

Jahresbericht 2010



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

Direktion:

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

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Maile, Stellv. Direktor, kaufmännischer Direktor

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Vertretungsweise wiss. Direktorin

Dr. rer. nat. Gerhard Volland, Vertretungsweise stellv. wiss. Direktor

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 Umsetzung des Arbeitsgebiets „Geotechnik“ der MPA an das Institut für Geotechnik (IGS)	7
3 Aktuelles aus den Abteilungen	8
4 Forschungsberichte	30
5 Dissertationen	66
6 Kooperationen	70
7 Veranstaltungen und Auszeichnungen	71
8 Gastwissenschaftler	73
9 Vorträge	74
10 Lehre	75
11 Veröffentlichungen	77

1 Vorwort

Der vorliegende Jahresbericht der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart gibt einen Überblick über die im Jahr 2010 durchgeführten Forschungsprojekte und Aktivitäten der Abteilungen.

Im vergangenen Jahr gab es erneut Änderungen im Direktorium. Frau Professor Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann wurde mit Wirkung vom 01.04.2010 zur vertretungsweisen wissenschaftlichen Direktorin und Herr Dr. Gerhard Volland zum vertretungsweisen stellvertretenden wissenschaftlichen Direktor berufen.

Durch Rektoratsbeschluss wurde die Direktion der MPA um einen kaufmännischen Direktor erweitert. Herr Professor Dr.-Ing Karl Maile, der seither schon die Verwaltung verantwortete, wurde vom Rektorat zum 10.08.2010 zusätzlich in diese Position berufen.

Im Bereich der internationalen Kooperation konnte die MPA ihre langjährige, sehr gute Zusammenarbeit mit den indischen Forschungszentren BARC (Bhaba Atomic Research Center, Mumbai) und dem Indira Gandhi Center for Atomic Research (IGCAR, Kalpakkam) durch die Unterzeichnung eines gemeinsamen Memorandum of Understanding formalisieren und für die Zukunft stabilisieren.

Ein weiteres Kooperationsabkommen, welches zum 1. Januar 2010 in Kraft trat, sichert die Erhaltung der kerntechnischen Kompetenzen an Forschungseinrichtungen und Hochschulen. Die MPA ist eines von drei Forschungseinrichtungen, die von den Kernkraftwerksbetreibern E.ON Kernkraft, RWE Power, EnBW Kernkraft und Vattenfall Europe Nuclear Energy gefördert werden. Das von der MPA abzudeckende Kompetenzfeld betrifft die Werkstofftechnik und Komponentensicherheit.

Der Transfer und Austausch neuester Forschungsergebnisse der MPA wurde auch im vergangenen Jahr über Kolloquien, Workshops und Fortbildungsveranstaltungen fortgesetzt. Insbesondere das vom 7. bis 8. Oktober durchgeführte 36. MPA-Seminar stellt in diesem Zusammenhang ein Kernelement dar, das mit ca. 200 Teilnehmern aus dem In- und Ausland wiederum sehr gut besucht war.

Die gute Kooperation mit der Industrie und öffentlichen Institutionen wurde auch im Jahre 2010 erfolgreich weitergeführt und ausgeweitet. In zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten, Gutachten und Stellungnahmen konnte die MPA 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. Das breite Spektrum von den Werkstoffen und Systemen im Bauwesen bis zu denen des Maschinenbaus, der Fahrzeugtechnik und der Investitionsgüterindustrie sowie die Unabhängigkeit und Neutralität als Zentralinstitut der Universität Stuttgart macht die MPA zu einem attraktiven Partner.

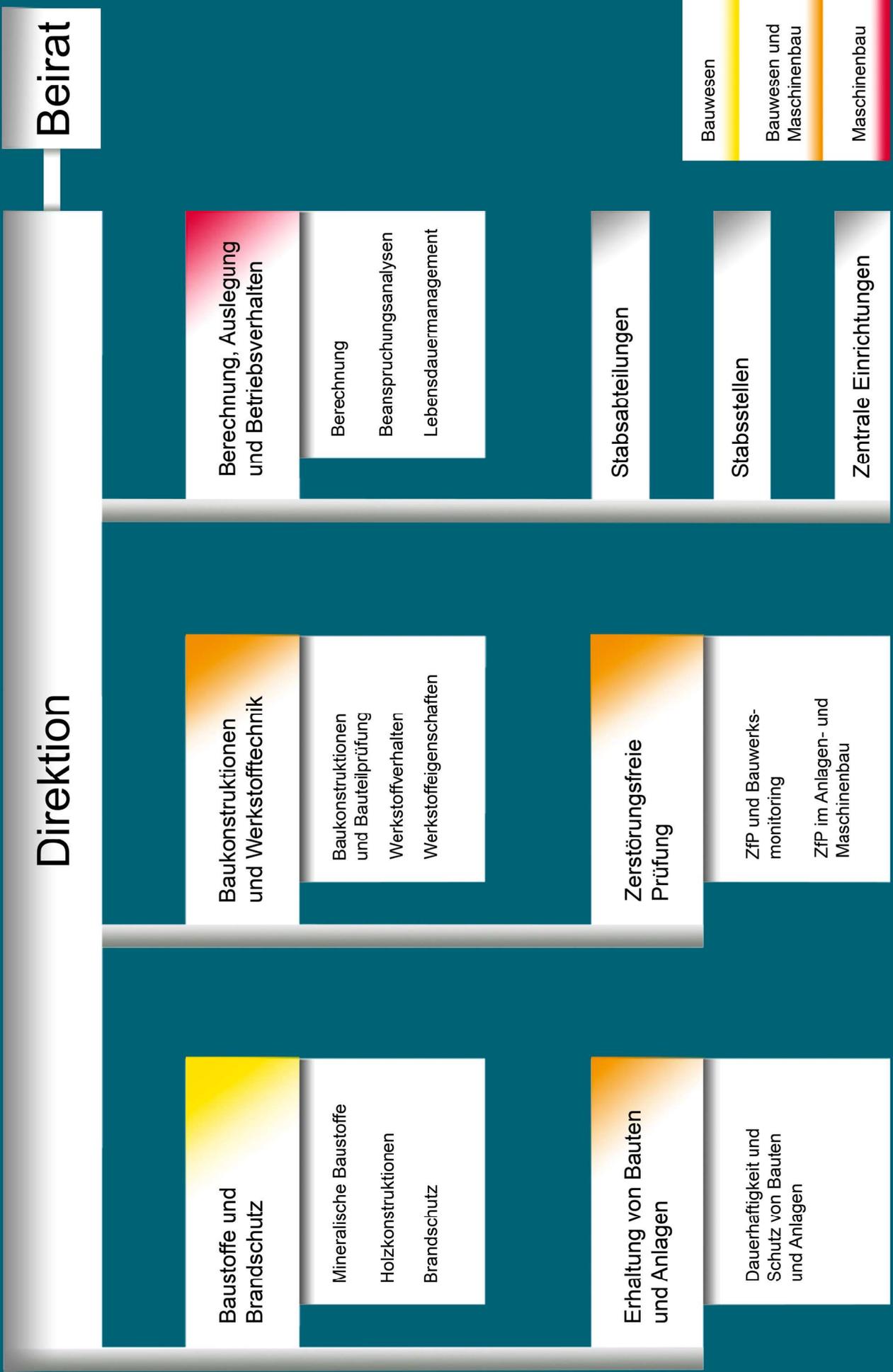
Wir möchten uns bei allen Partnern aus Industrie, Forschung und öffentlichen Institutionen für das uns entgegengebrachte Vertrauen und die gute Kooperation bedanken und freuen uns auf eine weiterhin gute Zusammenarbeit.



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



Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann
vertretungsweise wiss. Direktorin



2 Umsetzung des Arbeitsgebiets „Geotechnik“ der MPA an das Institut für Geotechnik (IGS)

Entsprechend eines Beschlusses des Rektorats der Universität Stuttgart wurde der Fachbereich „Geotechnik“ der MPA zum 01.01. 2011 in das Institut für Geotechnik (IGS) der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften eingegliedert. Hintergrund dieser Maßnahme ist die Bestrebung der Universität Stuttgart die Forschungsarbeiten in der Geomechanik am Institut für Geotechnik zu bündeln und zu stärken. Die Umsetzung der Referate „Geomechanik“ und „Spezialtiefbau“ der MPA, einschließlich Personal und Prüfeinrichtungen zum IGS ist ein wesentlicher Baustein dieser Bestrebungen.

Damit werden Teile der bisherigen Aufgaben des Fachbereichs „Geotechnik“ der MPA wie:

- Durchführung und Bewertung von Pfahlprobelastungen sowie Eignungs- und Abnahmeprüfungen an Verpressankern
- Ermittlung der Belastbarkeit des Baugrunds, Nachweis der Standsicherheit von Hängen und Baugruben
- Untersuchung und Begutachtung von Gründungselementen für die oberste Baubehörde, Erstellung von Baugrund- und Gründungsgutachten

zukünftig in Verantwortung des Instituts für Geotechnik durchgeführt. Die anerkannte Prüfstelle nach der Landesbauordnung für den Einbau von Verpressankern und die sachverständige Stelle für Eignungsprüfungen von Verpressankern werden zukünftig ebenfalls am IGS angesiedelt.

Im Geschäftsbereich der MPA verbleiben, einschließlich der Prüfeinrichtungen und des zugehörigen Personals, die Prüfgebiete

- Prüfung von Baustoffen auf Bitumenbasis (Bitumenbahnen) und Fugenmassen sowie Deponieabdichtungssysteme
- Untersuchungen an Spannbetonkonstruktionen und Verkehrsflächen mit magnetischer Streufeldmessung

Diese Arbeitsgebiete wurden dem Fachbereich „Erhaltung von Bauten und Anlagen“ zugeordnet. In allen Fragen dieser Prüf- und Arbeitsgebiete stehen für unsere Kunden auch weiterhin die jeweiligen Ansprechpartner

- Herr Dipl. Ing. Willand - Bitumen, Fugenmassen, Deponieabdichtungssysteme-
Tel 0711 – 685 -63351; E-Mail ernst.willand@mpa.uni-stuttgart.de
- Herr Dr. Sawade - magnetische Streufeldmessungen-
Tel 0711 – 685- 63364 ; E-Mail gottfried.sawade@mpa.uni-stuttgart.de

zur Verfügung.

3 Aktuelles aus den Abteilungen

Fachbereich Baustoffe und Brandschutz

Abteilung Mineralische Baustoffe: Dr.-Ing. Karim Hariri/ Dipl.-Ing. Christina Laskowski Tel.: 685/ -62258 bzw. -62252 E-Mail: Karim.Hariri@mpa.uni-stuttgart.de Christina.Laskowski@mpa.uni-stuttgart.de
Referat Bindemittel, Zusätze : Dipl.-Ing. Christina Laskowski , Dr. Hans Schellhorn
Referat Betontechnologie: Dr.-Ing. Christian Öttl, Dipl.-Ing. Andreas Huß
Referat Mauerwerk, Keramik, Naturstein: Dipl.-Ing. Frieder Knödler, Dr.-Ing. Michael Stegmaier
Referat Dämmstoffe: Dr. Thomas Popp, Dr.-Ing. Oliver Mielich

Neues Röntgenfluoreszenzgerät (XRF) in der Abteilung Mineralische Baustoffe

Die Abteilung Mineralische Baustoffe besitzt ein neues Röntgenfluoreszenzgerät von Bruker AXS für die chemische Materialanalyse. Die Röntgenfluoreszenz ist eine Standardmethode zur Analyse der chemischen Elemente in der Materialwissenschaft, an Baustoffen, in den Geowissenschaften und der anorganischen Chemie.

Das neue Gerät wird sowohl zur qualitativen Analyse von Elementen in den verschiedensten Stoffmatrices verwendet als auch zur semiquantitativen Elementuntersuchung und zur quantitativen Vollanalyse von Elementen. Es können nahezu alle Elemente des Periodensystems von Bor bis Uran untersucht werden. Der Vorteil der Röntgenfluoreszenzanalyse gegenüber anderen chemischen Untersuchungsverfahren liegt in der zumeist einfacheren Probenvorbereitung, da die zu untersuchenden Proben nicht durch aufwendige Säureaufschlussverfahren in eine vollständige Lösung überführt werden müssen. Es genügt die Herstellung von Schmelztabletten (mit Boraten als Flussmittel) oder in vielen Fällen die Herstellung einer gepressten Pulvertablette für die Analyse. Qualitative bzw. vergleichende Untersuchungen in Schadensfällen können auch an Probestücken oder lose geschüttetem Probematerial vorgenommen werden.

Anwendungsmöglichkeiten:

- quantitative Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von Baustoffrohstoffen und Baustoffen, z. B. Zemente und Zementklinker, Flugasche, Silikastaub, Naturstein, Ziegel usw.
- Untersuchung anorganischer Füllstoffe / Pigmente in Kunststoffen und Farben
- Untersuchung von Spurenelementen bis in den ppm – Bereich, siehe Bild 1
- Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von Korrosionsprodukten
- Vergleichende Schadensanalyse an vielfältigen Materialien (auch Glas, Metalle)

Das neue Gerät (Bruker S4 Pioneer) ist kompakt aufgebaut und verfügt über ein Probenmagazin, so dass 60 Proben im Routinebetrieb abgearbeitet werden können, siehe Bild 2.

Tabelle 1: Beispiel quantitativer Untersuchungsergebnisse mit XRF, Hauptelemente an Baustoffproben

Gew.-%	Flugasche	Silikastaub
SiO ₂	57,10	95,92
TiO ₂	1,45	0,01
Al ₂ O ₃	28,43	1,04
Fe ₂ O ₃	5,01	0,18
MnO	0,02	0,02
MgO	0,90	0,24
CaO	1,31	0,39
Na ₂ O	0,44	<0,01
K ₂ O	2,74	0,89
SO ₃	0,17	<0,01
P ₂ O ₅	0,05	0,06
SrO	0,08	---
LOI	2,90	0,92
Summe	100,60	99,67

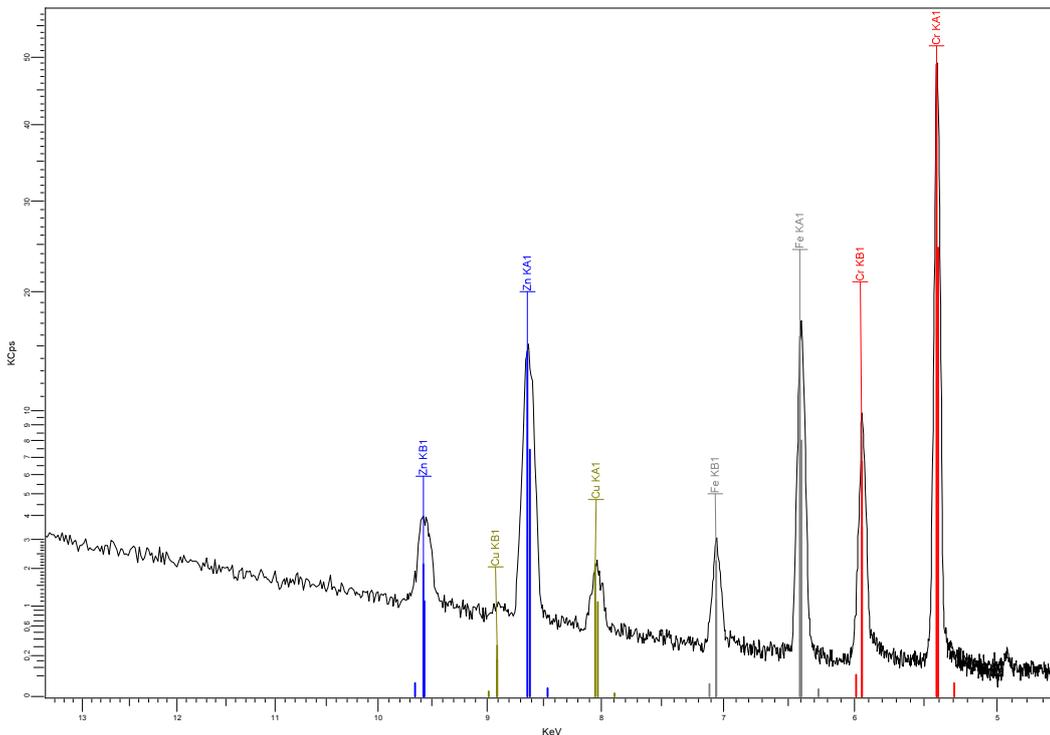


Bild 1: Beispiel: qualitativer Nachweis von Schwermetallen (Cr) in einem Lederarmband

Dargestellt ist ein Ausschnitt des aufgenommenen Fluoreszenzspektrum mit den Elementen Cr (rote Markierung), Fe (grau) Cu (dunkelgrau) und Zn (blau). Das Lederarmband wurde mit einer Chromgerbung behandelt.



Bild 2: Blick in das Probenmagazin der neuen, kompakten Bruker S4 Pioneer Röntgenfluoreszenz mit Rh – Röhre.

Ansprechpartner:

Dr. rer. nat. Friedrich Grüner

Telefon: +49 (0)711/685-66750

Telefax: +49 (0)711/685-66797

E-Mail: friedrich.gruener@mpa.uni-stuttgart.de

Ganzheitliches Leistungsspektrum im Rahmen der Bewertung einer betonschädigenden „Alkali-Kieselsäure-Reaktion“

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ist eine betonschädigende Reaktion. Für die Entstehung einer AKR ist die Anwesenheit von kieselsäurehaltiger Gesteinskörnung, Alkalien und Wasser Grundvoraussetzung. Dabei kommt es zu einer chemischen Reaktion zwischen unterschiedlichen Formen der Kieselsäure (amorph, kryptokristallin sowie gittergestörte SiO_2 -Mineralen) der Gesteinskörnung und den Alkalihydroxiden (NaOH, KOH) der Porenlösung des erhärteten Betons. Die Alkalien können dabei nicht nur in der Porenlösung vorliegen, sondern auch durch die Verwendung alkalihaltiger Taumittel von außen in das Betonbauteil eindringen.

Mit Hilfe einer Vielzahl von Prüfverfahren ist es bereits möglich, Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit richtig einzustufen. Trotzdem gibt es bezüglich der AKR-bedingten Schädigungsmechanismen immer noch ungeklärte Fragen, die trotz intensiver, weltweiter Forschungsbemühungen noch immer nicht abschließend geklärt werden konnten.

Die Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart beschäftigt sich in Kooperation mit dem Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart seit mehreren Jahren mit den Prüfverfahren, den Schädigungsmechanismen sowie der Vermeidung einer betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dabei bereits in zahlreichen Beiträgen national wie auch international veröffentlicht. Die nachfolgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Beurteilungsmöglichkeiten im Vorfeld einer Baumaßnahme sowie einen Überblick über das Leistungsspektrum durchführbarer Prüfungen an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart. Zur Aufrechterhaltung der bauaufsichtlichen Anerkennung beim Deutschen Institut für Bautechnik für Gesteinskörnungen mit Alkaliempfindlichkeitsklasse nimmt die MPA Stuttgart jährlich an diversen Ringversuchen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie teil.

In Deutschland wird die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen mit Hilfe der Alkali-Richtlinie beurteilt. Neben der obligatorischen, petrographischen Beschreibung der Gesteinskörnung wird ein Mörtelschnelltest (Schnellprüfverfahren) durchgeführt. Bei Nicht-bestehen dieses Schnellprüfverfahrens wird ein Betonversuch mit neunmonatiger Nebelkammerlagerung bei 40 °C angeschlossen. Hinsichtlich seiner Genauigkeit der Einstufung von Gesteinskörnungen hat dieser Versuch national und international eine sehr hohe Akzeptanz. Nachteilig erweist sich jedoch die relativ lange Prüfdauer von neun Monaten. Zukünftig soll eine Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen bereits nach drei Monaten mit dem Betonversuch bei 60 °C über Wasser (60 °C-Betonversuch) möglich sein. Beide Betonversuche haben jedoch gemeinsam, dass bei Nichtbestehen entsprechende Maßnahmen ergriffen werden müssen.

Die Schnellprüfverfahren und Betonprüfungen beurteilen hauptsächlich die Alkalireaktivität der Gesteinskörnung. Für spezielle Bauvorhaben reichen daher die Aussagen von Schnelltests und petrographischen bzw. mineralogischen Untersuchungen für eine sichere Bewertung des AKR-Schädigungspotentials der Betonzusammensetzungen nicht aus. Daher kann es auch zweckmäßig werden, mit Hilfe von Performance-Prüfungen projektspezifische Betonzusammensetzungen zu beurteilen. Mittels Performance-Prüfung kann die Eignung von Betonzusammensetzungen, die z. B. auf Flughäfen eingesetzt werden und mit Flugzeug und Flächenenteisungsmittel in Kontakt kommen, bewertet werden.

Die MPA Stuttgart befindet sich derzeit im Aufbau mit dem am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde in Weimar (FIB) entwickelten Verfahren der Klimawechsellagerung, mit welchem die Performance-Prüfungen durchgeführt werden können. Das Verfahren der Klimawechsellagerung simuliert zeitraffend die wesentlichen Umwelteinflüsse wie Austrocknung, Befeuchtung, Frost-Tauwechsel aber auch die Taumittleinwirkung. Zur Sicherung der Qualität der Ergebnisse werden derzeit Vergleichsversuche mit dem FIB durchgeführt. Bild 3 zeigt die für die Versuche notwendige Klimasimulationskammer mit Platz für bis zu 48 Probekörper verschiedener Abmessungen.



Bild 3: Klimasimulationskammer

Bei der Vermeidung einer betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion befasst sich die MPA Stuttgart aktuell mit dem „Einfluss von Phonolith-Gesteinsmehl auf das Alkaliangebot für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion“. Dieses Projekt wird im Rahmen der Innovationsgutscheine A & B für kleinere und mittlere Unternehmen durch das Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg gefördert. Nähere Informationen zu diesem Projekt finden Sie auf der Homepage der MPA Stuttgart.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Oliver Mielich
Telefon: +49 (0)711/685-62261
Telefax: +49 (0)711/685-66828
E-Mail: oliver.mielich@mpa.uni-stuttgart.de

Modernisierung der Vier-Säulen-Prüfmaschine der Abteilung Mineralische Baustoffe

Die 3MN sowie die 10MN-Prüfmaschinen der Abteilung Mineralische Baustoffe wurden erheblich modernisiert. Die mechanischen Einrichtungen wurden überholt, das Dichtungssystem der Kolben verbessert. Die elektronische Steuerung der Prüfmaschinen wurde durch eine moderne, PC-gesteuerte Steuerung ersetzt. Hierdurch können folgende Erweiterungen der Prüfmöglichkeiten bewerkstelligt werden:

- Weggeregelte Druckversuche
- Triggerung des Steuerungssignals durch äußere Weg-Sensoren
- Output der Messdaten kanalweise an ein externes Messgerät



Bild 4: Modernisierte Steuerung der Vier-Säulen-Prüfmaschine

Die Abteilung „Mineralische Baustoffe“ baut den Bereich der Bodenprüfung aus.

Das Referat Mauerwerk, Keramik und Naturstein der Abteilung „Mineralische Baustoffe“ hat sich in jüngster Vergangenheit in diesem Aufgabengebiet durch zahlreiche Aufträge aus Forschung und Industrie etabliert und hat sich hier zu einer zuverlässigen Anlaufstelle entwickelt.

Ermittelt wurden bisher vor allem Lastverformungskennlinien an Hohlräum- und Doppelbodenkonstruktionen.

Um den Bereich in seiner Gesamtheit normgerecht abdecken zu können, wurden Prüfeinrichtungen entwickelt, die es ermöglichen, sowohl Prüfungen an einzelnen Bodenelementen als auch an Systemstützen anzubieten. Es wurden bereits erste Aufträge erfolgreich abgewickelt.

Neben ersten Versuchen die Last mittels eines elektromechanischen Zylinders präziser als bisher in das Bodensystem einzutragen, wurde eine Rissdetektion mittels Schallemissionsanalysen oder Analysen mit dem ARAMIS-System (Messungen von Feldverformungen) erprobt.

Auch zur Weiterentwicklung von Heizstrich-Bodensystemen leistet die MPA einen Beitrag und bietet seit kurzem ein im Hause entwickeltes Verfahren an, um das wärmetechnische Verhalten von Heizstrichen erfassen, beurteilen und vergleichen zu können. Erste Aufträge, die speziell die Regelflexibilität von Heizstrichvarianten behandelten, haben interessante und aufschlussreiche Resultate gezeigt.

Bei diesem Verfahren zeichnet eine Thermokamera Temperaturverläufe an der Oberfläche von beheizbaren Prüfkörpern auf. Die einfache Herstellung dieser Prüfkörper in Verbindung mit

spezieller datentechnischer Aufbereitung der Messdaten, machen diese Untersuchung für schnelle und präzise, vergleichende Untersuchungen interessant.



Bild 5: Herstellung eines Bodenprüfkörpers (Monokornestrich 3 m x 3 m)

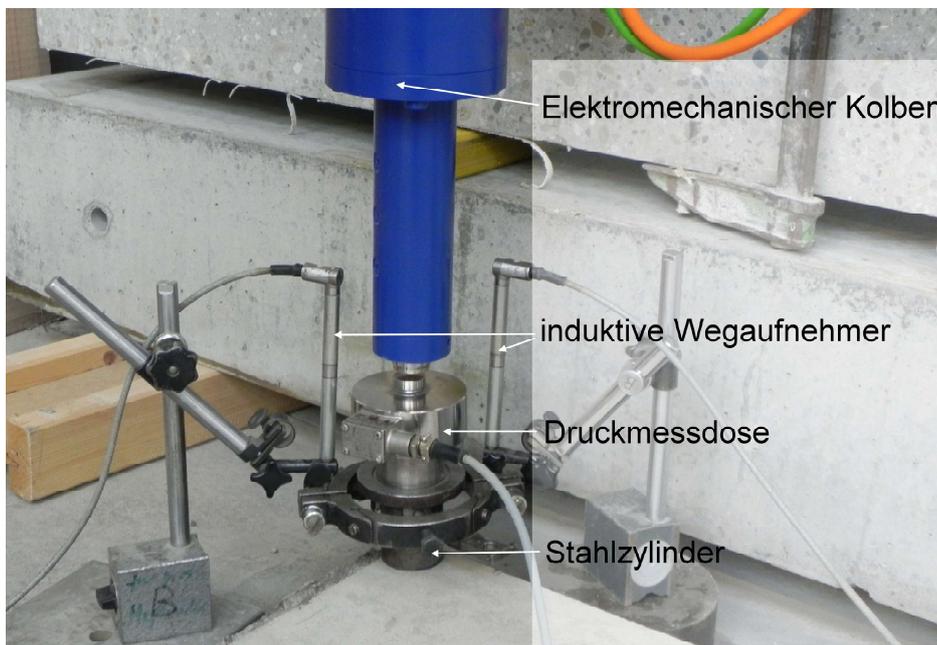


Bild 6: Lasteinleitung mittels elektromechanischem Kolben



Bild 7: Prüfaufbau zur Ermittlung des thermischen Verhaltens von Heizstrichen

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Gerhard Schroeter

Telefon: +49 (0)711/685-62253

Telefax: +49 (0)711/685-66828

E-Mail: gerhard.schroeter@mpa.uni-stuttgart.de

Keymark-Zertifizierung des Referats Dämmstoffe:

Am 07.06.2010 war es soweit, dass dem Referat Dämmstoffe die Keymark-Anerkennung zugesprochen wurde. Demnach ist das Referat für das Prüfverfahren der Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12667/12664 als Prüfstelle für die Keymark Zertifizierung von Dämmstoffen zugelassen.

Das Zulassungsverfahren wurde von der Europäischen Normungsorganisation NB SG 19/SDG5 (Scheme Development Group) durchgeführt und beinhaltet regelmäßige Ringversuche sowie ein externes Audit.

Keymark ist ein europäisches Qualitäts- und Gütezeichen von CEN/CENELC, das aussagt, dass der Hersteller sich regelmäßig einer freiwilligen Überwachung des Produkts unterzieht.

Ansprechpartner:

Dr. rer. nat. Thomas Popp

Telefon: +49 (0)711/685-62281

Telefax: +49 (0)711/685-66828

E-Mail: thomas.popp@mpa.uni-stuttgart.de

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

Die im Jahr 2009 vorgenommene Neugliederung der Abteilung in die drei Referate Holzbau, Qualitätsmanagement und Verbindungstechnik (jeweils Kurzbezeichnungen) hat sich im Berichtsjahr 2010 voll umfänglich bewährt. Bedingt durch die fachlich-personell verstärkte Fokussierung auf abgegrenzte Kernbereiche konnten in dem zum Jahresanfang noch schwierigen gesamtwirtschaftlichen Umfeld zunehmend technisch/wissenschaftlich sowie wirtschaftlich interessante Prüf-, Zulassungs- und Forschungsprojekte akquiriert werden. Nachfolgend werden einige erwähnenswerte Tätigkeitsfelder sowie im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte genannt.

Referat Holzbau, Holzwerkstoffe, Holzschutz

- Tragwerksbegutachtungen, Schadensanalysen und Sanierungskonzepte bei großen Dachtragwerken aus Brettschichtholz (u. a. Schwimmbäder, Supermärkte und große Veranstaltungshallen) und bei Brückenbauwerken (siehe hierzu auch nachfolgend unter Forschungsprojekte).
- Verifizierung von Ertüchtigungs-Maßnahmen mittels geklebter Rissverfüllungen und Querkugbewehrungen durch selbstbohrende Vollgewindeschrauben unter Einbezug vollmaßstäblicher Großbauteilversuche an unterschiedlich vorgeschädigten und sodann

- mit verschiedenen Methoden ertüchtigten Holzbauteilen (u. a. axiale Zug-Traglastversuche bis 6 MN).
- Erfolgreicher Abschluss eines umfangreichen Zulassungsverfahrens zu dem heute weltweit leistungsfähigsten auf der Baustelle herstellbaren, geklebten Brett-schichtholzanschluss ohne Abminderung der Bruttoquerschnittstragfähigkeit (allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-775 des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)). Mit Bezug auf den baurechtlichen Einsatz der Verbindung wurden auch alle diesbezüglich erforderlichen Prüf- und Zertifizierungsarbeiten durchgeführt sowie die Herstellung und Ausführung der ersten Bauwerke in Europa begleitet (vgl. Bild 1).
 - Werkstoff/Bauteiluntersuchungen sowie Gutachten für mehrere Zustimmungen im Einzelfall der Obersten Baubehörden der Länder für Pfosten-Riegel-Holz-Glas-Fassadenkonstruktionen unter Verwendung nicht geregelter Laubholzarten (insbesondere Eiche) für mehrere große Bauvorhaben namhafter deutscher Fassadenhersteller.
 - Material- und Bauteiluntersuchungen sowie Gutachten für die im Jahr 2010 erteilte allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-773 für einen neuartigen Holz-Kunststoff-Hybridschalungsträger. Abweichend von der bisherigen Schalungsträger-Zulassungsphilosophie des DIBt, wonach alle Schalungsträger insbesondere wegen Verwechslungsgefahr auf der Baustelle mit einheitlichen Tragfähigkeiten belegt wurden, weist der neue, optisch unverwechselbare Träger rd. 2fach höhere Tragfähigkeiten als die „alte“ Schalungsträger-Generation auf.



Bild 1

Referat Qualitätsmanagement, Festigkeitssortierung, Modellierung:

- Zerstörungsfreie, minimalinvasive und Festigkeits-Untersuchungen an Holzbrücken:
 - Die im Jahr 2009 begonnenen, seitens des Regierungspräsidiums Stuttgart beauftragten Brückenuntersuchungen aus gegebenem Anlass an mehreren (rd. 20) Holzbrücken wurden im Berichtsjahr 2010 abgeschlossen. Die Erkenntnisse der zerstörungsfreien ZfP-Untersuchungen werden seitens der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart in zukünftige Holzbrücken-Überwachungskonzepte/Pflichtenhefte eingearbeitet. Im Rahmen der Untersuchungen wurden erstmalig für Holzbauwerke umfassend die Vorteile, Grenzen und Synergieeffekte von Ultraschall-Scherwellen-Echo-Verfahren in Verbindung mit visuellen, haptischen, minimalinvasiven (Bohrwiderstandsmethode) und zerstörenden (Bohrkernentnahmen) Inspektionsmethoden überprüft.
 - Im Zuge der Überprüfungen der Pfeilertragfähigkeit einer denkmalgeschützten für den Schwerlastverkehr (60 to) freigegeben Neckarbrücke führte die Abteilung Holzkonstruktionen umfangreiche zerstörungsfreie und zerstörende Begutachtungen/Prüfungen der Holzpfahlgründungen durch. In einem ersten Schritt wurden im Rahmen von Tauchgängen seitens der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart-Mitarbeiter Begutachtungen und Probennahmen unter Wasser vorgenommen. Nach Trockenlegung wurden alle zugänglichen Pfähle und der Lastverteilungsrost mittels Bohrwiderstandsmessungen hinsichtlich des Alterungs-/Degradationszustandes untersucht. Aus freigespülten Pfählen wurden Proben für mechanisch-technologische Prüfungen entnommen (siehe Bilder 2 bis 6). Die Korrelierung der zerstörungsfrei und zerstörend gewonnenen Versuchsergebnisse an 150jährig hochbeanspruchten wassergesättigten Fichtenpfählen in Hinblick auf die Ableitung zutreffender Abminderungsfaktoren für eine semi-probabilistische Bemessung der Pfähle führte zu neuen wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen. Die Untersuchungen werden zwischenzeitlich an Großproben fortgesetzt.



Bild 2



Bild 3



Bild 4



Bild 5



Bild 6

- Im Arbeitsfeld Modellierung wurde im Berichtsjahr schwerpunktmäßig die Wellenausbreitung in Brettschichtholz mittels expliziter Zeitintegrationsverfahren unter Verwendung des Finite-Element-Programms ANSYS untersucht. Die Untersuchungen standen im Zusammenhang mit einem im Berichtsjahr abgeschlossenen AIF-Forschungsvorhaben zur Detektion von Fehlverklebungen in Brettschichtholz (vgl. hierzu Abschnitt Forschung). Bei den Untersuchungen wurde u. a. die zylindrische Anisotropie der einzelnen Lamellen im Querschnittsaufbau mit berücksichtigt. Im Vordergrund der Projekt-Zielsetzungen stand das Verständnis des Beugungs- und Reflexionsverhaltens der Wellen an Fehlverklebungs-Grenzflächen mit deutlich unterschiedlich ausgeprägten Impedanzsprüngen. Verallgemeinernd lässt sich sagen, dass wesentliche praxisrelevante Fortschritte der Simulation und damit betreffend das Verständnis von Messergebnissen von Wellenausbreitung in dem anisotropen inhomogenen Werkstoff Brettschichtholz erzielt wurden.

Referat Verbindungstechnik und Klebstoffe

Das Referat stellt unstrittig Deutschland- und EU-weit eine der renommiertesten Prüf- und Zertifizierungsstellen für Klebstoffe und geklebte Verbindungen in tragenden Holzbauteilen dar. In zunehmendem Maße werden auch Zulassungsuntersuchungen und insbesondere Zertifizierungsaufgaben in Bezug auf mechanische Verbindungsmittel (speziell selbstbohrende Vollgewindeschrauben), vorgenommen.

In enger Kooperation mit führenden Klebstoffherstellern, insbesondere mit Casco Adhesives, Purbond / Henkel, BASF, wurden mehrere neue Entwicklungen im Bereich von Flächen- und Keilzinkenklebstoffen zum Abschluss und zur Zulassungserteilung gebracht. Als wesentliche Neuerung ist die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1 765 der Klebstoffserie HB S zu nennen. Bei dieser, in enger Zusammenarbeit mit der Zulassungsstelle DIBt geprüften und zertifizierten Klebstoffinnovation, handelt es sich erstmalig um eine Klebstoff-Produktspanne, deren wesentliche Komponenten (Prepolymere) gleich sind und deren Reaktivität im Wesentlichen nur durch unterschiedliche Katalysatorzugaben gesteuert wird. Durch gezielte Prüfung von Eckpunkten der Klebstoffserie wurde eine sehr gute Bandbreite von Wartezeiten (geschlossen / offen) und Abbindegeschwindigkeiten realisiert, welche sehr unterschiedliche Produktionsbedingungen ermöglichen.

Im Bereich von Spezialklebstoffen wurden mit dem baden-württembergischen Unternehmen (Wevo Chemie) nach Zulassungsuntersuchungen für einen äußerst leistungsfähigen und temperaturbeständigen Instandsetzungsklebstoff abgeschlossen.

Berichte aus der Forschung:

- ***Qualitätsprüfung von Brettschichtholz-Klebefugen mittels Ultraschall***
Im Rahmen des Projektes wurden im Berichtsjahr neue Prüfmethode zur Detektion von Fehlstellen in BSH-Flächenverklebungen weiterentwickelt und an einfachen und abgestuften Fehlstellentypen verifiziert. Insbesondere wurde der Einsatz von Scherwellen und Sensorclustern untersucht und ein Finite-Element-basiertes Rechenmodell zur Ultraschallausbreitung in zylindrisch anisotropen Werkstoffen entwickelt. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen.

- ***Wood Wisdom-(ERA)Net-Projekt „Improved Moisture“***
Im Berichtsjahr wurden vollmaßstäbliche Bauteilversuche an gebogenen Trägern in einer Klimakammer durchgeführt mit unterschiedlichen Rissminderungsmaßnahmen. Bei den Versuchen wurden die Einflüsse von überlagerten mechanischen und klimatischen Beanspruchungen untersucht, die Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung erzeugen.
Bei den Bauteilversuchen wurden die Einflüsse unterschiedlicher Beschichtungen und von innenliegenden Armierungen mittels selbstbohrender Vollgewindeschrauben untersucht.
Die Versuche belegten den extremen Einfluss klimainduzierter Querspannungen. Infolge der sehr großen Materialstreuungen des Werkstoffes Holz bei Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung unterliegt die Verifizierung der Leistungsfähigkeiten unterschiedlicher Rissminderungsmaßnahmen einer sehr großen Streuung. Diesbezüglich sind weitere Untersuchungen speziell im Hinblick auf statisch abgesicherte Querspannungsbeanspruchungsmaßnahmen erforderlich.

- **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 Brettschichtholz-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 Klebstofffugendegradation. Dies gilt insbesondere auch für Bauteile, die deutlichen Nutzungsklasse 2 Klimabedingungen, für die diese Klebstoffgruppe nicht konzipiert war, ausgesetzt waren.

Abteilung Berechnung:

Dipl.-Ing. X. Schuler / Dr.-Ing. L. Stumpfrock

Tel.: 685/ -62601 bzw. -63041

E-Mail: xaver.schuler@mpa.uni-stuttgart.de

ludwig.stumpfrock@mpa.uni-stuttgart.de

Referat Werkstoffsimulation: Dr. rer. nat. E. Soppa

Referat Schweiß- und Fügesimulation: Dipl.-Ing. D. Krätschmer, Dipl.-Ing. J. Wink

Referat Numerische Bauteilanalyse: Dr.-Ing. L. Stumpfrock, Dipl.-Ing. T. Schütt

Referat Festigkeits- und Integritätsbewertung: Dr.-Ing. K.H. Herter, Dr.-Ing. U. Eisele

Referat Werkstoffsimulation

Schwerpunktthema

Ermüdung: Experimentelle Arbeiten und Simulationen auf dem Gebiet der Ermüdung von homogenen und heterogenen Werkstoffen an Bsp. vom austenitischen Stahl X6CrNiNb 18 10 und Metallmatrixverbundwerkstoff Al(6061)/Al₂O₃. Der Schwerpunkt liegt an den Rissinitiierungsmechanismen unter zyklischer Belastung in LCF-Regime.

- *Anwendung der Mikrotomographie* (in Zusammenarbeit mit Dr. R. Mokso, PSI/Villigen) für 3D-Rekonstruktion von Mikrogefüge incl. Schädigung nach zyklischer Belastung als Basis für die Erstellung der FE-Modelle.

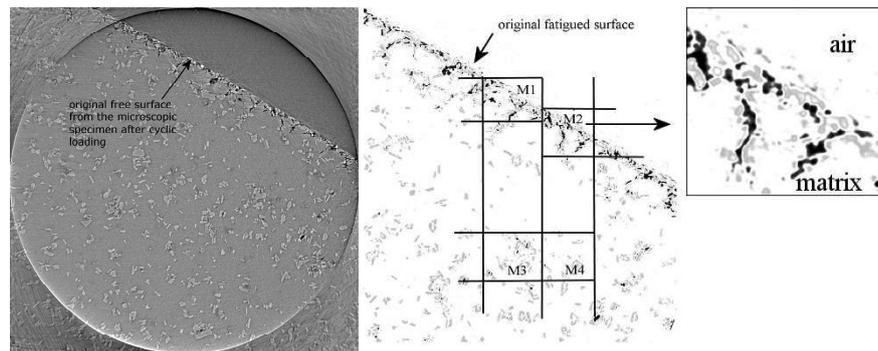


Bild 1: Oberflächennahe Ermüdungsrisse in einer ermüdeten Al(6061)/Al₂O₃ LCF-Probe untersucht mit X-Ray Mikrotomographie.

- *Dreidimensionale FE-Simulationen* der Verformung von Zweiphasengefüge unter zyklischer Belastung. Das Verhalten der Matrixphase wurde durch das Chaboche-Modell beschrieben (in Zusammenarbeit mit Dr. Ch. Kohler).
- Bestimmung der *Ausscheidungsgröße*- und -verteilung in der Al(6061)-Legierung mittels *TEM* (in Zusammenarbeit mit Fr. D. Kuppler) nach unterschiedlichen Wärmebehandlungen, die zu großen Unterschieden in der Fließgrenze führen.

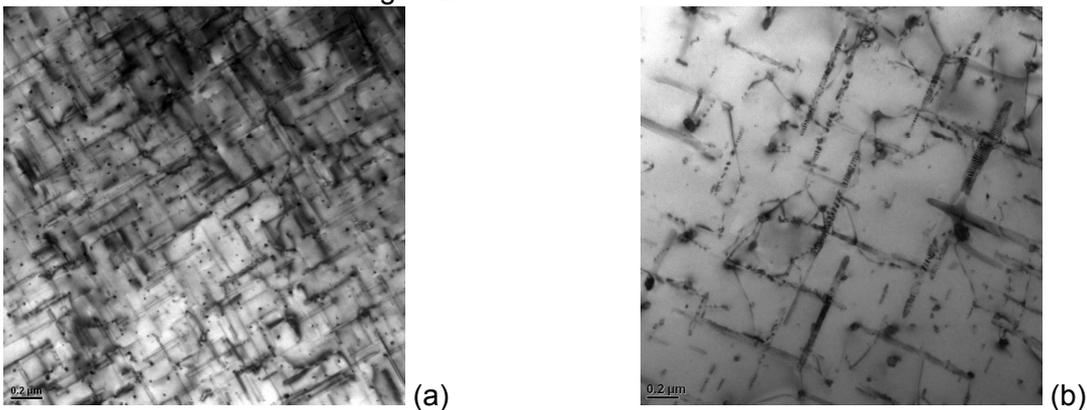


Bild 2: Unterschiede in der Größe und Verteilung der Ausscheidungen (meistens Mg₂Si) in der Al(6061)-Legierung (a) T6, die zu einer max. Aushärtung führt (b) Weichglühung.

- *Röntgendiffraktometrische Untersuchungen* der Martensitbildung in X6CrNiNb 18 10 auf der Mantel- bzw. Bruchfläche in Abhängigkeit von der Dehungsamplitude (in Zusammenarbeit mit Dr. K. Berreth).
- Anwendung der *Rückstreuungselektronen-Kikuchi Beugung* (Electron Backscatter Diffraction) im REM zu der Untersuchung der Martensitbildung in X6CrNiNb 18 10 unter zyklischer Belastung (in Zusammenarbeit mit Hr. D. Willer).

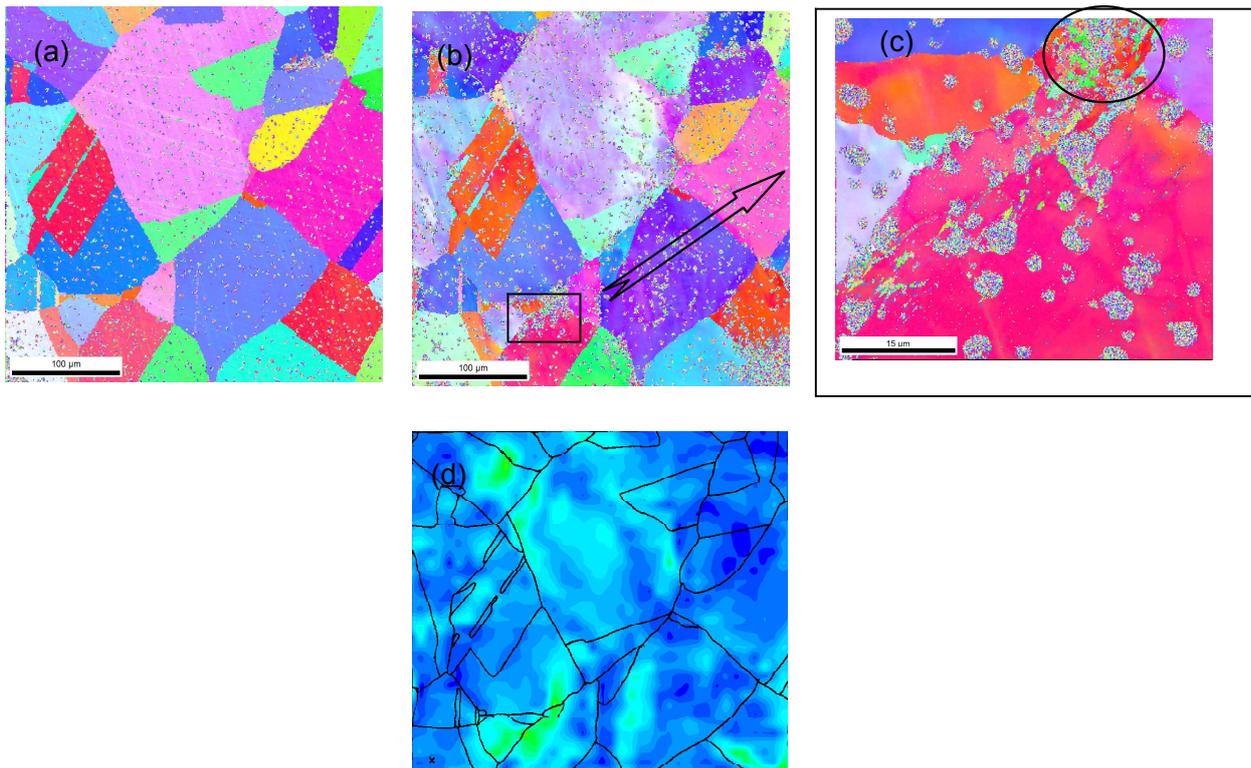


Bild 3: EBSD-Bilder der Kornorientierung in X6crNiNb 18 10 (a) im Ausgangszustand (b) nach 100 Zyklen mit der Dehnungsamplitude 1,5%, $R = -1$ (c) Detailansicht des Bereiches mit der Martensitbildung – grün (d) Verteilung der equivalenten Dehnungen passend zum Bild (b)/G- Fischer, RIV e.V. Dortmund.

- Entwicklung einer *Prüfvorrichtung* für Grundlagenuntersuchungen unter thermisch-mechanisch wechselnder Belastung im High Cycle Fatigue (HCF) Bereich (in Zusammenarbeit mit Abt. Dr. Klenk)

Weitere Aktivitäten in Kürze

Bestimmung der lokalen Dehnungsfelder auf der Probenoberfläche

Bestimmung der lokalen Dehnungsfelder in Mikrobereichen auf der Mantelfläche einer zyklisch belasteten LCF-Probe (Bild 3d, in Zusammenarbeit mit Dr. G. Fischer, TU Dortmund).

Sonstige Neuigkeiten

Forschungsberichte

P. Kizler: Simulation der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von ferritischem Stahl von Karbidbildung. Auftraggeber ZfES.

Referat Schweiß- und Fügessimulation

Schwerpunktthema

Zur numerischen Simulation des Widerstandspressschweißens wurden umfangreiche Erweiterungen der verwendeten Simulationsmethodik vorgenommen.

- Umsetzung der existierenden Simulationsmethodik auf Abaqus

- Einbindung von Phasenumwandlungsmodellen auf der Basis des JMAK-Modells zur Beschreibung von diffusionskontrollierten Umwandlungen, Martensitbildung und Erweichungszonen (angelasener Martensit), siehe Bild 1.



Bild 1: Numerische Ermittlung der Erweichungszone an widerstandspunktgeschweißten artgleichen 22MnB5+AS, t=1,5mm-Verbindungen

- Optimierte Ermittlung des spezifischen Kontaktwiderstands, basierend auf experimentell gemessenen Potentialverläufen während des Schweißens
- Vollautomatisierte Anpassung der numerischen Simulation an experimentellen Referenzversuch
- Methodenerweiterung zur numerischen Berechnung der Eigenspannungsentwicklung unter Berücksichtigung auftretender Phasenumwandlungen, siehe Bild 2

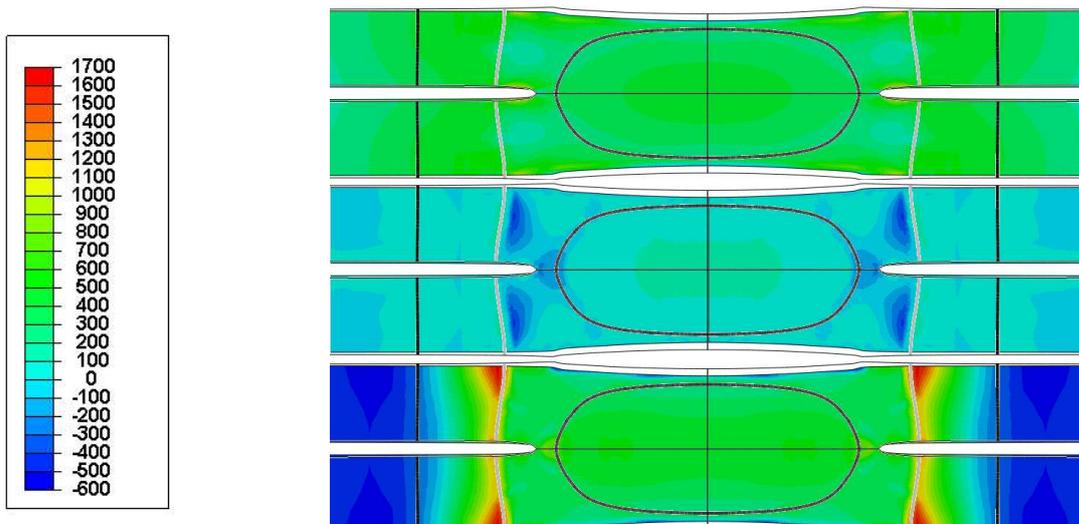


Bild 2: Numerische Ermittlung Rechnerische Eigenspannungsverteilung (radial, axial, tangential) an widerstandspunktgeschweißten artgleicher 22MnB5+AS, t=1,5mm-Verbindungen

Weitere Aktivitäten in Kürze

Numerische Simulation des Rührreißschweißprozesses (geplant)

Zur Simulation des FSW-Prozesses ist die Entwicklung einer gekoppelten fluid- und strukturellen Simulationsmethode in Kooperation mit dem Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart geplant. Zeitgleich werden strukturelle Simulationsansätze unter Berücksichtigung adaptiver Vernetzungen entwickelt und angewandt, siehe exemplarisch Bild 3.

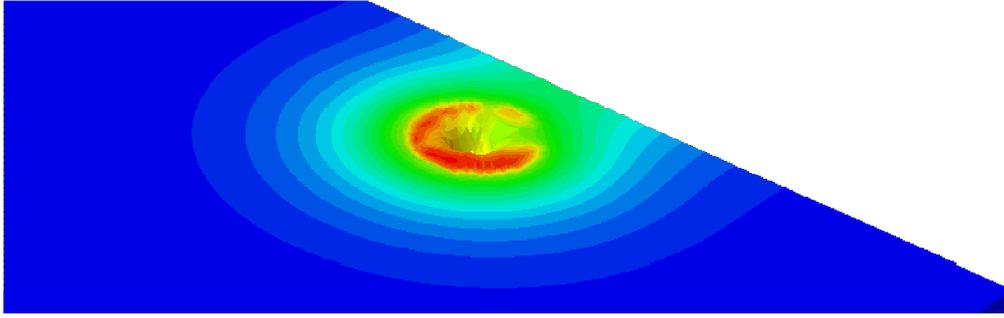


Bild 3: Temperaturfeldentwicklung beim Rührreißschweißen um das (ausgeblendete) eingetauchte Werkzeug

Industrieprojekte

Tätigkeitserweiterung im Bereich des Schweißens von Hartmetallen

Weitere Aktivitäten in Kürze

Forschungsantrag zur „Zustandsüberwachung von Offshore-Windenergieanlagen (WEA), Integritätsbewertung und Lebensdauermanagement“: In eine fortgeschrittene Zustandsüberwachung von WEA sollen neuere Erkenntnisse aus der Erkennung und Beurteilung von Schadensmechanismen, aus der Baudynamik und Maschinendynamik und aus der Nachrichtentechnik einfließen. Aufgabenschwerpunkte sind Erstellung eines Lastmonitoring- und Lebensdauerbewertungskonzepts, hochdiskretisiertes numerisches Modell des Gesamtsystems (Kopplung MKS / FEM) mit Validierung dieses Modells, Validierung der Last- und Beanspruchungssimulation durch Messungen in einem Turmquerschnitt und nachfolgendes Model-updating, probabilistische Modellierung von Lastkollektiven, Lebensdauerprognose, Prognose von Schadenseintritten, zustandsorientierte Instandhaltung, realitätsnahe Einschätzung von Materialsicherheiten mittels Untersuchung der relevanten Schadensmechanismen, Schadensvorhersage, Kombination von globaler Lastsimulation und Beanspruchungsanalyse von Komponenten und deren Rückwirkungen auf die Lebensdauer/Ermüdung sowie qualitätsgesicherter Einbau von Komponenten und deren Überprüfung im Betrieb.

Industrieprojekte

SEO M11: Prüftätigkeit im Rahmen des Ausbaus des Pumpspeicherkraftwerks Vianden in Luxemburg (Stahlwasserbau, Maschinentechnik)

Untersuchungen zur Lebensdauer/Integrität von Generatoren in Wasserkraftwerken

Untersuchungen zur Integrität von Ethylen-Pipelines

Forschungsberichte

BMW-Vorhaben 1501319: Rissverhalten ferritischer Druckbehälterstähle in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser bei transienten Vorgängen. Risskorrosion Phase 1: Rissinitiierung und Risswachstum, Teilbericht B Numerische Simulation

Referat Festigkeits- und Integritätsbewertung

Schwerpunkte

Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur

Für die Sicherheit von Leichtwasserreaktoren ist die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen des Primär- und Sekundärkreislaufs sowie der Nachkühlkette und der Kühlwasser-Einspeisesysteme von herausragender Bedeutung. Dabei ist vor allem die thermische Wechselbelastung des Materials von den strömungsmechanischen Bedingungen abhängig. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur in Leichtwasserreaktoren“ erfolgt n. a. die experimentelle Validierung der Simulationsmethoden. Hierzu wurde ein Konzept für eine Versuchsanlage erarbeitet und umgesetzt. Die Auslegung erfolgte entsprechend den thermodynamischen und thermohydraulischen Randbedingungen von Siedewasserreaktor Anlagen. Der realisierte Versuchskreislauf ist in Bild 1 dargestellt. Als Versuche sind vorgesehen Untersuchungen zu Vermischungsvorgängen bei Kalteinspeisung in eine heißgehende Rohrleitung (Detaildarstellung in Bild 1) sowie Untersuchungen zum Ausströmverhalten bei Lecks in Rohrleitungen.

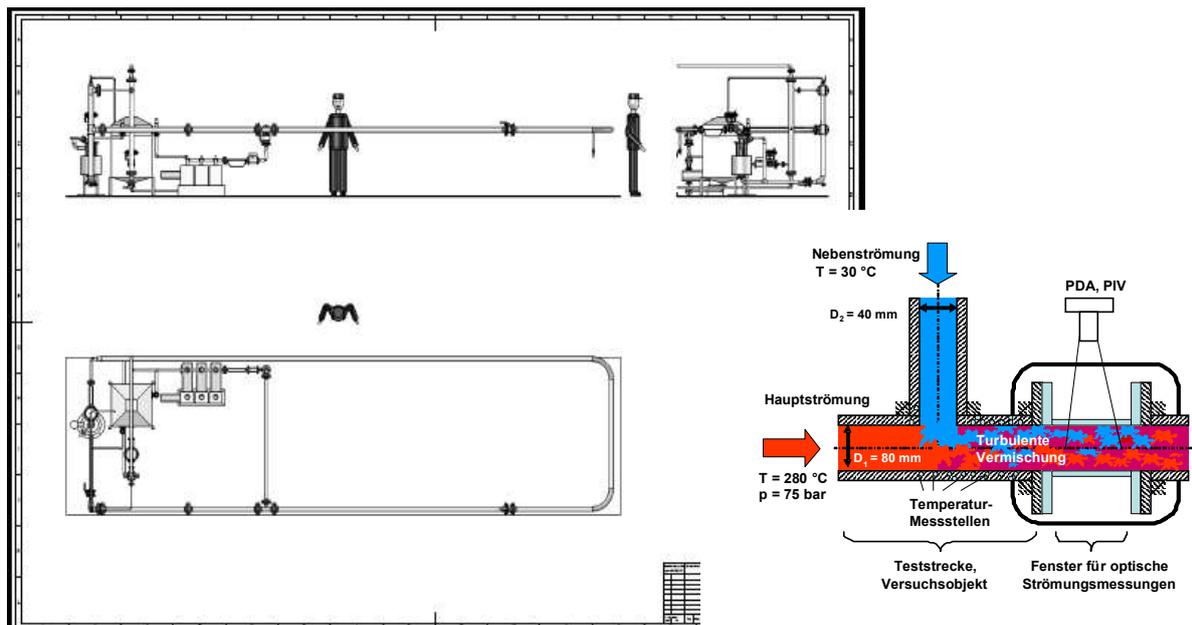


Bild 1: MPA Versuchsanlage für Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur

Weitere Aktivitäten in Kürze

Ermüdungsfestigkeit

Die Werkstoffermüdung ist neben den verschiedenen Arten der Korrosion und als Kombination in Form der Korrosionsermüdung einer der maßgeblichen Schädigungsmechanismen mit direkten Auswirkungen auf die Sicherheit und Verfügbarkeit von Bauteilen. Da im Gegensatz zu statischem Versagen bei Schwingbruchversagen im Allgemeinen keine vorhergehenden plastischen Verformungen auftreten, ist die hinreichend genaue Vorhersage der Lebensdauer im Rahmen einer Ermüdungsanalyse von großer Bedeutung. Der Ermüdungsnachweis beruht auf den aufeinander abgestimmten drei Bausteinen Berechnung (Beanspruchungsanalyse), Werk-

stoff (Werkstoffverhalten unter zyklischer Beanspruchung) und Bewertungskonzept (global oder lokal).

Die derzeitigen nationalen und internationalen Aktivitäten sind vor allem auf die genauere Quantifizierung von Einflussfaktoren – hier insbesondere der Mediumseinfluss – auf die Ermüdungsfestigkeit, also das Werkstoffverhalten fokussiert. Der Berücksichtigung der erforderlichen Einflussfaktoren innerhalb der unterschiedlichen Bewertungskonzepte, die dem Ermüdungsnachweis zugrunde liegen, wird dabei häufig nicht oder nicht im erforderlichen Umfang Rechnung getragen.

4 Forschungsberichte

Structural response of thin-walled austenitic pipes to radiolysis gas detonations

Stefan Offermanns, Eberhard Roos, Werner Stadtmüller

Abstract. Radiolysis gas is a mixture of gaseous hydrogen and oxygen, which is generated by dissociation of water under the influence of gamma and neutron radiation. Radiolysis gas aggregations can appear for example in safety-relevant piping of nuclear power plants. The detonation of such gas mixtures can not be excluded in all cases. Within the scope of a research project funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), the basis for the assessment of the related risk potential for plant operation shall, among others, be provided. Detonation tests and numerical evaluations are performed to simulate detonations of radiolysis gas in pipes with $O.D. \times t = (114.30 \times 6.02)$ mm made of austenitic steel under operating pressure of 70 bar.

It is observed, that depending on the ratio of detonating gas to nitrogen rupture of the pipe can occur in different distances from the ignition. Due to the high-rate response of the pipes to the detonations, multiple longitudinal cracks and fragmentation occurred in certain cases.

For the numerical investigations an appropriate material constitutive law is chosen in order to describe the material behaviour including strain rate sensitivity and thermal softening at high deformations. Several small-size specimen tests are performed in order to evaluate the required material parameters. For determination of the local strain distribution during the tests appropriate optical measurement is used. The material model is validated by numerical simulations of tensile and compression tests.

The numerical simulation of the deformation behaviour of the pipes fits well into the test results.

1. Introduction

One of the main risks with the occurrence or by the use of hydrogen in oxygen-containing environment is the easy inflammability of the hydrogen-oxygen-mixture (detonating gas), whereby the combustion proceeds with very different velocities and leads, in particular with high operating pressure, to extreme mechanical and thermal loads.

Detonating gas aggregations generated by dissociation of water under the influence of gamma and neutron radiation can appear for example in safety-relevant piping of nuclear power plants. Such a gas mixture is called radiolysis gas according to its origin. In particular steam piping connected to the reactor pressure vessel with non-permanently steam flow are at risk.

For the assessment of incident situations with appearance and ignition of different amounts of radiolysis gas knowledge about the pressure-profile of the deflagration (subsonic combustion before entry of detonation) as well as the criteria and mechanisms of an acceleration of the deflagration up to the detonation (DDT = *deflagration-to-detonation transition*) and herewith about the distance between ignition and DDT (RUD = *run-up distance*) is among other of the central meaning. Furthermore pressure-profile and speed of the detonation wave are elementary pipe load parameters.

Detonation tests can give information on the load parameters as well as on the structural mechanical reaction of the pipe at different ratios of radiolysis gas. Dependent on the ratio of radiolysis gas critical pressure profiles and thus tubing expansion and strain rates are to be expected, which can lead possibly to catastrophic piping failure. The failure mechanisms, fragmentation and fragment sizes are of central importance for the evaluation of the risk potential. So multiple longitudinal cracks, fragmentation or the separation of larger fragments can occur and may have an influence on surrounding installations.

Experimental investigations with purposeful ignition of detonating gas are well known for pipes with nominal diameters up to 50 mm and for operating pressure up to about 10 bar (e. g. [1]). Also numerous numerical studies are available dealing with the elastic or low plastic response of pipes to detonative loads [2, 3]. Further experimental and numerical investigations became necessary in order to analyze the complex interrelations between the gas dynamic process and the highly plastic deformation of the piping under detonative loads.

The following will summarize the state of the research and point out some important phenomena regarding gas dynamics and structural mechanics that have to be considered in analyzing that kind of problems.

2. Deflagration and detonation in pipes

If a radiolysis gas mixture is ignited in a pipe with the initial pressure p_0 , initially two reactions are to be distinguished. Due to the heat development of the ignition flame, shock waves are initiated, which run approximately with the speed of sound of the unburned gas through the pipe. At the same time a flame propagates toward the unburned gas mixture with laminar burning velocity, whereby the flame front assumes a parabolic profile due to wall friction. By the piston effect of the expanding burned gas the flame front accelerates up to turbulent burning velocities. The flame front velocity is now the sum of the burning velocity and the displacement velocity of the unburned gas. Additionally turbulence-generating structures (e. g. wall friction or weld seams) lead to a further acceleration of the flame front. The unburned gas behind the leading shock wave becomes pre-compressed due to increase of pressure and temperature. When the conditions of self-ignition are reached, a shock forms and the deflagration leads to the onset of detonation (DDT). At the same time a pressure wave propagates back through the burned gas due to conservation of momentum. This is called retonation. The detonation is characterised by unsteadiness in the pressure and speed course. The detonation starts as a so-called overdriven detonation in a volume of pre-compressed gas. Once the detonation front has been passed the compressed gas, the wave decays to a stable detonation, which can be described with the so-called Chapman-Jouguet-model (CJ). The pressure profile of a stable CJ detonation is characterised by the jump to the CJ pressure peak p_{CJ} followed by an expansion to the pressure of burned gas p_3 . This expansion is also referred to as Taylor-wave according to the work of G. Taylor [4]. It's important to note that the maximum pressure of an overdriven detonation could be more than 5 times higher than the CJ detonation pressure. A schematic diagram of the pressure profile of a stable detonation is given in Figure 1.

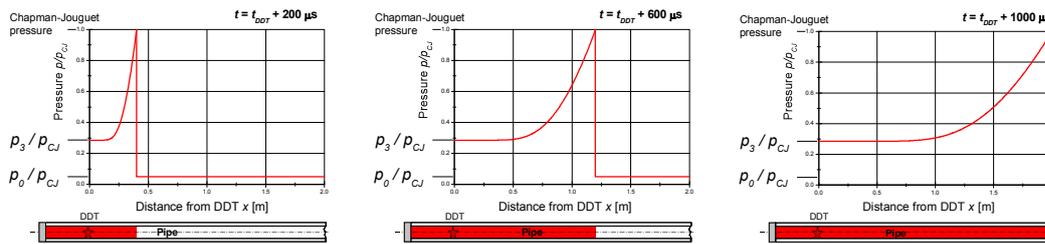


Figure 1. Pressure distribution of a stable CJ detonation ($v_{CJ} = 2000$ m/s) at different times (schematically)

3. Detonation tests

Detonation tests and numerical evaluations are performed at the Material Testing Institute (MPA) University of Stuttgart to simulate detonations of radiolysis gas with and without the presence of steam in pipes made of austenitic steel (X10CrNiTi18-9) [5]. The radiolysis gas is simulated by mixing hydrogen and oxygen from gas bottles in stoichiometric ratio and nitrogen is used to simulate the steam. Straight pipes as well as pipes with a welded elbow are tested. The dimension is given by O.D. x t = (114.30 x 6.02) mm and the filling pressure is 70 bar according to the operating pressure of special BWR-piping. The tests are carried out at room temperature. A burst membrane to simulate an open-ended pipe closes the end of the pipe. Pressure sensors are applied to the flanges at the pipe ends. The test pipe is instrumented by strain gauges. Next to the evaluation of strains and strain rates these signals are used to calculate burning velocities and the position of DDT.

Additionally a pattern is applied onto the pipe's surface and the tests are recorded by a high-speed camera (Photron APX-100). Using optical deformation analysis based on the raster method (ARAMIS), it is possible to evaluate global and local strains and deformations afterwards. The basic principle of this method is based upon the fact that the distribution of grey scale values of a rectangular area in the initial state corresponds to the distribution of grey scale values of the same area in the deformed state.

For dimensioning the detonation tests with the thin-walled pipes described above and to obtain pressure profiles for the numerical simulations, calibration tests with thick-walled quasi-rigid pipes with an inner diameter of 36 mm and a length of 4.00 m are carried out. These tests are instrumented by pressure sensors and are performed in cooperation with Pro-Science GmbH, Ettlingen using a testing facility of the Karlsruhe Research Center (FZK). Elementary pipe load parameters like run-up distance, wave velocities and pressure-time history can be obtained from the results of these tests.

The detonation tests with thin-walled pipes are performed in the underground test pit at the MPA University of Stuttgart. Tests are carried out with a ratio of detonating gas of 50 %, 60 % and 80 % respectively. As one of the main results it is observed that the tests with 60 % of detonating gas lead to catastrophic piping failure due to multiple longitudinal cracks while in case of 80 % of detonating gas - with the exception of one test - no rupture occurred. The fact that the tests with less detonating gas concentration lead to a higher local loads and to higher dynamical fracture behaviour is to be explained with the longer run-up distance and with the higher pre-compression involved. In case of 50 % of detonating gas no DDT occurred in the pipe due to

the long run-up distance. The deformation and fracture behaviour of the pipes is summarized in Table 1 and Figure 2 respectively.

Table 1. Tested straight pipes with the dimension $O.D. \times t = (114.30 \times 6.02)$ mm

Description of the test				Results	
Ratio of det-onating gas [vol.-%]	Test identifier	Pipe length [mm]	Heat of reaction [kJ]	RUD [mm]	Fracture behaviour
80 %	V80E1	1730	6260	450	No fracture
80 %	V80E2	3525	12070	500	Fracture in 2415 mm
80 %	V80E3	3600	12640	500	No fracture
60 %	V60E1	5133	13020	3620	Multiple longitudinal cracks
60 %	V60E2	4900	12690	3450	Multiple longitudinal cracks
50 %	V50E1	5800	12433	6030	No fracture (DDT in flange)

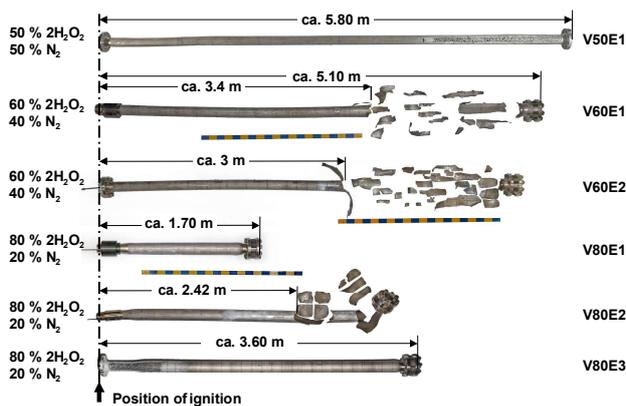


Figure 2. Deformation and fracture of the tested straight pipes with the dimension $O.D. \times t = (114.30 \times 6.02)$ mm

4. Determination of the material behaviour

A set of small-scaled specimen tests in tension and compression is performed to obtain the stress-strain behaviour of the material. The tensile specimens are sampled from the pipes in tangential as well as in axial direction. In order to ensure elastic behaviour of the specimen heads ferritic steel is connected to the tubular part of the specimen by electron beam welding. The compression specimens are lapped on the face sides in order to avoid eccentric load.

A servohydraulic high-speed testing machine (Schenck, 100 kN, 20m/s) is used for the dynamic tensile tests up to a strain rate of 1000 s⁻¹. A nearly constant strain rate during the test is obtained by using a special slack adaptor and the driving signal for the large proportional valves (6500 l/min each) obtained by a computer simulation program under consideration of machine data and ram speed. The elongation is measured with an electro-optical extensometer and strain gauges respectively. Force is measured by strain gauges applied on the dynamometer section of the specimen. These strain gauges are calibrated by using the piezoelectric load cell of the testing machine at low loading rates [6].

The compression tests up to a strain rate of 2500 s⁻¹ are performed on the servohydraulic high-speed testing machine described above and additionally on a split-Hopkinson pressure bar (SHPB) for strain rates of up to 5 · 10⁴ s⁻¹.

To obtain the stress-strain behaviour of the material at higher temperature quasi-static tensile tests are performed on an universal tensile testing machine (MTS Sintech 65G).

Some of the tests are prepared for optical deformation analysis and are recorded by a high-speed camera to verify the material constitutive law up to rupture.

The complete material behaviour as a function of strain, strain rate and temperature has to be described by a suitable material constitutive law. Most of finite-element codes provide the well-known material law developed by Johnson and Cook, which considers these dependencies by three multiplicative terms:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right), \quad (1)$$

where $\dot{\varepsilon}$ is equivalent plastic strain rate and T the current temperature, T_{melt} is the melting temperature, T₀ the room temperature. A, B, C, n and m are material parameters.

At high loading rates the heat caused by the mechanical deformation has no time to diffuse through the material. Hence the experimentally determined dynamic flow curves are assumed to be adiabatic if the strain rate is high enough. In order to obtain strain rate dependent isothermal flow curves for room temperature, the flow curves have to be reduced by the influence of thermal softening what is done using a simple multiplicative approach containing a temperature function [7]. In this work the function suggested by Petch [8] is used. Assuming uniaxial load furthermore, the isothermal flow curves can be obtained by using Equation 2:

$$e^{\left(\beta \frac{T - T_0}{T_m} \right)} = 1 + \frac{\kappa \cdot \beta}{\rho \cdot c \cdot T_m} \cdot \int_0^\varepsilon \sigma_{ad} \cdot d\varepsilon, \quad (2)$$

where κ is the Taylor-Quinney parameter, which implies the fraction of plastic deformation converted into heat, ρ the density, c the specific heat capacity, β is a material constant, which can be set to 3 MPa/K for the most materials [7].

The stress is scaled by the strain rate dependent term in equation (1) and fitted with the function (A + Bεⁿ). Averaging over all flow curves results in the parameters A, B and the strain hardening coefficient n. Parameter C is obtained by a logarithmic plot of stress vs. strain rate at different locations of plastic strain. Similarly the parameter m is determined from the quasi-static temperature dependent test results.

The Johnson-Cook material law with the determined parameter (Table 2) is verified by comparing numerical simulations of several high-speed tensile and compression tests to the results of the test data obtained from optical deformation analysis, also beyond necking and up to rupture.

Table 2. Evaluated Johnson-Cook parameters for the pipe material

Parameter	A	B	C	n	m
X10CrNiTi18-9	235 MPa	1470 MPa	0.005	0.65	0.70

5. Numerical Simulation

The detonation tests are simulated by a finite-element analysis using the Johnson-Cook material model described above. The calculations are performed by the explicit FE-code ABAQUS/Explicit using axisymmetric solid elements.

For any point along the longitudinal axis of the pipe, the pressure-time history can be described by the following expression:

$$p(x,t) = \begin{cases} p_0 & \frac{x}{t} \geq v_{CJ} \\ p_3 + (p_{CJ} - p_3) \cdot e^{\left(\frac{-t+1}{x-v_{CJ}}\right) \cdot c} & 0 < \frac{x}{t} < v_{CJ} \end{cases}, \quad (3)$$

where p_0 is the initial pressure and p_3 the pressure of the burned gas, p_{CJ} is the CJ pressure peak and v_{CJ} the velocity of the detonation wave front, c is a constant factor, which can be determined by fitting the experimental data in the region of stable detonation.

The pressure distribution of deflagration, retonation and overdriven detonation is obtained by using the CFD-simulation-tool DET3D, developed by Redlinger [9] and is calculated by the IKET at Karlsruhe Research Center (FZK). These results are simplified by a mathematical approach and are applied by a user-subroutine onto the inner surface of the pipe.

Note, that these pressure profiles are valid in case of elastic pipe response only. Since the huge plastic deformation of the test pipes leads to a change in volume and hence to a change in the gas state (density, temperature, etc.), the pressure has to be corrected. This is done approximately by using the isentropic relations. Neglecting the pressure equalisation in axial direction, this correction can be written as follows:

$$p_{corr}(x,t) = p(x,t) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{2\gamma}, \quad (4)$$

where p is the current pressure calculated from Equation 3, r_0 is the initial radius and r the current radius of the pipe, γ is the isentropic exponent, which is the ratio of specific heats.

6. Results and Conclusion

The FE-simulation is validated by comparing calculated strains and strain rates to the experimental determined ones. Figure 3 shows the deformation of the pipe in the region of DDT at different times in case of 80 % of detonating gas. Furthermore the deformed shape of the pipe obtained from the high-speed film is shown and overlaid with the hoop strain distribution evaluated by the optical deformation analysis. The final deformation of the test pipe is shown in Figure 4 and compared to the FE-calculation.

The graphs show a relatively good agreement between the FE-calculation and the detonation test with 80 % of detonating gas and without pipe rupture. The idealisations of the retonation propagation result in a small difference between experiment and calculation in the region of retonation.

The calculations show the possibility to analyze that kind of problems with an accurate material constitutive description and with the knowledge of the pressure-time history. Comparative calculations showed that the consideration of the influence of overdriven detonation and pressure correction due to volume change is most important to obtain realistic results.

Detonation tests with 60 % of detonating gas showed piping failure due to multiple longitudinal cracks. These cracks are assumed to initiate by multiple necking in the circumferential direction of the pipe. Further investigations are necessary in order to calculate the pressure history of these tests and to extend the material constitutive description by a suitable failure criterion.

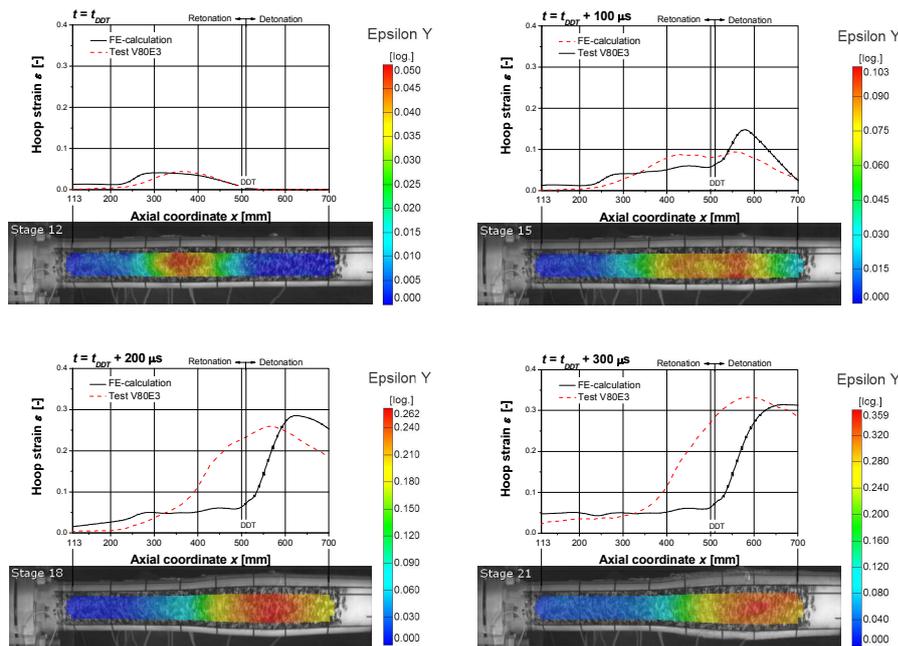


Figure 3. Deformation history of the test pipe V80E3– comparison of experiment and FE-calculation

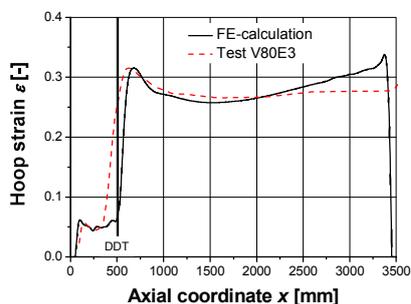


Figure 4. Final deformation of the test pipe V80E3 – comparison of experiment and FE-calculation

References

- [1] Kuznetsov M., Breitung W., Grune J. and Singh R. K., Structural response of DN-15 tubes under radiolysis gas detonation loads for BWR safety applications, Proc. SMiRT 18, Beijing, 2005, pp. 2740-2748.
- [2] Kuznetsov M., Lelyakin A. and Breitung W., Numerical simulation of radiolysis gas detonation in BWR exhaust pipes and mechanical response of the piping to the detonation pressure loads, Proc. ICONE 16, Orlando, Florida, 2008.
- [3] Shepherd J. E., Structural response of piping to internal gas detonation, ASME pressure vessels and piping division conference, Vancouver BC, Canada, 2006.
- [4] Taylor G., The Dynamics of the Combustion Products behind Plane and Spherical Detonation Fronts in Explosives, Proc. R. Soc. Lond. A, Vol. 200, No. 1061 (1950), 235-247.
- [5] Offermanns S., Roos E. and Stadtmüller W., Untersuchungen zum Rohrleitungsverhalten bei Radiolysegasdetonationen, 33. MPA-Seminar 2007, Stuttgart, Germany.
- [6] Roos E., Mayer U., Progress in testing sheet material at high strain rates, J. Phys. IV 110 (2003), 495.
- [7] Treppmann C., Fließverhalten metallischer Werkstoffe bei Hochgeschwindigkeitsbeanspruchung, LFW-Mitteilung, RWTH Aachen, 2001, Aachen, Germany.
- [8] Petch N. J., The Ductile-Brittle Transition in the Fracture of α -Iron, Phil. Mag. 8 (1958), 1089-1097.
- [9] Redlinger R., DET3D – A CFD tool for simulating hydrogen combustion in nuclear reactor safety, Nucl. Eng. Design, 238 (2008), 610-617.

Entwicklung und Erprobung einer Dämmplatte aus nachwachsenden Rohstoffen mit optimierter Wärmedämmung und verbessertem Brandverhalten

Hasan Özkan, Abt. Mineralische Baustoffe

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse des Projekts, „Entwicklung und Erprobung einer Dämmplatte aus nachwachsenden Rohstoffen mit optimierter Wärmedämmung und verbessertem Brandverhalten“, Förderkennzeichen KF0492401WZ7, Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AIF), welches zum Ziel hatte, einen neuen Wärmedämmstoff aus nachwachsenden Rohstoffen zu entwickeln und zu erproben.

Einleitung

Das Interesse an nachwachsenden Rohstoffen nimmt auch im Baubereich stetig zu. Die Palette an nachwachsenden Rohstoffen, die als Baustoffe bzw. Bauhilfsstoffe genutzt werden können, ist sehr groß. Nachwachsende Rohstoffe sind im Wohnungsbau vielseitig einsetzbar. Sie eignen sich besonders zur Herstellung von Dämmstoffen für den Wärme- und Schallschutz.

Trotz der vielfältigen Anwendungsgebiete werden gegenwärtig nur geringe Mengen an nachwachsenden Rohstoffen zur Herstellung von Baustoffen eingesetzt. Der Anteil an Dämmstoffen aus biogenen und anderen alternativen Materialien ist in den vergangenen Jahren auf dem Dämmstoffmarkt langsam, aber kontinuierlich auf 5 % angewachsen. Es wird erwartet, dass dieser Trend sich fortsetzen wird. Leider wiesen die bisher zum Einsatz gekommenen Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen, insbesondere die der Holzwole-Platte, einige Schwächen auf. Sie besitzen eine vergleichsweise höhere Wärmeleitfähigkeit oder ungünstigeres Brandverhalten. Im Gegensatz zu den Produkten aus Mineralfasern, Hartschaumstoffen etc., die den Brandschutzklassen A1, A2 oder B1 angehören, erreichen die bisherigen Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen oder anderen biogenen Materialien nur die Brandschutzklasse B2. Diese Brandschutzklasse ist ausreichend für den Einsatz der Dämmstoffe in Gebäuden mit bis zu zwei Vollgeschossen (Ein- und Zweifamilienhäuser). Für Gebäude mit mehr als zwei Vollgeschossen müssten die Materialien für Dämmschichten jedoch mindestens der Brandschutzklasse B1 (schwer entflammbar) angehören. Durch entsprechende Behandlung erreichen einige Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Holzfaserplatten) auch die Brandschutzklasse B1. Trotzdem sind dem Einsatz von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen in diesem Bereich sehr enge Grenzen gesetzt (siehe Tabelle 1).

Eine Übersicht der Produkteigenschaften ausgewählter Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen kann der folgenden Tabelle entnommen werden. Es ist dabei zu beachten, dass die Eigenschaften auch bei gleichem verwendetem Rohstoff je nach Verarbeitung und Einsatzbereich schwanken können.

Tabelle 1: Produkteigenschaften ausgewählter Dämmstoffe
(Quelle: Dämmstoffe aus der heimischen Natur. CMA 2002)

Material	Brandschutzklasse nach DIN 4102-1 [1]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m.K)]
Flachsfaser	B2	0,035 – 0,045
Hanffaser	B2	0,040 – 0,060
Holzfaserverplatte	B1/B2	0,040 – 0,060
Holzwohle-Platte	B1	0,090
Roggengranulat	B2	0,048
Schafswolle	B2	0,035 – 0,045
Schilf	B2	0,055 – 0,075
Stroh	B2	0,090 – 0,130
Zelluloseflocken	B1/B2	0,040 – 0,045
Korkechrot	B2	0,045 – 0,050
Polyurethan-Hartschaum	B1/B2	0,020 – 0,035
Polyurethan-Partikelschaum	B1	0,040
Steinwolle	A1/A2/B1	0,040
Blähton	A1	0,100 – 0,160

Bei der Holzwohle-Platte (**Wood-Wool board**) handelt es sich um ein offenes Gerüst aus loser Holzwohle, die mit einem mineralischen Bindemittel gebunden und zu seiner endgültigen Dicke geformt wird. Sie zählen zu den schwersten Platten unter den Holzwerkstoffen. Im Bild 1 werden verschiedene Holzwohle-Platten dargestellt. Diese Holzwohle-Platten sind unter dem Handelsnamen „Heraklith“ seit langem bekannt. Die Herstellung von WW-Platten beruht auf einem im Jahre 1908 in Österreich erteilten Patent. Durch die Einführung der europäischen Dämmstoffnorm DIN EN 13168 [2] zum 1. Juni 2003 wurde der bis dahin offiziell gebrauchte Begriff „Holzwohleleichtbauplatte“ (HWL-Platte) durch den Begriff „Holzwohle-Platte“ (WW) ersetzt, gleichwohl wird der alte Begriff in der Praxis weiter verwendet. Am Aufbau der Holzwohle-Platten hat sich in Folge dieser Umbenennung jedoch nichts verändert.



Bild 1 Ansicht verschiedener Holzwohle-Platten. Herkömmliche Platten (graue Platten) und die optimierte Platte (gelb)

Wesentlicher Bestandteil von Holzwohle-Platten sind neben langfaserig gehobeltem Laub- oder Nadelholz meist mineralische Bindemittel wie Zement oder Magnesit, gelegentlich wird auch

Gips eingesetzt. Zur Herstellung der WW-Platten werden nur ökologisch unbedenkliche Ausgangsstoffe verwendet. Das Holz stammt von heimischen Hölzern wie Fichte oder Kiefer, der Zement ist aus Kalkstein, Kalkmergel, Ton und Sand hergestellt. Schädliche Chemikalien wie Formaldehyd oder Pilzgifte kommen nicht zum Einsatz.

Holzwole-Platten, die mit Zement als Bindemittel hergestellt wurden, sind wenig feuchteempfindlich, weshalb sie auch im Außenbereich, z. B. als Putzträger bei Fassaden, eingesetzt werden. Aufgrund des hohen Gewichts eignen sich die steifen WW-Platten auch als Wandbaustoff für schalldämmende Konstruktionen, aber auch bezüglich des vorbeugenden Brandschutzes finden solche Platten Verwendung (Zement oder Magnesit brennen nicht); eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten (F30) stellt kein Problem dar, da sie als schwer entflammbar (B1) eingestuft sind.

Bei der Herstellung von Holzwole-Platten wird aus den auf einen halben Meter abgelängten und luftgetrockneten Rundlingen in Holzwolemaschinen längstgehobelte, langfaserige Holzwole produziert. Diese wird in einem Mischer mit der Bindemittelsuspension (Magnesit oder Zement mit Wasser und Zusatzstoffen) innig vermischt und einer Einlegestation zugeführt. Dort werden sie in Formen eingestreut. Die automatisch gefüllten und gestapelten Formen werden nach der Stapelpresse mit einem Betongewicht beschwert und zur teilweisen Aushärtung zwischengelagert (Kaltabbindeverfahren). Danach erfolgt das Ausschalen der Platten mit nachfolgender Aushärtung im Trockenofen oder durch natürliche Trocknung. Nach kurzer Zwischenlagerung werden die Holzwole-Platten auf das genaue Maß zugeschnitten und eventuell farblich beschichtet oder anderweitig weiterbehandelt.

Holzwole-Platten stellen einen idealen ökologischen Dämmstoff dar, der folgende Eigenschaften in sich vereint:

- Nachhaltigkeit durch Verwendung nachwachsender Rohstoffe
- hohe Verfügbarkeit durch Verwendung heimischer Rohstoffe
- geringer Energieaufwand bei der Herstellung
- Vermeidung von Schadstoffemissionen bei der Herstellung, Verarbeitung und beim Gebrauch der Produkte
- Langlebigkeit des Produktes
- Rezyklierbar oder ökologisch unbedenkliche Entsorgung
- Resistent gegen tierische und pflanzliche Schädlinge (Zahlreiche Untersuchungen bzgl. des Widerstandes von WW-Platten gegen tierische und pflanzliche Schädlinge bestätigen die Resistenz der Platten).

Durch die laufend erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz und die Energieeinsparung bei Gebäuden haben die Holzwole-Leichtbauplatten mit einem Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit von 0,090 W/(m.K) in Konkurrenz mit Wärmedämmstoffen aus z. B. Mineralwolle zunehmend an Marktbedeutung verloren. Diese Einhaltung des Rechenwertes der Wärmeleitfähigkeit bereitete den Holzwole-Leichtbauplattenherstellern seit Jahren keine Probleme. Dies führte zu einem Stillstand in der Weiterentwicklung des Produktes. Dies geht auch aus der durchgeführten Literatursichtung hervor. Die letzte größere Forschungsarbeit wurde im Jahre 1957 von Kristen et al. [3] durchgeführt.

Es wurde beabsichtigt, mit diesem Projekt eine technologische Entwicklung herbeizuführen, die einen entscheidenden Beitrag zur Energiewirtschaft sowie zum Umwelt- und zum Klimaschutz leistet. Es wurde angestrebt, das Wärmedämmvermögen der Holzwolle-Platten durch Änderung der Zusammensetzung und des Gefüges und durch Änderung des Herstellungsverfahrens zu verbessern. Dabei sollte eine Holzwolle-Platte entwickelt werden, die eine Wärmeleitfähigkeit von maximal 0,05 W/(m.K) aufweist und trotz hohem Naturstoffanteil mindestens der Baustoffklasse A2 nach DIN 4102-1 [1] (nicht brennbar) genügt.

Entwicklung und Erprobung des neuen Dämmstoffes

In erster Linie war es vorgesehen, den Einfluss aus gewählten Einflussgrößen im Hinblick auf die Verbesserung der das Projektziel betreffenden Eigenschaften (Wärmedämmung, Brandverhalten) zu untersuchen. Dabei kamen moderne Analyse- und Untersuchungsmethoden zum Einsatz, unterstützt von Simulationsmethoden, die in der Hauptsache bei der Optimierung des Gefüges der Dämmplatte zum Zuge kommen. Es war beabsichtigt, ein Simulationsmodell zum Aufbau der Dämmplatte zu entwickeln, welches im Wesentlichen aus den Gefügeelementen Zementummantelung, Holzspäne und Hohlräume besteht. Darüber hinaus sollte berichtet werden, inwieweit die Vorhersagen, die anhand des Simulationsmodells hinsichtlich der Optimierung der Wärmedämmung gewonnen werden, bei der Produktion der Dämmplatte umgesetzt und bei der anschließenden Produktprüfung bestätigt werden können.

Die durchgeführten Berechnungen an dem gewählten Modell (Abbildung 1) wurden mit dem 2D-Simulationsprogramm BISCO von Physibel nach DIN EN ISO 10211-1 [4] durchgeführt. Mit der Simulation wurde der Einfluss der Dicke der Zementschicht und des Luftvolumenanteils des Modells auf die Wärmeleitfähigkeit untersucht. Mit verschiedenen Modellen wurde versucht, unterschiedliche Rohdichten der Holzwolle-Platten abzubilden.

Die Holzwolle-Teilchen, die typischerweise eine Länge von mehr als 8 cm, eine Breite von 3 bis 6 mm und eine Dicke von 0,2 bis 0,5 mm aufweisen, besitzen eine völlig unregelmäßige Geometrie und sind spröde. Diese Holzwolle-Teilchen, die man auch als Holzwolle-Späne bezeichnen kann, unterscheiden sich damit grundsätzlich von Fasern, die typischerweise sehr viel kürzer und dünner sind und meist eine Dicke von nur wenigen μm aufweisen.

Um das Wärmedämmvermögen des Dämmstoffs zu verbessern, wurde ein Gefüge-Modell des Dämmstoffs für die Simulation entwickelt. Zur Berechnung wurde ein symmetrisches Modell aus sechs idealisierten Holzfasern (siehe Abbildung 1, linkes Bild) verwendet und Parameterstudien für dieses Modell durchgeführt. Da sich die Längs- und Querstäbe der Holzspäne über dem gesamten Gefüge wiederholen, wurde hierfür eine halbe Spanbreite gewählt. Trotz dieser Überlegung war es schwierig eine Beziehung zwischen verwendetem Modell und den Messwerten der Holzwolle-Platten herzustellen.

Abbildung 1 zeigt das verwendete Modell (linkes Bild) und das Ergebnis (hier Temperaturverteilung, rechtes Bild) der durchgeführten Berechnungen.

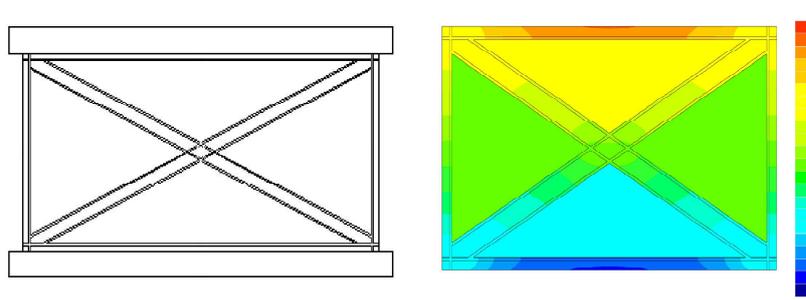


Abbildung 1: Gewähltes Simulationsmodell, das den Berechnungen zugrunde lag (linkes Bild) und Temperaturverteilung aus der Berechnung (rechtes Bild)

Die Temperaturverteilung (rechtes Bild) gibt die Ergebnisse der Berechnung für eine 0,4 mm dicke Holzfaser mit einer 0,006 mm dicken Zementummantelung wieder. Der sich einstellende Wärmestrom ergibt sich durch die aufgetragenen Temperaturen von oben nach unten.

Bei den Untersuchungen zeigte sich an Holzwolle-Platten, dass Faservolumen bzw. Faserdicke und Faserbreite keinen nennenswerten Einfluss auf das Wärmedämmvermögen haben. Der größte Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Holzwolle-Platten hat demnach das Bindemittel. Bei näherer Betrachtung des Simulationsmodells hängt die Wärmeleitfähigkeit außer von der Dicke des Zementsteins nur noch von dem Luftvolumenanteil ab. Je mehr Luftvolumenanteil im Modell ist, desto besser wird die Wärmeleitfähigkeit. Abhängig vom Luftvolumenanteil ändert sich die Rohdichte der zu betrachtenden Holzwolle-Platten.

Durch die Simulation konnten bei gleichbleibender Rohdichte verschiedene Wärmeleitfähigkeiten der Holzwolle-Platten abgebildet werden (Abbildung 2; M3-M7). Die Modellgeometrie spielt für die Wärmeleitfähigkeit eine wichtige Rolle. Obwohl die Rohdichte und der Luftvolumenanteil einiger simulierter Modelle (Abbildung 2; M3 bis M7 und M14 bis M18) konstant blieben, wurden mit der Änderung der Geometrie unterschiedliche Werte der Wärmeleitfähigkeit ermittelt (Abbildung 2).

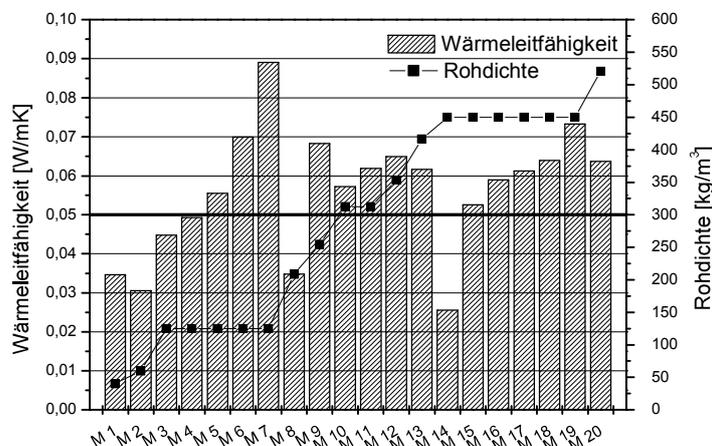


Abbildung 2: Ergebnisse der Simulation

Die Resultate der Berechnungen lieferten keine eindeutigen Werte der Wärmeleitfähigkeit. Die Rohdichte der Platten hängt von der Anordnung der Späne sowie der Verteilung und Größe der Hohlräume ab. Wenn die Gefügegeometrie sich ändert, ändert sich dementsprechend auch die Wärmeleitfähigkeit. Da die Holzwolle-Platten in ihrem Gefüge inhomogen sind und die Rezeptur der einzelnen Platten untereinander jeweils sehr verschieden ist, lässt sich die Wärmeleitfähigkeit der WW-Platten nicht als Funktion der Rohdichte darstellen. Die Anwendung bzw. Übertragung des Simulationsmodells auf die Holzwolle-Platten war somit nicht denkbar.

Das Bindemittel ist der wichtigste Ansatzpunkt für die Optimierung der Wärmeleitfähigkeit von Holzwolle-Platten. Daher wurden in der ersten Untersuchungsphase dieses Forschungsvorhabens folgende Bindemittel untersucht:

- Bindemittel auf Wasserglasbasis
- nur Zement als Bindemittel (Ausgangsmischung)
- Zement und Ton (der Zement soll anteilmäßig durch den Ton ersetzt werden)
- Zement und Silicastaub (besser ist die Verwendung von Silicaslurry)
- optimierte Rezeptur aus Zement mit Ton und Silicastaub

Aus den verschiedenen angegebenen Bindemitteln sollte sich im Hinblick auf die Optimierung der Wärmeleitfähigkeit und der Festigkeitseigenschaften (Druckfestigkeit und 10 % Druckspannung) ein optimales Bindemittel ergeben. Nachdem man ein optimales Bindemittel gefunden hatte, wurden verschiedene Holzwolle-Platten mit unterschiedlicher Rohdichte der reinen Holzwolle hergestellt. In der sich anschließenden Optimierungsphase entstand eine „Herstellrezeptur“ des Prototyps, so dass im nächsten Schritt die Umsetzung der Herstellung des Prototyps im Herstellwerk vollzogen werden konnte. Nach einer langen Reihe von Vorversuchen konnte eine Rezeptur für optimale Wärmeleitfähigkeit identifiziert werden. Es wurden Holzwolle, Weißzement, Anmachwasser und Zusätze für die Herstellung der Platten verwendet.

Die Holzwollespäne wurden am Anfang mit dem Anmachwasser, Zement und Zuschlägen separat in den Durchlaufmischer eingegeben und dort miteinander vermischt. Die Untersuchungen zeigten jedoch, dass eine optimale Ummantelung der Späne erst mit der späteren Zugabe der Zementschlämme zu realisieren ist. D.h. das Anmachwasser und der Zement werden in einem separaten Mischer zusammengemischt und erst danach in die Mischer zugegeben. Für die Serienproduktion wurde eine Einheit von unserem Kooperationspartner entwickelt und erfolgreich umgesetzt. Dadurch konnte eine Zementersparnis von ca. 20 % erzielt werden, ohne die Eigenschaften des Endprodukts zu verändern.

Bei Eingabe von speziellen Brandschutzmitteln in die Rezeptur der Holzwolle-Platten war das Abbindeverhalten der Holzwollespäne untereinander sehr schlecht. Daher wurden die Platten erst nach der Herstellung bzw. der Erhärtung mit einem speziellen Brandschutzmittel eingesprüht.

Die Holzwolle-Platten dürfen als Wärmedämmung entsprechend den Anwendungsgebieten nach der Norm DIN 4108-10 [5] und unter Beachtung der für die Baustoffklasse B1 nach DIN 4102-1 [1] bzw. unter Beachtung der für das Brandverhalten der Klasse B-s1,d0 nach DIN EN 13501-1 [6] (entspricht der nationalen bauaufsichtlichen Benennung „schwerentflammbar“) ver-

wendet werden. Dieses Projekt sah vor, dass das Brandverhalten optimiert, bzw. zumindest nicht verschlechtert wird.

Die Prüfungen des Brandverhaltens wurden immer erst dann durchgeführt, nachdem die Wärmeleitfähigkeit und die Druckfestigkeit bzw. Druckspannung bei 10 % Stauchung durch ein geeignetes Bindemittel hinreichend optimiert wurden. Bei den ersten Versuchen wurden Brandprüfungen im Brandschacht an Probekörpern durchgeführt (Bild 2, links), bei denen das Bindemittel gegenüber einer herkömmlichen Platte deutlich reduziert wurde. Die Reduzierung des Bindemittels hatte jedoch zur Folge, dass die hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit optimierten Holzwole-Platten nicht einmal die Baustoffklasse B1 nach DIN 4102-1 [1] erfüllten (Bild 2, rechtes Bild). Nach Abschluss der Brandprüfungen wurde zwar die Baustoffklasse B2 nach DIN 4102-1 [1] erfüllt, jedoch findet eine solche Platte kein Anwendungsgebiet mehr auf dem Dämmstoffmarkt.

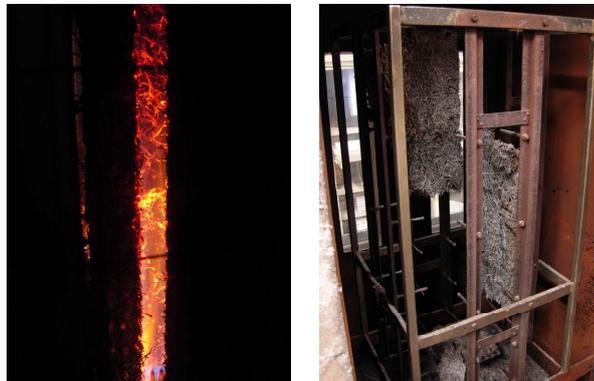


Bild 2 Prüfung im Brandschacht nach DIN 4102-1 [1]. Holzwole-Platten mit reduziertem Bindemittel. Das linke Bild zeigt die Holzwole-Platten während des Versuchs im Brandschacht. Das rechte Bild zeigt den zerstörten Probekörper unmittelbar nach dem Versuch im Brandschacht.

Vorversuche mit einem neuen, umweltfreundlichen und vom Hersteller patentierten Brandschutzmittel auf Phosphorsäurebasis (Prinzip Sauerstoffentzug) zeigten negative Auswirkungen auf das Abbindeverhalten.

In einer weiteren Optimierungsphase wurde ein neu entwickeltes Brandschutzmittel auf Phosphorsäurebasis bei der Herstellung des Bindemittelleims zugegeben. Die Zugabe des Brandschutzmittels hatte jedoch eine negative Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten der Holzwole-Platten. Auf der anderen Seite zeigte sich aber, dass bei der Zugabe des Brandschutzmittels die mit Bindemittelleim umhüllten Holzwole-Späne gegenüber herkömmlichen Holzwole-Spänen nicht mehr brennen bzw. glimmen.

In einem weiteren Versuch wurde das Brandschutzmittel durch nachträgliches Aufsprühen auf die hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit optimierten Holzwole-Platten aufgebracht. Das Bild 3 (links) zeigt ein deutlich verbessertes Brandverhalten der optimierten WW-Platte im Brandschacht gegenüber der Holzwole-Platte in Bild 2 (links)



Bild 3 Prüfung im Brandschacht nach DIN 4102-1 [1]. Holzwolle-Platten mit reduziertem Bindemittel und nachträglichem Aufsprühen des Brandschutzmittels. Das linke Bild zeigt die Holzwolle-Platte während des Versuchs im Brandschacht. Das rechte Bild zeigt den Probekörper unmittelbar nach dem Versuch im Brandschacht.

An den hinsichtlich Brandverhalten optimierten Holzwolle-Platten wurde nachträglich ein „Glimmen“ festgestellt. Weitere Untersuchungen stehen in der Zukunft noch aus, um auch das „Nichtglimmen“ der Holzwolle-Platten im Brandschacht zu optimieren.

Untersuchungen an hergestellten Platten und Herstellung des Prototyps

Nach Erkenntnissen aus der ersten Phase wurden die Holzwolle-Platten im Herstellwerk unseres Kooperationspartners hergestellt und auf die Materialeigenschaften untersucht. Dabei wurden an hergestellten Platten folgende Parameter bestimmt:

- Plattendicke ,
- Rohdichte nach Trocknung bei 60 °C bis zur Massenkonstanz,
- Wärmeleitfähigkeit bei einem mittleren Temperatur von 10 °C und
- Druckspannung bei 10 % Stauchung

Für alle hergestellten Holzwolle-Platten wurden eine Spanbreite von 2,5 mm und eine Spanstärke von 0,3 mm verwendet, da diese Abmessungen sich aus Untersuchungen als vorteilhaft erwiesen haben. Dies beruht auf einem Forschungsbericht des FIW München sowie der Ergebnisse der numerischen Berechnungen. Die Versuche zur Optimierung der Bindemittel bezüglich der Wärmeleitfähigkeit und des Druckverhaltens wurden daher mit dieser Spangeometrie durchgeführt.

Die Wärmeleitfähigkeit an Holzwolle-Platten wurde in einem Zweiplattengerät nach DIN EN 12667 [7] geprüft. Die Messungen wurden an getrockneten (bei 60 °C bis zur Massenkonstanz) Holzwolle-Platten durchgeführt. Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen in der Entwicklungsphase sind in Abbildung 3 dargestellt. Als Referenzprobe wird in erster Spalte die Norm-Platte mit der Bezeichnung „WW-EN 13168“ abgebildet.

Die Ergebnisse der ersten Untersuchungen zeigen (Abbildung 3), dass die angestrebten Wärmedämmwerte erreicht wurden. Es konnten viele Holzwolle-Platten unter dem Zielwert von 0,05 W/(m.K) hergestellt werden.

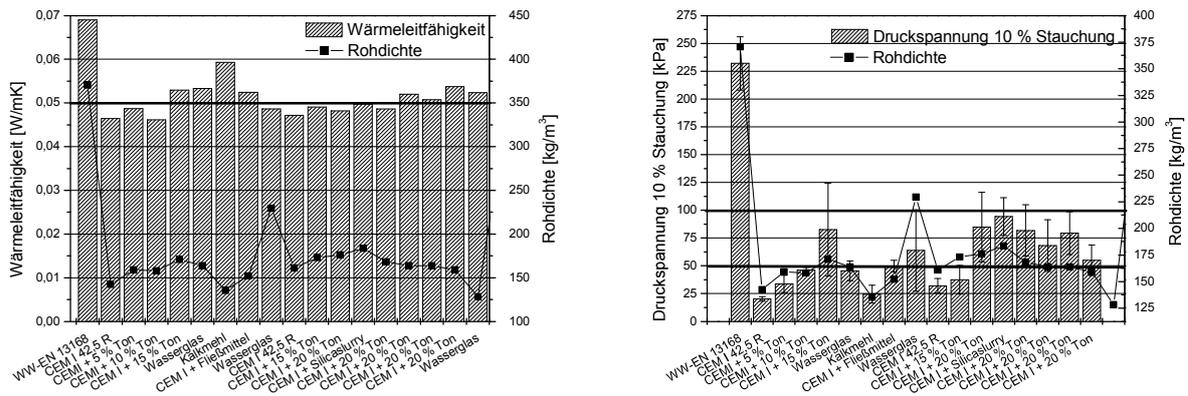


Abbildung 3: Ergebnisse aus der Entwicklungsphase

Die Druckspannungswerte lagen jedoch bei allen hergestellten Proben unter 100 kPa (Abbildung 3 rechts). Um ein verbreitetes Anwendungsgebiet zu erschließen, wurde in der zweiten Phase der Entwicklung versucht, die Materialeigenschaften der Holzwolle-Platten noch zu optimieren.

Die Änderung der Mischtechnik beim Einsatz von weniger Zementleim als Bindemittel führte zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit (bis zu einem Wert von 0,042 W/mK) im Vergleich zu herkömmlichen Holzwolle-Platten. Einbußen mussten hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, speziell bei der Anforderung Druckspannung bei 10% Stauchung, in Kauf genommen werden.

In Abbildung 4 werden die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen der in der Optimierungsphase hergestellten Holzwolle-Platten dargestellt. Die Probenbezeichnungen wurden von unserem Kooperationspartner übernommen und nach Herstellungsdatum (links nach rechts) abgebildet.

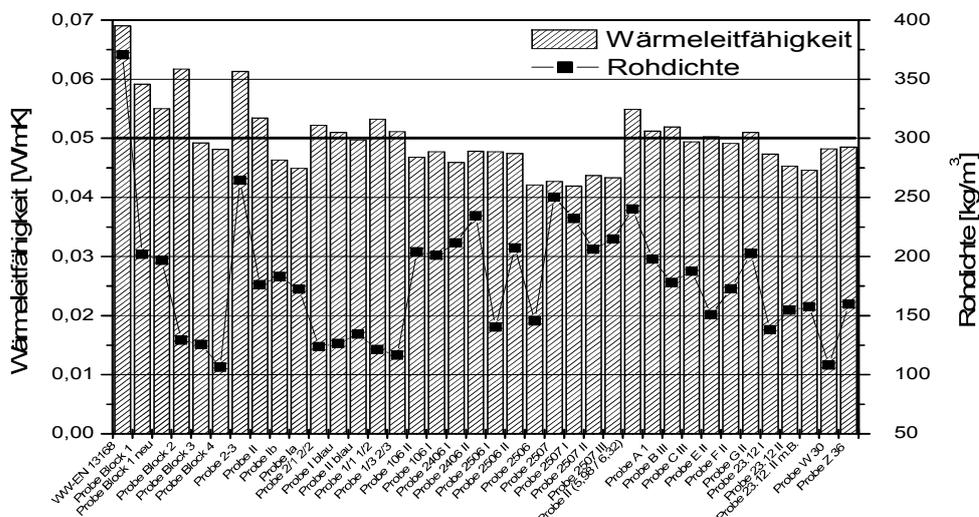


Abbildung 4: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen in der Optimierungsphase

Da die hergestellten WW-Platten in ihrem Gefüge inhomogen sind und die Rezeptur der einzelnen Platten unterschiedlich ist, ist ein Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit (siehe Abbildung 4) nicht zu erwarten. Die Rohdichte von Holzwolle-Platte ergibt sich aus der Menge der verwendeten Holzwolle und aus der Menge des verwendeten Zementleims. Eine Verringerung der Rohdichte der Holzwolle-Platte wurde meistens über den Einsatz von weniger Zement oder die Verwendung von Zement mit niedriger Rohdichte erreicht. Somit ist eine Rohdichte-Wärmeleitfähigkeit-Beziehung bei den hergestellten WW-Platten –wie bei anderen Dämmstoffen (EPS, XPS usw.)– nicht erkennbar.

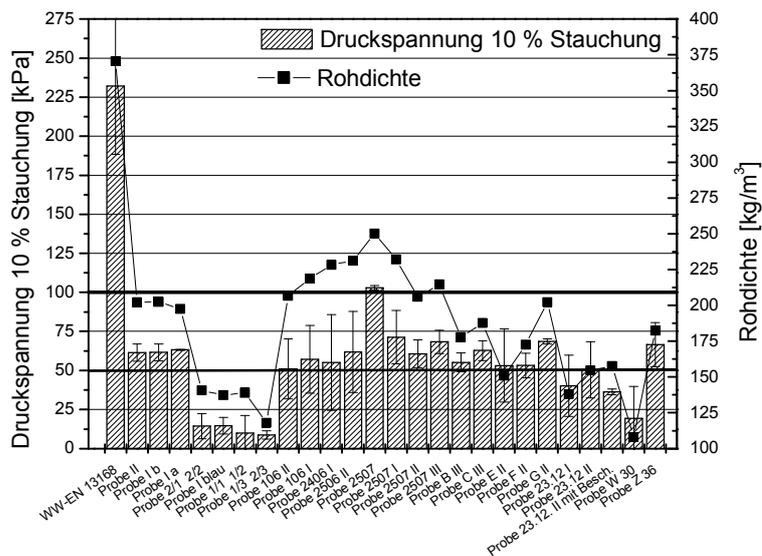


Abbildung 5: Ergebnisse der Druckfestigkeitsmessungen in der Optimierungsphase

Es wurden nur bei denjenigen Holzwolle-Platten Druckspannungswerte ermittelt, welche den Erwartungswert ($\lambda \leq 0,05 \text{ W/mK}$) der Wärmeleitfähigkeit besaßen (Abbildung 4). Von den geprüften Proben haben 25 Platten die Erwartungen an die Wärmeleitfähigkeit erfüllt. Dabei wurden jedoch niedrigere Druckfestigkeitswerte ($\leq 100 \text{ kPa}$) ermittelt (Abbildung 5).

Um ein verbreitetes Anwendungsgebiet zu erhalten, sollten die Holzwolle-Platten einen Druckspannungswert von mindestens 100 kPa aufweisen. Damit erfüllte nur die Holzwolle-Platte mit der Bezeichnung „Probe 2507“ die Anforderung hinsichtlich der Druckspannung. Daher wurde die Rezeptur dieser Platte für die Prototypenherstellung verwendet.

Fazit und Ausblick

Die wirtschaftliche Bedeutung des baulichen Wärmeschutzes in Gebäuden gewinnt immer mehr an Gewicht, da künftig mit wachsenden Energiekosten zu rechnen ist. Die mit der Energieerzeugung verbundene Entstehung von CO_2 -Emissionen ist allgemein zu reduzieren. Einen in zweierlei Hinsicht energieschonenden Effekt bietet der Einsatz von Wärmedämmstoffen aus Holz, da derzeit in der Industrie erhebliche Mengen an verwertbarem Spangut anfallen.

Es gibt eine Vielzahl von Dämmstoffanbietern, wobei der gesamte Marktanteil für Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen mit weniger als 5 % angegeben wird. Sie können jedoch erfolgreich mit mineralischen Dämmstoffen konkurrieren. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind auch vom ökologischen Standpunkt aus vorteilhaft. Sie enthalten weniger Zusatzstoffe, sie weisen ein niedriges Treibhauspotential auf, die Rohstoffe sind regional verfügbar und die Prozessketten sind kurz.

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erreichten Ergebnisse wurden im letzten Abschnitt erläutert. Die bisher hergestellten Holzwole-Platten mit einer mittleren Wärmeleitfähigkeit von 0,069 [W/mK] bei einer Mitteltemperatur von 10 °C wurden auf eine Wärmeleitfähigkeit von 0,05 [W/mK] optimiert. Ferner wurde das Herstellverfahren dahingehend optimiert, dass die Bindemittel und Zusatzstoffe als Suspension zugegeben wurden. Der Zielwert der Wärmeleitfähigkeit konnte durch Einbußen auf die Druckfestigkeit erreicht werden. Das Brandverhalten konnte durch das nachträgliche Aufbringen des Brandschuttmittels auf Phosphorsäurebasis durch Besprühen oder Eintauchen der optimierten Holzwole-Platte in der Art und Weise verbessert werden, dass trotz der geringeren Beileimung der Späne sich das Brandverhalten im Brandschacht gegenüber einer herkömmlichen Holzwole-Platte nicht verschlechterte.

Mit den angegebenen Eigenschaften erreicht die neu entwickelte Holzwole-Platte noch genügend Anwendungsgebiete nach DIN 4108-10 [5], die für den Erfolg dieses Produkts auf dem Markt maßgebend sind.

Die Markteinführung der neu entwickelten Dämmplatte aus Holzwole wird durch unseren Kooperationspartner erfolgen. Die Platten werden als neu entwickelte Baustoffreihe vertrieben. Das Produkt bzw. die Produktreihe soll vor allem in Deutschland und in Österreich, Schweiz, Frankreich und Italien vermarktet werden.

Mittlerweile liegt eine Zulassung (Z-23.15-1788) der hergestellten Holzwole-Platten bei unserem Kooperationspartner vor.

Literatur

- [1] DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen (Mai 1998); Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [2] DIN EN 13168: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzwole (WW) (Oktober 2001); Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [3] Kristen, Th.; Westhoff, W; Rüscher, H.; Stois, A.; Hierl, J.: Holzwole-Leichtbauplatten – Eigenschaften, Feuchtigkeits- und Frostbeanspruchung. Berlin 1957
- [4] DIN EN ISO 10211-1: Wärmebrücken im Hochbau; Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Teil 1; Allgemeine Berechnungsverfahren (November 1995); Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [5] DIN 4108-10: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe (Juni 2008); Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [6] DIN EN 13501-1 – Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten; Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten (Januar 2010); Beuth Verlag GmbH, Berlin

- [7] DIN EN 12667: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät (Mai 2001); Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [8] DIN V 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte (Juni 2007); Beuth Verlag GmbH, Berlin

Zum Einfluss der Carbonatisierung auf die Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Porenbetonplansteinen

Michael Stegmaier

Im Rahmen einer begrenzten Studie sollte der Einfluss der Carbonatisierung auf die Druckfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit von handelsüblichen Porenbetonplansteinen untersucht werden. Dazu wurden an aus ganzen Porenbetonplansteinen herausgearbeiteten Probekörpern die Druckfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen ermittelt und mit den von den Herstellern deklarierten Werten verglichen.

1 Anlass und Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Tastversuche war, den Einfluss unterschiedlicher Lagerungsbedingungen und hier insbesondere die Carbonatisierung, auf die Druckfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit von Porenbetonplansteinen üblicher Festigkeits- und Rohdichteklasse zu untersuchen. Die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen für Außenbauteile ist bei den heutzutage geltenden Anforderungen (Energieeinsparverordnung) von zentraler Bedeutung für Planer und Bauherren. In welchem Ausmaß sich die von den Herstellern zugesicherten Eigenschaften durch die Carbonatisierung verändern können, sollte im Rahmen dieser Versuchsreihe ermittelt werden.

2 Verwendetes Probenmaterial

Für die Untersuchungen wurden zwei Porenbetonplansteinsorten unterschiedlicher Hersteller verwendet. Gemäß der CE-Kennzeichnung der Hersteller handelt es sich dabei um einen Porenbetonplanstein der Festigkeitsklasse 2 und Rohdichteklasse 0,35 (PP2-0,35) und um einen Porenbetonplanstein der Festigkeitsklasse 3 und Rohdichteklasse 0,52 (PP3-0,52).

Der Porenbetonplanstein PP2-0,35 weist gemäß Herstellerdeklaration einen Wert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ von 0,085 W/(m·K) und der Porenbetonplanstein PP3-0,52 nach Herstellerangaben eine Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ von 0,112 W/(m·K) auf.

Von diesen Porenbetonplansteinen wurde im Baustoffhandel je eine vollständige Palette beschafft. Für die Prüfungen wurden aus den Steinen geeignete Probekörper herausgearbeitet.

3 Versuchsumfang und Versuchsdurchführung

3.1 Lagerungsbedingungen

An den beiden verschiedenen Porenbetonplansteinen wurden die Druckfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit im Anlieferungszustand, nach 120 Tagen Lagerung im Klima bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte, sowie nach 120 Tagen Lagerung bei 1 Vol.-% CO₂ und einer Temperatur von 20 °C ermittelt.

3.2 Ermittlung der Druckfestigkeit und Rohdichte

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit und Rohdichte wurden aus insgesamt 3 Plansteinen nach DIN V 4165-100 [1] je 3 Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm trocken herausgesägt. Bei der Auswahl der Porenbetonplansteine wurden Steine aus der Mitte der Palette entnommen, um den Feuchtegehalt, der bei Auslieferung der Steine vorhanden ist, bei den Probekörpern zu

erhalten und den Einfluss des Transports und der Lagerung bis zur Probenpräparation zu minimieren.

Die Ermittlung der Druckfestigkeit im Anlieferungszustand erfolgte unmittelbar nach dem Sägen der Würfel gemäß DIN V 4165-100 [1]. Der Feuchtegehalt der Porenbetonplansteine wurde nach der Druckprüfung durch Trocknung bei 40 °C bis zur Massenkonstanz ermittelt.

Die Probekörper für die Ermittlung der Druckfestigkeit nach 120 Tagen Lagerung im Klima bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte bzw. nach 120 Tagen Lagerung bei 1 Vol.-% CO₂ und einer Temperatur von 20 °C wurden unmittelbar nach dem Sägen in die entsprechenden Klimate eingelagert. Der Feuchtegehalt der Porenbetonplansteine wurde nach der Druckprüfung durch Trocknung bei 40 °C bis zur Massenkonstanz ermittelt.

Zur Prüfung der Konformität der Porenbetonplansteine mit den Herstellerangaben wurde zusätzlich die Druckfestigkeit bei einem Feuchtegehalt von 6 ± 2 M.-%. sowie die Rohdichte gemäß DIN V 4165-100 [1] ermittelt.

3.3 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12667 [2] wurden je Lagerungsart aus einem Stein, der aus der Mitte einer Palette ausgewählt wurde, je 2 Platten mit den Abmessungen von 200 x 200 x 30 mm³ herausgesägt.

Bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit im Anlieferungszustand wurden die Prüfkörper bis zur Prüfung der Wärmeleitfähigkeit mit mehreren Lagen HD-PE-Folie umwickelt, um den Feuchtezustand der Proben bis zur Prüfung zu erhalten.

Für die eigentliche Prüfung wurden die Probekörper dann mit einer dünnen Folie umwickelt, so dass während der Prüfung der Wärmeleitfähigkeit die Proben nicht austrocknen konnten. Der so ermittelte Wert entspricht somit der Wärmeleitfähigkeit des Steins im Anlieferungszustand. Im Anschluss an die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit wurde dann der Feuchtegehalt der Prüfkörper durch Trocknung bei 40 °C bis zur Massenkonstanz ermittelt.

Die Probekörper für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit nach 120 Tagen Lagerung im Klima bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte bzw. nach 120 Tagen Lagerung bei 1 Vol.-% CO₂ und einer Temperatur von 20 °C wurden unmittelbar nach dem Sägen in die entsprechenden Klimate eingelagert. Der Feuchtegehalt der Prüfkörper wurde nach der Wärmeleitfähigkeit durch Trocknung bei 40 °C bis zur Massenkonstanz ermittelt.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Druckfestigkeit

In der folgenden Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Druckfestigkeit und Rohdichte zusammengestellt. Zusätzlich sind die ermittelten Feuchtegehalte bei den verschiedenen Prüfungen angegeben.

Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Mittelwerte.

Tabelle1: Ergebnisse der Ermittlung der Druckfestigkeit und Rohdichte der untersuchten Porenbetonplansteine

		P2-0,35	P3-0,52
Deklarierte Werte der Hersteller			
Druckfestigkeit ¹⁾	[N/mm ²]	2,2 (Feuchtegehalt: 6 ± 2 M.-%)	3,0 (Feuchtegehalt: 6 ± 2 M.-%)
Rohdichte ¹⁾²⁾	[kg/m ³]	0,350	0,520
Messwerte nach DIN V 4165-100 [1]			
Druckfestigkeit ¹⁾³⁾	[N/mm ²]	2,77 (Feuchtegehalt: 6 ± 2 M.-%)	3,29 (Feuchtegehalt: 6 ± 2 M.-%)
Rohdichte ¹⁾²⁾	[kg/m ³]	0,320	0,530
Anlieferungszustand			
Druckfestigkeit ¹⁾	[N/mm ²]	2,25 (Feuchtegehalt: 32,1 M.-%)	3,17 (Feuchtegehalt: 46,4 M.-%)
Rohdichte ¹⁾²⁾	[kg/m ³]	0,32	0,49
120 Tage in 20/65			
Druckfestigkeit ¹⁾	[N/mm ²]	2,56 (Feuchtegehalt: 4,6 M.-%)	2,50 (Feuchtegehalt: 6,8 M.-%)
Rohdichte ¹⁾²⁾	[kg/m ³]	0,32	0,51
120 Tage in 1 Vol.-% CO₂			
Druckfestigkeit ¹⁾	[N/mm ²]	1,46 (Feuchtegehalt: 6,8 M.-%)	1,96 (Feuchtegehalt: 7,8 M.-%)
Rohdichte ¹⁾²⁾	[kg/m ³]	0,36	0,57
¹⁾ Mittelwert der Serie ²⁾ nach Trocknung bei 40 °C bis zur Massenkonstanz ³⁾ ermittelt am ganzen Stein, ohne Anwendung eines Abminderungsfaktors			

Die Überprüfung der deklarierten Werte durch die Normprüfungen nach DIN V 4165-100 [1] ergab, dass die Werte für die Druckfestigkeit und Rohdichte des PP2-0,35 eingehalten werden. Bei dem Porenbetonplanstein PP3-0,52 ist die deklarierte Druckfestigkeitsklasse eingehalten, die Rohdichteklasse wurde jedoch überschritten.

Im Anlieferungszustand liegen die mittleren Druckfestigkeiten beider Porenbetonsteinsorten trotz des hohen Feuchtegehaltes über dem deklarierten Wert. Nach 120 Tagen Lagerung in 20 °C und 65 % rel. Feuchte erreicht zwar der PP2-0,35 noch den deklarierten Mittelwert, der PP3-0,52 liegt mit im Mittel 2,5 N/mm² unter dem deklarierten Mittelwert.

Nach der Schnellcarbonatisierung liegen beide Sorten Porenbetonplansteine deutlich unterhalb der deklarierten Werte. Der PP2-0,35 liegt um rd. 34 % und der PP3-0,52 um rd. 35 % unterhalb des deklarierten Wertes der Hersteller.

4.2 Wärmeleitfähigkeit

In der folgenden Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit zusammengestellt. Zusätzlich sind die ermittelten Feuchtegehalte bei den verschiedenen Prüfungen angegeben.

Tabelle 2: Ergebnisse der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Porenbetonplansteine

		P2-0,35	P3-0,52
Deklarierte Werte der Hersteller			
Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]	0,085 ($\lambda_{10, tr}$)	0,112 ($\lambda_{10, tr}$)
Anlieferungszustand			
Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]	0,177 (Feuchtegehalt: 53,5 M.-%)	0,210 (Feuchtegehalt: 46,3 M.-%)
120 Tage in 20/65			
Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]	0,087 (Feuchtegehalt: 4,2 M.-%)	0,110 (Feuchtegehalt: 5,5 M.-%)
120 Tage in 1 Vol.-% CO ₂			
Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]	0,106 (Feuchtegehalt: 5,7 M.-%)	0,123 (Feuchtegehalt: 6,9 M.-%)

Im Anlieferungszustand sind die Wärmeleitfähigkeiten beider Porenbetonsteinsorten deutlich höher als der jeweils deklarierte Wert. Dies liegt an dem hohen Feuchtegehalt, mit dem die Porenbetonsteine ausgeliefert werden.

Nach 120 Tagen Lagerung in 20 °C und 65 % rel. Feuchte erreichen beide Steinsorten, unter Berücksichtigung der vorhandenen Feuchtigkeit in den Proben beim PP2-0,35, die deklarierten Werte. Bei den deklarierten Werten handelt es sich um Messwerte, die im trockenen Zustand ermittelt werden.

Die Messungen nach der Lagerung bei 120 Tagen in 1 Vol.-% CO₂ ergaben bei vergleichbaren Werten für den Feuchtegehalt wie bei der Lagerung für 120 Tage in 20 °C und 65 % rel. Feuchte höhere Werte für die Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit des PP2-0,35 liegt um rd. 25 % und die Wärmeleitfähigkeit des PP3-0,52 um rd. 10 % über den deklarierten Werten der Hersteller.

5 Zusammenfassung

An zwei verschiedenen Sorten Porenbetonplansteinen wurde die Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit im Anlieferungszustand, nach 120 Tagen Lagerung im Klima 20 °C und 65 % rel. Feuchte sowie nach einer Schnellcarbonatisierung für 120 Tage in 1 Vol.-% CO₂ und einer Temperatur von 20 °C ermittelt.

Die Wärmeleitfähigkeiten beider Porenbetonsorten sind im Anlieferungszustand rd. doppelt so hoch wie nach Lagerung für 120 Tage in 20 °C und 65 % rel. Feuchte (PP2-0,35: +103 %, PP3-0,52: +91 %). Nach dieser Lagerungsart der Prüfkörper wurde der deklarierte Wert der Wärme-

leitfähigkeit beim PP3-0,52 erreicht, die Wärmeleitfähigkeit des PP2-0,35 lag leicht über dem deklarierten Wert.

Die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit ist auf den deutlichen Rückgang der Feuchtigkeit der Proben innerhalb des Lagerungszeitraums von 120 Tagen zurückzuführen.

Auffallend ist, dass die Wärmeleitfähigkeiten der Proben, die für 120 Tage in 1 Vol.-% CO₂ gelagert wurden, bei beiden Porenbetonsorten höher sind, als nach Lagerung für 120 Tage in 20 °C und 65 % rel. Feuchte (PP2-0,35: +22 %, PP3-0,52: +12 %). Dieser Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit bei diesen unterschiedlichen Lagerungsarten ist durch den etwas höheren Feuchtegehalt sowie durch die Erhöhung der Porenbetontrockenrohichte durch die Schnellcarbonatisierung zu erklären.

Auch bei der Druckfestigkeit ist ein Unterschied zwischen den Werten nach 120 Tagen in 20 °C und 65 % rel. Feuchte im Vergleich zur Schnellcarbonatisierung vorhanden.

Bei beiden Porenbetonsorten ist die Druckfestigkeit nach der Schnellcarbonatisierung geringer, als nach Lagerung bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte. Die Druckfestigkeit des PP2-0,35 liegt nach der Schnellcarbonatisierung rd. 43 % unter dem Wert der Lagerung in 20 °C und 65 % rel. Feuchte. Beim PP3-0,52 beträgt der Unterschied rd. 22 %.

Dieser Rückgang der Druckfestigkeiten kann nicht auf einen Einfluss des Feuchtegehaltes bei der Druckprüfung zurückgeführt werden, da die Feuchtegehalte bei der Druckprüfung im Rahmen der zulässigen Feuchtigkeit von 6 ± 2 M.-%. nach DIN V 4165-100 [1] und somit vergleichbar hoch waren.

Der Feuchtegehalt eines Porenbetonplansteines beeinflusst dessen Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Mit sinkendem Feuchtegehalt steigt die Druckfestigkeit und sinkt die Wärmeleitfähigkeit. Dies bedeutet, dass sich diese beiden Eigenschaften des Porenbetons während der Nutzung durch das Austrocknen des Baustoffes positiv verändern. Das Austrocknen wiederum begünstigt die Carbonatisierung des Porenbetons. Die Untersuchungen an den geprüften Porenbetonplansteinen haben gezeigt, dass sich die Carbonatisierung sowohl negativ auf die Druckfestigkeit, als auch auf die Wärmeleitfähigkeit auswirkt und den positiven Effekt der Austrocknung auf diese Materialeigenschaften umkehrt.

Bei den hier dargestellten Versuchen handelt es sich um Tastversuche mit begrenztem Umfang im Labormaßstab. Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch, dass bei diesem Baustoff, der vor allem auch wegen seiner guten Wärmedämmeigenschaften bei Planern und Bauherren beliebt ist, durch die unvermeidliche Carbonatisierung des Porenbetons im Verlauf der Nutzung die tatsächlich vorhandenen Materialeigenschaften der Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit von den ursprünglich geplanten Werten deutlich abweichen können.

Literatur

[1] DIN V 4165-100– Porenbetonsteine – Teil 100: Plansteine und Planelemente mit besonderen Eigenschaften, Ausgabe: Oktober 2005

[2] DIN EN 12667 - Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und

dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswi-
derstand, Ausgabe Mai 2005

Qualitätsprüfung von Klebefugen in Brettschichtholz mittels Ultraschall

Simon Aicher, Gerhard Dill-Langer, Cyril Stritzke

Im Forschungsprojekt „Qualitätsprüfung von Klebefugen in Brettschichtholz mittels Ultraschall“ (Laufzeit 1.4.2008-30.6.2010) wurde ein zerstörungsfreies Verfahren zur Prüfung von Flächenverklebungen in Brettschichtholz (BSH) erforscht und entwickelt, das sowohl für die Qualitätssicherung bei der Herstellung von BSH-Bauteilen als auch für die Begutachtung bestehender BSH-Tragwerke geeignet ist.

Hintergrund des Forschungsprojektes

Die zunehmende Verwendung von Holz für tragende Anwendungen im Bauwesen ist eng mit der Entwicklung und Verbreitung von verklebten Holzbauteilen verbunden. Insbesondere durch den Einsatz von Brettschichtholz wurde die Dimensionsbegrenzung des natürlichen Materials Holz überwunden. In Faserlängsrichtung können im Prinzip beliebig lange Lamellen durch geklebte Keilzinkenstöße hergestellt werden. Aus den begrenzten Lamellenquerschnitten werden durch mehrfache Flächenverklebung Trägerbauteile mit Höhen von bis zu ca. 3 Metern gefertigt.

Der technische Fortschritt in der Technologie der Holzverklebung, wie z. B. die Reduzierung der notwendigen Klebstoffmenge, die deutliche Reduzierung der erforderlichen Verpress- und Abbindezeiten und die Einführung völlig neuer Klebstoffklassen, hat wesentlich zum stetigen Wachstum und zum wirtschaftlichen Erfolg der durchweg mittelständisch strukturierten Holzleimbauindustrie beigetragen. Die stark zunehmende Verbreitung des Holzleimbaus in Verbindung mit teilweise nicht unproblematischen neuen Anforderungen an die Kompetenz der Hersteller durch die genannten technologischen Innovationen der Verklebungs-Technologie führte in den vergangenen Jahren zu einer schleichenden Zunahme von Qualitätsproblemen und kleineren Schadensfällen.

Anlässlich eines großen und tragischen Schadensfalls im Januar 2006 (Einsturz des geklebten Holzdachtragwerks der Eislaufhalle von Bad Reichenhall) und weiterer in der Folge bekannt gewordener größerer Schadensfälle wird in der Öffentlichkeit und auch in Fachkreisen die Sicherheit und in diesem Zusammenhang auch die Qualitätssicherung der Verklebung tragender Holzbauteile neu diskutiert. Es ist in diesem Zusammenhang jedoch darauf hinzuweisen, dass die Flächenverklebungen in den Brettschichtholzelementen des komplex aufgebauten Holztragwerks der Eislaufhalle von Bad Reichenhall nicht schadensursächlich waren.

Im Zusammenhang mit diesen und anderen Schadensfällen wird in Frage gestellt, ob die bisher existierenden qualitätssichernden Maßnahmen bei der Herstellung von BSH-Flächenverklebungen wie u.a. detaillierte normative Regelungen der Herstellprozesse und die vorgeschriebene Eigen- und Fremdüberwachung mit zerstörender Prüfung von wenigen Stichproben zur Erzielung des notwendigen hohen Sicherheitsniveaus ausreichen.

Eine wesentliche Lücke bei der Qualitätssicherung von Brettschichtholz-Verklebungsfugen besteht nach überwiegender Meinung von Fachkreisen in dem Fehlen eines geeigneten (notwen-

digerweise zerstörungsfreien) Prüfverfahrens am fertigen Produkt, also an den Klebefugen des produzierten Brettschichtholzträgers.

Darüber hinaus besteht ein dringender Bedarf nach einem Prüfverfahren, welches zur Überprüfung von Klebefugen in bestehenden Brettschichtholztragwerken angewandt werden kann. Die Verfügbarkeit eines zuverlässigen und validierten Prüfverfahrens wie z.B. im Flugzeugbau wäre ein wichtiger Schritt für die Wiedergewinnung bzw. Erhöhung des Vertrauens von Bauherren und der Öffentlichkeit in die Qualität und Sicherheit der Verklebung von Holz für tragende Anwendungen.

Aufbauend auf einem vorangegangenen AiF-Projekt, das sich mit der zerstörungsfreien Detektion von Fehlverklebungen in geklebten Verbundbauteilen beschäftigte, standen für das Forschungsprojekt zur Prüfung der Flächenverklebungen ebenfalls die Anwendung und Weiterentwicklung von fortgeschrittenen Ultraschallmethoden im Mittelpunkt.

Das Ziel des Forschungsprojektes bestand in der Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens auf der Basis von Ultraschalltechnologien zur Qualitätsprüfung von Brettschichtholz-Flächenverklebungen, welches

- für typische, auch schwierig zu detektierende Fehlverklebungen geeignet ist,
- auch bei lediglich einseitigem Zugang zum Brettschichtholzbauteil einsetzbar ist,
- einfach und zuverlässig auch in kleinen und mittleren Produktionsbetrieben funktioniert und
- ebenfalls für die Beurteilung von BSH-Flächenverklebungen in bestehenden Bauwerken geeignet ist.

Die wesentlichen methodischen Ansätze und die Hauptergebnisse des Forschungsprojektes lassen sich in 6 Punkten zusammenfassen:

1. Praxisnahe Herstellung von Modellfehlverklebungen

Grundlage für die experimentellen Untersuchungen war die gezielte Herstellung modellhafter praxisnaher Fehlverklebungen in Brettschichtholz-Flächenverklebungsfugen. Entscheidend für den Erfolg und die Aussagekraft der mit den Modell-Fehlstellen gewonnen Erkenntnisse war die Produktion vollmaßstäblicher Probekörper unter industriellen Bedingungen in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten mittelständischen Unternehmen (kmUs) der Holzleimbauindustrie.

Für das Forschungsprojekt wurden insgesamt 26 großformatige Brettschichtholzbauteile untersucht, wobei neben nominell fehlerfreien Referenzprüfkörpern folgende Fehlstellentypen realisiert wurden:

- durchgehenden Bereiche ohne Klebstoffauftrag
- einseitig bzw. beidseitig geschlossene Bereiche ohne Klebstoffauftrag
- Bereiche mit Klebstoffauftrag, jedoch mit untermaßigen Lamellenstärken

Für die unterschiedlichen Fehlstellentypen wurden außerdem die Parameter Fehlstellen-Breite und -Länge gezielt variiert.



Bild 1 Brettschichtholzlamelle vorbereitet für Herstellung einer Modellfehlstelle: Übergang zwischen einem Abschnitt ohne Klebstoffauftrag und dem daran anschließenden ordnungsgemäß beleimten Abschnitt

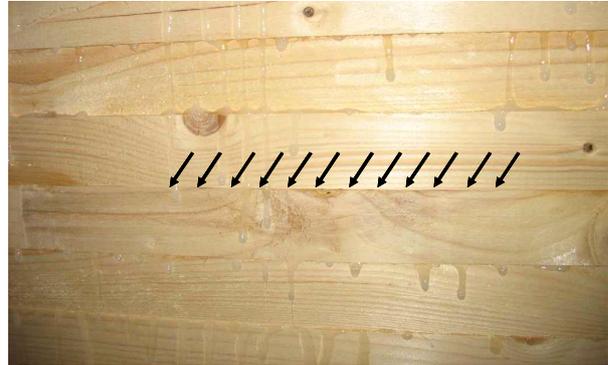


Bild 2 Herstellung eines Brettschichtholzprüfkörpers mit einer Modellfehlstelle (abschnittsweise fehlender Klebstoff): Seitenansicht des in der Presse befindlichen Trägers mit Markierung des Fehlstellenbereiches

2. Erfolgreiche Anpassung von Ultraschallmethoden

Zur Anpassung an den anisotropen Werkstoff Brettschichtholz in Bauteilabmessungen und an die spezielle Problematik der Verklebungs-Fehlstellendetektion wurden ausgehend vom Forschungsantrag zwei Strategien – die Verwendung von Clustersensoren und die Schrägeinstrahlung des Ultraschalls – überprüft. Die Verwendung von Cluster-Prüfköpfen in Verbindung mit einer neu eingeführten sogenannten „Pre-Scan“-Anordnung der Sensoren stellte sich als der entscheidende Verbesserungsschritt der Prüfmethodik heraus.

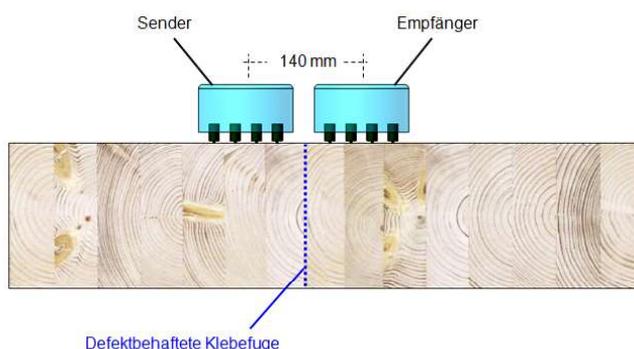


Bild 3 Prinzipskizze der Anordnung der Ultraschall-Clustersensoren bei der Echo-Messung



Bild 4 Photo der Ultraschall-Clustersensoren in Echo-Anordnung und der Pulser-/ Receiverinheit

3. Detektion einfacher und komplexer Fehlstellen

Mittels der optimierten Prüfmethodik konnten zunächst einfache, in den weiteren Projektschritten dann auch abgestufte und komplexe Fehlverklebungen in Brettschichtholz-Flächenverklebungsfugen detektiert und hinsichtlich ihrer Dimensionen bestimmt werden. Für

manche Fehlstellentypen genügen ein einseitiger Zugang zum Bauteil und vereinfachte Prüf-schemata, für andere Fehlstellen waren aufwändigere Techniken, z. B. die Kombination von Cluster-Prüftechnik mit Schrägeinstrahlung des Ultraschalls einzusetzen.

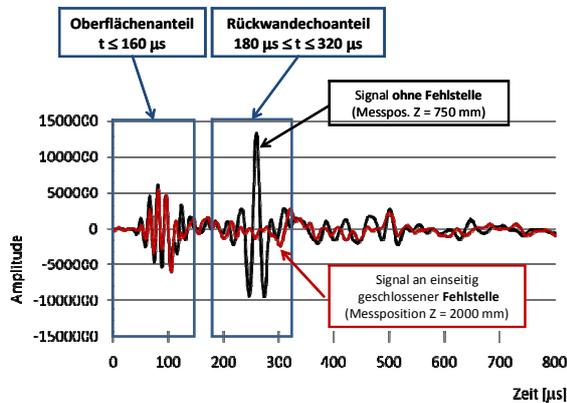


Bild 5 Beispiel für Einzelsignale der Echomesung an einem Referenzprüfkörper ohne Fehlstelle und einem Prüfkörper mit einseitig geschlossener Fehlstelle

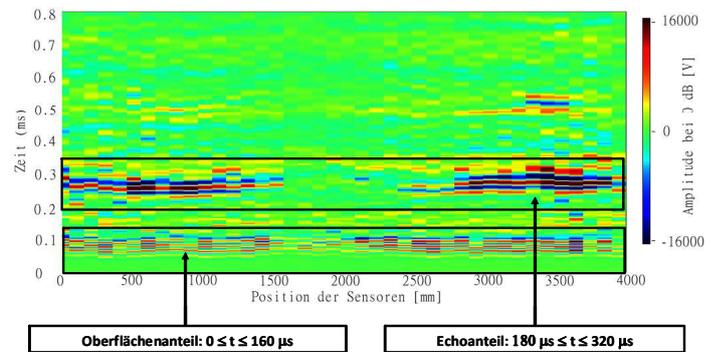


Bild 6 Beispiel eines B-Scans der Echo-Messung an einem Prüfkörper mit einseitig geschlossener Fehlstelle

4. Bestimmung der Verfahrensgrenzen

Durch Variation der Parameter wie z.B. Länge und Breite der Fehlstelle wurden die Grenzen des Prüfverfahrens quantitativ bestimmt. Es wurde des Weiteren festgestellt, welche Fehlstellenarten prinzipiell mittels des Ultraschall-Prüfverfahrens detektierbar sind. Es stellte sich zudem heraus, dass das Verfahren außer für die Detektion von Fehlverklebungen auch zur Vermessung (verdeckter) Risse potentiell gut geeignet ist.

In den Bildern 7 und 8 wird exemplarisch anhand normierter Amplitudenverläufe aus Echomesungen verdeutlicht, dass mit dem Verfahren relative Fehlstellenbreiten ab ca. 25% und Fehlstellenlängen ab ca. 300 mm detektierbar sind

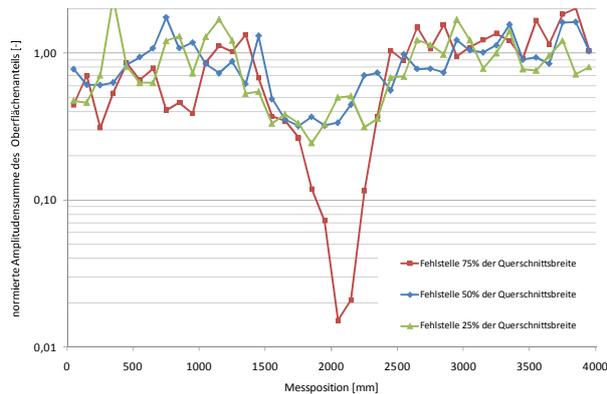


Bild 7 Vergleich des Verlaufs der normierten Amplitudensummen (Oberflächenanteil bei Echo-Messungen) für Fehlstellen unterschiedlicher relativer Breite

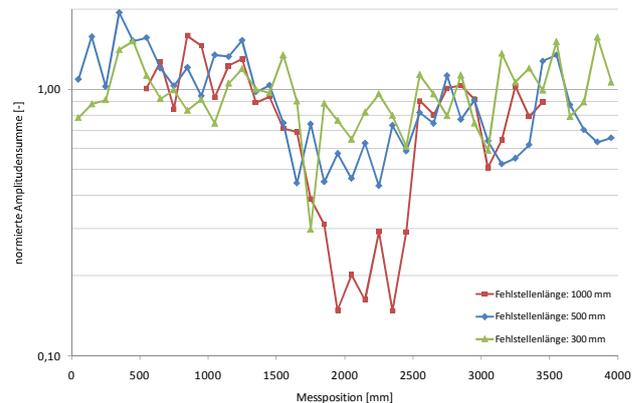


Bild 8 Vergleich des Verlaufs der normierten Amplitudensumme (Transmissionmessungen) für Fehlstellen unterschiedlicher Länge

5. Erstellung und Kalibrierung eines Finite-Element-Rechenmodells

Der vom wissenschaftlichen Standpunkt aus wichtigste Schritt des Projektes war die erfolgreiche Erstellung, Kalibrierung und Validierung eines Rechenmodells zur Simulation der Ultraschallausbreitung in Brettschichtholz mit und ohne Fehlverklebungen. Die Herausforderung bei der Modellierung bestand darin, die besonderen Anforderungen des anisotropen Materials, der niederfrequenten Ultraschallanregung und der nicht reduzierbaren 3-Dimensionalität der Problemstellung mit einem kommerziellen Programmcode und beherrschbaren Rechenzeiten zu erfüllen.

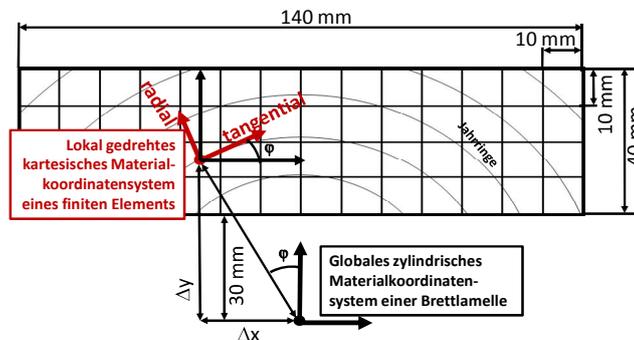


Bild 9 Diskretisierung der Querschnittsfläche einer Brettschichtholzlamelle mit Zuordnung des lokalen orthorhombischen Materialverhaltens zum jeweiligen wuchsbedingt zylindrischen Materialkoordinatensystem

Mit dem gewählten Finite-Element-Ansatz und impliziter Zeitintegration gelang es, ein im Sinne der vorstehend genannten Randbedingungen geeignetes Rechenmodell zu erstellen und die wichtigsten Parameter – insbesondere hinsichtlich der Dämpfungseigenschaften – an speziellen Versuchsdaten zu kalibrieren. Die Simulations-Ergebnisse für modellierte Fehlstellen wurden anhand von Vergleichen mit den empirischen Ergebnissen für entsprechende reale Fehlstellen validiert.

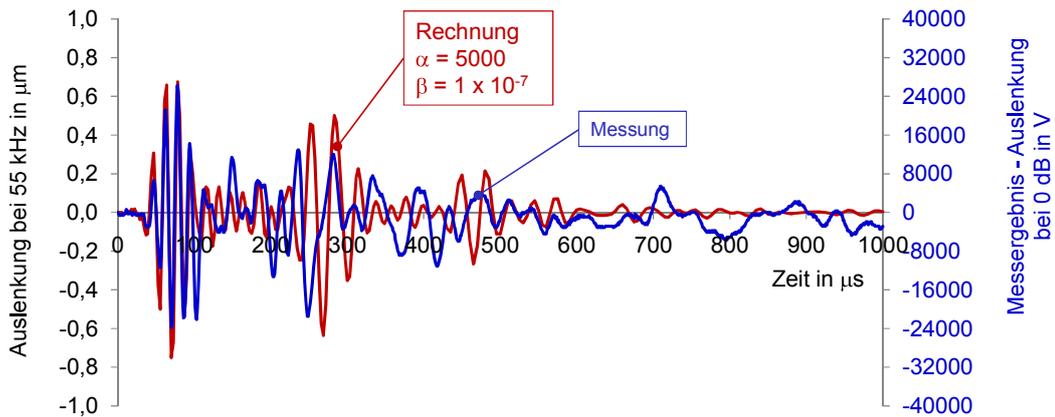


Bild 10 Vergleich der Signalformen eines berechneten und eines gemessenen Ultraschallsignals bei Echo-Anordnung der Cluster-Prüfköpfe

6. Anwendungen des validierten Rechenmodells

Anhand des entwickelten Rechenmodells war es zum einen möglich, das Verständnis für die Mechanismen der Störung der Wellenausbreitung durch Fehlstellen erheblich zu verbessern und damit in einem Rückkopplungsschritt u. a. die Versuchsanordnungen für die Strategie der Schrägeinstrahlung zu optimieren. Zum anderen steht mit dem Rechenmodell nunmehr ein Tool für die Vorhersage der Reichweite des Prüfverfahrens außerhalb der vorliegenden beschränkten empirischen Datenbasis zur Verfügung.

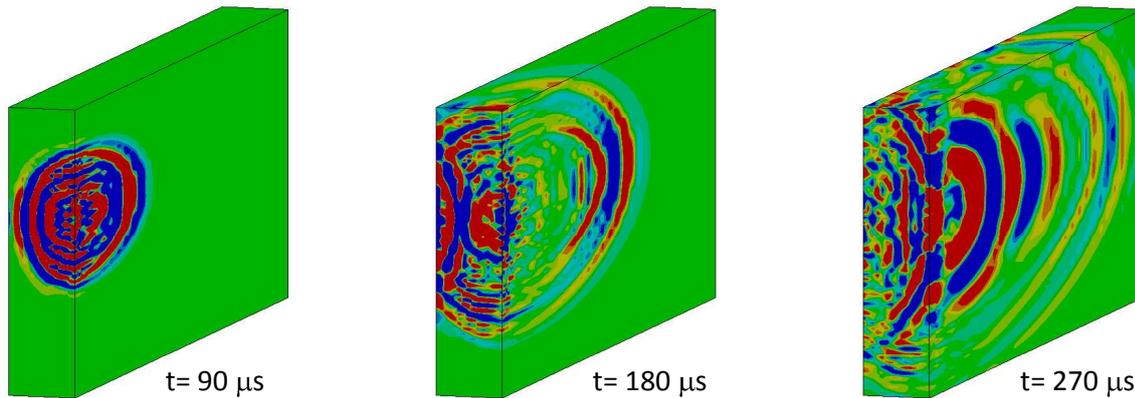


Bild 11 Ergebnisse der Modellierung der Ultraschallausbreitung in Brettschichtholz ohne Fehlverklebung (Anregung in Echo-Anordnung). Dargestellt ist die Hälfte des Prüfkörpers mit Schnitt durch die Mittelebene bzgl. der Längsrichtung

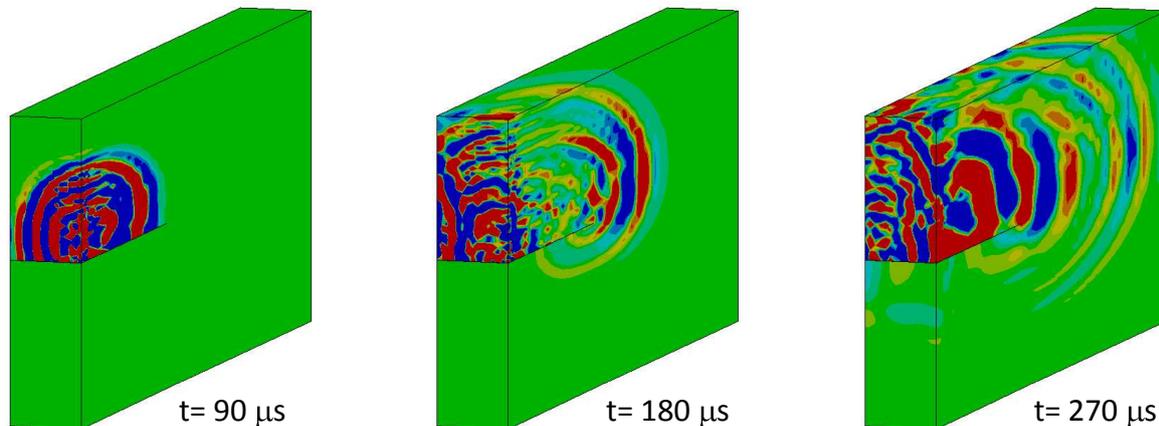


Bild 12 Ergebnisse der Modellierung der Ultraschallausbreitung in Brettschichtholz mit einer einfach durchgehenden Fehlverklebung (Anregung in Echo-Anordnung). Dargestellt ist die Hälfte des Prüfkörpers mit Schnitt durch die Mittelebene bzgl. der Längsrichtung. Die modellierte Fehlstelle ist durch eine schwarze Linie markiert

Fazit

Insgesamt wurden alle Ziele des Forschungsprojektes in den wesentlichen Punkten erreicht, das heißt:

Es wurden in dem Forschungsprojekt alle notwendigen experimentellen und rechnerischen Elemente eines zerstörungsfreies Prüfverfahrens auf der Basis von Ultraschalltechnologien zur Qualitätsprüfung von Brettschichtholz-Flächenverklebungen entwickelt, welches

- für einfache und einige komplexere Fehlverklebungen geeignet ist,
- in vielen Fällen auch bei lediglich einseitigem Zugang zum Brettschichtholzbauteil einsetzbar ist,
- das Potential hat, aufgrund der begrenzten Anschaffungskosten einfach und zuverlässig auch in kleinen und mittleren Produktionsbetrieben zu funktionieren und das
- aufgrund der Portabilität ebenfalls für die Beurteilung von BSH-Flächenverklebungen in bestehenden Bauwerken geeignet ist.

Die optimierten Verfahrensschritte des Ultraschall-Prüfverfahrens wurden bereits während des Forschungsprojektes zur Begutachtung des Zustandes von Brettschichtholz-Bauteilen in bestehenden Gebäuden erfolgreich eingesetzt, so dass der erste Anwendungszweck bereits in Einzelfällen umgesetzt werden konnte. Dem Einsatz auch bei der Produktion von Brettschichtholzträgern durch KmUs steht prinzipiell nichts im Wege und ist im Sinne einer Pilotanwendung in näherer Zukunft zu erwarten.

Neben der Erreichung wesentlicher Ziele bleiben auch einige offene Fragen wobei ein weiterer nachstehend genannter Forschungsbedarf festzustellen ist.

- Zu den wichtigsten offenen Forschungsthemen gehört eine variabelere und realitätsnähere Fehlstellenmodellierung. Ein wichtiger Schritt hierzu besteht in der Einführung von Kontaktelementen zu Erzeugung von Fehlstellenabschnitten mit lokaler Übertragung von Druckkräften aber ohne Übertragung von Zugkräften. Scherkräfte müssten dann über einen Reibungsterm gesteuert werden. Die Nutzung von Kontaktelementen mit vielfältiger Steuerung der Kontakteigenschaften ist in dem verwendeten FEM-Programm ANSYS vorgesehen, führt jedoch zu noch längeren Rechenzeiten durch die Einführung einer lokalen Materialnichtlinearität. Des Weiteren wäre eine unabhängige Kalibrierung der Kontaktparameter vorzunehmen und die Zeitschritte an die Konvergenzbedingungen anzupassen.

- Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Anpassung und Optimierung von Clusterprüfköpfen speziell für die Anwendung auf Holz und Brettschichtholz. Die vorhandenen im Projekt eingesetzten Cluster-Prüfköpfe wurden ursprünglich für die Echo-Prüfung von Beton entwickelt und erreichen aufgrund der von Beton abweichenden Wellenlänge in Holz nicht alle gewünschten Eigenschaften. Im Zusammenhang mit der Erzielung z.B. eines möglichst ebenen Wellenfeldes sollte neben der geometrischen Anordnung der Einzelsensoren im Cluster auch die gezielte Phasensteuerung der Sensoranregung geprüft werden. Durch diese Maßnahmen könnten voraussichtlich sowohl die Reichweiten der Ultraschalldurchdringung als auch der Fehlstellenkontrast erhöht werden.

- Für einen praxisnäheren Einsatz des Messkonzeptes sind Forschungsarbeiten zur (Halb-) Automatisierung des Abscannens der Holzoberflächen anzustreben. Hierbei sollten sowohl einfache mechanische Systeme (z.B. mit rotierenden Sensoren) als auch weitergehende Konzepte mit der Anwendung von Robotertechnik untersucht werden.

Literatur

- [1] Sandoz, J.L.: Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology 23, 1989, S. 95-108
- [2] Kessel, M. H., Plinke, B., Augustin, R., Huse, M.: Strength grading of construction timber with large cross sections. Proc. 5th World Conf. on Timber Eng., Vol 1, Montreux, 1998, S. 557-562
- [3] Patton-Mallory, M., De Groot, R. C., Acousto-Ultrasonics for Evaluating decayed Wood Products. Proc. 2nd Pacific Timber Eng. Conf. 1989, Oakland, Vol.2, S. 185-190
- [4] Bucur, V.: Nondestructive Characterisation and Imaging of Wood, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2003

- [5] Neum, U.: Ein Prüfverfahren auf Ultraschallbasis zur Lokalisierung äußerlich nicht erkennbarer Holzschädigung. Diss. Bergische Universität Wuppertal, 1990
- [6] Kimura, M., Kusunoki, T., Ohta, M., Hatanaka, K., Kozuka, H., Ito, H.: Ultrasonic pulse test on glulam glued connection. Proc. Int. Timber Eng. Conference, Vol 2, London, 1991, S. 2.250-2.257
- [7] Klingsch, W., Weber, W.: Erarbeitung anwendungstechnischer Grundlagen zur zerstörungsfreien Qualitätsüberwachung von Holzleimbauteilen mittels Ultraschall. Forschungsbericht Bergische Universität Wuppertal, 1991
- [8] Klingsch, W.: Zerstörungsfreie Lokalisierung äußerlich nicht sichtbarer Holzschädigungen mittels Ultraschall. Bauen mit Holz 6, 1989, 421 f.
- [9] Bisks A.S., Green Jr. R.E., McIntyre P. (Hrsgb.). Non-destructive testing handbook, Ultrasonic testing, 2.Aufl., Bd. 7, American Society for Non-destructive Testing (ASNT), 1991
- [10] Deutsch, V., Platte, M., Vogt, M.: Ultraschallprüfung – Grundlagen und industrielle Anwendung. Berlin, Heidelberg, 1997
- [11] D. J. Hagemai: Adhesive-bonded joints. in: ASTM Handbook Nondestructive Evaluation and Quality Control, 9. edition, USA, 1996, S. 610-640
- [12] Beal, F. C.: Overview of acousto-ultrasonics applied to wood and wood-based materials. In: Proc. 2nd Int. Conf. on Acousto-Ultrasonics, Atlanta. The American Soc. for Nondestructive Testing, 1993, S. 153-161
- [13] Bucur, V. Acoustics of wood, CRC Press, 1995, Boca Raton, New York, London
- [14] Bucur, V.: Ultrasonic Energy Flux Deviation and Off-Diagonal Elastic Constants of Wood. Proc. 13th Int. Symposium on Nondestructive testing of wood. Berkley, USA, 2002, S. 273ff
- [15] Berndt, H., Schniewind, A.P., Johnson, G. C.: Ultrasonic energy propagation through wood: where, when, how much. Proc. 13th Int. Symposium on Nondestructive testing of wood, Sopron, Ungarn, 2000, S. 57-65
- [16] Krause, M., Mielentz, Milmann, Wiggerhauser, Müller, Schmitz: Ultrasonic image of concrete members using an array system. NDT & E International 34 (6), 2001, S. 403-408
- [17] S. Aicher, G. Dill-Langer: Zerstörungsfreie Detektion von Fehlverklebungen bei geklebten Holzbauteilen, Schlussbericht des AiF-Vorhabens No. 13856, Laufzeit 2004 bis 2006, MPA Universität Stuttgart, 2006
- [18] G. Dill-Langer, W. Bernauer, S. Aicher (2005): Inspection of glue-lines of glue-laminated timber by means of ultrasonic testing. Proc. Int. Conf. Non-destructive Testing of Wood, Hannover, S. 47-60
- [19] G. Dill-Langer, S. Aicher, W. Bernauer: Reflection measurements at timber glue-lines by means of ultrasound shear waves. Otto-Graf-Journal, Vol. 16, MPA, Universität Stuttgart, 2005, S. 273-284
- [20] Aicher, S., Höfflin, L., Dill-Langer, G.: Damage Evolution and Acoustic emission of wood at tension perpendicular to fiber. Holz Roh- Werkstoff 59, 2001, S. 104-116
- [21] Hasenstab, W.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren, Diss., Fakultät VI, TU Berlin, 2006

- [22] Y. He, D. Manful, A. Bárdossy, G. Dill-Langer, S. Aicher, T. Ringger: De-Noising of Ultrasound Signals of Non-Destructive Testing Based on Fuzzy Logic. Otto-Graf-Journal, Vol. 15, MPA, Universität Stuttgart, 2004, S. 103-119
- [23] Y. He, D. Manful, G. Dill-Langer, A. Bárdossy, S. Aicher: Application of Fuzzy Logic to signal processing of ultrasound measurements. Proc. Int. Conf. Non-destructive Testing of Wood, Hannover, 2005, S. 275-286
- [24] Cohen, A.: Wavelets and multiscale signal processing. Chapman and Hall, 1995
- [25] Ruck, H.-J., Reinhardt, H.-W.: Anwendung der Wavelet-Transformation in der Signalanalyse. In: Virtuelle Instrumente in der Praxis. 1. Aufl. Heidelberg, Hüthig, 2002, S. 92-97.
- [26] Höfflin, L., Aicher, S.: Wave velocities in the radial-tangential growth plane of spruce and beech. Proc. Int. Conf. Wood and Wood fiber composites, Universität Stuttgart, 2000, S. 291-302
- [27] Stössel, R.: Air coupled ultrasound inspection as a new non-destructive testing tool for quality assurance, Diss., Fakultät Maschinenbau, Universität Stuttgart, 2004
- [28] Grosse, C. U, Wanner, A., Kurz, J. H., Linzer, L. M.: Acoustic Emission. in: Damage and its evolution in fiber-composite materials – simulation and non-destructive evaluation. Hrsgb.: Busse, G., Kröplin, B.-H., Wittel, F. K., ISD-Verlag, Universität Stuttgart, 2006
- [29] Ansys Manual, Theorie Reference, Release 5.6, 1999

Veröffentlichungen

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt sind bisher in vier Tagungsbeiträgen veröffentlicht worden:

- [30] G. Dill-Langer, S. Aicher (2009): Qualitätsprüfung von Brettschichtholz-Klebefugen mittels Ultraschall. Tagungsband Dechema: Tagung des gemeinsamen Ausschusses Klebtechnik (GAK) am 11.2.2009 in Frankfurt / M.
- [31] G. Dill-Langer, S. Aicher (2009): Zerstörungsfreie Detektion von Fehlstellen in tragenden Holz-Klebefugen. Beitrag zum Institutsseminar IZFP Saarbrücken, 8.6.2009
- [32] G. Dill-Langer, S. Aicher (2010): Qualitätsprüfung von Brettschichtholz-Klebefugen mittels Ultraschall. Tagungsband Dechema: Tagung des gemeinsamen Ausschusses Klebtechnik (GAK) am 23.2.2010 in Frankfurt / M.
- [33] G. Dill-Langer, C. Stritzke (2010): Modellierung der Ausbreitung niederfrequenter Ultraschallwellen im zylindrischen anisotropen Werkstoff Holz und die Anwendung auf die zerstörungsfreie Prüfung von Brettschichtholz. ANSYS Conference & 28th CADFEM Users' Meeting, November 3-5, 2010 in Aachen.

5 Dissertationen

Mischungsentwurf und Fließeigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung

Kurzfassung der Dissertation von Andreas Huß

Der Schwerpunkt der Dissertation liegt in der Untersuchung der Fließeigenschaften von SVB vom Mehlkorntyp. Wie aus den durchgeführten Untersuchungen hervorgeht, sind die Fließeigenschaften dieser SVB maßgeblich von der Leimmenge (Feststoffe $\leq 0,125$ mm, Flüssigkeiten und Luft) und den granulometrischen Eigenschaften der verwendeten Gesteinskörner $> 0,125$ mm abhängig. Da die in der Literatur beschriebenen Zusammenhänge zwischen der im SVB vorhandenen Leimmenge und der Verarbeitbarkeit bisher nicht oder nur ansatzweise im Hinblick auf die Granulometrie der Gesteinskörnung untersucht wurden, sind die erarbeiteten theoretischen und praktischen Forschungsergebnisse ein Novum. Mit dem in Bild 1 veranschaulichten erweiterten Modell der Leimschichtdicke (eMLSD) wurde ein Modell für SVB mit beliebig geformten Gesteinskörnungen in Anlehnung an die „Excess Paste Theory“ von KENNEDY entwickelt und durch Untersuchungen an Korngemischen sowie durch SVB-Versuche verifiziert.

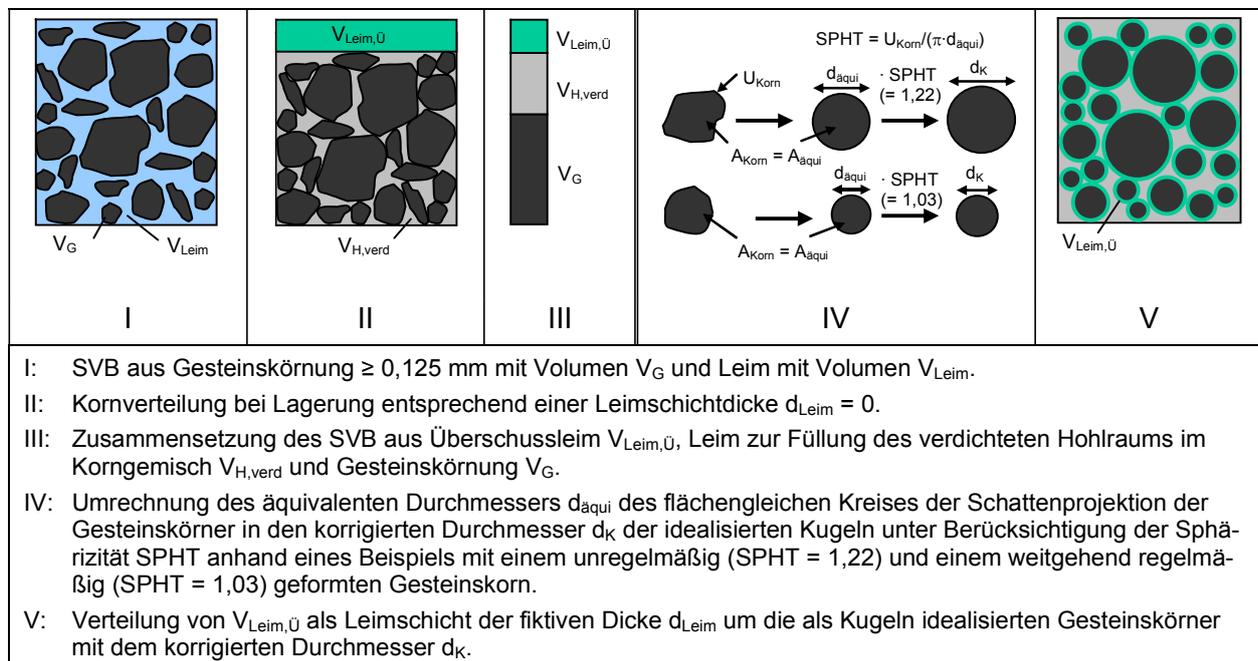


Bild 1: Erweitertes Modell der Leimschichtdicke (eMLSD) – modellhafte Betrachtung von SVB mit beliebig geformten Gesteinskörnern und Überführung der Körner in Kugeln

Bei der Modellbildung wird für die Überführung von irregulär geformten Gesteinskörnern in idealisierte Kugeln der mittels der fotooptischen Kornformanalyse bestimmte Sphärizitäts-Index (SPHT) zur Beschreibung der Kornform verwendet. Des Weiteren wird bei der Modellvorstellung die im SVB vorliegende Leimmenge in den Anteil zur Füllung des Hohlraumes zwischen den

Gesteinskörnern bei einer Leimschichtdicke $d_{\text{Leim}} = 0$ und den Überschussleimanteil zur Separierung der Gesteinskörner durch die Leimschicht unterteilt.

Da die praktische Umsetzung dieser Modellvorstellung mit den bekannten Prüfungen und Berechnungen zur Packungsdichte sowie zur spezifischen Oberfläche von Korngemischen nicht möglich ist, wurde zudem ein Verfahren zur Bestimmung des Hohlraum- und des Überschussleimgehaltes entwickelt. Bei dem Verfahren wird direkt das zur Herstellung von SVB vorgesehene Korngemisch mit einer Korngröße $> 0,125$ mm geprüft. Diese Prüfung wird als Korngemisch-Prüfung (KGP) bezeichnet. Dabei ist die Lagerung der Gesteinskörner des homogenisierten Korngemisches entsprechend der im SVB vorliegenden Anordnung ausschlaggebend. Der mit der KGP bestimmte Hohlraumgehalt wurde als Hohlraumgehalt bei einer Leimschichtdicke $d_{\text{Leim}} = 0$ betrachtet. Zusammen mit der als Sphärizitäts-Index charakterisierten Kornform des Korngemisches und der aus der Stoffraumrechnung resultierenden Leimmenge kann somit die im realen SVB vorhandene Leimschichtdicke berechnet werden.

Der entscheidende Unterschied zwischen der KGP und den u.a. von DE LARRARD, KOEHLER, MARQUARDT oder WÜSTHOLZ im Zusammenhang mit SVB angewendeten Verfahren zur Hohlraumbestimmung des Korngemisches liegt darin, dass das Korngemisch bei der KGP nicht im trockenen sondern im angefeuchteten Zustand in das Prüfgefäß (vgl. Bild 2) eingefüllt wird.



Bild 2: Prüfgefäß für die KGP (links: unmaßstäbliche Skizze des Längsschnitts mit Auflast für die Verdichtung; Mitte: Einzelteile; rechts: Gefäß mit Korngemisch)

Auch bei der anschließenden Verdichtung bei der KGP bestehen wesentliche Unterschiede zu anderen Methoden. So verwendet beispielsweise WÜSTHOLZ das Volumen eines lose geschütteten Korngemisches zur Bestimmung des mit Leim zu füllenden Volumens im SVB, KOEHLER das Volumen eines durch Stochern verdichteten Korngemisches und MARQUARDT das Volumen des bei Vibrationsverdichtung mit Auflast unter Wasser verdichteten Korngemisches. Auch das von DE LARRARD angewendete Verfahren zur Bestimmung der Packungsdichte als Eingangsgröße zur Berechnung der virtuellen Packungsdichte mittels des „Compressible Packing Models“ nutzt die Vibrationsverdichtung mit Auflast. Allerdings werden dabei trockene Einkornschüttungen aus enggestuften Kornfraktionen geprüft. Bei keinem der erwähnten

Verfahren wird explizit versucht, die Gesteinskörner des Korngemisches entsprechend der Situation im SVB anzuordnen. Dies ist nur bei dem hier entwickelten Verfahren der KGP der Fall.

Des Weiteren wird bei der KGP mit dem vom Korngemisch adhäsiv gebundenen Wasser ein granulometrischer Kennwert für die Gesteinskörner bestimmt. Anhand der durchgeführten Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass dieser Kennwert von der Kornform und von der Kornzusammensetzung abhängig ist. Durch die hohe Trennschärfe der KGP war eine klare Differenzierung sowohl zwischen den unterschiedlichen Kornformen der im Korngemisch vorhandenen groben Gesteinskörnungen als auch zwischen Korngemischen derselben Gesteinskörnungen aber verschiedenen Kornzusammensetzungen erkennbar. Das adhäsiv gebundene Wasser wird im Rahmen der Auswertung der KGP als Wasseranteil des zur Separierung der Gesteinskörner im SVB benötigten Leims betrachtet und zusammen mit dem Wasser-Mehlkorn-Verhältnis des Leims für die Berechnung des erforderlichen Überschussleimanteils herangezogen. Aus dem Hohlraumgehalt des Korngemisches und dem erforderlichen Überschussleimgehalt ist es somit möglich, den zur Herstellung von SVB erforderlichen Leimgehalt zu bestimmen. Durch die integrale Erfassung des im Korngemisch adhäsiv gebundenen Wassers werden dabei auch indirekt die für den Leimbedarf relevanten granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörner, bzw. des damit zusammengesetzten Korngemisches, berücksichtigt. Damit steht mit dem Verfahren der KGP eine Methode zur Bestimmung der Volumenanteile der Gesteinskörnung, des Leims zur Füllung des Hohlraums und des Überschussleims zur Verfügung. In Bild 3 ist ein Beispiel für die theoretischen Volumenanteile des Überschussleims (\ddot{U}), des Hohlraums (H) und der Gesteinskörnung (G) in Abhängigkeit vom Wasser-Mehlkorn-Verhältnis im Leim angegeben.

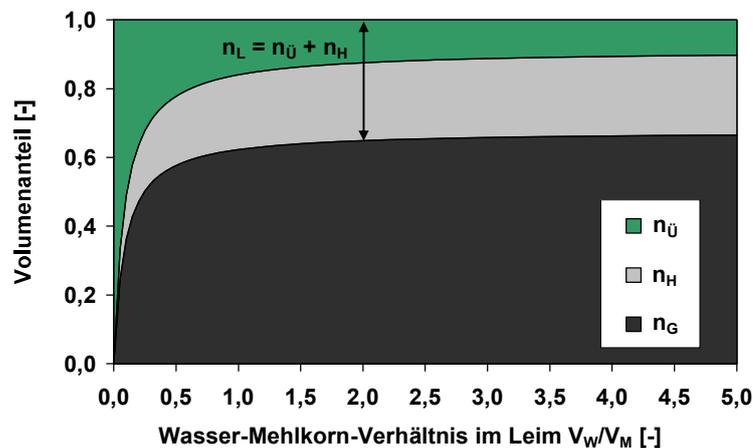


Bild 3: Beispiel für die theoretischen Volumenanteile im SVB in Abhängigkeit vom Wasser-Mehlkorn-Verhältnis im Leim, berechnet mit dem Verfahren der KGP

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass bei einem Leimgehalt in der mit dem Verfahren der KGP bestimmten Größenordnung praxisgerechte SVB-Mischungen hergestellt werden können. Durch die Verwendung von Gesteinskörnungen, die hinsichtlich der Kornform an der oberen (Gemisch mit Kies und Natursand) als auch an der unteren (Gemisch mit Splitt und Brechsand aus Quarzporphyr) Grenze innerhalb der Regeln-

forderungen nach DIN 1045-2 lagen, besitzen die vorliegenden Ergebnisse eine hohe Aussagefähigkeit. Damit steht mit dem Verfahren der KGP erstmals ein Verfahren zur Konzeption von SVB-Mischungen auf Grundlage der bekannten Stoffraumrechnung zur Verfügung.

Aus den vorliegenden Forschungsergebnissen lassen sich zwei unterschiedliche Mischungskonzepte, zum einen mit dem eMLSD und zum anderen mit dem Verfahren der KGP, ableiten. Der Ansatz mit dem eMLSD ist als visionär zu bezeichnen, da das hierfür erforderliche Gerät zur fotooptischen Kornformanalyse i.d.R. nicht in einem Betonlabor verfügbar ist und zudem die Berechnung der Packungsdichte derzeit noch keine Praxisrelevanz besitzt. Der Ansatz mit dem Verfahren der KGP ist aufgrund der mit einfachen Mitteln zu realisierenden Untersuchungsmethode und der direkten Prüfung des zur Herstellung von SVB vorgesehenen Korngemisches als äußerst praxisgerecht einzustufen. Die Anwendbarkeit dieses Mischungskonzeptes konnte zudem exemplarisch im Rahmen eines Praxistests in einem Betonwerk bestätigt werden.

Neben dem Ziel, die granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen theoretisch und praktisch in die Mischungskonzeption einzubinden, werden auch Ansätze zur Optimierung des Bindemittelleims im Laborversuch sowie ein Verfahren zur Bestimmung des erforderlichen Wassergehaltes von SVB-Mischungen mittels der Leistungsmessung aufgezeigt.

In einem weiteren Kapitel der Arbeit konnte der grundlegende Zusammenhang zwischen dem Fließverhalten von SVB beim Setzfließversuch und der im Rheometer (BTRHEOM) bestimmten plastischen Viskosität aufgezeigt werden. Mit dem aus der Fließkurve beim Setzfließversuch abgeleiteten Setzfließzeitkoeffizient b steht somit ein neuer Kennwert zur Beschreibung der plastischen Viskosität von SVB zur Verfügung. Damit ist es möglich, praxisgerechte Prüfgeräte auf Basis des bewährten Setzfließversuches zu entwickeln. Der Vorteil dieser Prüfgeräte gegenüber Rotations- oder Platten-Rheometern besteht neben der praxisgerechten Umsetzung auch in der Möglichkeit, das Fließverhalten von SVB unter Einbeziehung der durch den Blockiering simulierten Bewehrung zu untersuchen.

Die Anwendung des Verfahrens der KGP auf SVB-Mischungen vom Kombinations- oder Stabilisierertyp war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Allerdings ist davon auszugehen, dass bei diesen Typen die Gefügestabilität aufgrund der Verwendung von stabilisierenden Zusätzen weniger kritisch als bei SVB vom Mehlkorntyp ist und somit die vorliegenden Erkenntnisse übertragbar sind. Inwiefern dabei höhere Wasser-Mehlkorn-Verhältnisse und demzufolge geringere aus dem Verfahren der KGP resultierende Überschussleimgehalte realisiert werden können, ist durch weitere Forschung zu klären.

6 Kooperationen

Wissenschaftliche Kooperation zwischen der MPA Universität Stuttgart, dem Bhaba Atomic Research Center (BARC) in Mumbai und dem Indira Gandhi Center for Atomic Research (IGCAR) in Kalpakkam

Mit der Unterzeichnung eines „Memorandum of Understanding“ bekräftigt die Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart ihre langjährige Kooperation mit Forschungsinstituten in Indien und in Japan.

Mehr als zehn Jahre arbeitet die MPA bereits mit dem Bhaba Atomic Research Centre (BARC) in Mumbai und dem Indira Gandhi Center for Atomic Research (IGCAR) in Kalpakkam zusammen. In dieser Zeit haben es die deutschen und indischen Forscher es geschafft, die Komponenten kerntechnischer Kraftwerke wesentlich sicherer zu machen und entsprechende Sicherheitsregeln aufzustellen. Am 6. Januar 2010 bekam die internationale Zusammenarbeit mit dem „Memorandum of Understanding“ einen offiziellen Charakter.

Reaktorsicherheit im Blick

Um die kerntechnischen Kompetenzen an Forschungseinrichtungen und Hochschulen zu erhalten und auszubauen, haben die deutschen Kernkraftwerksbetreiber E.ON Kernkraft, RWE Power, EnBW Kernkraft und Vattenfall Europe Nuclear Energy Kooperationsabkommen mit drei Forschungseinrichtungen, darunter der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart geschlossen. Das Programm mit einer Gesamtfördersumme von rund 6,5 Millionen Euro erstreckt sich auf die Bereiche Simulationsmethoden, Neutronik/Thermohydraulik, Werkstoffverhalten sowie auf die Analyse internationaler Forschungsergebnisse.

An der MPA werden insbesondere Themen im Zusammenhang mit dem Einfluss des Werkstoffes auf die Sicherheit von Komponenten und Systemen bearbeitet. Ziel ist die Qualifizierung und Charakterisierung des Werkstoffverhaltens in modernen, hocheffizienten Kraftwerkssystemen zur Bewertung von Lebensdauer und Sicherheit.

Bereits im vergangenen Jahr schloss die MPA einen Kooperationsvertrag mit dem Fachverband der Strom- und Wärmeerzeugung VGB Powertech, durch das der Erkenntnis- und Wissenstransfer aus der anwendungsorientierten Wissenschaft in die technische Praxis strukturiert und intensiviert werden soll. Die Arbeitsfelder umfassen die Erstellung von Konzepten und Methoden zur sicherheitstechnischen Bewertung und zum Lebensdauermanagement von Anlagen und die Zulassung und Qualifizierung von Werkstoffen und Schweißverfahren sowie von Dichtverbindungen für fossile und nukleare Kraftwerke sowie für regenerative Kraftwerkstypen wie Wasser- und Windkraftwerke.

7 Veranstaltungen und Auszeichnungen

36. MPA-Seminar

Traditionelle Plattform zum Gedanken- und Erfahrungsaustausch

Bereits zum 36. Mal fand vom 7. bis 8. Oktober das traditionelle MPA-Seminar statt, zu dem ca. 200 Teilnehmer anreisten, darunter auch zahlreiche ausländische Gäste aus acht verschiedenen Ländern.

Ihnen wurden zahlreiche interessante Vorträge aus dem Themenbereich „Werkstoff- und Bauteilverhalten in der Energie- und Anlagentechnik“ geboten. Sie deckten das gesamte Themenfeld ab, das sich mit dem Einsatz und Verhalten von Werkstoffen und Komponenten unter betrieblichen Beanspruchungen sowie deren Herstell- und Verarbeitungstechniken im gesamten Bereich der Energie- und Anlagentechnik befasst.

Erstmals fand im Rahmen des diesjährigen MPA-Seminars und zum ersten Mal in Deutschland der 7. „Indo-German“ Workshop zum Thema „Structural Integrity of Pressure Retaining Components“ statt. Diese Workshopreihe startete im Jahr 2002 und dient der Präsentation und Diskussion der Ergebnisse im Rahmen der Kooperationen mit indischen Institutionen, die seit 1999 auf dem Gebiet der Sicherheitsforschung für Kraftwerke bestehen.

Im Anschluss an den ersten Seminartag bekam H. S. Kushwaha vom Bhabha Atomic Research Centre (BARC), Mumbai, Indien, die Carl-von-Bach-Gedenkmünze überreicht. Sie wird an Persönlichkeiten verliehen, die sich um die „Stärkung von Forschung, Entwicklung und Lehre“ auf dem Gebiet der Materialprüfung und Festigkeitsberechnung im Bach’schen Sinne in Verbindung mit der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart verdient gemacht haben.

Herr Kushwaha war der Initiator der sehr erfolgreichen Kooperation mit Indien und war wesentlich an dem Fortbestand beteiligt.



H. S. Kushwaha, Prof. E. Roos

Den traditionellen abendlichen Empfang in der Mensa nutzten die Teilnehmer, um den fachlichen Austausch zu intensivieren, die Zusammenarbeit zu vertiefen und die persönlichen Kontakte zu pflegen.

Guter Ausbildungsstandard an der MPA

Der gute Ausbildungsstandard an der MPA wurde durch die Belobigung von **Frau Yvonne Evelyn Rohm**, Auszubildende Baustoffprüferin, bestätigt. Sie hat am 30. Juni 2010 mit sehr guten Resultaten ihre Abschlussprüfung als Baustoffprüferin, Schwerpunkt Geotechnik, abgelegt und erhielt für diese sehr gute Leistung eine Belobigungsurkunde sowie einen Preis von der IHK Region Stuttgart, Bezirkskammer Ludwigsburg.

8 Gastwissenschaftler

Name	Land/	Zeitraum
Abdelhalim, M.	Ägypten	12.04.-11.10.10
Abd El Malak, S.	Ägypten	13.04.-31.07.10
Ahmed, A.M., Dr.	Ägypten	01.11.-30.11.10
Albert, S.K., Dr.	Indien	22.06.-17.09.10
Chattopadhyay, J., Dr.	Indien	06.06.-30.06.10
El Batanouny, M., Dr., Frau	Ägypten	01.07.-31.08.10
Elkady, M.	Ägypten	13.04.-31.07.10
Gupta, Suneel Kumar	Indien	01.08.-31.10.10
Kain, V., Dr.	Indien	04.10. - 08.10.10
Khan, I.A. Mr.	Indien	04.10. - 08.10.10
Kushwaha, H.S.,Dr.	Indien	04.10. - 08.10.10
Moussa, N.	Ägypten	13.04.-31.07.10
Rastogi, R.	Indien	01.06.-30.06.10
Simatos, A., Fr.	Frankreich	15.02.-31.03.10
Vaze, K.K.	Indien	04.07.10-07.07.10

9 Vorträge

Auch in 2010 fanden im Rahmen des MPA-Ingenieurkolloquiums wieder zahlreiche Vorträge statt, die bei internen und externen Zuhörern großes Interesse fanden.

Dipl.-Ing. Daniel Krätschmer, Referat Schweiß- und Fügesimulation, MPA Universität Stuttgart:

„Konzeption und Anwendung eines stochastischen Mikrorisswachstumsmodells auf Basis einer Markov-Kette“, 12.01.2010

Prof. Dr.-Ing. Johannes Wilden, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fachgebiet Füge- und Beschichtungstechnik, TU Berlin:

„Synergie von Werkstoff- und Prozesstechnik – Schlüssel zu neuen Füge- und Beschichtungstechnologien“, 02.02.2010

Prof. Michael Todd, Dept. Structural Engineering, University of California San Diego (UCSD), USA:

“Structural Health Monitoring: A Paradigm for Promoting Reliability-Driven Life Cycle Management”, 17.09.2010

Professor Shaofang Gong, Chair professor in communication electronics, Linköping University, Sweden:

“Culture Bee – Wireless Data Monitoring and Control System Applied to Cultural Buildings”, 25.10.2010

Mr. Suneel Gupta, Safety Division, Bhaba Atomic Research Centre (BARC), Mumbai, Indien:

“Fatigue Investigations under Complex Multiaxial Load Conditions”, 25.10.2010

10 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 Motorentchnik

3 Verfahrenstechnik
4 Technologiemanagement

5 Technikpädagogik
6 Erneuerbare Energien

7 Technische BWL
8 Commas

Vorlesungsangebot des IWB (Fakultät Umwelt- und Bauingenieurwissenschaften)



11 Veröffentlichungen

Aicher, S.: Process Zone Length and Fracture Energy of Spruce Wood in Mode-I from Size Effect. Wood and Fiber Science, Vol. 42 (2010), No. 2, pp. 237-247.

Aicher, S. and G. Stapf: Fatigue Behaviour of Finger Jointed Lumber. CIB – W18 Meeting 43, August 22-26 (2010), Nelson, New Zealand, pp. 1-17.

Altpeter, I., K. Szielasko, G. Dobmann, H. Ruoff und D. Willer: Auswirkungen betrieblicher Alterungsprozesse auf Ermüdungslebensdauer und Werkstoffzähigkeit des niedrig legierten Stahls WB 36. Abschlussbericht Reaktorsicherheitsforschung - Vorhabensnummer 150 1311, Berichts-Nr. 090116-TW, Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZfP) Saarbrücken und Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), 74 S.

Bauer, M., E. Roos, A. Klenk and K. Maile: Investigation on the High Temperature Behaviour of Welded Martensitic Joints. Engineering Fracture Mechanics 77 (2010), pp. 3000 – 3010.

Baumann, O., K.-H. Herter, U. Schirmer und X. Schuler: Bewertung von Druckprüfungen mit „erhöhtem“ Prüfdruck bei Müllheizkraftwerken. VGB PowerTech 90 (2010) H. 7, S. 56-63.

Berger, C, E. Roos, E. Affeldt, J.-M. Rudnig, F. Müller, A. Scholz, M. Speicher und A. Klenk: Rissverhalten von Nickelbasis-Gusslegierungen mit unterschiedlicher Kornstruktur. Zwischenbericht über das Vorhaben Nr. 962 (AIF-Nr. 15626). Informationstagung Turbomaschinen der FVV am 15. April 2010 in Bad Neuenahr, Heft R550, S. 7-34.

Berger, C., E. Roos, J. Rudnig, F. Müller, A. Scholz, M. Speicher, A. Klenk, E. Affeldt und R. Teetz: Rissverhalten von Nickelbasis-Grundlegierungen mit unterschiedlicher Kornstruktur. Abschlussbericht über das Vorhaben Nr. 962 „Rissverhalten / Kornstruktur“, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), Heft 914 (2010), 183 S.

Büttner, M., E. Roos, M. Seidenfuß and X. Schuler: Crack Propagation in Dissimilar Welds. Proceedings of the 18th European Conference “Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale”, August 30 – September 03 (2010), Dresden, Germany. CD-ROM, Topic C: “Applications to Components and Structures”. C.04.1-3 Fracture of Weldments, Joints and Adhesives.

Das, C.R., J. Swaminathan, S.K. Albert, A.K. Bhaduri, B. Raj, B.S. Murty and A. Klenk: Improving Type IV Cracking Resistance of P91 Steel Through Addition of Boron. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Diburg, B., A. Jüngert und C. Grosse: Praxiseinsatz innovativer Inspektionstechniken und Prüfverfahren in einer linersanierten, begehbaren Prüfstrecke. Teil 3: Einsatz der Wärmefluss-Thermographie und des Ultraschall-Echo-Verfahrens sowie Bewertung der getesteten zerstörungsfreien Prüfverfahren. 3R International 49 (2010), H. 1, S. 48-55.

Dill-Langer, G., C. Russelli, S. Aicher: Enhanced reliability of finger-joints by means of advanced proof loading. World Conference of Timber Engineering, June 20-24 (2010), Riva del Garda, Italy., Book of Abstracts, pp. 119-120.

Dugan, S. und S. Zickler: Herstellung von Festkörpern mit realistischen Fehlern für die Ultraschallprüfung. DGZfP-Jahrestagung, 10. – 12. Mai 2010 in Erfurt.

Gehlen, C., S. Kessler und K. Menzel: Potentialfelder: Analyse und Auswertung. Fachtagung Bauwerksdiagnose, 18. – 19. Februar 2010 in Berlin.

Grosse, C.: Ultrasound Testing for Early Age Quality Control of Concrete. Proceedings of the 13th International Conference on Structural Faults & Repair, June 15-17 (2010), Edinburgh, Scotland.

Grosse, C. und M. Krüger: Dauerüberwachung von Bauwerken des Kulturerbes. Fachtagung Bauwerksdiagnose, 18. – 19. Februar 2010 in Berlin.

Grosse, C., S.D. Glaser and M. Krüger: Initial Development of Wireless Acoustic Emission Sensor Motes for Civil Infrastructure State Monitoring. Smart Structures and Systems, Vol. 6 (2010), No. 3, pp. 197-209.

Grüner, F.: Münster Salem, Nordquerhausfassade. Projekt „Langzeitverhalten von Maßnahmen zur Beseitigung anthropogener Umweltschäden an bedeutenden Kulturdenkmälern“. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring, Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Hrsg.: M. Auras, J. Meinhardt, R. Snethlage, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-8407-4.

Grüner, F., W. Bucher und F. Eger: Grenzen und Möglichkeiten der Natursteinkonservierung am Beispiel des grünen Schilfsandsteins vom Kapellenturm in Rottweil. In Tagungsband Natursteinsanierung Stuttgart 2010 „Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen“, 26. März 2010 in Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-8407-4.

Herter, K.-H. X. Schuler and J. Bartonicek: Basic Principles for the Life Time of Mechanical NPP Components and System. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Huß, A. und K. Fischer. Eignung von Kalksteinsplitt aus Baden-Württemberg für XF2-Beton nach ZTV-ING. Beton 60 (2010), H. 5, S. 185-189.

Huss, A. and H.-W. Reinhardt: Design and Flow of Powder-type SCC with Crushed Aggregates. Proceedings of the SCC 2010 “Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete”, September 26-29 (2010), Montreal, Canada. Verlag: Springer, ISBN 978-90-481-9664-7, pp. 3-11.

Kauffmann, F., T.-U. Kern, S. Straub and K.-H. Mayer: Evolution of Microstructure of the New Heat Resistant 9-11 % Cr Steels as a Function of Long Term Creep Stressing. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Kauffmann, F., K. Maile, S. Straub, K.H. Mayer, M. Bauer and E. Roos: Optimisation of Long-Term Creep Strength of Martensitic Steels. Transactions of the Indian Institutes of Metals, Vol. 63 (2010), No. 2-3, pp. 357-361.

Kerkhof, K., J. Schwenkkros, F. Barutzki and C. Gurr-Beyer: Advanced Methods for Vibration Reduction at a Piping. Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Division Conference, July 18-20 (2010), Washington, USA, PVP2010-25603.

Kinder, J., H. Diem und M. Bader: Schadensuntersuchung des geborstenen Kompressorings eines 450 MW-Generators. 36. VDI-Jahrestagung „Schadensanalyse in Kraftwerken – Fortschrittliche Technologien 700 Grad und Oxyfuel, 13. – 14. Oktober 2010 in Würzburg. VDI-Berichte 2102 (2010), ISBN 978-3-18-092102-0, S. 215-231.

Klenk, A., K. Maile and E. Roos: Concepts for Integrity and Lifetime Assessment of Boiler and Turbine Components of Advanced Ultra-Supercritical Fossil Plants. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Klenk, A., M. Speicher, A. Hobt, K. Maile and E. Roos: Defect Assessment by Fracture Mechanics Methods and Damage Characterisation. Proceedings of the HIDA 5 Conference “High-Temperature Defect Assessment, June 23-25 (2010), Guildford, UK.

Kockelmann, H.: Zum Nachweis der Einhaltung von Leckageratengrenzkriterien für Flanschverbindungen. Münchener Forum Verbindungstechnologie vom 2.–3. Dezember 2010 in München.

Kockelmann, H., R. Hahn und M. Schaaf: Zulässige Emissionen bei Flanschverbindungen im Anwendungsbereich der TA Luft. 25. FDBR-Fachtagung Rohrleitungstechnik „Rohrleitungen in Kraftwerken und chemischen Anlagen – Rohrfernleitungen“, 23. – 24. März 2010 in Neuss.

König, G., R. Bieselt, D. Klucke, D. Schünemann, H. Kurz and H. Kockelmann: Calculation of Bolted Flange Connections of Metal to Metal Contact Type – Results of MPA/VGB-Project SA „AT“19/08. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Krätschmer, D., K.-H. Herter and X. Schuler: Prevention of Unacceptable Material Fatigue Considering the Coolant – Principles and Application. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Krüger, M.: Wireless Monitoring of Reinforced Concrete Structures. In: Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures. Volume 2: Non-Destructive Testing Methods. Verlag: Woodhead Publishing Limited, ISBN 1-4398-4112-8, pp. 111-123.

Krüger, M. und C. Grosse: Drahtlose Sensortechnik für historische Bauwerke. ITG/GMA-Fachtagung „Sensoren und Messsysteme“, 18. -19. Mai 2010 in Nürnberg. VDE Verlag, ISBN 978-3-8007-3260-9, S. 513-517.

Krüger, M., F., Lehmann and C. Grosse: Acoustic Emission Monitoring of Wire Breaks at the Humber Suspension Bridge. Proceedings of the 13th International Conference on Structural Faults & Repair, June 15-17 (2010), Edinburgh, Scotland.

Kurz, H. and E. Roos: Characterization of Leakage Through Gaskets by a Two-Stage Numeric Approach Using Transport Equations. Proceedings of the ASME Pressure Vessel & Piping Conference Division / K-PVP Conference, July 18-22 (2010), Washington, USA, PVP2010-25618.

Kurz, H. und E. Roos: Bestimmung der Leckage durch inhomogen verpresste Flachdichtungen und Flachdichtungen mit veränderter Geometrie. 16. International Dichtungstagung, 12.–13. Oktober 2010 in Stuttgart. VDI-Berichte 2102 (2010), ISBN 978-3-18-092102-0, S. 70 – 86.

Lang, X., G. Wagner, D. Eifler, L. Kleih, E. Roos, C. Conrad, B. Wolter und C. Boller: Zerstörende und zerstörungsfreie Bestimmung technologischer Eigenschaften sowie mikrostrukturorientierte Untersuchungen von FSW-Verbindungen. Abschlusskolloquium zum AiF-Forschungscluster „Integration des Rührreibschweißens in Fertigungsprozessketten“, 27. – 28. September 2010 in Nürnberg. DVS-Berichte Band 267, ISBN 978-3-87155-592-3, S. 404-409.

Lehmann, F., G. Dill-Langer, K. Hörsting, M. Krüger, C. Grosse und R. Frenzl: Zerstörungsfreie und minimalinvasive Prüfung von Holzbrücken. DGZfP-Jahrestagung 2010 „ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung“, 10.–12. Mai 2010 in Erfurt. Berichtsband 122-CD, ISBN 978-3-940283-26-9.

Lehmann, F., M. Krüger and C. Grosse: Non-Destructive Testing of Timber Bridges Using Ultrasound Techniques. Proceedings of the 13th International Conference on Structural Faults & Repair, June 15-17 (2010), Edinburgh, Scotland.

Lückemeyer, N., H. Kirchner, T.-U. Kern, M. Reigl, A. Klenk, T. Klein, M. Schwienheer, L. Cui, A. Scholz and C. Berger: Determination of Material Behaviour in 700°C-Turbine Components under Component and Load Specific Conditions. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Maile, K.: MPA startet neues Verbundforschungsprojekt. Hochtemperaturwerkstoffe in modernen Hochleistungskraftwerken. Transmitter 1/2010, S. 6-8.

Maile, K.: 725°C Teststrecke in GKM. 36. VDI-Jahrestagung „Schadensanalyse in Kraftwerken – Fortschrittliche Technologien 700 Grad und Oxyfuel, 13. – 14. Oktober 2010 in Würzburg. VDI-Berichte 2102 (2010), ISBN 978-3-18-092102-0, S. 27-35.

Maile, K., E. Roos, A. Lyutovich, J. Böse, M. Itskov, Kh. Ashurov, A. Mirkarimov, S. Kazantsev and Kh. Kadirov: Protective Coating of Steel Tubes Via Vacuum Arc Deposition. Proceedings of the 9th Liège Conference on Materials for Advanced Power Engineering 2010, September 27-29 (2010), Liège, Belgium. Edts.: J. Lecomte-Beckers, Q. Contrepois, T. Beck and B. Kuhn, -ROM, pp. 1016-102.

Maile, K. und R. Scheck: Erprobung neuer Abdruckmaterialien für die Ambulante Bauteilmetallographie. Berichte der 13. Internationalen Metallographie-Tagung, 29. September - 01. Ok-

tober 2010 in Leoben. In: Prakt. Met. Sonderband 42 (2010) „Fortschritte in der Metallographie“, ISBN 978-3-88355-382-5, S. 77-81.

McLaskey, G., S.D. Glaser and C. Grosse: Beamforming Array Techniques for Acoustic Emission Monitoring of Large Concrete Structures. J. of Sound & Vibration 329 (2010), pp. 2384-2394.

Mendicino, A. L., S. Fortino, M. Henning, G. Dill-Langer: A computational method for crack growth in glulam under variable humidity. World Conference of Timber Engineering, June 20-24 (2010), Riva del Garda, Italy., Book of Abstracts, pp. 271-272

Menzel, K.: Risiken bei der Verwendung hochfester, verzinkter Verbindungsmittel im Betonbau. Tagung „Korrosionsschutz der Stähle im Kontakt mit Beton“. Neue Entwicklungen und Forschungsergebnisse, 7.-8. Oktober 2010 in Stuttgart. Verlag: Dechema e.V., ISBN 978-3-935406-43-7, S. 115-120.

Metzger, K., K.-H. Czychon, K. Maile und S. Johnson: Erprobung neuer Rohrleitungswerkstoffe in der 725°C-Teststrecke des Grosskraftwerkes Mannheim. 25. FDBR-Fachtagung Rohrleitungstechnik „Rohrleitungen in Kraftwerken und chemischen Anlagen – Rohrfernleitungen“, 23. – 24. März 2010 in Neuss.

Mielich, O.: Beitrag zu den Schädigungsmechanismen in Betonen mit langsam reagierender alkaliempfindlicher Gesteinskörnung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 583, Beuth Verlag, ISBN 978-3-410-65072-0, 165 S.

Müller, F., M. Speicher, A. Scholz, A. Klenk, S. Sheng and J. Ewald: Creep-Fatigue Crack Behaviour of a 10Cr-Steel. Proceedings of the 18th European Conference “Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale”, August 30 – September 03 (2010), Dresden, Germany. CD-ROM, Topic A: “Fundamentals, Physics and Mechanism”, A.03.1-2 Cracks, Creep and Microstructure.

Narasaiah, N., S. Sivaprasad, J. Chattopadhyay, H.S. Kushwaha, E. Roos and S. Tarafder: Effect of Constraint on Fracture Parameters of Piping Materials. Transactions of the Indian Institutes of Metals, Vol. 63 (2010), No. 2-3, pp. 541-545.

Nothdurft, R., A. Mühlig und H. Diem: Ungewöhnlicher Schaden am Innengehäuse einer MD-Dampfturbine. 36. VDI-Jahrestagung „Schadensanalyse in Kraftwerken – Fortschrittliche Technologien 700 Grad und Oxyfuel, 13. -14. Oktober 2010 in Würzburg. VDI-Berichte 2102 (2010), ISBN 978-3-18-092102-0, S. 249-259.

Ottens, W., R. Hahn und H. Kockelmann: Optimierung von Spindelabdichtungen in Armaturen hinsichtlich Funktion und Ausblassicherheit durch Oberflächenbehandlung und -beschichtung. 6. Forum Industriearmaturen am 9. Juni 2010 in Essen, S. 15-25.

Ottens, W., R. Hahn und H. Kockelmann: Stopfbuchsabdichtungen durch Oberflächenbehandlung und -beschichtung optimieren. In: Jahrbuch Dichtungstechnik 2011, Isgatec Verlag, ISBN 978-3-9811509-4-0, S. 310-323.

Ottens, W., R. Hahn, H. Kockelmann and E. Roos: Optimization of Stuffing Box Stem Sealings in Valves by Means of Surface Treatment and Coating. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Ottens, W., R. Hahn, H. Kockelmann and E. Roos.: Optimization of Stuffing Box Stem Sealings in Valves by Means of Surface Treatment and Coating. Proceedings of the 16th International Sealing Conference, October 12-13 (2010), Washington, USA, pp. 155-170.

Ottens, W., E. Roos, H. Kockelmann and R. Hahn: Optimization of Stuffing Box Stem Sealings in Valves by Means of Surface Treatment and Coating. Proceedings of the ASME Pressure Vessel & Piping Conference Division / K-PVP Conference, July 18-22 (2010), Washington, USA, PVP2010-25043.

Roos, E., M. Bauer, A. Klenk and K. Maile: Description of Failure Modes in Welded Components Operating in the Creep Regime. Transactions of the Indian Institutes of Metals, Vol. 63 (2010), No. 2-3, pp. 101-109.

Roos, E., C. Berger, S. Sheng, A. Hobt, A. Klenk, T. Mao, F. Müller und A. Scholz: Bewertung von Bauteilen mit Fehlstellen in Abhängigkeit vom Kriechverformungsvermögen. Zwischenbericht über das Vorhaben Nr. 958 (AVIF-Nr. A252). Informationstagung Turbomaschinen der FVV am 15. April 2010 in Bad Neuenahr, Heft R550, S. 59-83.

Roos, E., K. Maile and A. Lyutovich: Multilayer Stacks Obtained by on Assisted eb PVD Aimed at Thermal Barrier Coating. Proceedings of the 9th Liège Conference on Materials for Advanced Power Engineering 2010, September 27-29 (2010), Liège, Belgium. Edts.: J. Lecomte-Beckers, Q. Contrepois, T. Beck and B. Kuhn, CD-ROM, pp. 660-667.

Rudnig, J.-M., F. Müller, A. Scholz, C. Berger, A. Klenk, M. Speicher und E. Affeldt: Kriechermüdungsrissverhalten der konventionell und gerichtet erstarrten Nickelbasis-Gusslegierung MAR-M 247. 33. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe „Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe“, 26. November 2010 in Düsseldorf.

Ruoff, H., K. Kanjanapongkul, M. Gibis, K. Maile and J. Weiss: Characterization of Electrospun Biopolymer Nanofibers Using SEM and FIB. Berichte der 13. Internationalen Metallographie-Tagung, 29. September - 01. Oktober 2010 in Leoben. In: Prakt. Met. Sonderband 42 (2010) „Fortschritte in der Metallographie“, ISBN 978-3-88355-382-5, S. 385-390.

Sawada, K., M. Bauer, F. Kauffmann, P. Mayr and A. Klenk: Microstructural Change of 9% Cr-welded Joints After Long-Term Creep. Materials Science and Engineering A 527 (2010), pp. 1417-1246.

Sawade, G. und H.-J. Krause: Prüfung von Spannbetonbauteilen mit magnetischen Methoden. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), H. 3, S. 154-164.

Sawade, G. und H.-J. Krause: Magnetic Flux Leakage (MFL) for the Non-Destructive Evaluation of Pre-Stressed Concrete Structures. Volume 2: Non-Destructive Testing Methods. Verlag: Woodhead Publishing Limited, ISBN 1-4398-4112-8, pp. 215-241.

Schmidt, K. and E. Roos: Materials for Boiler Components of 700°C-Plant. Proceedings of the 36th MPA-Seminar Materials and Components Behaviour in Energy & Plant Technology, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Schneider, K., N. Römer, E. Roos and X. Schuler: The Impact of Fatigue Strength Considerations for the Lifetime Management for Pumped-Storage Power Plant. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Schuler, X. and F. Schöckle: Plant Life (PLIM) and Ageing Management (AM) in German NPP's – Prerequisite for Long Term Operation (LTO). Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Seidenfuß, M., E. Roos und M.K. Samal: Entwicklung eines nichtlokalen Schädigungsmodells. Materials Testing 52 (2010), H. 1-2, S. 36-41.

Seidenfuss, M., M.K. Samal and E. Roos: Nonlocal Rousselier Model in Structural Damage Mechanics. Proceedings of the 18th European Conference “Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale”, August 30 – September 03 (2010), Dresden, Germany. CD-ROM, Topic B: “Methods, Concepts and Materials”. B.05.2-1 Theoretical Development of Damage Models.

Soppa, E. Ch. Kohler, P. Kizler, D. Kuppler, K. Berreth, X. Schuler and E. Roos: Dislocation Structures and Damage Development in Fatigued X6CrNiNb 18 10 Austenitic Stainless Steel. Proceedings of the 18th European Conference “Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale”, August 30 – September 03 (2010), Dresden, Germany. CD-ROM, Topic A: “Fundamentals, Physics and Mechanism”, A.02.1-4 Fatigue.

Soppa, E., Y. Schneider, R. Mokso, Ch. Kohler, X. Schuler and E. Roos: Crack Initiation in the Al(6061)/Al₂O₃ Composite under Monotonic and Cyclic Loading. Proceedings of the 18th European Conference “Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale”, August 30 – September 03 (2010), Dresden, Germany. CD-ROM, Topic A: “Fundamentals, Physics and Mechanism”, A.02.3.-5 Metallic Materials.

Speicher, M., A. Hobt, A. Klenk K. Maile and E. Roos: Defect Assessment by Fracture Mechanics Methods and Damage Characterisation. Proceedings of the 18th European Conference “Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale”, August 30 – September 03 (2010), Dresden, Germany. CD-ROM, Topic A: “Fundamentals, Physics and Mechanism”, A.03.1-1 Cracks, Creep and Microstructure.

Speicher, M., A. Hobt, A. Klenk, K. Maile and E. Roos: Consideration of Integrity Behaviour of Structures in the Creep Regime. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Compo-

nents Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Speicher, M., K. Schmidt, A. Klenk, K. Maile and E. Roos: Weld Behaviour of Martensitic Steels and Ni-based Alloys for High-Temperature Components. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart, Germany.

Udoh, A., G. Sasikala, A. Klenk and E. Roos: Fracture Mechanics Behaviour of Ductile Cast Iron and Martensitic Steel at Elevated Temperature. Proceedings of the 36th MPA-Seminar „Materials Components Behaviour in Energy & Plant Technology“, October 7-8 (2010), University of Stuttgart., Germany

Van Tittelboom, K., N. De Belie, F. Lehmann and C. Grosse: Towards Durable Concrete that Repairs Cracks Autonomously. Proceedings of the International RILEM Conference of Superabsorbent Polymers and other New Additives in Concrete, August 15-18 (2010), Lungby, Denmark, pp. 285-292.

Wang, Y., F. Kauffmann, K.-H. Mayer, A. Scholz, C. Berger and K. Maile: The Effect of Microstructural Stability on Long-Term Behaviour of 11%Cr Steels for Steam Power Plants with Operating Steam Temperatures up to 650°C. Proceedings of the 9th Liège Conference on Materials for Advanced Power Engineering 2010, September 27-29 (2010), Liège, Belgium. Edts.: J. Lecomte-Beckers, Q. Contrepolis, T. Beck and B. Kuhn, CD-ROM, pp 84-96.

Weirich, T.: Detection of Crack Initiation and Crack Growth in Reinforcing Steel. Proceedings of the 8th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, June 20-23 (2010), Kgs. Lyngby, Denmark.

Zäh, M.F., P. Gebhard, E. Roos, R. Noveva, D. Krätschmer und L. Kleih: Eignung von Anlagen für das Rührreibschweißen und Übertragbarkeit von Schweißparametern. Abschlusskolloquium zum AiF-Forschungscluster „Integration des Rührreibschweißens in Fertigungsprozessketten“, 27. – 28. September 2010 in Nürnberg. DVS-Berichte Band 267, ISBN 978-3-87155-592-3, S. 410-416.