung zur Verfügung. Neben LCF (Low Cycle Fatigue) können mit dieser Prüfeinrichtung auch HCF (High Cycle Fatigue)-, zyklische Bruchmechanikversuche mit Großproben oder Bauteilversuche durchgeführt werden. Prüfcylinder, Rahmen und Hydraulik sind auf hohe Kolbengeschwindigkeit bzw. Prüffrequenz ausgelegt. Der Antrieb erfolgt durch einen hydrostatisch gelagerten Gleichlaufzylinder, der in der unteren Traverse montiert ist. Durch den 4-Säulen-Aufbau erhält der Prüfrahm eine extrem hohe Steifigkeit, dadurch werden unerwünschte Eigenresonanzen und Biegeeffekte vermieden. Die weiteren technischen Daten dieser Prüfeinrichtung sind:

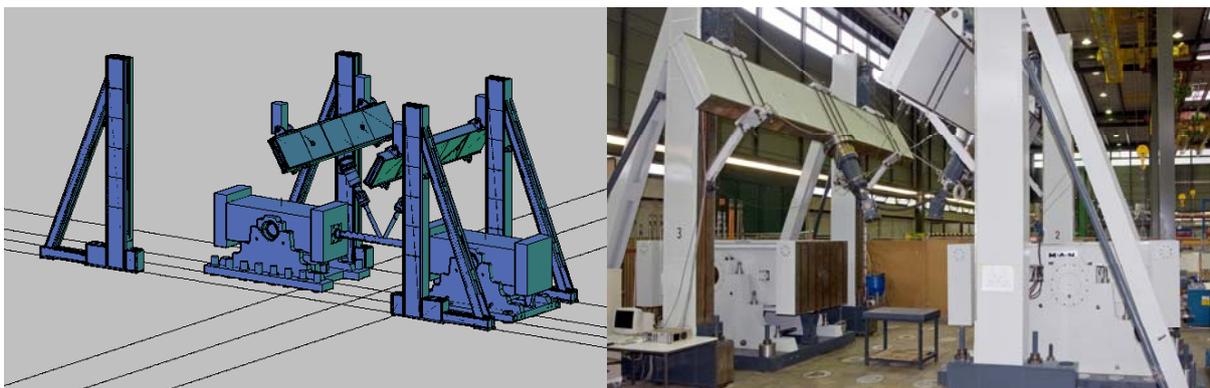
Prüfkraft statisch:	1,6 MN
Prüfkraft dynamisch:	1,0 MN
Frequenz:	20 Hz bei $\Delta s = 1 \text{ mm}$
Kolbenweg:	$\pm 30 \text{ mm}$
Hydraulikaggregate:	$p_{\text{nenn}}=280 \text{ bar}$, $Q=360 \text{ l/min}$
Regelsystem IST Labtronic 8400	für kraft-, dehnungs- und weggeregelte Versuchsführung
Probenspannung:	hydraulische Keilspannbacken, Anschlussgewinde

Für den Einbau langer Prüfkörper ist die obere Traverse bis zu einer Höhe von 3 m verstellbar und mit einer hydraulischer Traversenklemmung und Hubzylindern ausgestattet.



Zur Erhöhung der flexiblen Bauteilprüfung bei sehr hohen Belastungen erfolgte durch die Neukonzeption und -fertigung der Lagerböcke des Horizontalprüfgerüsts MAN 3 MN eine Modernisierung, die nun in variabler Position über Spannanker auf einer Stahlbeton-Spannplatte im Ankerpunkttraster 1 x 1 m befestigt werden können. Damit wird die Festigkeitsprüfung großer Proben und Bauteile bis max. 10 m Länge ermöglicht.

Die Prüfkräfte von bis zu 3 MN werden auf der Antriebsseite über einen servohydraulischen Prüfzylinder erzeugt, im Portal der Gegenseite erfolgt die Bauteilbefestigung und die Ableitung der resultierenden Kräfte. Die maximale Prüfkraft dieser Einrichtung beträgt statisch ± 3 MN und dynamisch ± 2 MN. Eine Bauteilprüfung mit flexiblen Randbedingungen ist durch die Schwenkbarkeit beider Mittelteile gegenüber der Spannplatte über Kegelrollenlager mit einem Schwenkwinkel von $\pm 7,5^\circ$ gewährleistet.



4 Forschungsberichte

Mikrostrukturelle Schädigungsmechanismen von AlSi12Cu4MgNi2 bei zyklischer Beanspruchung

Dipl.-Ing. Daniel Krätschmer, Abt. Berechnung

Bei der Lebensdauerberechnung von schwingend beanspruchten Bauteilen wird von der Annahme ausgegangen, dass jeder Zyklus im Werkstoff eine Schädigung bewirkt, die sich linear akkumuliert. Die Schädigung bedeutet mikrostrukturelle und physikalische Veränderungen im Werkstoff, die ab einem gewissen Ausmaß zu einem Anriss führen. Diese zum Anriss führende Schädigung im Werkstoff wird indirekt als Funktion der im Bauteil herrschenden äquivalenten Spannungs- und Dehnungsamplitude erfasst und als Anrisskennlinie in der Berechnung verwendet.

Mit dieser Vorgehensweise werden die komplexen werkstoffmechanischen Vorgänge bei der Werkstoffschädigung nur pauschalisierend beschrieben. Da die beschriebenen Anrisskennlinien an glatten Rundproben ermittelt werden, kann der Mehrachsigkeitseinfluss des Spannungszustandes nicht erfasst werden. Eine Bewertung des Schädigungsgrades und damit des Lebensdauer verbrauchs zu einem bestimmten Zeitpunkt ist auch mit der Kenntnis der Belastungsvorgeschichte nur eingeschränkt möglich.

Um die Werkstoffschädigung zu identifizieren und quantitativ in der Berechnung zu berücksichtigen, muss bereits der Beginn des zyklischen Risswachstums, ausgelöst aus der lokalen Mikrostruktur, in die Analyse einbezogen werden. Dies ist nur mit Modellen möglich, die die Vorgänge in der Mikrostruktur, welche unter zyklischer Belastung zum Anriss führen, berücksichtigen. Geeignete mikromechanische Modelle müssen die Entwicklung und Ausbreitung von Mikrorissen, die für den Lebensdauer verbrauch maßgeblich sind, bei wechselnder Beanspruchung quantitativ beschreiben können. Genaue Kenntnisse und die Quantifizierung des Schädigungsverlaufs und damit verbunden eine bessere und genauere Bestimmung der Lebensdauer ermüdungsgefährdeter Bauteile ist sowohl aus technischer als auch ökonomischer Sichtweise anzustreben.

Die mikrostrukturelle Qualifizierung und Quantifizierung wirkender Ermüdungsschädigungsmechanismen an dem austenitischen Rohrleitungswerkstoff X6CrNiNb18-10 wurde in der Abt. Berechnung der MPA Universität Stuttgart umfassend vorgenommen [1]. Zur modellhaften Beschreibung der bei polykristallinen Werkstoffen im LCF-Bereich wirkenden Mechanismen wurde ein stochastisches Mikrorisswachstumsmodell auf der Basis einer Markov-Kette weiterentwickelt und modularisiert. Das Modell ermöglicht durch ein einachsiges Anpassungsexperiment, lokale Mikrorissverteilungen an der Probenoberfläche für mehrachsige zyklische Beanspruchungen korrekt zu beschreiben. Eine Bewertung des aktuellen Schädigungszustands und der Restlebensdauer bis Anriss kann durch die Verwendung des werkstoffspezifischen rechnerischen bzw. experimentell ermittelten Erwartungswerts der Mikrorissverteilung vorgenommen werden. Die rechnerischen Ergebnisse stimmen mit aus Ermüdungsversuchen ermittelten expe-

rimentellen Daten sowie der Lebensdauerkurven der bekannten Regelwerke für diesen Werkstoff gut überein, siehe Bild 1.

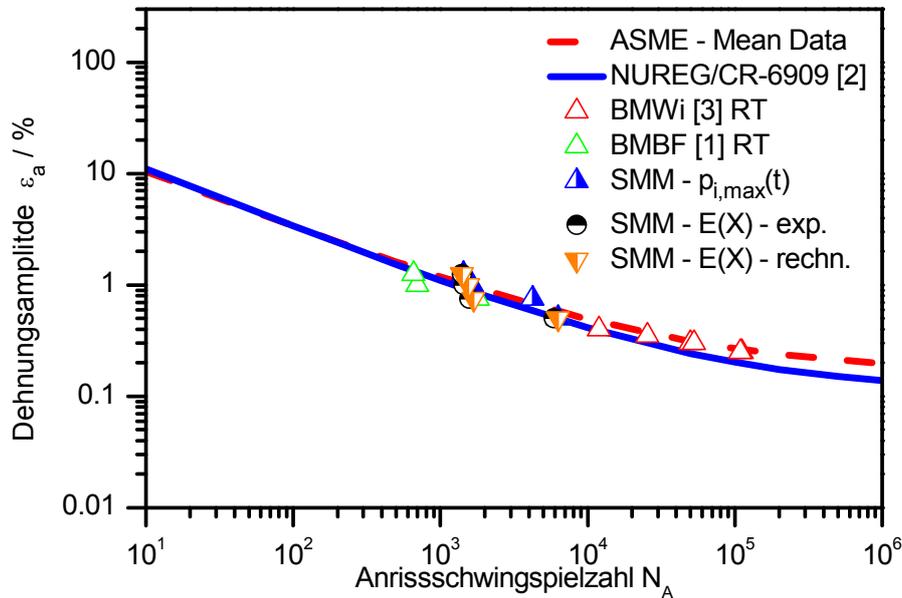


Bild 1: Einordnung der Ergebnisse des Stochastischen Mikrorisswachstumsmodells im Vergleich zu Experiment und Lebensdauerkurven

Die Erweiterung und Anwendung des konzeptionell mechanismenunabhängigen mikrostrukturellen Schädigungsmodells auf weitere Werkstoffe ist nahe liegend. Im Rahmen des in der Abteilung Berechnung durchgeführten Forschungsvorhabens „Werkstoffausnutzung“ wurden die mikrostrukturellen temperaturabhängigen Ermüdungsschädigungsmechanismen für die praxisrelevante Kolbengusslegierung AlSi12Cu4MgNi2 durch isotherme Versuche ermittelt.

Ziel der experimentellen Untersuchungen war es, mikrostrukturelle Aspekte der Ermüdungsschädigungsinitiation und des Ermüdungsrisswachstums für die Kolbengusslegierung AlSi12Cu4MgNi2 zu qualifizieren und zu quantifizieren. Der Werkstoff AlSi12Cu4MgNi2 zeichnet sich hinsichtlich hoher Verschleißfestigkeit und guten mechanischen Eigenschaften bei höheren Temperaturen aus. Das Anwendungsgebiet über- und quasi-eutektischer Aluminium-Silizium-Legierungen umfasst im Allgemeinen Gussteile, welche bei erhöhten Temperaturbeanspruchungen hohen Festigkeitsanforderungen unterworfen sind – insbesondere bei Kolben für Verbrennungsmotoren.

	Massenanteile in %							
Kurzzeichen	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Ti	Mn	Zn
AlSi12Cu4MgNi2	12,5- 13,3	3,3- 3,9	0,8- 1,1	1,75- 2,25	0,65	≤ 0,01	0,10- 0,35	0,25
	Massenanteile in ppm							
	P	Sr	Ca	Na	B			
AlSi12Cu4MgNi2	40- 120	5	5	5	200- 300			

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Legierung AlSi12Cu4MgNi2

Durch die Ausbildung von primären Siliziumkristallen wird die hohe Verschleißfestigkeit der Gusslegierung erreicht. Auf eine Zugabe von Veredelungsmitteln wie Strontium oder Natrium zur Erzielung eines untereutektischen Gieß- und Erstarrungsverhaltens wird verzichtet. Die hohe Warmfestigkeit dieser Legierungen wird durch Zusätze der Legierungselemente Kupfer, Magnesium und Nickel gewährleistet. Eine Kornfeinung mittels AlTi₅B₁-Draht wird vorgenommen.

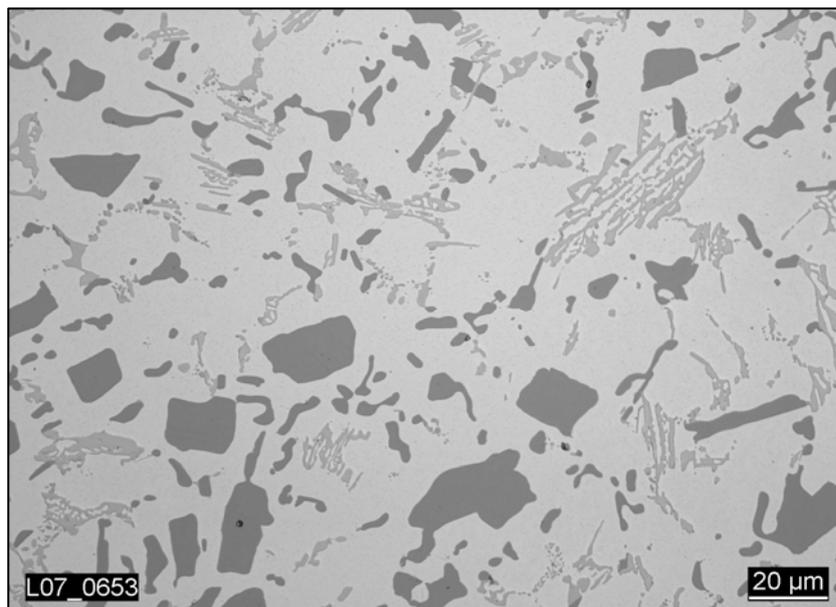


Bild 2: Lichtmikroskopische Aufnahme der Mikrostruktur von AlSi12Cu4MgNi2

Die Mikrostruktur der verwendeten Kolbengusslegierung zeigt Bild 2. Neben Siliziumkristallen können mittels EDX-Untersuchungen sowie röntgendiffraktrometrischen Methoden verschiedene intermetallische Phasen unterschiedlicher Form und Zusammensetzung ermittelt werden:

- Cu-Ni-Aluminide (Al₃(CuNi)₂, Al₇Cu₄Ni)
- Al₁₅(Cu,Fe,Mn)₃Si₂, Al₉FeNi
- Mg₂Si
- Al₂Cu (θ-Phase)

AlSi12Cu4MgNi2 weist eine dendritische Erstarrungsstruktur mit einem mittleren sekundären Dendritenarmabstand von 25µm auf. Der sekundäre Dendritenarmabstand kann als Maß für die mechanischen Eigenschaften einer Al-Si-Legierung angesehen werden. Die Größe des sekundären Dendritenarmabstands korreliert negativ mit den mechanischen Eigenschaften von Aluminiumgusslegierungen [4]-[6].

Der nach erfolgter Kornfeinung mittels einer Farbätzung nach Weck ermittelte mittlere Korndurchmesser beträgt 650 µm.

Einen Überblick der mechanischen Kennwerte von AlSi12Cu4MgNi2 bei unterschiedlichen Prüftemperaturen zeigt Tabelle 2.

Versuch	Temp. [°C]	D [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _{p1} [MPa]	F _M [kN]	R _m [MPa]	A [%]	E [MPa]
Z7*	400	9,92	28		2,55	33	29,9	68000
Z9	25 (RT)	9,90	194	****	19,9	259	0,83	84753
Z10	200	9,90	165	204	16,02	208	2,1	77137

* keine Auslagerung bei T=400°C vorgenommen

Tabelle 2: Mechanische Kennwerte der Kolbengusslegierung AlSi12Cu4MgNi2 nach Anlassbehandlung (5h/230°C) und Auslagerung (200h/200°C)

Neben einer Anlassbehandlung von 5h bei T=230°C wurden die Proben vor der Beanspruchung bei Prüftemperatur für 200h ausgelagert. Durch die lange Auslagerungszeit kann die Forderung nach betriebsähnlichen Werkstoffzuständen durch die Herausbildung der inkohärenten θ-Phase (Al₂Cu) erfüllt werden, was sich in Form einer Härtereduktion sowie einer Zunahme der Duktilität ausdrückt.

Die Qualifikation und Quantifizierung oberflächennaher Ermüdungsschädigung bei AlSi12Cu4MgNi2 erfolgte durch eine sukzessive Dokumentation von Mantelflächenbereichen der geprüften Rundprobe. Hierfür werden drei Verfahren angewandt:

- Ausbau der Probe bei definierter Schwingspielzahl und licht- und rasterelektronenmikroskopische Dokumentation der Ermüdungsschädigung der Probenoberfläche (Einproben-technik)
- Erstellung von Gefügeabdrücken (Replika-Technik) im eingebauten Zustand (Mehrproben-technik)
- Direkte Dokumentation der Mantelflächen durch die Applikation eines mobilen Lichtmikroskops an der Schwingprüfmaschine.

Neben der Ermittlung oberflächennaher Schädigung werden insbesondere Parameter der lokalen Partikeleigenschaften, wie Flächeninhalt, Umfang, Rundheit, Orientierung und Anordnung der Partikel (Siliziumkristalle und intermetallische Phasen) dokumentiert und mit den auftretenden Schädigungsmechanismen verknüpft. Der Versuch der Verknüpfung von Einschlussmorphologie und Ermüdungsrissinitiierung bei Al-Si-Legierungen wird durch eine Vielzahl von Untersuchungen motiviert [7]-[10].

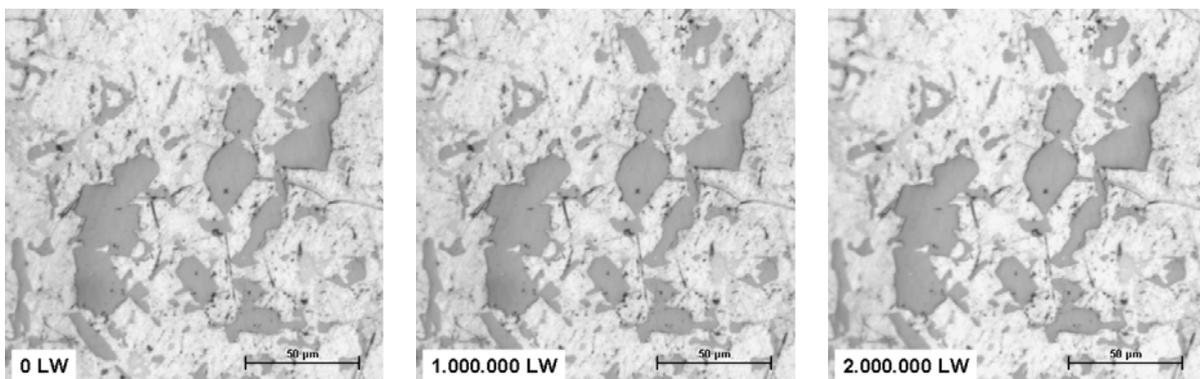
Im Rahmen des Vorhabens wurden einachsige zyklische Untersuchungen bei $T=25^{\circ}\text{C}$, $T=200^{\circ}\text{C}$, $T=250^{\circ}\text{C}$ und $T=400^{\circ}\text{C}$ dehnungskontrolliert im LCF- und spannungskontrolliert im HCF-Regime durchgeführt. Einen Überblick der vorgenommenen rein wechselnden Untersuchungen sowie die eingestellten Dehnungs- und Spannungsschwingbreiten zeigt Tabelle 3.

Prüftemperatur	Totaldehnungsamplitude $\epsilon_{a,t}$	Spannungsamplitude σ_a / MPa		
	Low Cycle Fatigue (LCF) ($10^3 < N_A < 10^4$)	High Cycle Fatigue (HCF) ($N_A > 10^7$)		
RT	0,25%	80		
200°C	0,25%	-		
250°C	-	48	56	64
400°C	0,34%	27	30	-

Tabelle 3: Durchgeführte Untersuchungen (isotherm, rein wechselnd)

Bei zyklischen Versuchen bei Raumtemperatur kann nach Versagen der Probe sowohl bei LCF- und HCF- Beanspruchungen der Ermüdungsrissinitiierungsmechanismus durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen mit dem Brechen großer unförmiger Siliziumkristalle verknüpft werden.

Gestufte Schwingprüfungen mit anschließender Dokumentation der Mantelfläche zeigen, dass keine licht- oder rasterelektronenmikroskopisch erkennbare Schädigung in Form von Matrixmikrorissen oder Partikelbrüchen zu detektieren ist, siehe Bild 3. Eine Schädigungsevolution im Sinne von wachsenden Mikrorissen findet nicht statt. Das Versagen der Probe bei Raumtemperatur weist eine spröde Charakteristik auf. Das Versagen der Probe wird durch einen Bruch eines Primärsiliziumkristalls ausgelöst, was das große Streuband der Bruchlastspielzahlen von AlSi12Cu4MgNi2 bei Raumtemperatur erklärt. Der Schädigungsmechanismus kann als partikelmorphologiedominiert aufgefasst werden. Dominanz bedeutet hier, dass alle wirkenden Ermüdungsschädigungsmechanismen in Mehrphasenwerkstoffen wie AlSi12Cu4MgNi2 nicht auf eine Phase reduziert werden können, sondern ein Zusammenwirken der einzelnen Phasen bei Belastung darstellt.



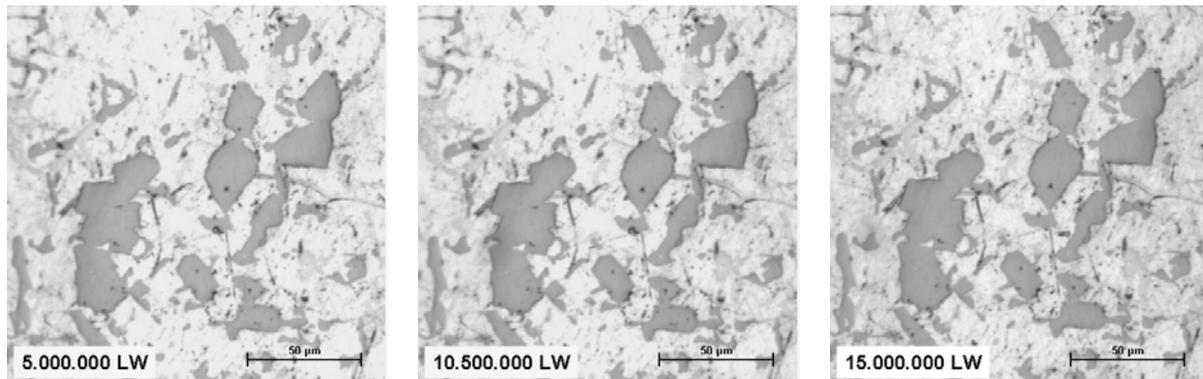


Bild 3: Oberflächendokumentation bei gestuften Schwingspielzahlen ($T=25^{\circ}\text{C}$, HCF, $R=-1$)

Bei einer Prüftemperatur von $T=250^{\circ}\text{C}$ kann bei rein wechselnden makroskopisch elastischen Untersuchungen mit Spannungsamplituden von $\sigma_a=48 - 64 \text{ MPa}$ sowohl matrixrissdominierte als auch partikelversagensdominierte Ermüdungsschädigung festgestellt werden. Das Versagen eines Partikels kann sowohl als Bruch als auch als Ablösung vom Matrixverbund ausgelöst werden. Bei einer Spannungsamplitude von $\sigma_a=48 \text{ MPa}$ überwiegt der dominierende Einzelriss ausgehend von dem Versagen von Siliziumkristallen, zumeist in Form eines Bruchs. Im Gegensatz zu den Untersuchungsergebnissen bei Raumtemperatur kann aber eine hohe Anzahl an Ermüdungsmikrorissinitiationsorten ohne anschließendes ausgeprägtes Mikrorisswachstum festgestellt werden.

Es zeigt sich dabei eine deutliche Abhängigkeit der Rissinitiation von der Partikelmorphologie. Wie schon bei den Versuchen bei Raumtemperatur nach Versagen der Probe festgestellt, kann bei $T=250^{\circ}\text{C}$ die Mikrorissinitiation mit dem Versagen in Form von Bruch und Ablösung von großen, unregelmäßigen Siliziumkristallen verknüpft werden. Ein Einfluss der Partikelorientierung auf die Versagenswahrscheinlichkeit, wie von anderen Untersuchungen berichtet, kann nicht eindeutig festgestellt werden.

Durch analytische (Ansatz nach Eshelby) und numerische Verfahren (Mikrostruktursimulationen) konnte gezeigt werden, dass Siliziumkristalle und intermetallische Phasen in Belastungsrichtung eine höhere Lastübernahme aufweisen. Unter der Annahme, dass Partikelbrüche mit dem Erreichen der Bruchfestigkeit des Einschlusses auftreten, ist ein direkter Einfluss der Orientierung auf die Versagenswahrscheinlichkeit anzunehmen. Eine Dokumentation des zum Versagen führenden Einzelrisses ist durch sukzessive Prüfung und Dokumentation nicht möglich – einzig direkte Beobachtungen der Mantelfläche können das beschleunigte Risswachstum am Ende der Lebensdauer der Probe erfassen.

Bei höheren Spannungsamplituden kann die Bildung von kornorientierungsspezifischen Matrixrissfeldern, initiiert am Übergangsbereich zwischen Einschluss- (intermetallische Phasen, Siliziumkristalle) und Al-Matrixphase festgestellt werden. Die Einzelrisse der Rissfelder initiieren dabei unabhängig von der Größe und Form der Einschlüsse.

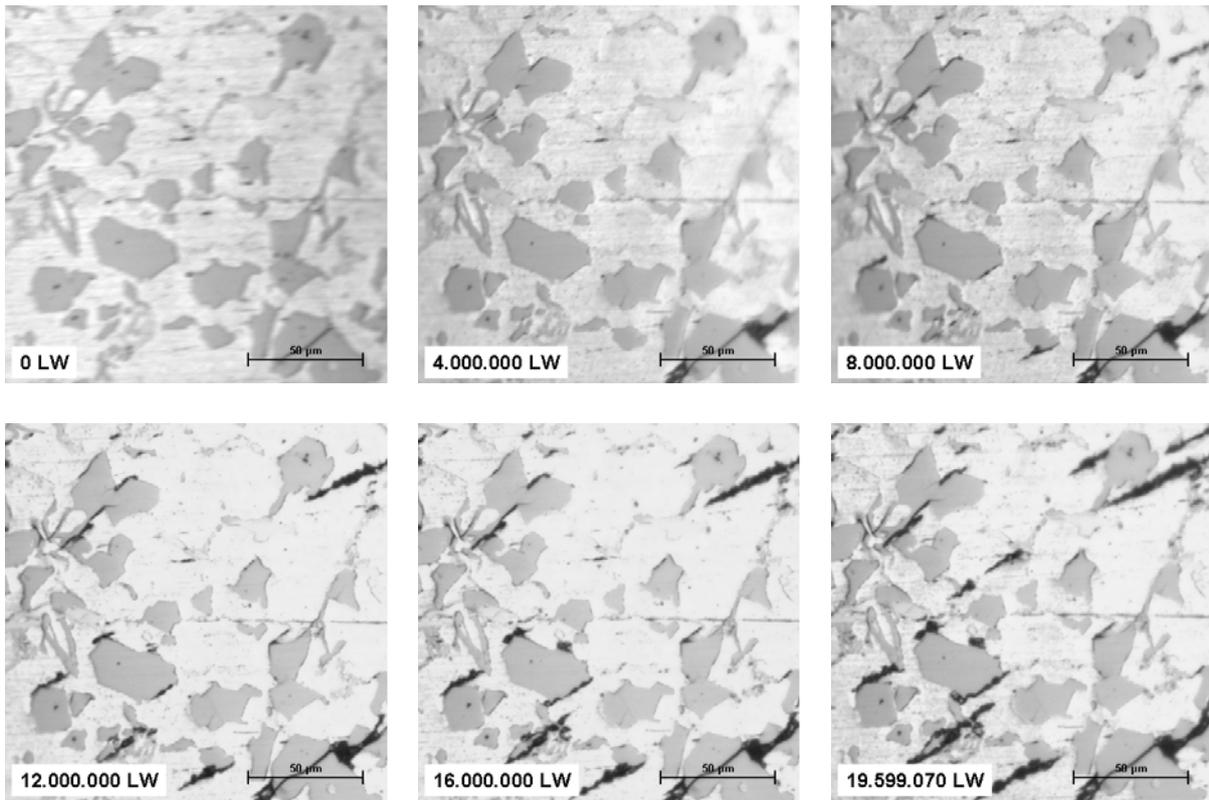


Bild 4: Oberflächendokumentation bei gestuften Schwingspielzahlen ($T=250^{\circ}\text{C}$, HCF)

Eine Dokumentation der kornorientierungsspezifischen Ermüdungsrissinitiierung zeigt Bild 4. Es kann gezeigt werden, dass der Bereich der Mikrorissfelder mit einheitlicher Orientierung, zu-
meist in $\pm 45^{\circ}$ -Orientierung zur Belastungsrichtung, mit der Korngröße verknüpft werden kann. Ein Wachsen der Mikrorisse über mikrostrukturelle Barrieren wie Korn- oder Phasengrenzen kann nicht festgestellt werden.

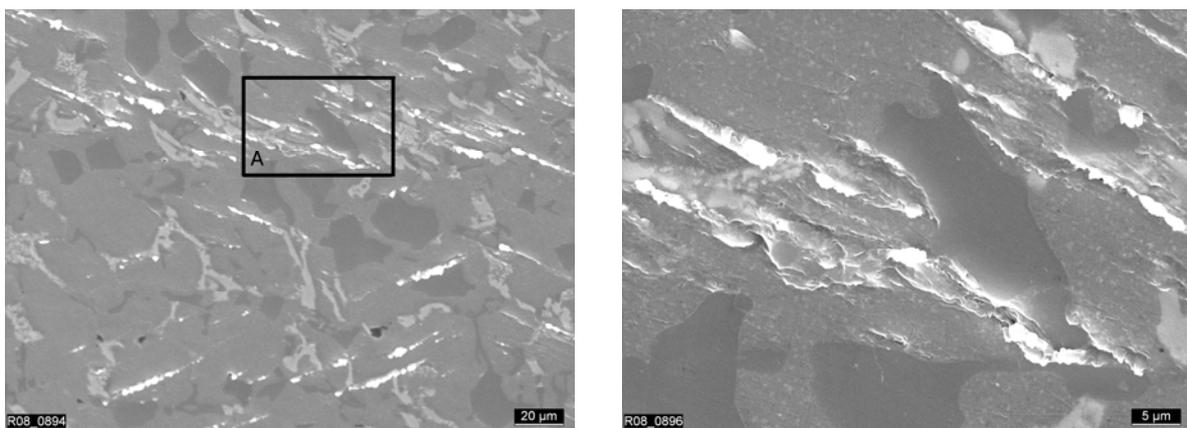
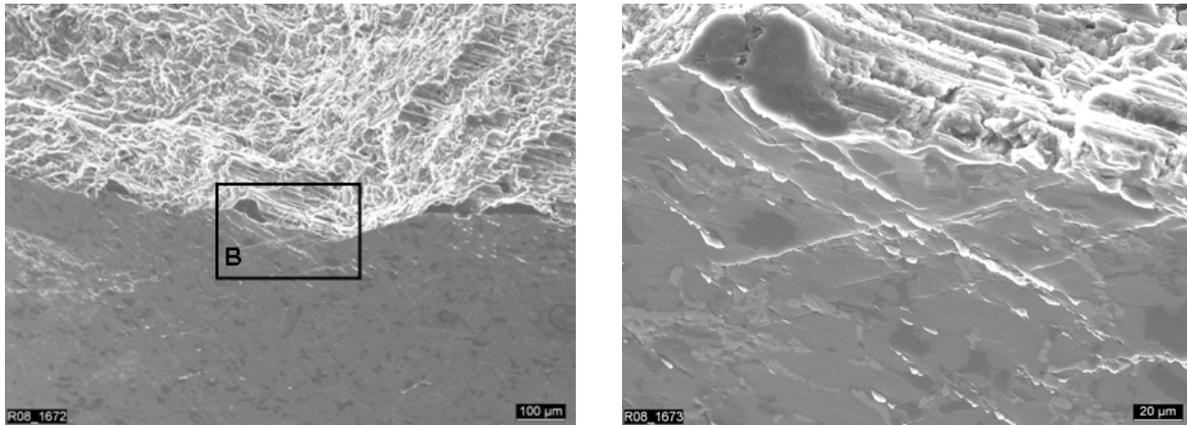


Bild 5: Rasterelektronenmikroskopische Oberflächenaufnahme der korn-orientierungsspezifischen Mikrorissfelder mit Detailabbildung A.

Die Anzahl an betroffenen oberflächennahen Körnern wird durch die Spannungsamplitude be-
stimmt. Untersuchungen mit $\sigma_a = 64 \text{ MPa}$ zeigen eine an nahezu allen Körnern stattfindende

Mikrorissbildung mit jeweiliger Kornorientierungsspezifischer Orientierung. Durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen können in den lichtmikroskopisch als Mikrorissfelder identifizierten Bereichen Gleitbandstrukturen mit Extrusionen sowie Mikrorissbildung nachgewiesen werden, siehe [Bild 5](#). Untersuchungen von Proben nach Bruch bestätigen, dass der Ort des Bruchausgangs, Gleitbandstrukturen mit Extrusionen und Mikrorissen aufweist, siehe [Bild 6](#).



[Bild 6](#): Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Ortes des Bruchausgangs bei $T=250^{\circ}\text{C}$ mit Detailabbildung B

Das Auftreten von kornorientierungsspezifischen Gleitbandstrukturen mit Extrusionen und Mikrorissbildung bei AlSi12Cu4MgNi2 anstatt partikelmorphologiedominiertem Einzelrisswachstum war bis zu den im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen in der Literatur nicht beschrieben und für Al-Si-Legierungen im Allgemeinen weitgehend unbekannt.

Das Auftreten von Extrusionen ist an das Vorhandensein von Ermüdungsgleitbändern gekoppelt, welche tief in das Werkstoffinnere reichen können [11]. Die Ermüdung bei duktilen Werkstoffen beruht auf (lokalen) plastischen Wechselverformungen, d.h. bei metallischen Werkstoffen auf einem ständigen Hin- und Herbewegen von Versetzungen sowie auf den Wechselwirkungen von Versetzungen untereinander und mit den unterschiedlichen Phasen (hier: Siliziumkristalle, intermetallische Phasen, θ -Ausscheidungen, Korngrenzen). Untersuchungen der Versetzungsstruktur waren im Rahmen des Vorhabens nicht vorgesehen.

Zusammenfassend ergeben sich hinsichtlich der Ermüdungsrissinitiierung und des Ermüdungsrisswachstums folgende experimentell ermittelten Schädigungsformen, siehe [Bild 7](#).

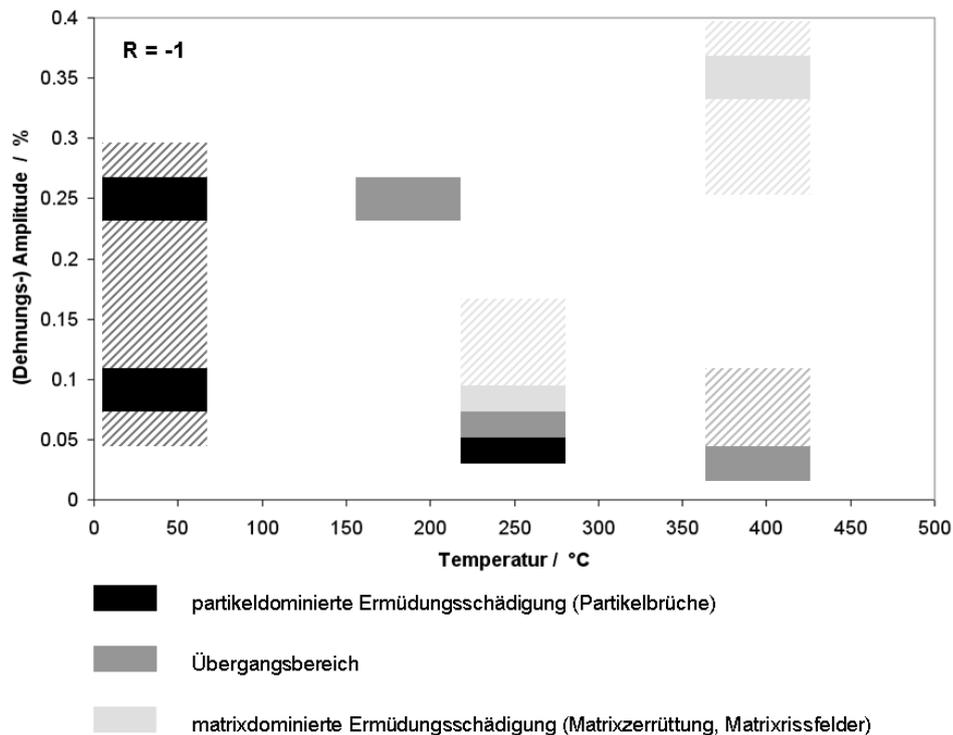


Bild 7: Auftretende Schädigungsformen in Abhängigkeit von der Temperatur und der Belastungshöhe

Für Untersuchungen bei Raumtemperatur kann die Ermüdungsschädigung als partikeldominiert angenommen werden. Es zeigt sich eine deutliche Größenabhängigkeit der Schädigungsinitiierung, welche aufgrund der spröden Werkstoffcharakteristik zu einem sofortigen Versagen der Probe führt. Für $T=400^{\circ}\text{C}$ zeigt sich die Ermüdungsschädigung in Form einer integralen Matrixzerrüttung. Einen Einfluss der Partikelmorphologie ist nicht zu identifizieren. Insofern kann von einer matrixdominierten Ermüdungsschädigung ausgegangen werden. Für den Übergangsbereich bei $T=250^{\circ}\text{C}$ bilden sich in Abhängigkeit von der Beanspruchungshöhe die Schädigungsformen „Einzelriss“ (partikeldominiert) und „Gleitbandrissfeld“ (matrixdominiert) heraus.

Die in Abhängigkeit zur Temperatur und Beanspruchungshöhe wechselnden Schädigungsformen können gemäß der Modellvorstellung von Tanaka und Mura klassifiziert werden [12]. Die Autoren unterscheiden Ermüdungsrissinitiierung an Werkstoffen mit Einschlussphasen in drei Klassen:

- Gleitbandriss, ausgehend von einem abgelösten Partikel
- Partikelversagen durch den Aufstau von Versetzungen
- Gleitbandriss, ausgehend von einem unabgelösten Partikel

Ferner werden Berechnungsvorschläge auf der Basis der Akkumulation von Versetzungsdipolen verknüpft mit der Berechnungsmethode für Einschlüsse nach Eshelby [13] angegeben. Der untersuchte Werkstoff AlSi12Cu4MgNi2 weist in Abhängigkeit von Temperatur und Beanspruchung alle durch Tanaka und Mura beschriebenen Schädigungsformen auf.

Der in Abhängigkeit zu den Eigenschaften der Matrixphase („weiche“ Matrix bei hohen Temperaturen, „harte“ Matrix bei Raumtemperatur) stehende Schädigungsmechanismus wurde in der Abteilung Berechnung für einen Verbund aus $\text{Al(6061)/Al}_2\text{O}_3$ für statische Beanspruchungen

umfangreich untersucht. So dominieren bei einer „weichen“ Matrix Partikelablösungen – bei einer nach vorgenommener T6-Wärmebehandlung „harten“ Matrix Partikelbrüche als dominanter mikrostruktureller Schädigungsmechanismus [14]-[15].

Unter der Annahme, dass die mechanischen Kennwerte der spröden intermetallischen Phasen und Siliziumkristallen im betrachteten Temperaturbereich konstant sind – die der Matrixphase aber eine hohe Temperaturabhängigkeit aufweisen, können nur Untersuchungen der Versetzungs- und Ausscheidungsstruktur zur quantitativen Beschreibung des Werkstoffzustands der Matrixphase unter unterschiedlicher Ermüdungsbeanspruchung, d. h. zu unterschiedlichen Lastwechseln bei jeweils konstanter Spannungs- bzw. Dehnungsamplitude, eine quantitative Aussage zum Schädigungsmechanismus und dem damit verbundenen Lebensdauerzustand des Werkstoffes liefern. Somit ist es dann möglich mit einem einheitlichen grundlegenden Schädigungsmechanismus, z.B. auf der Basis von Versetzungsbewegungen, die unterschiedlichen Schädigungsformen der unterschiedlichen Temperaturen und Lasthöhen quantitativ zu beschreiben und in ein Lebensdauerkonzept einzubinden.

Das bisher unbekannte Auftreten von Gleitbandrissen mit Extrusionsbildung kann den wirkenden Ermüdungsschädigungsformen von AlSi12Cu4MgNi2 zugeordnet werden. Hinsichtlich der Werkstoffoptimierung bei Al-Si-Legierungen zeigen die vorgenommenen Untersuchungen, dass die Optimierung einzelner mikrostruktureller Parameter wie beispielsweise

- Reduktion der Siliziumkristallgröße / Unterdrückung der Primärsiliziumbildung durch Veredelung
- Optimierung der Rundheit der Einschlüsse
- Reduktion von Partikelagglomerationen

nicht für den gesamten technisch relevanten Temperaturbereich eine Optimierung der Ermüdungsfestigkeit darstellen muss, sondern gesondert auf seine Auswirkungen untersucht werden sollte. Insbesondere der Einfluss der Matrixphase mit seinen komplexen Ausscheidungs- und Versetzungsstrukturen auf die Ermüdungsfestigkeit ist nur unzureichend untersucht und bietet Potenzial für die Optimierung von Aluminiumgusslegierungen mit hoher Verschleißfestigkeit und optimierten mechanischen Verhalten bei erhöhten Temperaturbeanspruchungen.

Literatur

- [1] Krämer, D., Krolop, S.: Entwicklung eines schädigungsmechanischen Modells zur Bewertung der Lebensdauer von Kraftwerkskomponenten bei zyklischer mechanischer Beanspruchung, Abschlussbericht zum BMBF Vorhaben 1501095, MPA-Auftrags-Nr. 8819 00 000, 2001
- [2] Chopra, O.K., W.J. Shack: Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials, NUREG/CR-6909, ANL-06/08, February 2007
- [3] Reicherter, B., Schuler, X., Herter, K.-H.: Nachweis der Ermüdungsfestigkeit bei kerntechnischen Komponenten aus ferritischen und austenitischen Werkstoffen, BMWi-Vorhaben 150 1296, Abschlussbericht Nr. 8335 000 000 , MPA Universität Stuttgart, 2009

- [4] Zhang, B., Poirier, D.R., Chen, W.: Microstructural Effects on high-cycle fatigue-crack initiation in A356.2 Casting Alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science, 30, 2659-2666
- [5] Lados, D.A, Apelian, D., de Figueredo, A.M.: Fatigue performance of high integrity cast aluminium components, Proceedings from the 2nd International Aluminium Casting Technology Symposium, 7-9 October 2002, Columbus, OH, ASM International 2002
- [6] Lados, D.A., Apelian, D.: Operating Fatigue Crack Growth Mechanisms at the Microstructure Level in Al-Si-Mg Cast Components, Worcester Polytechnic Institute, 2004
- [7] Bowles, C.Q., Schijve, J.: The role of inclusions in fatigue crack initiation in an aluminium alloy, Int. Journal of Fracture, Vol. 9, No. 2, 1973
- [8] Plumtree, A., Schafer S.: Initiation and short crack behavior in aluminium alloy castings, In: Miller, K.J., de los Rios, E.R., (Eds.), The mechanical behavior of Short Fatigue Cracks, EGF Publication 1, Suffolk, UK, p.215
- [9] Joyce, M.R., Styles C.M., Reed, P.A.S.: Elevated temperature short crack fatigue behaviour in near eutectic Al-Si alloys, Int. Journal of Fatigue 25, 2003, p. 863-869
- [10] Shiozawa, K., Tohda, Y., Sun, S.-M.: Crack Initiation and small fatigue crack growth behaviour of squeeze-cast Al-Si aluminium alloys, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 20, No. 2, pp. 237-247, 1997
- [11] Thompson, N., Wadsworth, N.J., Louat, N.: The origin of fatigue fracture in copper, Philosophical Magazine 1, 113-26, 1956
- [12] Tanaka, K., Mura, T.: A theory of fatigue crack initiation at inclusions, Metallurgical Transactions A, Vol. 13A, 1982, p.117ff
- [13] Eshelby, J.D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proceedings of The Royal Society of London, Series A, 241, 376-396
- [14] E. Soppa, G. Fischer, M. Seidenfuß, R. Lammert, G. Wackenhut, H. Diem, „Deformation and damage in Al based composites. FE simulations and experiments”, oral presentation, Aluminium Alloys, Their physical properties, Edited by J. Hirsch, B. Skrotzki and G. Gottstein, Volume2, Willey-VCH (2008), pp. 1225-1231
- [15] Babout, L., Ludwig, W., Maire, W., Buffière, J.Y., Nuc. Instrum. Meth. Phys. Res. B (2003), pp.200-203

Zum Langzeit-Kriechverhalten von extrudiertem Polystyrol-Hartschaum (XPS) bei unterschiedlicher Druckbeanspruchung

Dr. rer. nat. Thomas Popp, Abt. Mineralische Baustoffe

Einleitung

Extrudergeschäumte Kunststoffe (XPS) sind polymere Feststoffe aus Polystyrol, die eine geschlossenzellige Struktur aufweisen und in Form von Hartschaumplatten auf den Markt kommen. Bei einer Feststoff-Rohdichte des Polystyrols von rd. 1060 kg/m^3 rangiert hierbei das Gesamtvolumen der Hohlräume bei extrudierten Hartschäumen zwischen 96 % und 98 %. Die Hartschaumplatten werden im Hochbau unter anderem zur Wärmedämmung in dauerhaft druckbelasteten Anwendungen als lastabtragende Wärmedämmung unter Gründungsplatten eingesetzt.

Die Verwendung des Dämmstoffs in diesem Anwendungsgebiet muss über eine vom DIBt Berlin ausgestellte allgemeine bauaufsichtliche Zulassung geregelt sein. Bei dem Zulassungsverfahren spielt dabei die Festlegung der maximal zulässigen Druckspannung unter Berücksichtigung der Dauerbelastung eine wichtige Rolle. Die Einstufung erfolgt auf der Grundlage von folgenden Prüfungen, die an der kleinsten und größten jeweils zu regelnden Plattendicke durchzuführen sind:

- Verhalten im kurzzeitigen Druckversuch nach DIN EN 826 [1]
- Ermittlung des Langzeit-Kriechverhaltens von mindestens 3 verschiedenen Belastungsstufen nach DIN EN 1606 [2].

Grundsätzlich befinden sich die in den betreffenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelten maximal zulässigen Druckspannungen für die dauerbelastete Anwendung unter Gründungsplatten innerhalb des konventionellen elastischen Bereichs des Dämmstoffs und außerdem in der Regel unter dem Wert, der sich aus folgendem Ausdruck ergibt: $\sigma_{10} / 3,15$ oder $\sigma_m / 3,15$.

Bei σ_{10} und σ_m handelt es sich genau genommen um den statistischen Wert des 5% Quantils der Druckspannung bei 10 % Stauchung bzw. der Druckfestigkeit aus dem kurzzeitigen Druckversuch einer größeren Prüfserie, die im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle des Herstellers durchgeführt wurde.

Seit Anfang 2006 werden an der MPA Universität Stuttgart im Auftrag verschiedener Hersteller das Langzeit-Kriechverhalten von XPS-Produkten geprüft. Die Auswertung der Dauerstandversuche erfolgt hierbei mittels des sogenannten Findley-Ansatzes, mit dem, wie nachfolgend aufgeführt, das Verformungsverhalten unter Druckbeanspruchung mathematisch beschrieben werden kann:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_t = \varepsilon_0 + m \cdot t^b$$

Die Gesamtstauchung ε_t setzt sich aus der Anfangsverformung ε_0 und dem zeitabhängigen Ausdruck $m \cdot t^b$ zusammen, der das Kriechverhalten bei langzeitiger Druckbeanspruchung beschreibt. Die Konstanten m und b sind wie die Anfangsverformung ε_0 lastabhängig.

Die Findley-Gleichung kann durch Logarithmieren als lineare Beziehung, wie im Folgenden dargestellt, ausgedrückt werden:

$$\log(\varepsilon_t - \varepsilon_0) = \log m + b \cdot \log(t)$$

Demnach ergibt die Kurvenanpassung mittels linearer Regression bei doppellogarithmischer Darstellung der Versuchsergebnisse eine ausreichende Beschreibung der Kriechverformung über die Zeit, wenn mindestens, wie nach DIN EN 1606 [2] gefordert, das Bestimmtheitsmaß $r^2 > 0,9$ beträgt. In diesem Fall lassen sich die beiden Konstanten m (Ordinatenabschnitt) + b (Steigung der Geraden) auf einfachem Wege aus oben genannter Gleichung ableiten.

Mit Hilfe der auf diesem Wege ermittelten Findley-Parameter lässt sich dann das Kriechmaß für einen Zeitraum über den des Dauerstandversuches hinaus durch Extrapolation abschätzen. Eine Extrapolation bis zur 30-fachen Zeitspanne der Prüfdauer ist nach DIN EN 1606 [2] erlaubt.

Der übliche Betrachtungszeitraum zur Abschätzung der Dickenverringerung und zur Beurteilung der Qualität des Dämmstoffs für die Anwendung unter lastabtragenden Gründungsplatten beträgt 50 Jahre (438300 h). Das über die Extrapolation errechnete Stauchungsmaß, bestehend aus kurzzeitiger und langzeitiger Verformung, sollte bei XPS Dämmstoffen nach DIN EN 13164 insgesamt 2 % nicht überschreiten, wobei der Beitrag der Kriechverformung unter 1,5 % liegen sollte. In diesem Fall muss der Dauerstandversuch über 608 Tage laufen.

Im folgenden Beitrag soll das Materialverhalten von einzelnen XPS-Produkten bei langandauernder Lasteinwirkung exemplarisch vorgestellt und zum Einfluss der Laststufe auf die Materialkennwerte m und b näher eingegangen werden.

Probenmaterial

Das für den vorliegenden Beitrag ausgewertete Probenmaterial umfasste insgesamt zehn Produkte von drei verschiedenen XPS-Herstellern (A, B, C).

Tab. 1 gibt einen Überblick über einzelne grundlegende Kennwerte der Produkte (Plattendicke, Rohdichte, Festigkeit). Die Plattendicke reichte hierbei von 50 mm bis 120 mm, der Rohdichtebereich erstreckte sich von 32 kg/m³ bis 42 kg/m³, und die Werte zur Druckspannung bei 10 % Stauchung bzw. zur Druckfestigkeit lagen je nach Plattensorte zwischen 380 kPa und 800 kPa. Beim kurzzeitigen Druckversuch nach DIN EN 826 zeigten sich im Wesentlichen zwei Typen unterschiedlicher Kraft-Verformungskennlinien. Je nach Kurvenverlauf konnte unterschieden werden zwischen einem Typ mit deutlichem Maximum nach dem elastischen Proportionalitätsbereich (Kurzzeichen Y, Abb.1 entsprechend Bild 1a gemäß DIN EN 826 [1]) und dem Typ mit einem nach dem Proportionalitätsbereich kleinen, aber steten Anstieg der Kraftaufnahme, der sich bis zur 10 % Stauchungsgrenze und darüber hinaus fortsetzte (Kurzzeichen 10%, Abb.2 entsprechend Bild 1c gemäß DIN EN 826 [1]).

Tabelle 1: Materialkennwerte der verschiedenen Dämmstoff-Proben

Probe [Kürzel]	Dicke [mm]	Rohdichte [kg/m ³]	kurzzeitiger Druckversuch σ_m bzw. $\sigma_{10\%}$ [kPa]	E-Modul [kPa]
A1	50	42	770 (Y)	40000
A2	100	41	800 (Y)	42000
B1	60	36	420 (Y)	19000
B2	80	32	380 (Y)	20000
B3	100	35	500 (Y)	21000
B4	120	35	450 (Y)	31000
C1	50	34	400 (10%)	10000
C2	120	34	450 (10%)	20000
C3	50	36	510 (Y)	19000
C4	120	34	470 (Y)	24000

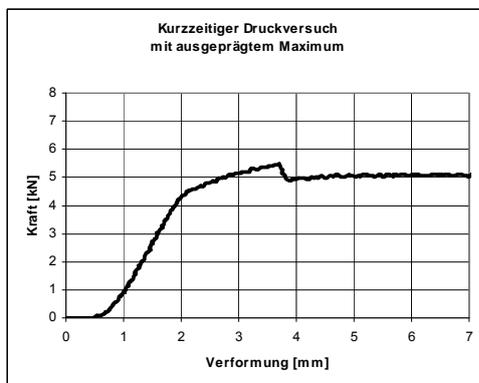


Abb. 1: Kurvenverlauf des kurzzeitigen Druckversuchs des Dämmstoffs mit einem Maximum vor der 10 % Stauchungsgrenze

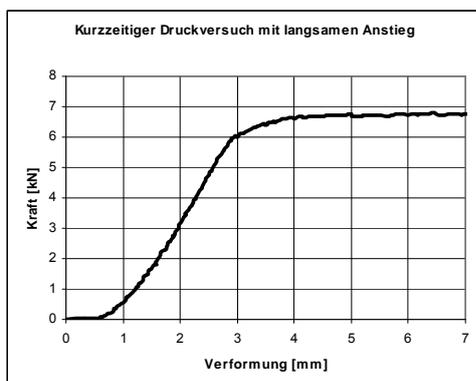


Abb. 2: Kurvenverlauf des kurzzeitigen Druckversuchs des Dämmstoffs mit einem stetigen Anstieg bis zur 10 % Stauchungsgrenze

Versuchsdurchführung

In Abb. 3 ist ein einzelner Zweisäulen-Prüfstand, wie er an der MPA Universität Stuttgart entwickelt wurde, dargestellt. Die Dauerdruckbeanspruchung wird über einen konstanten pneumatischen Überdruck erzeugt, der die Kraft über den mit einer Rollmembran abgedichteten Kolben auf die untere Druckplatte überträgt. Ausgelegt ist der Prüfstand für Kräfte bis ca. 9,5 kN und für einen maximalen Querschnitt des Prüfkörpers von 150 mm x 150 mm. Für die größte Querschnittfläche ergibt sich hieraus eine maximale Laststufe von rd. 400 kPa als Obergrenze des möglichen Prüfbereichs. Die im Rahmen von Zulassungsversuchen gewählten Laststufen sind deutlich niedriger und bewegen sich üblicherweise zwischen 75 kPa und 280 kPa.

Die in dem vorliegenden Beitrag vorgestellten Prüfserien zum Kriechverhalten wurden mit der Abfolge der Laststufen 100 kPa - 125 kPa - 150 kPa oder mit der Abfolge der Laststufen 200 kPa - 250 kPa - 280 kPa durchgeführt. Die Prüfdauer betrug bei allen Versuchen jeweils 608 Tage. Dabei lag das Bestimmtheitsmaß, das bei der Versuchsauswertung mittels linearer Regression ermittelt wurde, bei allen Langzeitversuchen zum Kriechverhalten stets über 98 %.

Die Ergebnisse und Kennwerte zum Langzeit-Verformungsverhalten in Abhängigkeit von der Herkunft (Hersteller), Dicke und Laststufe sind in Tab. 2 wiedergegeben. Die Gesamt-, Kriech- und elastische Anfangsverformung sind jeweils in % ausgewiesen. Eine grafische Darstellung wurde für die Prüfergebnisse zur Langzeit-Verformung sowie zu den Findley-Parametern jeweils in Abhängigkeit der Laststufe ausgewählt und befindet sich von A in den Abb. 4 und 5, von B in den Abb. 6 und 7 und von C in den Abb. 8 und 9 bzw. in den Abb. 10 und 11. Dabei wurden in den jeweiligen Abbildungen die Produkte eines Herstellers mit unterschiedlichen Dicken zusammengefasst.

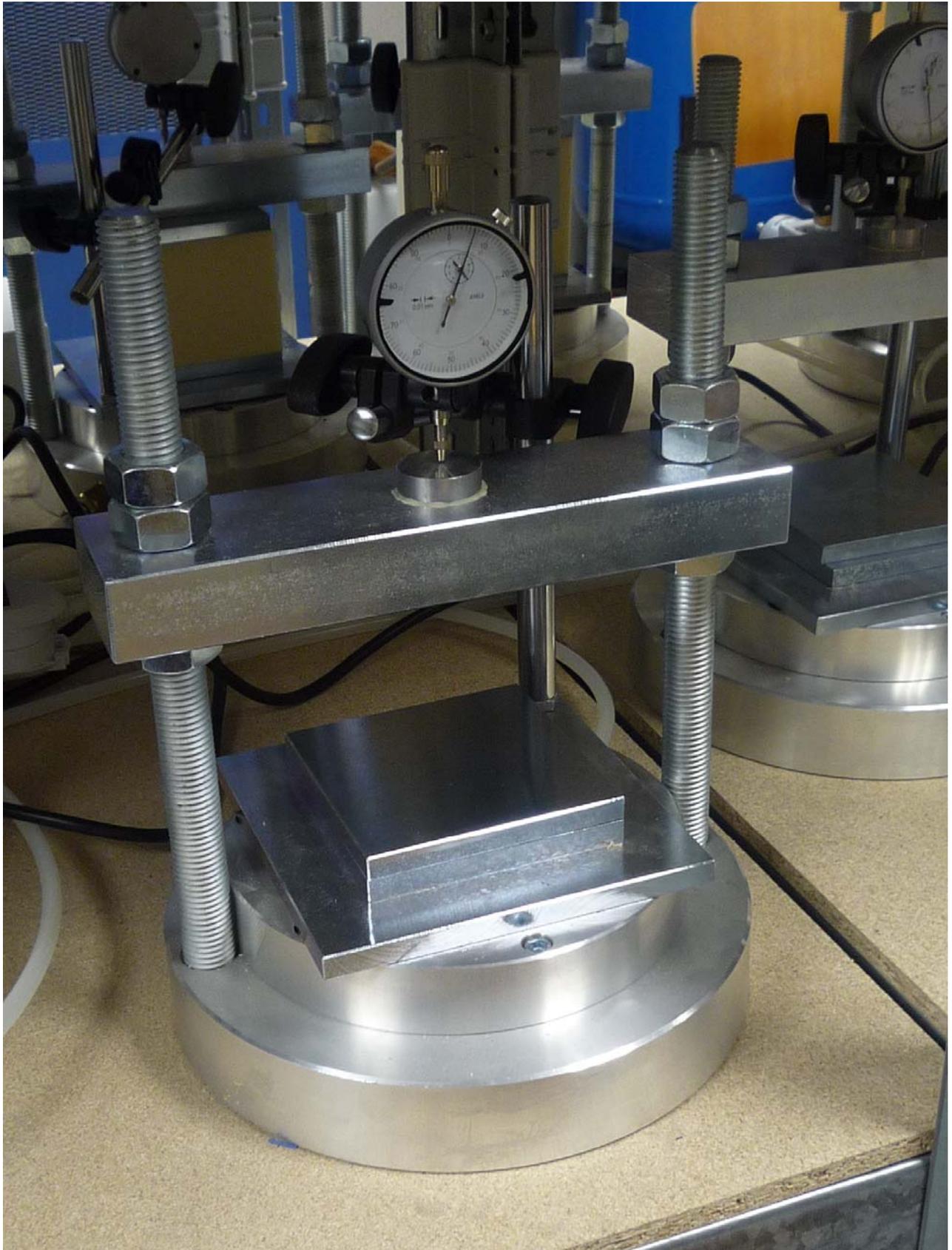


Abb. 3: Prüfstand zur Bestimmung des Kriechverhaltens von Wärmedämmstoffen

Tabelle 2: Ergebnisse und Kennwerte zum Langzeit-Verformungsverhalten in Abhängigkeit von der Dicke und der Laststufe

Probe [Kürzel]	Dicke [mm]	Laststufe σ_c [kPa]	Gesamt- Verformung*	Kriech- Verformung*	elastischer Anteil	Koeffizienten der Findley-Gleichung	
			ϵ_t [%]	ϵ_{ct} [%]	ϵ_0 [%]	m [--]	b [--]
A1	50	200	1,57	1,08	0,49	0,0130	0,2843
		250	1,82	1,20	0,62	0,0108	0,3070
		280	2,05	1,36	0,69	0,0079	0,3416
A2	100	200	1,53	1,05	0,48	0,0071	0,3850
		250	1,92	1,32	0,60	0,0060	0,4155
		280	2,30	1,63	0,67	0,0049	0,4470
nach DIN EN 13164			≤ 2	$\leq 1,5$			
B1	60	100	1,11	0,60	0,51	0,0205	0,2216
		125	1,51	0,87	0,64	0,0332	0,2130
		150	1,77	1,00	0,77	0,0445	0,2015
B2	80	100	1,23	0,83	0,40	0,0645	0,1746
		125	1,43	0,92	0,51	0,0890	0,1520
		150	1,60	0,99	0,61	0,1022	0,1414
B3	100	100	1,35	0,87	0,48	0,0841	0,1834
		125	1,71	1,11	0,60	0,1200	0,1717
		150	1,95	1,24	0,71	0,1489	0,1628
B4	120	100	1,63	1,31	0,32	0,0080	0,4063
		125	1,82	1,42	0,40	0,0152	0,3629
		150	1,95	1,47	0,48	0,0218	0,3380
nach DIN EN 13164			≤ 2	$\leq 1,5$			
C1	50	100	2,55	1,59	0,96	0,0443	0,2231
		125	3,60	2,38	1,22	0,1094	0,1852
		150	5,52	4,43	1,08	0,1249	0,2230
C2	120	100	2,08	1,56	0,52	0,0350	0,3074
		125	3,09	2,43	0,66	0,0613	0,2985
		150	5,39	4,60	0,79	0,0772	0,3300
C3	50	100	1,82	1,30	0,52	0,0165	0,2848
		125	2,20	1,54	0,66	0,0266	0,2611
		150	2,41	1,63	0,78	0,0357	0,2432
C4	120	100	2,08	1,66	0,42	0,0119	0,3953
		125	3,13	2,60	0,53	0,0153	0,4104
		150	4,29	3,66	0,63	0,0183	0,4229
nach DIN EN 13164			≤ 2	$\leq 1,5$			
* Extrapolation auf 50 Jahre auf der Grundlage der linearen Regressionsanalyse							

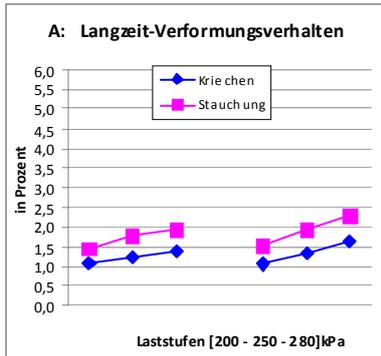


Abb. 4: Probe A: 50 mm bzw. 100 mm

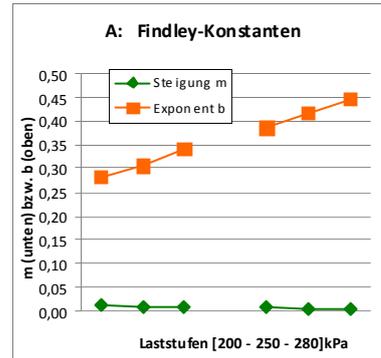


Abb. 5: Probe A: 50 mm bzw. 100 mm

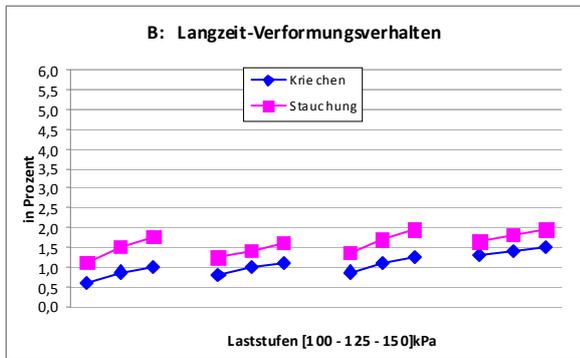


Abb. 6: Probe B: 60 mm – 80 mm – 100 mm – 120 mm

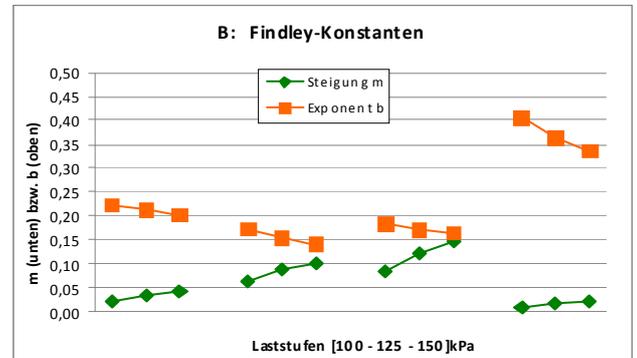


Abb. 7: Probe B: 60 mm – 80 mm – 100 mm – 120 mm

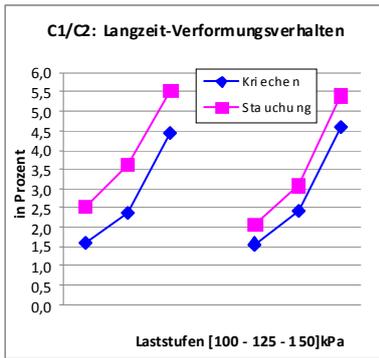


Abb. 8: Probe C1/C2: 50 mm bzw. 120 mm

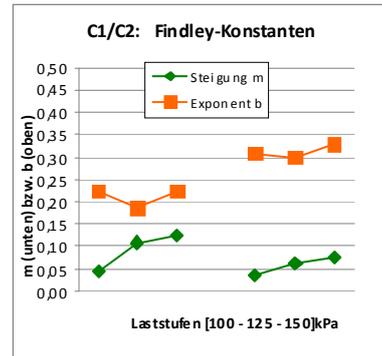


Abb. 9: Probe C1/C2: 50 mm bzw. 120 mm

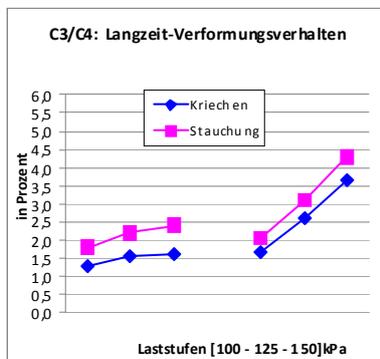


Abb. 10: Probe C3/C4: 50 mm bzw. 120 mm

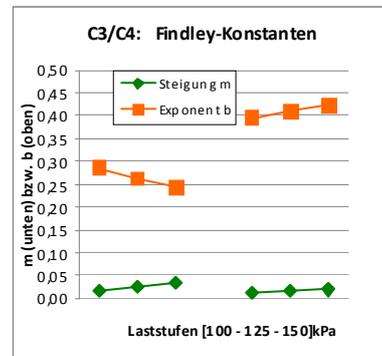


Abb. 11: Probe C3/C4: 50 mm bzw. 120 mm

Schlussfolgerungen

Die Prüfergebnisse zeigten bezüglich des Langzeit-Kriechverhaltens unter langdauernder konstanter Druckbeanspruchung insgesamt ein recht vielfältiges Bild. Es wird vermutet, dass zum einen die Polymermatrix und zum anderen insbesondere die Zellstruktur des Dämmstoffs, charakterisiert durch Zellform, Zellgröße und Größenverteilung der Zellen, jeweils eine große Bandbreite in ihrer Ausbildung aufweisen und dadurch die beobachteten Unterschiede im Materialverhalten verursachen.

Die hier vorgestellten Versuchsergebnisse bestätigten den in DIN EN 1606 [2] verwendeten, mathematischen Ansatz nach Findley als sehr gute Näherung zur Beschreibung des Langzeit-Kriechverhaltens von extrudiertem Polystyrol-Hartschaum unter ständiger Druckbeanspruchung [3, 4]. Beide Findley-Parameter m und b erwiesen sich als laststufenabhängig und zeigten in der Gesamtschau der hier vorgestellten Prüfergebnisse eine breit angelegte Werteskala.

Für ein und dasselbe Probenmaterial wurden unter den beiden Findley-Parametern m und b mit zunehmender Höhe der Laststufe ein zueinander gegenläufiges Verhalten beobachtet, wobei eine einfache Beziehung zwischen den beiden Materialkonstanten nicht offensichtlich ist. Bei dem Probenmaterial A wurden bei zunehmender Höhe der Laststufe die Beträge von m kleiner während gleichzeitig die Beträge von b zunahmten. Dagegen verhielten sich die Beträge der Parameter m und b jeweils von Probenmaterial B und C hierzu jeweils gerade umgekehrt.

Eine Ausnahme stellten die Ergebnisse der beiden Produkte C1 und C2 dar, die nach der 2. Laststufe eine deutliche Zunahme der Gesamt- und Kriechverformung zeigten. C1 und C2 lieferten im kurzzeitigen Druckversuch Kurvenverläufe entsprechend Abb. 2, d.h. mit einem steten Anstieg der Kraft bis zur 10 % Stauchungsgrenze. Es wird vermutet, dass die Tragfähigkeit der hier vorhandenen Zellstruktur jeweils geringer war, verglichen mit Hartschäumen, die im kurzzeitigen Druckversuch ein ausgeprägtes Maximum bei der Kraft-Verformungskennlinie besitzen.

Auf die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen der Dicke des Produkts und dem Maß der Kriechverformung bei gleichem Hersteller gibt, ist zu bemerken, dass bei den hier vorliegenden Versuchsbedingungen mit zunehmender Dicke das Kriechmaß leicht zu höheren Werten tendierte.

Literatur

[1] DIN EN 826 DIN EN 826 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen; Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung

[2] DIN EN 1606 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen; Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens bei Druckbeanspruchung

[3] Norbert Krollmann Langzeitverhalten von extrudiertem Polystyrol-Hartschaum bei konstanter und zyklisch wechselnder Druckbeanspruchung in Bauphysik 17 (1995) Heft 1

[4] Lastabtragende Wärmedämmung DiB Special Dämmtechnik, Sonderdruck aus Deutsches Ingenieurblatt – DiB Special 12/2006 S. 12-15 Nr.2207

Process Zone Length and Fracture Energy of Spruce Wood in Mode I from Size Effect

Dr. rer. nat. Simon Aicher, Abt. Holzkonstruktionen

Abstract

The paper reports on the determination of fracture energy and fracture process zone length in Mode I fracture of European spruce wood loaded in tension perpendicular to fiber direction, based on Bazant's size effect law. Within the size effect model, fracture energy and fracture process zone length are correlated and represent unambiguous limit values for large structures or specimens. The model parameters were derived from an earlier conducted experimental size effect study on specific single edge notched beam (SENB) specimens with a scale range of 1:32.

The Mode I fracture energy range of 250 to 290 N/m, derived from the size effect law, is in agreement with the fracture energies obtained for the same specimens based on external work until complete specimen failure. The elastically equivalent length of the fully developed fracture process zone ahead of the nominal crack tip was determined to be in the range of about two millimetres. The stated independent proof of the correlated fracture energy confirms the validity of the derived size of the fracture process zone. Furthermore, the obtained fracture process zone size is in close agreement with a previous result for Eastern Canadian spruce, a finding based on Scanning Electron Microscopy.

Keywords: Fracture, fracture energy, Mode I, size effect, process zone, spruce, wood

Introduction

In timber engineering and wood drying the Mode I fracture with a crack parallel to longitudinal (L) fiber direction in solid wood or glulam, initiated and driven by tension stresses perpendicular to fiber direction bound to mechanical and/or moisture loads, is of high importance. This is especially true for splitting failures in curved and pitched cambered glulam beams or in timber joints with dowel type fasteners. The orientation of the normal vector of the crack plane, resulting from loading perpendicular to fiber direction, may conform to the limit cases of pure radial (R) or pure tangential (T) direction and in general is at some angle in between R and T directions. The respective Mode I fracture planes are then denoted by RL, TL and (R/T)L.

The material parameters fracture energy and fracture process zone length are decisive for the characterisation and modelling of the fracture process and the material resistance to crack initiation and propagation. In a perfectly brittle material containing a crack, all of the fracture process at tension and/or shear loading takes place at the crack tip. In many common materials including wood the fracture process is not confined to a point but occurs within a certain length (area), termed fracture process zone, stretching out ahead of the crack tip. Depending on the respective material either hardening, ideal plastic behavior, or softening may occur in the process zone. Hardening and plasticity are features demonstrated by most metals (Dugdale 1960) whereas softening is typical, *inter alia* for

concrete (Hillerborg 1976, Reinhardt 1984) and for wood (Boström 1992) when loaded in tension perpendicular to fiber direction. In all cases, additional energy is dissipated in the fracture process zone during progressive damage, as compared to ideal brittle fracture, thus increasing the energetic fracture resistance, termed fracture energy. In the softening of wood, damage mechanisms like slipping, friction, decohesion and pull-out of the gap-bridging fibers (Vasic et al. 2002, Vasic and Smith 2002) and effects of anisotropy and material inhomogeneity (Dill-Langer et al. 2000, Landis et al. 2002, Dill-Langer 2004), contribute to the nonlinear fracture resistance. The sketched energy dissipation and degradation evolution increases the required energy input, termed strain energy release rate, to drive the fracture process.

In this paper, both, fracture energy and fracture process zone length, or more precise, the elastically equivalent size of the fracture process zone, are consistently derived by Bazant's nonlinear size effect law (Bazant 1984; Bazant and Pfeiffer 1987) by reevaluating the results of an earlier study (Aicher et al. 1993) on the influence of size on tension strength perpendicular to grain in notched beam specimens of European spruce.

Literature review

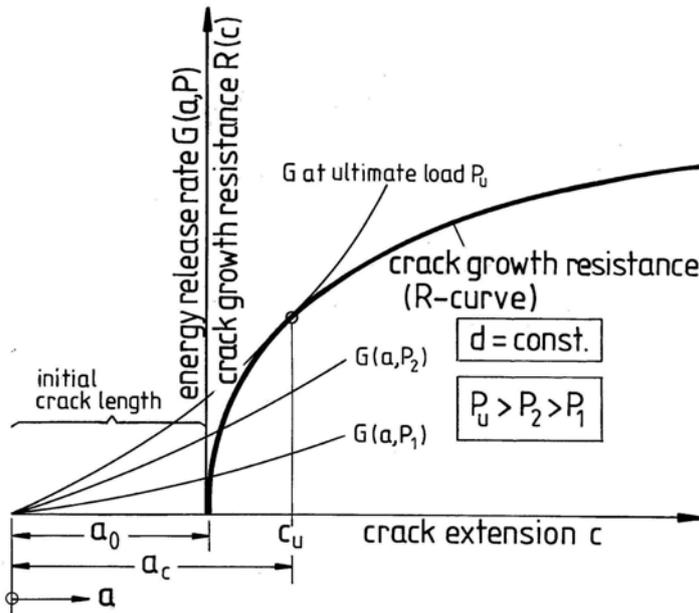
Fracture energy can be determined through stable crack growth tests by evaluating the external work exerted to create new unit areas of crack surfaces. The experiments may be performed with monotonic loading until complete specimen failure with separation of the crack surfaces or by successive loading and unloading with associated crack elongation measurements. Determination of fracture energy in Mode I loading perpendicular to fiber direction has primarily been conducted on single edge notched beams (SENB) or through wedge splitting test arrangements on several wood species including spruce, pine and oak (*inter alia* Larsen and Gustafsson 1989, 1990; Aicher 1994; Smith and Chui 1994; Stanzi-Tschegg et al. 1995; Reiterer et al. 2000).

However, with regard to fracture process zone size quantification there are only very few investigations reported in the present body of literature. An experimental micro-mechanical study on the characterisation and size of the fracture process zone in Eastern Canadian spruce was performed by Vasic et al. (2002) by means of in-situ real time Scanning Electron Microscopy (SEM). According to this investigation, after initiation the crack grows in a highly localized manner, with a length of the fracture zone of about 1 to 2 mm. No evidence was found for a larger zone of micro-cracks ahead of the crack tip, as seen for instance in concrete or ceramics. Computations using a distinct bridging crack model (BCM), which contrary to usual cohesive crack models is based on the assumption of co-existence of a sharp crack tip and a non fictitious bridging zone behind it, resulted in a bridging zone length of 4 mm for Canadian spruce (Vasic and Smith 2002; Smith et al. 2003). The stated bridging zone size coincides with the fiber length of Eastern Canadian spruce.

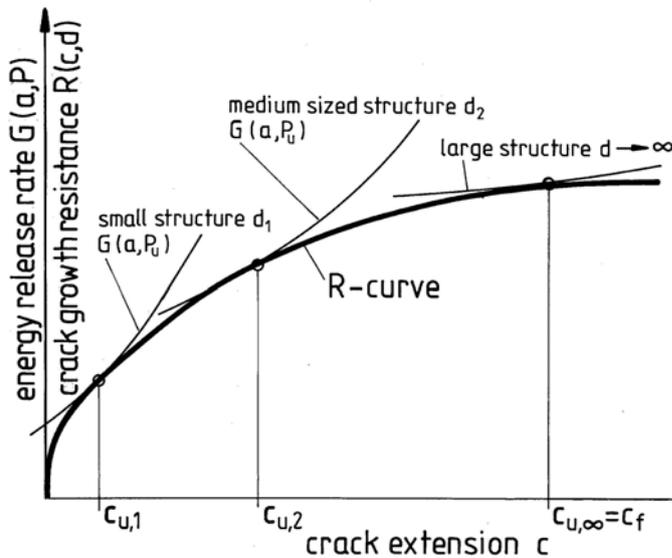
Apart from the above-cited experimental determinations of fracture energy and process zone length and the semi-computational BCM model approach, a further method, based on Bazant's nonlinear size effect law seems possible. The approach which has been successfully applied to rock, concrete and other cementitious materials (Bazant 1984,1987; Bazant and Pfeiffer 1987; Bazant and Kazemi 1990; N. N. 1990) enables the consistent determination of both fracture energy and elastically equivalent process zone length as inter-dependent material properties within the frame of one model assumption. Although the size effect model has been applied in earlier studies on the evaluation of strength vs. size relationships of Mode I and II fractures in spruce, pine and oak, (Aicher 1992; Aicher et al. 1993; Morel and Valentin 1996) the literature so far provides no evidence of a successful application of Bazant's size effect concept to fracture energy and process zone determination in wood fracture.

Unambiguous definition of fracture energy

For an ideal brittle material, fracture energy G_f is a constant, often termed critical energy release rate G_c . On the contrary, in cases of materials exhibiting softening, G_f is a function of crack extension c and of the characteristic specimen size d , ie $G_f = R_{(c, d)}$. Figure 1a illustrates the fact, well proven by experiments, that for softening materials, the resistance to crack propagation, termed R-curve, increases with growing extension c of an initial crack of length $a = a_0$. Quantity c may be regarded as the elastically equivalent length of the fracture process zone with gradually decreasing capability to sustain transverse tension or shear stresses in case of Mode I and II crack loading, respectively.



a)



b)

Figure 1a,b. General relationship of crack growth resistance (R-curve) and crack extension of fracture softening materials. (a) unique size; (b) similar structures of different sizes.

For a given specimen size d and an initial notch length a_0 , fracture at ultimate load P_u occurs when crack extension c has grown during loading to its specimen size dependant maximum length $c = c_u(d)$, then determining the critical crack length $a_u = a_0 + c$. In the post-peak regime, i.e. beyond the ultimate load on the descending load deformation path—stable fracture assumed—the length of the fully developed process zone $c = c_u$ may be assumed to be roughly constant. The parametric dependency of process zone length respective of its elastically equivalent length c vs. specimen size d is depicted in Fig 1b. The

graph shows that the process zone length c is related to specimen or crack size in such a manner that c is a degressively increasing function of d , reaching a limit value c_f altogether with an asymptotic value for the energetic fracture resistance $R(c,d)$ at very large specimen sizes $d \rightarrow \infty$. It is important to mention, that the experimentally measured R -curve depends considerably on the shape of the structure and is only valid for specimens of similar geometry (Bazant and Cedolin 1991; Morel et al. 2003).

Based on the above discussion of fracture energy and process zone as influenced by the absolute size of the structure/specimen, the material properties G_f and c_f are unambiguously defined as the energy required for crack growth and the related length of the elastically equivalent fracture process zone in an infinitely large structure (Bazant 1987; Bazant and Cedolin 1991). This definition can be written mathematically as

$$G_f = \lim_{d \rightarrow \infty} R(c,d) \quad \text{and} \quad c_f = \lim_{d \rightarrow \infty} c(d) \quad (1a,b)$$

Contrary to the above stated limitations of R -curves, as being dependent on specimen shape, the given definitions of fracture energy and fracture process zone are independent of specimen size and shape and hence provide intrinsic material properties. With regard to the pretentious term 'intrinsic' it should be born in mind that this statement refers—as with all engineering material properties—to a global, i.e. smeared, material characteristic within the frame of non local fracture mechanics.

BAZANT'S NON-LINEAR SIZE EFFECT LAW

Basic Equations for Size Law, Fracture Energy and Process Zone Length

The equation of the employed non-linear size effect law (Bazant 1987; Bazant and Cedolin 1991) and its relation to fracture energy and process zone length is concisely given in the following with consideration to the anisotropic behavior of the material wood. As a result of the defined limit character of G_f and c_f , in an approximation for the ultimate load state of a structure of size d , the proportionality condition of energy release rate and fracture energy can be written as

$$\frac{G(\alpha, P_u)}{g(\alpha)} = \frac{G_f}{g(\alpha_f)} \quad (2)$$

where

$$G(\alpha, P_u) = g(\alpha) \frac{P_u^2}{d b^2 E_{\text{eff}}} \quad (3)$$

with

$$\alpha = \frac{a}{d} = \frac{a_0 + c}{d} = \alpha_0 + \frac{c}{d} \quad (4)$$

and

$$g(\alpha_f) = g(\alpha_0) + g'(\alpha_0) \frac{c_f}{d} \quad (5)$$

where

$$\alpha_f = \alpha_0 + \frac{c_f}{d}, \quad g'(\alpha_0) = \frac{dg(\alpha_0)}{d\alpha} \quad (6), (7)$$

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{2E_x E_y} \left[\sqrt{\frac{E_x}{E_y}} + \frac{E_x}{2G_{xy}} - \nu_{yx} \right]^{-0.5} \quad \text{whereby } \nu_{yx} = \nu_{xy} E_x / E_y \quad (8a, b)$$

Term $G(\alpha, P_u)$ is the (strain) energy release rate $G = G(\alpha, P)$ at maximum load $P = P_u$ which is related to a specific crack extension c (here: parallel to x-axis) of a given structure with characteristic size d (here: parallel to y-axis), width b and effective modulus of elasticity E_{eff} (see below). $g(\alpha)$ represents the normalized energy release rate, i.e. a shape function depending on the specimen shape including the normalized crack extension c/d . Quantity α is the size-normalized full length a of the elastically equivalent crack. Expression $g(\alpha_f) = g(\alpha_0 + c_f/d)$ is the normalized energy release rate with regard to the limit value of crack extension $c = c_f$. Quantity E_{eff} represents the effective modulus of elasticity, which conforms to Young's modulus in cases of isotropic material and plane stress conditions. In the case of an orthotropic material like wood, assuming plane stress conditions and crack extension parallel to wood fiber direction (x-axis), E_{eff} is defined (Sih et al. 1965) according to Eqs (8a, b).

Substituting $G(\alpha, P_u)$ and $g(\alpha_f)$ in Eq (2) by Eqs (3) and (5), delivers for ultimate load

$$P_u = \sqrt{\frac{G_f E_{\text{eff}} b^2 d}{g(\alpha_0) + g'(\alpha_0) \cdot (c_f / d)}} \quad (9)$$

Substitution of ultimate load P_u in Eq (9) by nominal strength (factor c_n depends on the respective test configuration)

$$\sigma_N = \frac{P_u c_n}{b d} \quad (10)$$

yields the non-linear size effect law, i.e. the relation between nominal strength and the characteristic structure or specimen size d

$$\sigma_N = \frac{B}{\sqrt{1 + d / D_0}} \quad (11)$$

where

$$B = \sqrt{\frac{G_f E_{\text{eff}} c_n^2}{g'(\alpha_0) c_f}} \quad \text{and} \quad D_0 = \frac{g'(\alpha_0) c_f}{g(\alpha_0)} . \quad (12a, b)$$

Determination of size effect law parameters by linear transformation

The parameters B und D_0 , defining the size dependency of nominal strength σ_N , can be derived empirically by means of tests performed with geometrically similar specimens of significantly different sizes. Parameter determination can be achieved by transforming the size effect expression (11) into an equivalent linear format

$$Y = C + d A \quad (13)$$

where

$$Y = \frac{1}{\sigma_N^2}, \quad C = \frac{1}{B^2} \quad \text{and} \quad A = \frac{1}{B^2 D_0} = \frac{C}{D_0} . \quad (14a, b, c)$$

The parameters C and A of the linear substitution (13) can now be obtained from a linear regression approximation of the experimental data of a size effect study, hence delivering B and D_0 via Eqs (14b, c). Additionally, the elastically equivalent fracture process zone length c_f and fracture energy G_f can be derived by introducing B and D_0 in Eqs (12a, b).

Size effect law parameters for spruce

Test Scheme, Specimen Geometry and Sizes

With regard to experimental data, this paper relies on results from an earlier investigation on the non-linear fracture behavior and the related size effect of clear wood of European spruce (*picea abies*) loaded in tension perpendicular to fiber direction (Aicher et al. 1993). The tests were performed with a specific type of single edge notched beam (SENB) specimen (Larsen and Gustafsson 1990) that was designed for direct experimental determination of fracture energy.

The beam specimens consisted of three parts with two different orientations of fiber direction; these were glued together as shown in Fig 2. The actual test volume with fiber direction parallel to beam depth d was located at mid-span. Adherents with fiber direction parallel to beam axis were glued to both vertical narrow side faces of the test volume. The

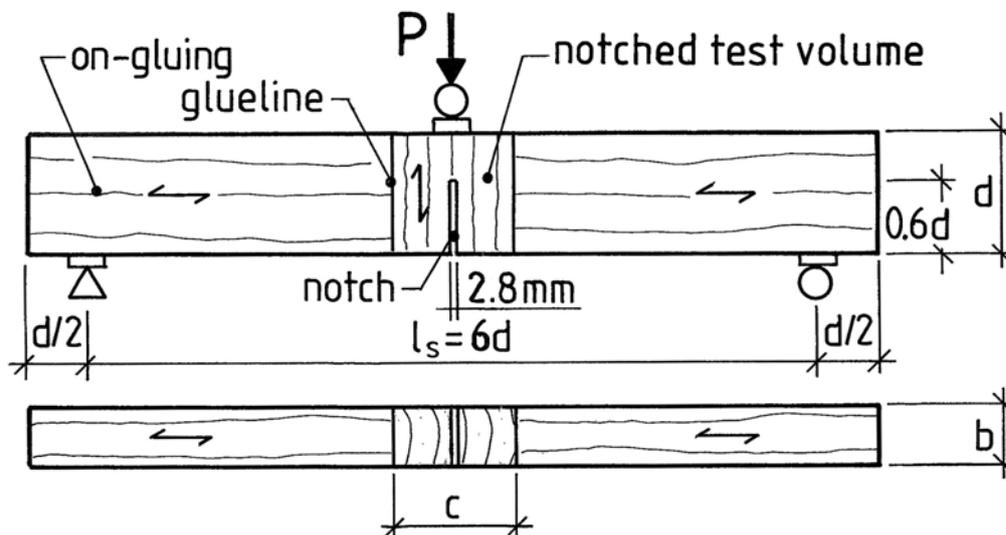


Figure 2. Specimen geometry and test scheme of single edge notched beam (SENB) specimen used in the MODE I size effect study.

test volume incorporated a single edge notch at the bending tension side with a rather long initial notch length of $a_0 = 0.6 d$ in order to assure stable crack propagation. For the size effect study presented here, only the maximum loads prior to softening were evaluated. The longitudinal–tangential growth plane of the test volume and hence of the initial notch plane were–throughout–approximately normal to the beam axis (see Fig 2). Thus, the obtained size effect parameters apply to the so-called RL crack configuration.

The size range of the geometrically (2D) similar specimens covered beam depths d of 10, 20, 40, 80, 160 and 320 mm; beam width throughout was $b = 44$ mm. The shape of the test volumes within the beam plane was quadratic, except for depths d of 160 and 320 mm where–material bound–the length c of the test volumes in beam length direction was $0.5 d$ and $0.25 d$, respectively. Each sample set, with specimens of the same size, consisted of 16 specimens, with the exception of the sample with $d = 320$ mm where only 5 specimens were investigated. Nonetheless, it is noteworthy that an exclusion of the specific sample has no impact on the derived size effect results. All test volumes, cut from two boards of European spruce, were straight grained and showed no macroscopic defects. Prior to the gluing of the SENB assembly the test volumes were conditioned to moisture equilibrium in a constant climate of 20 C and 65% relative humidity (RH); the mean values for density, annual ring width and moisture content were $\rho_{12} = 460 \pm 24 \text{ kg/m}^3$, $r = 2.5$ mm and $u = 11.8$ % respectively. The specified moisture content also refers to the state of testing.

The three-point bending tests with a mid-span load and a span to depth ratio of $l_s/d = 6$ were performed in displacement control with a constant rate of cross-head speed per specimen size, ranging from 0.4 mm/min for $d = 10$ mm and 20 mm to 0.8 mm/min at $d = 320$ mm. The given loading rates resulted in times to maximum load of about 2 min and

complete failure of the specimen was attained within 6 – 10 min depending on specimen size. The temperature and relative humidity in the test room conformed to about 20°C and 55 RH, respectively.

Test results and size effect law

Figure 3a shows the individual bending test results in the format of nominal strength $\sigma_N = 9 P_u / (b d)$ vs. beam depth d . Furthermore, a least squares fitted power function $\sigma_N = a \cdot d^b$ is given, whose parameters were determined as $a = 3.71 \text{ N/mm}^2$ and $b = -0.408$ (note: d in mm). The graph also shows the shape parameter, i.e. the exponent m of a 2 parameter Weibull (cumulative) strength distribution function ($1 - \exp[-(\sigma_N/\sigma_0)^m]$) for each sample with specific size d . The scatter of the shape parameters varies from 6.6 to 8.8, thus being rather similar for all investigated sizes (for details including values for the scale parameter σ_0 , see Aicher et al. 1993). Figure 3b presents the primary test results transformed into a linear relationship of σ_N^{-2} and d according to Eq (13). The linear approximation of the transformed test results yields the regression parameters

$$A = 265.4 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N}^2} \right], \quad C = 0.4242 \left[\frac{\text{mm}^4}{\text{N}^2} \right].$$

From the linear regression parameters A and C one obtains via Eqs (14 b and c) the size effect law coefficients

$$B = 1.535 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right], \quad D_0 = 16.0 [\text{mm}].$$

Figure 4 depicts the nonlinear size effect relationship between nominal strength σ_N and characteristic size d , given in Figs 3a and b, now expressed by the size effect law (11), employing the above derived coefficients B and D_0 . In detail, the size effect relationship is presented in double logarithmic scaling, i.e. $\lg \sigma_N$ vs. $\lg d$. The chosen logarithmic representation enables a clear visualization of the fact that the size effect law equation inherently describes the transition from fracture behavior according to linear elastic fracture mechanics (LEFM) for large sizes $d \rightarrow \infty$ (range with linear slope of -0.5) to a conventional strength of materials approach for very small sizes $d \rightarrow 0$ where strength, on the macroscopic scale, can be considered a scalar quantity (here: $\sigma_N = B$). This is here shown to be well suitable for application in investigations of wood in Mode I fracture with tension loading perpendicular to fiber direction, too.

Length of elastically equivalent fracture process zone

The determination of the length of the fully developed elastically equivalent fracture process zone $c = c_f$ from Eqs (12a and b) necessitates the determination of the normalized strain energy $g(\alpha)$ as a steadily differentiable function of normalized crack length α . Here, function $g(\alpha)$ was derived from an analytical solution for Mode I stress intensity factor K_I

and its respective stress intensity shape function $f(\alpha)$ for a three-point bending specimen with a single edge centre notch (Brown and Srawley 1966)

$$K_I = \frac{6 M \sqrt{a}}{b d^2} Y(\alpha) \quad (15a)$$

where

$$Y(\alpha) = A_0 + A_1 \alpha + A_2 \alpha^2 + A_3 \alpha^3 + A_4 \alpha^4 \quad (15b)$$

(Note: see below for explicit values of parameters A_0 to A_4 , depending on the span to depth ratio.) In order to obtain a different format for Eq (15a), moment M is replaced by load P (see Eq. 10) and section modulus $S = b d^2 / 6$ yielding

$$M = \frac{P c_n}{b d} \cdot S = \frac{P c_n d}{6} \quad (16)$$

Now, the Mode I stress intensity factor according to Eq (15a) can be rewritten as

$$K_I = \frac{P}{b \sqrt{d}} k(\alpha) \quad \text{where} \quad k(\alpha) = c_n \sqrt{\alpha} Y(\alpha) \quad (17a, b)$$

The experimental size effect study had been performed, as mentioned, with a span to depth ratio of $s/d = 6$. For this s/d ratio the shape function

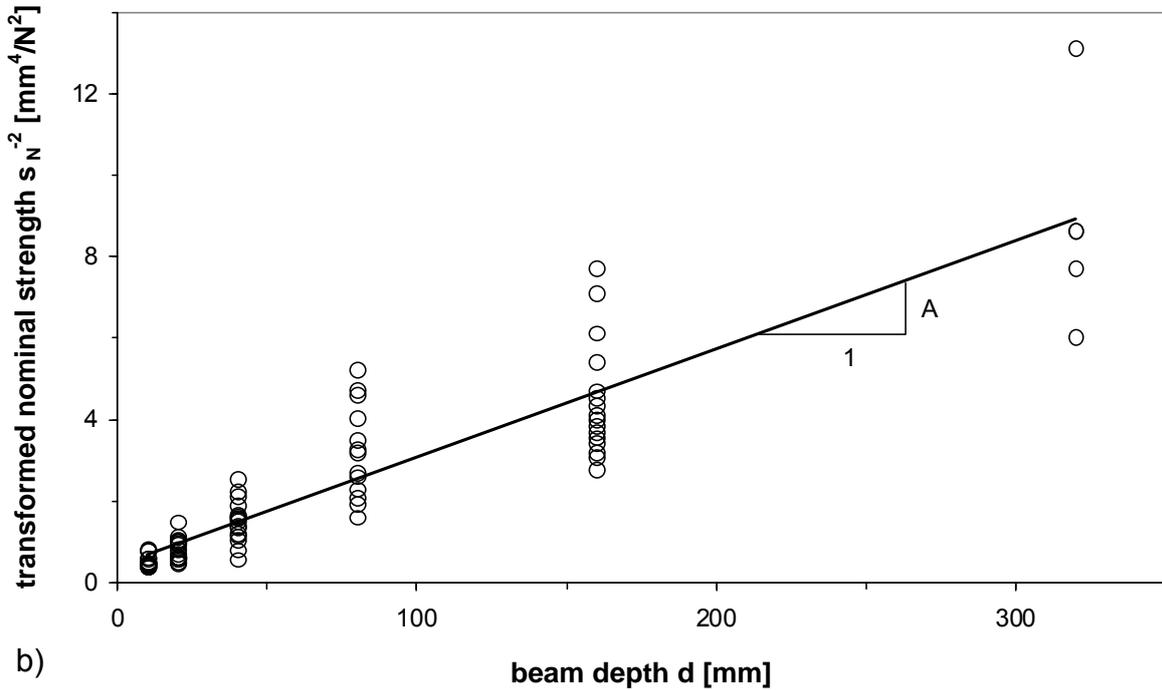
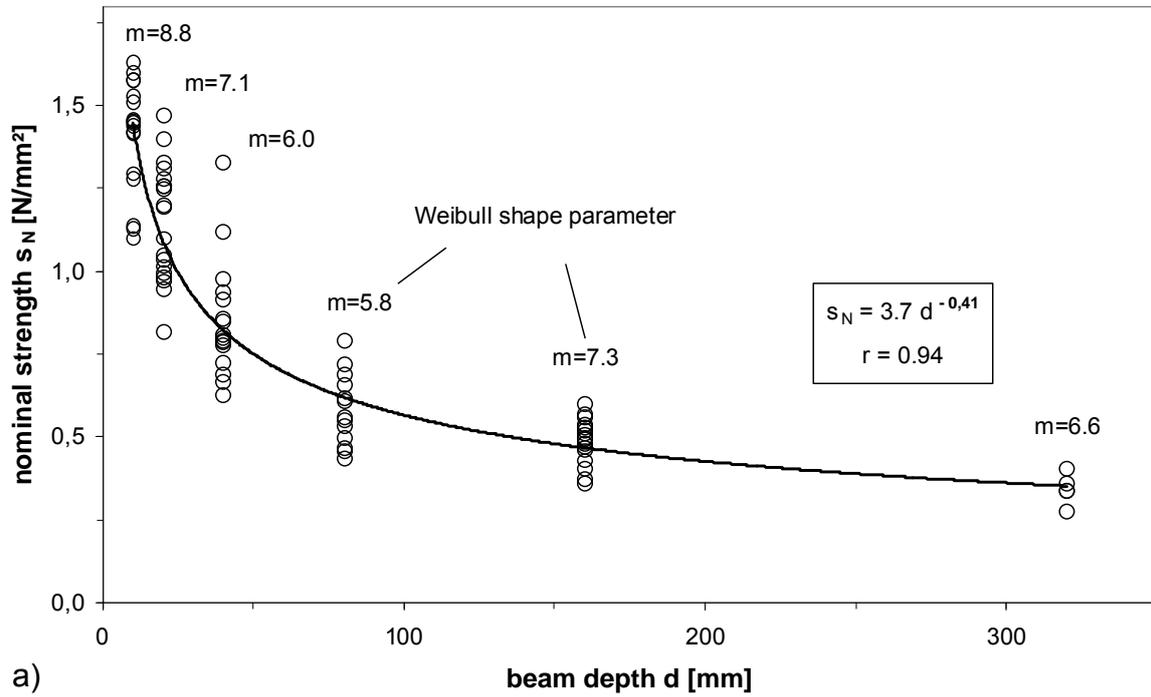


Figure 3a, b. Nominal bending strengths σ_N depending on beam depths d of investigated 2D geometrically similar specimens. (a) σ_N vs. d ; (b) transformed results σ_N^{-2} vs. d .

parameters A_0 to A_4 in Eqs (15b) and (17b) were determined as

$$A_0 = 1.945, \quad A_1 = -2.91, \quad A_2 = 14.095, \quad A_3 = -24.545, \quad A_4 = 25.51$$

based on a linear interpolation of the parameters A_i for $s/d = 4$ and $s/d = 8$, as specified by Brown and Srawley for beams of isotropic material. With regards to the actual orthotropic constitutive law of the test volumes and the heterogeneous build-up of the specimens, finite element analysis was used to verify that the parameters also apply in close approximation to the employed specimens. Parameter c_n in Eq (17b) becomes $c_n = 9$ for the regarded load configuration and span to depth ratio of 6 when replacing M in Eq (16) by $3Pd/2$.

Through reference to the general relationship between energy release rate and stress intensity factor

$$G = \frac{K^2}{E_{\text{eff}}} \quad (18)$$

the relation between normalized strain energy $g(\alpha)$ and normalized stress intensity $k(\alpha)$ is obtained by inserting Eqs (3) and (17a) in Eq (18), resulting in

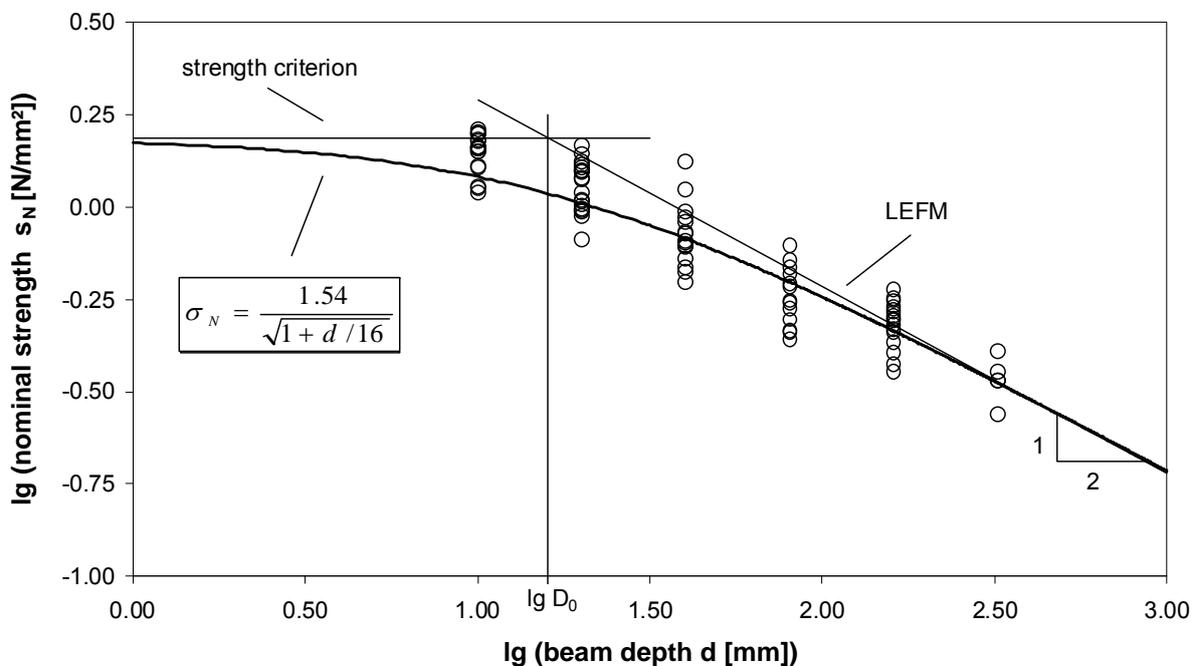


Figure 4. Empiric relationship between nominal bending strengths and beam depths, expressed by $\lg \sigma_N$ vs. $\lg d$, and approximation of the test results by Bazant's nonlinear size effect law.

$$g(\alpha) = k^2(\alpha). \quad (19)$$

Employing the above-specified values for A_0 to A_4 and c_n yields for normalized strain energy

$$g(\alpha) = (17.51 \alpha^{0.5} - 26.19 \alpha^{1.5} + 126.86 \alpha^{2.5} - 220.91 \alpha^{3.5} + 229.59 \alpha^{4.5})^2. \quad (20)$$

For determination of the elastically equivalent length of the fracture process zone, c_f , normalized strain energy release rate and its first derivative have to be evaluated for the actual initial notch to beam depth ratio $\alpha = \alpha_0 = 0.6$, giving

$$g(\alpha = 0.6) = 522.3 [-] \quad \text{and} \quad g'(\alpha = 0.6) = 3909 [-]$$

Quantity c_f can now be calculated from Eq (12b) employing the above stated values for D_0 , $g(0.6)$ and $g'(0.6)$ as

$$c_f = 2.14 \text{ mm.}$$

The derived magnitude of the elastically equivalent process zone length is roughly 30% to 50% of the length of European spruce tracheid cells, which have a range of about 4 to 6 mm. The obtained fracture process zone size conforms well to SEM results by Vasic et al. (2002) for Eastern Canadian spruce. A further confirmation of the given result for the process zone length stems from the direct proportionality of c_f and G_f (see Eqs (12a) and (21a)) as G_f based on the size effect approach is also validated by an independent, fully experimental method (see below).

Fracture energy G_f

Fracture energy G_f can be directly determined from Eq (12a) hereby revealing the direct relation with fracture process zone length

$$G_f = c_f \frac{g'(\alpha_0)}{E_{\text{eff}}} \left(\frac{B}{c_n} \right)^2 \quad (21a)$$

Equation (21a) can be rewritten in a more comprehensive manner by substituting c_f and B via expressions (12b) and (14c), giving

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{A} \cdot \frac{1}{E_{\text{eff}} c_n^2} \quad (21b)$$

Equation (21b) reveals that fracture energy is fully determined by normalized strain energy for initial notch to depth ratio α_0 and by the slope A of the linearized size effect relationship (13); effective modulus of elasticity E_{eff} and the system factor c_n are constants.

Instead of the above formal derivation of fracture energy, the limit character of G_f becomes more evident making use of the basic definition (1a), which by means of Eq (3) and the failure criterion $G(\alpha, P_u) = R(c, d)$ can be expressed as

$$G_f = \lim_{d \rightarrow \infty} R(c, d) = \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{g(\alpha) P_u^2}{d b^2 E_{\text{eff}}} \quad (22a)$$

Replacing $P_u = \sigma_N b d / c_n$ by the size effect law expressions (11) and (12a, b) then gives rise to

$$G_f = \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{B^2 d g(\alpha)}{E_{\text{eff}} c_n^2 (1 + d/D_0)} \quad (22b)$$

Considering the limit case of very large structures or specimens, ie $d \rightarrow \infty$, leads to $c = c_f \ll d$, therefore $\alpha = \alpha_0 + c_f / d \approx \alpha_0$ and $\lim_{d \rightarrow \infty} g(\alpha) = g(\alpha_0)$.

Equation (22b) can then be written as

$$G_f = \frac{B^2 g(\alpha_0)}{E_{\text{eff}} c_n^2} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{d}{1 + d/D_0} \quad (22c)$$

which is as a consequence identical to Eq (21b) considering $\lim_{d \rightarrow \infty} \frac{d}{1 + d/D_0} = D_0$ and Eq (14c).

In order to determine G_f from Eqs (21a) or (21b), the effective modulus of elasticity E_{eff} according to Eqs (8a, b) has to be known. With regard thereto it has to be mentioned that the four independent elasticity coefficients $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{yx}$ ($x, y =$ parallel and perpendicular to fiber direction) defining E_{eff} have not been measured in the herein described experimental size effect investigation on clear spruce wood. Irrespective thereof, realistic ranges of the relevant stiffness parameters can be assessed, by employing the elasticity ratios $E_x / E_y = 30$, $E_x / G_{xy} = 16$ as stated *inter alia* implicitly in the European standard EN 338 on strength classes for softwoods. The Poisson ratio ν_{yx} , as defined by Eq (8b) can be assumed to be 0.45 (Aicher et al. 1995). Based on the above given elasticity and Poisson ratios, Eq (8a) results in $E_{\text{eff}} = E_x/14$ for the effective modulus of elasticity, depending exclusively on Young's modulus E_x parallel to fiber direction.

The elasticity value E_x parallel to fiber of the investigated specimens, according to the given values for density and annual ring width, can be assumed to be in the range of about 12000 – 14000 N/mm² and hence $E_{\text{eff}} = 850 – 1000$ N/mm². By inserting this range

for E_{eff} in Eq (21b) together with quantities $A = 265 \cdot 10^{-4}$ [mm³/N²], $g(0,6) = 522$ [-] and $c_n = 9$, one obtains for fracture energy a range of

$$G_f \approx 240 - 290 \text{ N/m.}$$

The derived semi-empiric result for the asymptotic unambiguous limit value of fracture energy G_f , based on the size effect law assumptions, is highly consistent with fracture energies determined for the same specimens in an alternative approach based on total external work (Aicher 1994). There, the empiric fracture energy median (3-parameter Weibull fit) was 276 N/m. This result agrees well with results for spruce given by Larsen and Gustafsson (1990) where $G_f = 285$ N/m for $\rho = 460$ kg/m³. Reiterer et al. (2000) state a G_f -value of 260 N/m without density specification. Moreover, the insertion of the total work G_f median into Eq (21b) produces an effective modulus of elasticity of $E_{\text{eff}} = 900$ N/mm² which substantiates the above stiffness assumptions.

Summary and Conclusions

Bazant's nonlinear size effect law enables the derivation of the directly related quantities fracture process zone length and fracture energy. In case of wood, however, the model, so far, was primarily used for a theory-based approximation of strength data from size effect studies. In this paper a previously known size effect study on Mode I fracture of European spruce subjected to tension perpendicular to fiber and crack propagation parallel to fiber was re-evaluated with regard to fracture energy and fracture process zone length.

Based on the derived size effect law parameters, the resulting length of the fracture process zone was 2.1 mm. This value is highly consistent with previously reported results that were obtained from in-situ fracture observations on Eastern Canadian spruce by means of Scanning Electron Microscopy. The limit value of fracture energy derived from the size effect law was in the range of 240 to 290 N/m. This model-based result comprises the median of the directly measured fracture energies based on external work, being 276 N/m. Due to the direct correlation of fracture energy and fracture process zone length in the frame of Bazant's size effect model, the independent proof of the fracture energies also supports the derived size of the process zone length.

In conclusion, it can be stated that the nonlinear effects, increasing the energetic fracture resistance of spruce wood subjected to tension perpendicular to fiber direction and crack propagation parallel to fiber, are confined to a very small region of about a half of the fiber length ahead of the nominal crack tip. This result is very different from that of most cementitious materials.

It has to be mentioned, that the findings are related to the wood species spruce with a moisture content of about 12% and a temperature of about 20 °C. Regarding the influence of moisture content, the literature gives evidence of a pronounced decrease of fracture energy with reduction of moisture content within in the range of 8% to 18% (Smith and Chui 1994). Contrary to this Petterson and Bodig (1983) have revealed a steady increase

of fracture toughness with decreasing moisture content. It is therefore reasonable to suppose that the different moisture sensitivities of both fracture mechanics parameters are related to the moisture dependent micromechanical damage mechanisms in the fracture process zone. This could have an impact on its size as well. Since temperature shows a pronounced effect on fracture energy and toughness (Reiterer 2001) the fracture process zone dimensions could be influential. With regard to generalization of the presented results, it seems worthwhile to reveal the discussed potential influences of moisture and temperature as well as the effect of wood species and fracture plane configurations.

In a general sense, this investigation emphasizes the fact, that in the specifically regarded RL cracking configuration—which is highly relevant for timber structures—spruce wood, despite some evident material softening, displays highly brittle behavior.

References

Aicher S (1992) Fracture and size effect law for spruce and oak in mode I and mixed mode I and II. Proc. RILEM TC 133 Meeting, LRBB, Bordeaux.

Aicher S (1994) Fracture energy, critical strain energy release rate and fracture toughness of spruce in tension perpendicular to grain. Holz Roh-Werkst 52(6):361–370. In German.

Aicher S, Reinhardt HW, Klöck W (1993) Non linear fracture mechanics size effect law for spruce in tension perpendicular to grain. Holz Roh-Werkst 51(6):385–394. In German.

Aicher S, Schmidt J, Brunold S (1995) Design of timber beams with holes by means of fracture mechanics. Paper 28-19-4 in Proc. CIB W18 Meeting 28, Copenhagen, Denmark.

Bazant ZP (1984) Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. J Eng Mech 110:518–525.

Bazant ZP (1987) Fracture energy of heterogeneous materials and similitude. Proc. SEM-RILEM Int Conf on fracture of concrete and rock, pp. 390 – 402, Houston, Texas.

Bazant ZP, Cedolin L (1991) Stability of structures: elastic, fracture and damage theories. Oxford University Press, New York.

Bazant, ZP, Kazemi MT (1990) Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete. Int J Fract 44:111–131.

Bazant ZP, Pfeiffer PA (1987) Determination of fracture energy from size effect and brittleness number. ACI Materials Journal Nov. – Dec.:463–480.

Boström L. (1992) Method for determination of the softening behaviours of wood and the applicability of a nonlinear fracture mechanics model. Thesis, Report TVBM-1012, Lund University, Sweden.

Brown WF, Srawley JE (1966) Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials. ASTM STP, No. 410, ASTM, Philadelphia, Pa.

Dill-Langer G (2004) Schädigung von Brettschichtholz bei Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung. PhD Thesis, Materials Testing Institute, University Stuttgart, Germany. In German only.

Dill-Langer G, Lütze S, Aicher S (2000) Microfracture in wood monitored by confocal laser scanning microscopy. *Wood Sci Technol* 36(2000): 487–499.

Dugdale DS (1960) Yielding of steel sheets containing slits. *J Mech Phys Solids* 8:100–108.

Hillerborg A, Modéer M, Petersson PE (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Res.* 6(6):773–782.

Landis EN, Vasic S, David WG, Parrod P (2002) Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood. *Exp Mech* 42(4):389–394.

Larsen HJ, Gustafsson PJ (1989) Design of endnotched beams. Paper 22-10 1, *in Proc. CIB W18 Meeting 22*, Vol. II, Berlin, Germany.

Larsen HJ, Gustafsson PJ (1990) The fracture energy of wood in tension perpendicular to the grain - results from a joint testing project. Paper 23-10-12 *in Proc. CIB W18 Meeting 23* Lisbon, Portugal.

Morel S, Mouro G, Schmittbuhl J (2003) Influence of the specimen geometry on R-curve behaviour and roughening of fracture surfaces. *Int J Fracture* 121(1-2):23–42.

Morel S, Valentin G (1996) Size effect in crack shear strength of wood. *J. de Physique IV, Colloque C6, supplement an J. de Physique III*, 6: C6 – 385 – C6-393

N N (1990) Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. RILEM draft recommendations. *Materials and Structures* 23:461–465.

Petterson RW, Bodig J (1983) Prediction of fracture toughness of conifers. *Wood Fiber Sci* 15(4):302–316.

Reinhardt HW (1984) Fracture mechanics of an elastic softening material like concrete. *Heron* 29(2): 1–42.

Reiterer A, Stanzi-Tschegg SE, Tschegg EK (2000) Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood. *Wood Sci Technol* 34(5):417–430.

Reiterer A (2001) The influence of temperature on the mode I fracture behaviour of wood. *J. Mat. Science Letters* 20:1905–1907.

Sih GC, Paris PC, Irwin GR (1965) On cracks in rectilinearly anisotropic bodies. *Int. J. Fracture Mech* 1:189–203.

Smith I, Chui YH (1994) Factors affecting mode I fracture energy of plantation-grown red pine. *Wood Sci Technol* 28(2):147–157.

Smith I, Landis E, Gong M (2003) Fracture and fatigue in wood. J. Wiley & Sons Ltd, Chichester.

Stanzl-Tschegg SE, Tan DM, Tschegg EK (1995) New splitting method for wood fracture characterisation. Wood Sci Technol 29(1):31–50.

Vasic S, Smith I (2002) Bridging crack model for fracture of spruce. Eng Fract Mech 69: 745–760.

Vasic S, Smith I, Landis E (2002) Fracture zone characterization – micro-mechanical study. Wood Fiber Sci 34 (1):42–56.

Hinweis:

Der wiedergegebene Aufsatz wurde in der Zeitschrift "Wood and Fiber Science" Vol. 42 H.2, 2010, original veröffentlicht. Die MPA Universität Stuttgart dankt der Society of Wood Science and Technology, Monona, WI für die Zustimmung zur Wiedergabe des Manuskripts im MPA Jahresbericht 2009.

6 Kooperationen

Kooperationsvertrag zwischen der VGB PowerTech und der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA)

Der VGB PowerTech (Fachverband der Strom- und Wärmeerzeugung) und die MPA Universität Stuttgart haben mit Wirkung vom 01.05.09 einen Kooperationsvertrag abgeschlossen, der den Erkenntnis- und Wissenstransfer aus der anwendungsorientierten Wissenschaft in die technische Praxis strukturiert und intensiviert. Damit soll die Grundlage sowohl für eine praxisgerechte Ausbildung mit wissenschaftlichem Niveau als auch für den Transfer neuester Erkenntnisse der Forschung in die tägliche praktische Arbeit in den Anlagen geschaffen werden. Dieser Erkenntnis- und Wissenstransfer stellt zugleich ein wichtiges Element zur Optimierung der Sicherheitsstrategie und Verfügbarkeit dar.

Die Kooperationsvereinbarung umfasst im Schwerpunkt den Transfer von Wissen und Forschungsergebnissen in die Praxis, die Definition und Bearbeitung gemeinsamer Forschungsprojekte sowie die Ausbildung von technischem Nachwuchs an der Universität und die Weiterbildung von Fachpersonal.

Die benannten Arbeitsfelder befassen sich mit der Erstellung von Konzepten und Methoden zur sicherheitstechnischen Bewertung und zum Lebensdauermanagement von Anlagen, der Zulassung und Qualifizierung von Werkstoffen und Schweißverfahren sowie von Dichtverbindungen für fossile und nukleare Kraftwerke, aber auch regenerative Kraftwerkstypen wie Wasser- und Windkraftwerke.

Kooperationsvertrag mit dem NIMS (National Institute for Materials Science), Japan

Die langjährige gute Zusammenarbeit zwischen der MPA und einem der Vorgängerinstitute, dem „National Research Institute of Metals (NRIM) wurde 1999 durch ein „Memorandum of Understanding“ auf das NIMS übertragen, formalisiert und strukturiert. Dieses wurde am 8. Oktober 2009 im Vorfeld der 125-Jahr-Feier der MPA erneuert und verlängert.

Das NIMS ist weltweit anerkannt und eines der führenden Institute im Bereich der Materialwissenschaft. Insbesondere auf dem Gebiet der Werkstoffe für sehr hohe Temperaturen und entsprechenden Umgebungsbedingungen, wie sie in den modernen fossil befeuerten Hochleistungskraftwerken zur Schonung der Ressourcen und Umwelt gefordert sind, besteht seit vielen Jahren eine enge Partnerschaft. Diese dokumentiert sich in einem regen Austausch von Wissenschaftlern und einem jährlich stattfindendem Seminar. Es dient der Diskussion von Forschungsergebnissen und Weiterentwicklungen der Werkstoffe und findet abwechselnd in Japan und Deutschland statt. Zuletzt wurde im Februar 2010 in Tsukuba, Japan ein Seminar abgehalten.



Dr. Kazuhiro Kimura (NIMS), Prof. Kotobu Nagai (NIMS), Prof. Eberhard Roos und Prof. Karl Maile (v.l.n.r.)



Veranstaltungen, Auszeichnungen, Ehrungen, Preise

Veranstaltungen

125-jähriges Jubiläum der MPA

Am 8. Oktober 2009 feierte die MPA ihr 125-jähriges Bestehen mit einer Festveranstaltung in der Staatsgalerie Stuttgart. Am darauf folgenden Tag fand das jährliche MPA-Seminar mit dem Schwerpunkt Energie- und Anlagentechnik statt.

An der Festveranstaltung nahmen über 200 geladene Gäste aus Industrie, Politik und Wissenschaft teil. Die Moderation des Festaktes wurde von Jo Frühwirt (Moderator beim SWR) übernommen. Zahlreiche Vertreter von der Universität Stuttgart, Industrie und Fachverbänden, die der MPA durch jahrelange enge Zusammenarbeit verbunden sind, überbrachten nach der Begrüßung durch den geschäftsführenden Direktor der MPA, Prof. Dr.-Ing. habil Eberhard Roos, ihre Grußworte und Wünsche für eine weiterhin erfolgreiche Zukunft.



Jo Frühwirt (SWR) (l.) und Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos



Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin (r.) (Universität Stuttgart) im Gespräch mit Jo Frühwirt



Dr.-Ing. Johannes Lambertz (Vorstandsvorsitzender RWE Power AG, Essen)

Die sich anschließenden Vorträge wurden von Experten aus Deutschland, Indien, Österreich und den USA gehalten, mit deren Organisationen und Firmen die MPA seit vielen Jahren eng verbunden ist. Prof. Dr. rer. pol. Peter Gross (Autor und Publizist, ehem. Ordinarius für Soziologie an der Universität St. Gallen / Schweiz) sprach in seinem Festvortrag über Prüfen und Vertrauen und den damit verbundenen Herausforderungen.



Prof. Dr. rer. pol. Peter Gross (l.) hielt den Festvortrag

Den Abschluss der Veranstaltung bildete die Verleihung der Carl-von-Bach-Medaille an den Materialwissenschaftler Prof. Teruo Kishi, der bis 2009 Präsident des NIMS (National Institute for Materials Science) in Japan war.



Verleihung der Carl-von-Bach-Medaille von Prof. Roos (r.) an Prof. Teruo Kishi, Japan

Das MPA-Seminar fand am folgenden Tag wie gewohnt auf dem Campus in Vaihingen statt. Zum Rahmenthema „Werkstoff- und Bauteilverhalten in der Energie- und Anlagentechnik“ fanden Vorträge von Experten aus 11 Ländern statt.

Auszeichnungen

Aufgrund des persönlichen tatkräftigen Engagements für die IAKS (International Association for Sports and Leisure Facilities) hat der Vorstand **Herrn Hans-Peter Knauf** im November die Ehrenmitgliedschaft in der IAKS verliehen.

5 Gastwissenschaftler, Gastvorträge

Gastwissenschaftler

Name	Land	Zeitraum
Ahmed, M.A., Dr.	Ägypten	14.03.-01.05.09
Alkhaldi, H., Dr.	Jordanien	17.06.-30.08.09
Balokhonov, R., Prof. Dr.	Russland	17.09.-15.12.09
Bontcheva, N., Prof. Dr., Frau	Bulgarien	14.05.-20.05.09
Deryugin, Y.Y., Dr.	Russland	01.08.-31.08.09
El-Arby, I.	Ägypten	06.08.-04.09.09
El-Mahallawy, N. , Prof. Fr	Ägypten	22.10.-25.10.09
Günther, Bruno	Chile	02.03.-30.03.09
Gupta, Suneel Kumar	Indien	22.04.-17.06.09
Kakhodapour, J.	Iran	01.10.09-01.10.10
Kulkova, S., Prof. Dr., Frau	Russland	01.04.-30.05.09 01.11.-01.12.09
Kumar, P.	Indien	01.05.-31.07.09
Kushwaha, H.S., Dr.	Indien	02.10.-11.10.09
Maksoud, I.	Ägypten	01.11.08-30.04.09
Monjo, Francois	Frankreich	04.05.-24.07.09
Naga, S., Prof. Frau	Ägypten	20.10.-30.10.09
Petrova, V., Prof.Dr., Frau	Russland	01.07.-31.07.09 02.09.-31.10.09
Postek, E.W., Dr.	Großbritannien	17.05.-27.06.09
Raj, Baldev, Dr.	Indien	01.02.-04.02.09
Romanova, V., Prof. Dr., Frau	Russland	17.09.-15.12.09
Sahni, I.,	Indien	15.05.-25.07.09
Sasikala, G., Dr., Frau	Indien	01.06.-28.08.09
Sayed, K.H. Dr.	Ägypten	20.10.-01.12.09
Tu, H. Y., Doktorand	China	01.10.07- Sept. 2011

Gastvorträge:

Dr. Baldev Raj, Indira Gandhi Centre for Atomic Research (IGCAR), Kalpakkam, Indien: Approaches to development of steels and manufacturing technologies for fusion reactors. 03.02.2009

Bruno Günther, Turbomécánica, Concepción, Chile: Wissenschaftliche Betrachtungen zur Entstehung der chemischen Elemente. 24.03.2009

Dr. Concetta Fazio, Forschungszentrum Karlsruhe, Programm Nuklear: Innovative Fast Neutron Transmutation Systems: Structural Materials Selection and Characterisation, 30.11.2009

Prof. Dr.- mont. Peter J. Uggowitzer, Metallphysik und Technologie, Departement Materialwissenschaft, ETH Zürich: Design Strategie für hochduktilen bioresorbierbare Magnesiumlegierungen. 09.12.2009

6 Promotionen

Mathias Bauer: „Lebensdaueroptimierung von Schweißverbindungen martensitischer Stähle für Hochtemperaturanwendungen“

7 Lehre

Die Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart ist in verschiedenen Studiengängen und Studienrichtungen, die von den Fakultäten Bauwesen und Maschinenbau getragen werden, sowohl im Vor- als auch im Hauptdiplom engagiert. Dabei ist ein wesentliches Anliegen der Lehrenden die Forschungsarbeiten der MPA für die Studierenden in ein attraktives grundlagen- als auch anwendungsorientiertes Lehrangebot zu integrieren.

Vorlesungsangebot des IMWF (Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik)



1 Maschinenbau
2 Fahrzeug- und Motorentechnik

3 Verfahrenstechnik
4 Technologiemanagement

5 Technikpädagogik
6 Erneuerbare Energien

7 Technische BWL
8 Commas

Vorlesungsangebot des IWB (Fakultät Umwelt- und Bauingenieurwissenschaften)

Grundstudium

	Pflichtveranstaltungen •Werkstoffe im Bauwesen I •Einführung in die Informatik	Wahlveranstaltung •Moderne Befestigungstechnik im Ingenieurbau	
Hariri / Schwarte Schwarte			Eligehausen

Hauptstudium

Grundfach •Werkstoffe im Bauwesen II	Schwarte / Hariri
------------------------------------------------	-------------------

	Vertiefungsfächer •Befestigungstechnik I •Korrosionsschutz Betonbau •Korrosionsschutz Metallbau •Bauschäden und Instandhaltung (Erhaltung von Immobilien)	Ergänzungsfächer •Betontechnologie •Befestigungstechnik II •Maßstabeffekte von Beton- und Stahlbetonkonstruktionen •Numerische Modellierung von Werkstoffen •Baustoffauswahl nach ökologischen Gesichtspunkten •Qualitätssicherung, Inspektion und Überwachung im Bauwesen	
Eligehausen Nürnberger Nürnberger Hariri / Weirich			Hariri/ Hårdtl Assmann Eligehausen Ozbolt Ozbolt Lünser Große

8 Veröffentlichungen

Aicher, S. and L. Höfflin: Glulam Beams with Holes Reinforced by Steel Bars. Proceedings of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 – Timber Structures, August 23-27, Dübendorf, Schweiz, Paper CIB-W18/42-12-1.

Bachmaier, S.: A Wireless Monitoring System for SHM of Historic Structures. 1st WTA International PhD Symposium, October 8-9 (2009), Leuven, Belgium, Paper 07.

Bachmaier, S., M. Krüger and C. Grosse: A Survey on Power Management for Long-Term Measurements using Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4), July 22-24 (2009), Zurich, Switzerland.

Bauer, M.: Lebensdaueroptimierung von Schweißverbindungen martensitischer Stähle für Hochtemperaturanwendungen. Techn.-wiss. Bericht MPA Stuttgart (2009), H. 09-01.

Bauer, M., A. Zöllner, A. Klenk and K. Maile: Experimental and Numerical Investigations on the Behaviour and Assessment of Martensitic Welds. Proceedings of the 2nd ECCC Creep Conference, April 21-23 (2009), Zurich, Switzerland. In: Creep & Fracture in High Temperature Components – Design & Life Assessment Issues. DEStech Publications, ISBN 978-1-60595-005-1, pp.1017-1028.

Blumer, R.-D., J. Kinder und M. Numberger: Die 162 Jahre alte Eisenbahnbrücke über die Schussen bei Ravensburg. Industriekultur 3 (2009)

Cazauran, X., Y. Birembaut, R. Hahn, H. Kockelmann and S. Moritz: Gas Leakage Correlation. Proceedings of the ASME Pressure Vessel & Piping Conference, July 26-30 (2009), Prague, Czech Republic, PVP2009-77882.

Chattopadhyay, J., H.S. Kushwaha and E. Roos: Improved Integrity Assessment Equations of Pipe Bends. Int. J. of Press. Ves. and Piping 86 (2009), pp. 454-473.

Diburg, B., A. Jüngert und C. Grosse: Praxiseinsatz innovativer Inspektionstechniken und Prüfverfahren in einer linersanierten, begehbaren Prüfstrecke. Teil 2: Einsatz der lokalen Resonanzspektroskopie und des Impakt-Echo-Verfahrens. 3R International 48 (2009), Heft 12, S. 2-8.

Dill-Langer, G. und S. Aicher: Qualitätsprüfung von Klebefugen in Brettschichtholz mittels Ultraschall. In: 9. Kolloquium „Gemeinsame Forschung in der Klebetechnik“ am 10. und 11. Februar 2009 in Frankfurt am Main, S. 50-52.

Dugan, S. and S. Zickler: Comparison of Different Test Reflectors for Ultrasonic Testing. 35. MPA-Seminar „Werkstoff- & Bauteilverhalten in der Energie- & Anlagentechnik“ am 9. Oktober 2009 in Stuttgart.

Dzúgan, J., H. MacGillivray, U. Mayer, V. Mentl and C. Watson: ESIS TC5 European Robin on Dynamic Compression Testing. Proceedings of the 17th European Conference on Fracture, September 2-5 (2008), Brno, Czech Republic, pp. 2591-2598.

Frick, J., F. Lehmann und F. Grüner: Zerstörungsfreie Untersuchungen mittels Impact Echo und Georadar am Turmhelm der Marienkirche in Reutlingen. Tagungsband Natursteinsanierung Stuttgart 2009 „Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen“, 20. März 2009 in Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-7989-6, S. 35-43.

Gerber, S.: Berücksichtigung der Messunsicherheit bei Bruchmechanikversuchen. DVM-Fortbildungsseminar Bruchvorgänge „Bruchmechanische Prüfmethode“, 11. März 2009 in Stuttgart, S. 97-114.

Gersinska, R., L. Weil, K.-H. Herter and X. Schuler: Results of Low Cycle Fatigue Experiments in German Boiling Water Reactor Environment. Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, August 24-27 (2009), Virginia Beach, USA.

Grassegger, G.: Reinigen als Wissenschaft – MPA Stuttgart berät bei der Restaurierung. Der Bausachverständige, Jahrgang 5 (2009), H. 2, S. 35.

Grassegger, G., G. Patitz und O. Wölbart: Tagungsband Natursteinsanierung Stuttgart 2009 „Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen“, 20. März 2009 in Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 134. S.

Grassegger, G., Ozbolt, J. und Reinhardt, H.-W.: Wie belastbar und heterogen ist Sandstein? Ergebnisse von experimentellen Daten und FE-Simulationen an baden-württembergischem Schilfsandstein. In: Tagungsband ARKUS 2009 Die Naturwerksteinvorkommen Baden - Württembergs und ihr Einsatz für Denkmalpflege, Technik und Architektur, 21. September 2009 in Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, S. 59-80.

Grassegger, G. und O. Wölbart: Salze und Salzsäuren an Bauwerken. In: Salzsäuren an Kulturgütern - Stand des Wissens und Forschungsdefizite. DBU Publikation Salzsäuren (2009), S. 6-21. Hrsg.: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

Grassegger, G. und O. Wölbart: Steindenkmäler im Einfluss anthropogener Umweltverschmutzungen - Entwicklung von Methoden zur Langzeitkontrolle von Verwitterung und Konservierung. Tagungsband Natursteinsanierung Stuttgart 2009 „Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen“, 20. März 2009 in Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, S. 89-98.

Grassegger, G., W. Werner und O. Wölbart (Hrsg.): Tagungsband ARKUS 2009 Die Naturwerksteinvorkommen Baden - Württembergs und ihr Einsatz für Denkmalpflege, Technik und Architektur, 21. September 2009 in Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-8164-6, 114 S.

v. Greve-Dierfeld, S., C. Gehlen and K. Menzel: DFG-Research Group 537: Modelling for Reinforcement Corrosion – Validation of Corrosion Model. Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR-2, November 24-26

(2008), Cape Town, South Africa. In: Concrete, Repair, Rehabilitation and Retrofitting (2009), Verlag: Taylor & Francis Ltd, CD, ISBN 978-0-415-46850-3, pp.407-413.

Grosse, C.: Kulturdenkmale für die Nachwelt erhalten – Historische Gebäude drahtlos überwachen. Der Bausachverständige 5 (2009), H. 4, S. 40.

Grosse, C.: Acoustic Emission Localization Methods for Large Structures Based on Beamforming and Array Techniques. Proceedings of the 7th International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, June 30 – July 3 (2009) Nantes, France.

Grosse, C.: Grundlagen von Arrayverfahren zur Überwachung von Bauwerken mit Hilfe der Schallemissionsanalyse. 17. Kolloquium Schallemission, 24. -25. September 2009 in Bad Schandau. In: DGZfP-Berichtsband BB 118 – CD, ISBN 978-3-940283-19-1, Vortrag 20.

Grosse, C., M. Krüger and S. Bachmaier: Wireless Sensing Techniques for an Efficient Monitoring of Structures and Plants. 35. MPA-Seminar „Werkstoff- & Bauteilverhalten in der Energie- & Anlagentechnik“ am 9. Oktober 2009 in Stuttgart.

Grosse, C., M. Krüger and S. Bachmaier: Wireless Monitoring of Structures Including of Acoustic Emission Techniques. Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR-2, November 24-26 (2008), Cape Town, South Africa. In: Concrete, Repair, Rehabilitation and Retrofitting (2009), Verlag: Taylor & Francis Ltd, CD, ISBN 978-0-415-46850-3, pp. 533-539.

Grosse, C. and H.W. Reinhardt: Overview of Sonic Testing Methods for Cement Based Materials during Setting and Hardening and Results of Rilem TCS ATC and SFC. Proceedings of Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modelling, June 3-5 (2009), Toulouse, France.

Grüner, F.: Das Ulmer Münster braucht Eisensandstein – und wir prüfen ihn auf Eignung. In: Tagungsband ARKUS 2009 Die Naturwerksteinvorkommen Baden - Württembergs und ihr Einsatz für Denkmalpflege, Technik und Architektur, 21. September 2009 in Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-8164-6, S. 45-58.

Hildenbrand, S., R. Wodarz, T. Gabrio and G. Volland: Biomonitoring of the di(2-ethylhexyl) Phthalate Metabolites mono(2-ethyl-5-hydrohexyl)Phthalate and mono(2-ethyl-5-oxohexyl) Phthalate in Children and Adults during the Course of Time and Seasons. Int. J. Hyg. Environ. Health 212 (2009) pp. 679-684.

Husemann, R.-U., K. Schmidt, A. Klenk, K. Maile und E. Roos: Marcko 700 – Untersuchung von Werkstoffen für das 700°C-Kraftwerk. 32. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe „Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe“, 27. November 2009 in Düsseldorf, S. 5-22.

Huß, A. und K. Fischer: Eignung von Kalksteinsplitt aus Baden-Württemberg für XF₂-Beton nach ZTV-ING, Teil I. Miro 5 (2009), S. 12-15.

Huß, A. und K. Fischer: Eignung von Kalksteinsplitt aus Baden-Württemberg für XF₂-Beton nach ZTV-ING, Teil II. Miro 6 (2009), S. 16-19.

Huß, A. und H.-W. Reinhardt: SVB vom Mehlkorntyp mit gebrochener Gesteinskörnung. Entwurfskonzept und Fließeigenschaften von SVB – Teil 2. Betonwerk + Fertigteiltechnik 75 (2009), H. 9, S. 22-34.

Huß, A. und H.-W. Reinhardt: SVB vom Mehlkorntyp mit gebrochener Gesteinskörnung. Entwurfskonzept und Fließeigenschaften von SVB – Teil 1. Betonwerk + Fertigteil-Technik 75 (2008), H. 8, S. 4-12.

Huß, A. und H.-W. Reinhardt: Mischungsentwurf von Selbstverdichtendem Beton (SVB) mit gebrochener Gesteinskörnung. 17. Internationale Baustofftagung IBAUSIL, 23.-26. September 2009 in Weimar. Tagungsbericht Band 2, ISBN 978-3-00-027265-3.

Juengert, A. and C. Grosse: Inspection Techniques for Wind Turbine Blades using Ultrasound and Sound Waves. Proceedings of the 7th International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, June 30 – July 3 (2009) Nantes, France.

Juengert, A. und C. Grosse: Zerstörungsfreie robotergestützte Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Ultraschall und Thermographie. ZfP-Zeitung 115 (2009), H. 6, S. 3-49.

Kinder, J., M. Baumgärtner, R.-D. Blumer, P. Reiner, W. Huber und P. Biehlolawek: Patina als Korrosionsschutz auf alten Kupferblechen. Metall 63 (2009), Heft 11, S. 573-578.

Kinder, J. und D. Hüter: TEM-Untersuchungen an höherfesten und elektrisch hochleitfähigen CuNi₂Si-Legierungen. Metall 63 (2009), H. 6, S. 298-303.

Kockelmann, H., J. Bartonicek, E. Roos, R. Hahn and W. Ottens: Long Term of Stuffing Box Packings under the Influence of Fluids at High Temperature. Proceedings of the ASME Pressure Vessel & Piping Conference, July 26-30 (2009), Prague, Czech Republic, PVP2009-77059.

Krause, H.-J., E. Rath, G. Sawade und F. Dumat: Bestimmung der Feuchte und des Chloridgehaltes von Beton mit der „Radar-Magnet-Betontest“-Methode. Messtechnik im Bauwesen, Special 1/2009, S. 77-82.

Krüger, M. und C. Grosse: Ereignisbasierte Messwerterfassung in drahtlosen Sensornetzwerken für die Strukturüberwachung. tm – Technisches Messen 76 (2009), Heft 12, S. 568-577.

Krüger, M., C. Grosse and S. Bachmaier: Development of a Wireless Network to Monitoring Historic Structures. Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring – 2009, September 9-11 (2009), Stanford, USA. In: Des Tech publ. Stanford, ISBN: 978-1-60595-007-5, pp. 2083-2090.

Kurz, H., H. Kockelmann und G. König: Auslegung von Flanschverbindung mit der Dichtung im Kraftnebenschluss. Dichtungstechnik H. 2 (2009), S. 77-83.

Kurz, H., H. Kockelmann und G. König: Auslegung und Berechnung von Kraftnebenschlussverbindungen. 16. Dichtungskolloquium „Untersuchung und Anwendung von Dichtelementen“, 16.-17. September 2009 in Steinfurt. Vulkan-Verlag, ISBN 978-3-8027-2209-7, S. 61-74.

Lutz, W., J. Herrmann, M. Kockelmann, H.S. Hosseini, A. Jäckel and S. Schmauder: Damage Development in Short-Fiber Reinforced Injection Molded Composites. Computational Materials Science 45 (2009), pp. 698-708.

Maile, K.: Use of Advanced Alloy 617 Mod for Critical Components of the Future 700°C Coal Fired Power Plant. Proceedings of the 2009 Symposium on Advanced Power Plant Heat Resistant Steels and Alloys, October 21-24 (2009), Shanghai, China.

Maile, K., R. Scheck, A. Zickler, F. Sket und A. Borbely: Nachweis und Bewertung der Kriechschädigung in 9-11% Cr-Stählen unter langzeitiger mehrachsiger Beanspruchung. Vortragstexte der 43. Metallographie-Tagung, 16.-18. September 2009 in Aachen. In: Prakt. Met. Sonderband 41 (2009) „Fortschritte in der Metallographie“, S. 237-246.

Mayer, U., W. Böhme, M. Borsutzki, R. Häcker und K. Schneider: Hochgeschwindigkeitszugversuche an gefügten Stählen. Ergebnisse eines VDEh-Ringversuchs zum Stahl-Eisen-Prüfblatt. Materials Testing 51 (2009) H. 11-12, S. 755-760.

Mielich, O. und H.-W. Reinhardt: Alkali-Kieselsäure-Reaktion als Rissursache in einem Beton mit gebrochener Grauwacke bzw. gebrochenem Quarzporphyr als Gesteinskörnung. 1. Kolloquium „Erhaltung von Bauwerken“, 27.–28. Januar 2009. In: Tagungshandbuch 2009, TAE, ISBN 3-924813-76-0.

Mielich, O. und H.-W. Reinhardt: Alkali-Silicia Reaction Causing Cracks in Concrete with Crushed Greywacke and Quartz Porphyry. Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop “Concrete Durability and Service Life Planning – Concrete life’09”, September 7-9 (2009), Haifa, Israel. In: RILEM Proceedings PRO 66 (2009), ISBN 978-2-35158-074-5.

Mielich, O. und H.-W. Reinhardt: Einfluss einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion auf den statischen E-Modul von Beton. 17. Internationale Baustofftagung IBAUSIL, 23.-26. September 2009 in Weimar. Tagungsbericht Band 2, ISBN 978-3-00-027265-3.

Offermanns, S., U. Mayer und E. Roos: Einsatz berührungsloser optischer Messmethoden in der hochdynamischen Werkstoff- und Komponentenprüfung. Tagung Werkstoffprüfung „Fortschritte der Kennwertermittlung für Forschung und Praxis“, 3. – 4. Dezember 2009 in Bad Neuenahr.

Offermanns, S., E. Roos and W. Stadtmüller: Structural Response of thin-walled Austenitic Pipes to Radiolysis Gas Detonations. Proceedings of the 9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, September 7-11 (2009), Brussels, Belgium. In: Dymat 2009, Vol. 1, ISBN: 978-2-7598-0472-6, pp.785-791.

Ottens, W., R. Hahn, M. Ilievski und H. Kockelmann: Optimierung von Spindelabdichtungen in Armaturen durch Oberflächenbehandlung und -beschichtung. 16. Dichtungskolloquium „Un-

tersuchung und Anwendung von Dichteelementen“, 16.-17. September 2009 in Steinfurt. Vulkan-Verlag, ISBN 978-3-8027-2209-7, S. 121-128.

Robeyst, N., C. Grosse and N. de Belie: Monitoring Fresh Concrete by Ultrasonic Transmission Measurements: Exploratory Multi-Way Analysis of the Spectral Information. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 95 (2009), No 1, pp. 64-73.

Robeyst, N., C. Grosse and N. de Belie: Measuring the Change in Ultrasonic p-wave Energy Transmitted in Fresh Mortar with Additives to Monitor the Setting. *Cement and Concrete Research* 39 (2009), pp. 868-875.

Roos, E.: Wozu Bruchmechanische Kennwerte? Charakteristik, Übertragbarkeit, Sicherheitsphilosophie. DVM-Fortbildungsseminar Bruchvorgänge „Bruchmechanische Prüfmethoden“, 11. März 2009 in Stuttgart, S. 1-24.

Roos, E., U. Eisele, X. Schuler and H. Silcher: Design and Material Selection for Plants under Consideration of Fracture Mechanics Aspects. 35. MPA-Seminar „Werkstoff- & Bauteilverhalten in der Energie- & Anlagentechnik“ am 9. Oktober 2009 in Stuttgart.

Roos, E., K.-H. Herter, X. Schuler and T. Weißenberg: Proof of Fatigue Strength of Ferritic and Austenitic Nuclear Components. 35. MPA-Seminar „Werkstoff- & Bauteilverhalten in der Energie- & Anlagentechnik“ am 9. Oktober 2009 in Stuttgart.

Roos, E., D. Krätschmer, S. Mielke und C. Teetz: Weiterentwicklung eines schädigungsmechanischen Modells zur Berechnung einer maximal zulässigen Werkstoffausnutzung unter schwingender Beanspruchung angewandt auf eine Aluminiumgußlegierung. Abschlussbericht über das Vorhaben Nr. 909 „Werkstoffausnutzung“, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), Heft 881 (2009), 138 S.

Roos, E., X. Schuler and L. Stumpfrock: Numerical Evaluation of Ratchetting Effects on the Deformation and Failure Behaviour of Components. *Proceedings of the ASME Pressure Vessel & Piping Conference*, July 26-30 (2009), Prague, Czech Republic, PVP2009-77245.

Roos, E. und S. Silcher: Linear-elastische Bruchmechanik Versagensprozess, Kennwerte, Ermittlung. DVM-Fortbildungsseminar Bruchvorgänge „Bruchmechanische Prüfmethoden“, 11. März 2009 in Stuttgart, S. 25-48.

Roos, E., W. Stadtmüller and S. Offermanns: Pipe Behaviour under Radiolysis Gas Detonation. *Proceedings of the 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20)*, August 9-14 (2009), Espoo, Finland.

Samal, M.K., M. Seidenfuss and E. Roos: A new mesh-independent Rousselier's Damage Model: Finite Element Implementation and Experimental Verification. *International Journal of Mechanical Sciences* 51 (2009), pp. 619-630

Samal, M.K., M. Seidenfuss, E. Roos, B.K. Dutta and H.S Kushwaha: A mesh-independent Gurson-Tvergaard-Needleman Damage Model and its Application in Simulating Ductile Fracture Behaviour. *Proc. IMechE Vol. 223, Part C: J. Mechanical Engineering Science*, pp. 283-292.

Schickert, M., J. Neisecke, W. Brameshuber, C. Colla, C. Flohrer, A. Gardai, C. Grosse, M. Krause, O. Kroggel, M. Krüger and M. Willmes.: DGZfP Merkblatt B11 – A Guideline Describing Fundamentals and Applications of the Impact-Echo Method. Proceedings of the 7th International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, June 30 – July 3 (2009) Nantes, France.

Schmidt, K., K. Maile, A. Klenk and E. Roos: Advanced Numerical Description of Creep Behavior of Boiler Components. Proceedings of the 3rd Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys for High Efficiency USC Power Plants 2009, June 2 – 4 (2009), Tsukuba, Japan.

Schmidt, K., E. Roos, A. Klenk, M. Speicher and K. Maile: Advanced Numerical Description of the Behavior of 700°C Steam Power Plant Components. 35. MPA-Seminar „Werkstoff- & Bauteilverhalten in der Energie- & Anlagentechnik“ am 9. Oktober 2009 in Stuttgart.

Sens-Schönfelder, C., J. Ritter, U. Wegler and C. Grosse: Noise and Diffuse Wavefields – Extend Abstracts of the Neustadt Workshop -, July 5 – 8 (2009), Neustadt a. d. Weinstrasse. In: Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Sonderband II/2009, ISBN 978-3-00-027952-2, 133 S.

Speicher, M., A. Klenk, K. Maile, and E. Roos: Investigations on Advanced Materials for 700°C Steam Power Plant Components. Proceedings of the 3rd Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys for High Efficiency USC Power Plants 2009, June 2 – 4 (2009), Tsukuba, Japan.

Speicher, M., A. Klenk, E. Roos, and K. Maile: Creep Crack Assessment of Components at High Temperatures. Proceedings of the 12th International Conference on Fracture, July 12 – 17 (2009) Ottawa, Canada.

Stegmaier, M.: Einfluss einer Ettringit- und Thaumazitbildung auf das Tragverhalten von Mauerwerk aus Porenbetonsteinplatten. Kurzberichte aus der Bauforschung 50 (2009), Heft 1, S.

Steller, I., W. Bendick, T.-U. Kern, K. Maile, M. Monsees and A. Scholz: 60th Anniversary of the German Creep Committee. Proceedings of the 2nd ECCC Creep Conference, April 21-23 (2009), Zurich, Switzerland. In: Creep & Fracture in High Temperature Components – Design & Life Assessment Issues. DEStech Publications, ISBN 978-1-60595-005-1, pp. 642-655.

Volland, G., B. Schilling, T. Gabrio, B. Link und I. Zöllner: Dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (PCB) in der Innenraumluft. Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft 69 (2009), Heft 3, S. 83-89.

Wehrstedt, A., S. Gerber und C. Weißmüller: Der Kerbschlagbiegeversuch. Der Weg von nationalen Prüfvorschriften und Normen zur DIN-EN-ISO-Norm. Materials Testing 51 (2009) H. 3, S. 103-109.

Weirich, T., C. Grosse und C. Gehlen: Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Ermittlung des Risswachstums bei schwingender Beanspruchung von geripptem Bewehrungsstahl. 17. Kolloquium Schallemission, 24. -25. September 2009 in Bad Schandau. In: DGZfP-Berichtsband BB 118 – CD, ISBN 978-3-940283-19-1, Vortrag 3.

Weirich, T., C. Grosse und C. Gehlen: Detektion von Anriss und Rissausbreitung an Betonstählen. 50. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DafStb), 8 – 9. Oktober 2009 in München.

Wood, P.K.C., C.A. Schley, M. Williams, R. Beaumont, A. Rusinek, U. Mayer and A. Pearce: A Method to Calibrate a Specimen with Strain Gauges to Measure Force over the Full-force Range in High Rate Testing. Proceedings of the 9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, September 7-11 (2009), Brussels, Belgium. In: Dymat 2009, Vol. 1, ISBN: 978-2-7598-0472-6, pp. 265-273.

Wu, Y. and U. Nürnberger: Corrosion-Technical Properties of High-Strength Stainless Steels for the Application in Prestressed Concrete Structures. Materials and Corrosion 60 (2009), No. 10, pp. 771-779.

Zecha, H., T. Hermann, W. Hienstorfer and X. Schuler: Aspects of Brittle Failure Assessment for RPV. 35. MPA-Seminar „Werkstoff- & Bauteilverhalten in der Energie- & Anlagentechnik“ am 9. Oktober 2009 in Stuttgart.