

Koblenz



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

DGZfP-JAHRESTAGUNG Zerstörungsfreie Materialprüfung

2017

Kurzfassungen der Vorträge und Posterbeiträge



*ZfP in
Forschung,
Entwicklung
und
Anwendung*



KOBLENZ

22. – 24. Mai 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

DGZfP-JAHRESTAGUNG 2017

Zerstörungsfreie Materialprüfung

Kurzfassungen der Vorträge und Posterbeiträge



Koblenz, 22. – 24. Mai 2017

▶ **Montag, 22. Mai 2017**

09:00 – 11:00 **Eröffnung**

11:30 – 12:30 **Mo.1.A**

Vorträge der Preisträger

A. Erhard, G. Mook, D. Treppmann

13:30 – 15:00 **Mo.2.A**

Vorträge d. Mitgliedergruppe B

P. Archinger, G. Vogt

15:20 – 16:40 **Mo.3.A**

Normen und Regelwerke

M. Purschke, M. Sengebusch

17:00 – 18:00 **Mo.4.A**

Poster mit Kurzpräsentation:
Ultraschallverfahren

F. Ahrens

Mo.3.B

Materialcharakterisierung

J. Bamberg, B.-R. Müller

Mo.4.B

Poster mit Kurzpräsentation:
**Zustands- und Fertigungs-
überwachung**

B. Busch

Mo.3.C

Fertigungsüberwachung

S. Becker, B. Weihnacht

Mo.4.C

Poster mit Kurzpräsentation:
Simulation

A. Erhard

Mo.4.D

Poster mit Kurzpräsentation:
Diverse ZfP-Verfahren

M. Purschke

18:30 – 21:30

Posterabend mit Prämierung auf der Galerie

▶ **Dienstag, 23. Mai 2017**

08:30 – 10:20

Automotive

A. Hofmann, B. Valeske

Di.1.A

Luftultraschall

W. Hillger, T. Waschkies

Di.1.B

Algorithmen/Simulation

B. Schreieck, M. Spies

Di.1.C

**ZfP-Wissen gestern, heute und
morgen**

F. Ahrens, A. Erhard

10:40 – 12:00	Di.2.A	Di.2.B	Di.2.C	Di.2.D
Seite 64	UT Phased Array – Total Focusing Method <i>J. Büchler, W. Roye</i>	Verbundwerkstoffe <i>M. Kreuzbruck, U. Rabe</i>	Verkehrswesen – Bahn <i>R. Krull, U. Mosler</i>	Holzstrukturen <i>S. Feistkorn, J.H. Kurz</i>
13:00 – 14:00	Podiumsdiskussion zum Thema ZfP und Industrie 4.0 <i>R. Krauter, Wissenschaftsjournalist</i>			
14:30 – 17:00	Mitgliederversammlung der DGZfP, Tagungszentrum Raum 4-6			
20:00 – 24:00	Konferenzabend im Kurfürstlichen Schloss			

▶ **Mittwoch, 24. Mai 2017**

08:30 – 10:20	Mi.1.A	Mi.1.B	Mi.1.C	
Seite 82	Thermographie <i>M. Goldammer, M. Kreuzbruck</i>	Druckgeräte <i>J. Röhmeier, D. Treppmann</i>	Computertomographie <i>M. Maisl, T. Wenzel</i>	
10:40 – 12:00	Mi.2.A	Mi.2.B	Mi.2.C	
Seite 98	Verbundwerkstoffe – Verfahren <i>W. Essig, H.-G. Herrmann</i>	Defektnachweis/ Akustische Verfahren <i>T. Heckel, T. Orth</i>	Reliability (POD) <i>S. Dugan, W. Heinrich</i>	
12:30 – 13:50	Mi.3.A	Mi.3.B	Mi.3.C	
Seite 111	Verkehrswesen – Luftfahrt <i>B. Busch, M. Rahammer</i>	Zustandsüberwachung <i>P. Starke, D. Tschamtko</i>	Mikrowellen und Terahertz <i>U. Ewert, S. Kremling</i>	
14:00	Schlusswort			



BMB Gesellschaft für
Materialprüfung mbH

DEKRA Incos GmbH

DÜRR NDT GmbH & Co. KG

GE Sensing & Inspection
Technologies GmbH

GMA-Werkstoffprüfung GmbH

Helling GmbH

Ingenieurbüro Dr. Hillger

IT-Service Leipzig GmbH

KARL DEUTSCH
Prüf- und Messgerätebau
GmbH + Co. KG



Helmut Klumpf
Technische Chemie KG



MR Chemie GmbH



PLR Prüftechnik Linke & Rühle GmbH



ROSEN Group



rtw RÖNTGEN-TECHNIK DR.
WARRIKHOFF GmbH & Co. KG



Tuboscope Vetco Deutschland
GmbH



VOGT Ultrasonics GmbH



Wilhelm Nosbüsch GmbH



YXLON International GmbH

SONDERVERANSTALTUNGEN

→ SONNTAG, 21. MAI 2017

Sitzung der DGZfP-Prüfungsbeauftragten
Rhein-Mosel-Halle, Tagungszentrum Raum 3 13:00 – 16:00 Uhr

**Sitzung des DGZfP-Fachausschusses
Hochschullehrer im Lehrgebiet ZfP**
Rhein-Mosel-Halle, Besprechungsraum 2 15:00 – 17:00 Uhr

Sitzung der DACH-Zertifizierungsbeauftragten
Rhein-Mosel-Halle, Besprechungsraum 4 15:30 – 18:00 Uhr

→ MONTAG, 22. MAI 2017

Sitzung der DGZfP-Mitgliedergruppe D
Rhein-Mosel-Halle, Moselsaal 12:30 – 13:30 Uhr

→ DIENSTAG, 23. MAI 2017

**Sitzung des DGZfP-Fachausschusses
Thermographie**
Rhein-Mosel-Halle, Moselsaal 12:30 – 14:30 Uhr

Mitgliederversammlung der DGZfP
Rhein-Mosel-Halle, Tagungszentrum Raum 4 – 6 14:30 – 17:00 Uhr

RAHMENPROGRAMM

→ SONNTAG, 21. MAI 2017

Begrüßungsabend 17:30 – 22:00 Uhr
Schiff „Loreley Star“, ab Anlegestelle Pegelhaus (Abfahrt 18:30 Uhr)

→ MONTAG, 22. MAI 2017

Posterabend mit Prämierung
Rhein-Mosel-Halle, Galerie 18:30 – 21:30 Uhr

→ DIENSTAG, 23. MAI 2017

Konferenzabend 20:00 – 24:00 Uhr
Kurfürstliches Schloss (Einlass 19:30 Uhr)

Gebühren

Teilnahmegebühr	750,00 €*
für Mitglieder der DGZfP	695,00 €*
für Vortragende und präsentierende Posterautoren	695,00 €*
für persönliche Mitglieder der DGZfP im Ruhestand	88,00 €**
für Studenten (bis 30 Jahre)	55,00 €**
für Begleitpersonen	120,00 €***
weitere Karte für den Konferenzabend	85,00 €

* inkl. Tagungsunterlagen, Pausenversorgung und Konferenzabend

** inkl. Tagungsunterlagen und Pausenversorgung

*** inkl. Stadtführung am 22.05.2017, nachmittags, Posterabend, Konferenzabend und Mittagessen im Konferenzzentrum; kein Zugang zum Vortragsprogramm

Die DGZfP gewährt Freiplätze für den sechsten und jeden weiteren dritten voll zahlenden Teilnehmer aus derselben Mitgliederorganisation.

Die Tagungsunterlagen, Teilnehmerkarte(n) und Namensschild(er) liegen zur Abholung im Tagungsbüro in Koblenz bereit (Öffnungszeiten s. u.). Das Namensschild gilt als Ausweis für die entsprechenden Tagungsveranstaltungen.

Bitte beachten Sie den **Anmeldetermin** und unsere **Stornierungsfristen** (Eingangsdatum DGZfP):

Stornierung bis 10.04.2017: 50 % der Teilnahmegebühr

Stornierung ab 11.04.2017: keine Erstattung möglich

Berichtsband

ist in den mit * und ** gekennzeichneten Teilnahmegebühren enthalten

Tagungsort

Rhein-Mosel-Halle | Julius-Wegeler-Str. 4 | 56068 Koblenz

www.koblenz-kongress.de/rhein-mosel-halle

Tagungsbüro

21. Mai 2017 12:00 – 17:00 Uhr

22. Mai 2017 07:30 – 18:00 Uhr

23. Mai 2017 07:30 – 14:00 Uhr

24. Mai 2017 07:30 – 14:30 Uhr



Die Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung lädt zu ihrer diesjährigen Jahrestagung vom 22. bis 24. Mai nach Koblenz ein. Koblenz ist eine der ältesten Städte Deutschlands, dazu eine der vielseitigsten: Kirchen, Burgen, Schlösser und historische Stadthäuser erzählen Geschichten aus vergangenen Zeiten, verwinkelte Gassen und Plätze laden zum Flanieren und Verweilen ein.

Koblenz ist ein wichtiger Wirtschaftsstandort für die Maschinen- und Automobilzuliefererindustrie, für Softwarefirmen, Banken und Versicherungen. Die Universität Koblenz-Landau und die Hochschule Koblenz sind bekannt für ihre erziehungswissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge.

Geprägt durch die Lage am Zusammenfluss von Rhein und Mosel, ist Koblenz eine der schönsten Städte Deutschlands. Teile von Koblenz gehören zum UNESCO-Welterbe, denn seit 2002 ist die Stadt mit ihren Kulturdenkmälern das nördliche Tor zur Kulturlandschaft Oberes Mittelrheintal, das Kastell Niederberg wiederum steht seit 2005 als Teil des Obergermanisch-Rätischen Limes auf der UNESCO-Liste.

Auch als Tagungsort hat sich Koblenz gut aufgestellt. Die Rhein-Mosel-Halle ist der zentrale Veranstaltungsort. Nach der Generalsanierung, die im September 2012 abgeschlossen wurde, präsentiert sich die „neue“ Rhein-Mosel-Halle technisch und architektonisch auf dem neuesten Stand der Zeit.

Mit insgesamt 175 Beiträgen gab es so viele Beitragsanmeldungen wie noch nie zu einer Jahrestagung. Der Programmausschuss tagte am 5. Dezember 2016 und hatte die Qual der Wahl. Mit 87 Vorträgen inklusive 7 Hauptvorträgen und 68 Posterbeiträgen, davon 45 mit Kurzpräsentation, wird ein Programm angeboten, das dem Motto der Tagung „ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung“ sicherlich gerecht werden kann. Zusätzlich präsentieren Firmen der Mitgliedergruppe B in 15 Kurzvorträgen ihre neuesten Entwicklungen. Neu im Programm ist eine einstündige Podiumsdiskussion zum Thema „ZfP und Industrie 4.0“, die am Dienstagnachmittag stattfinden wird. Unserem Aufruf folgten mehrheitlich Vorschläge zu diesem Thema. Ein Einführungsvortrag leitet die Diskussion ein.

Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme, interessante Vorträge und Diskussionen und natürlich wieder auf viele persönliche Begegnungen in Koblenz.

Dr. Anton Erhard
Vorsitzender der DGZfP e.V.



Sehr verehrte Teilnehmerinnen und
Teilnehmer der Jahrestagung der DGZfP,

herzlich willkommen hier in Koblenz, der Stadt an Rhein und Mosel. Ich freue mich sehr, dass Sie unsere schöne Stadt als Veranstaltungsort für Ihre Tagung vom 22. bis 24. Mai 2017 gewählt haben. Unsere Stadt ist eine Drehscheibe des internationalen Tourismus und das wirtschaftliche Oberzentrum der Region. Im Jahr 2011 waren wir Gastgeber der bisher größten Bundesgartenschau, ein Jahrhundertevent für Koblenz mit mehr als 3,5 Mio. Besuchern. Unsere Stadt ist also ein idealer Tagungsort!

Ihr Verband, die Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., leistet wichtige Arbeit und ist deshalb eine auf vielen Gebieten unverzichtbare Organisation. Die Zerstörungsfreie Prüfung ist ganz wesentlich mitverantwortlich dafür, dass viele Unfälle und Katastrophen im alltäglichen Leben nicht passieren. Mit Hilfe dieser Prüftechnik können verborgene Fehler in Materialien, Bauteilen und Konstruktionen vor und während ihres Betriebes so frühzeitig erkannt werden, dass deren unvorhergesehenes Versagen verhütet wird. Unfälle mit Gefährdung von Menschenleben und schweren Sach- und Umweltschäden können damit vermieden werden.

Sie werden auf Ihrer Jahrestagung viel über fachliche Neuheiten und Anwendungen neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse hören. Ich wünsche Ihnen interessante Stunden, wünsche Ihnen aber auch, dass Sie trotz der vor Ihnen liegenden Arbeit die Zeit finden, einige der Vorzüge unserer schönen Stadt Koblenz genießen zu können!

Prof. Dr. Joachim Hofmann-Göttig
Oberbürgermeister der Stadt Koblenz

Die Star Trek Physik – Warum die Enterprise nur 158 Kilogramm wiegt und andere galaktische Erkenntnisse

Prof. Dr. Metin Tolan
TU Dortmund

Wie genau nehmen es die Macher von »Star Trek« eigentlich mit Physik und Technik? Erstaunlich genau! Schließlich rechnet Spock in Windeseile aus, dass genau 1.771.551 puschelige Tribbles in den Laderaum der Enterprise passen. Und es wird auch nicht einfach nur »Gas« gegeben, wenn die Enterprise zu ihren Reisen aufbricht – nein, sie reist mit »Warp-Antrieb«. Könnte sich das berühmteste Raumschiff der Filmgeschichte tatsächlich in der Nähe des Sterns Sigma Draconis befinden, und müssen wir uns vor dunkler Materie wirklich fürchten? In bewährter wie unterhaltsamer Manier analysiert Metin Tolan anhand vieler Filmszenen alle Mechanismen und Zahlen, mit denen die Sternenflotte zu tun hat – und kommt zu galaktischen Erkenntnissen. Faszinierend!

VORTRÄGE

Jeder macht Fehler – wir finden sie

S. Gondrom-Linke¹

¹ Volume Graphics, Heidelberg

Führende Industrieunternehmen in der ganzen Welt suchen mit Software von Volume Graphics Fehler in ihren Produkten. Sie wissen, dass Volume Graphics ihnen hilft, möglichst alles über ihre Produkte herauszufinden – und das zerstörungsfrei. Die Basis dafür liefert die industrielle Computertomographie (CT), denn sie durchleuchtet ein Bauteil komplett. Aus den vielen beim Scan aufgenommenen Projektionen rekonstruiert die Software ein dreidimensionales Volumen einschließlich aller Informationen über Materialien und Geometrien. Seit 1997 entwickelt Volume Graphics Software für die industrielle CT in Heidelberg. Wir sind unabhängiger Partner der meisten großen Anbieter von CT-Anlagen.

Mit der Volume Graphics Produktfamilie führen Sie alle Arten von Analysen und Visualisierungen direkt auf Daten der industriellen CT durch: VGStudio MAX ist unsere erweiterbare High-End-Software; VGStudio ermöglicht einen preiswerten Einstieg in die Welt der Analyse und Visualisierung industrieller CT-Daten; VGMetrology ist unsere leicht zu bedienende, universelle Messtechniklösung; VG InLine prüft Ihre Bauteile automatisiert innerhalb des Produktionsprozesses; und myVGL ist der kostenlose Viewer.

VGStudio MAX können Sie mit vielen Zusatzmodulen Ihrem Bedarf anpassen und somit beispielsweise die Maße Ihrer Bauteile überprüfen, Wandstärken ermitteln und Porositäten finden. Mit Makros und Vorlagen automatisieren Sie Ihre Arbeitsabläufe in VGStudio MAX. Eine vollständige Automatisierung ist mit VG InLine möglich.

Mit jeder neuen Version von VGStudio MAX weiten wir die Grenzen der industriellen CT weiter aus. Die neueste Version dringt in die Welt der Simulation vor: Mittels Simulation sagt das Zusatzmodul Strukturmechanik-Simulation vorher, welchen Belastungen ein Bauteil standhält und an welcher Stelle es vielleicht brechen würde. Eine aufwendige und verlustbehaftete Netzgenerierung entfällt. Ebenfalls direkt auf den CT-Daten führt das Modul Transportphänomene virtuelle Strömungs- und Diffusionsexperimente durch und berechnet damit die effektiven Materialeigenschaften (u. a. Permeabilität, Porosität, elektrischer Widerstand und thermische Leitfähigkeit), beispielsweise von Erd- und Gesteinsproben, anderen porösen Materialien oder Faserverbundwerkstoffen.

Innovationen für die Industrielle Röntgenprüfung optimiert für Anforderungen im Bereich schneller CT und hochauflösender Röntgeninspektion

E. Neuser¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Wunstorf

dynamic 41|100 – Ein hochauflösender Flachbilddetektor optimiert für 2D Inspektionen und hochauflösende CT Anwendungen

- 16“ Detektor mit 100 µm Pixelgröße (16 MPixel)

- Optimiert für Langzeitstabilität im industriellen Hoch-kV Einsatz

Verglichen mit herkömmlichen 200µm Pixel Detektoren erlaubt die neue Detektorgeneration eine Verdoppelung der Auflösung bei gleicher Scandauer oder eine vergleichbare CT Qualität bei halbiertes Scandauer.

High Flux Röntgenröhre für schnelle CT

„State of the Art“ Mikrofocus Röntgenröhren erlauben schnellere Messungen (erhöhter Photonenfluss) nur bei gleichzeitig verschlechterter Ortsauflösung (größerer Fokusdurchmesser).

Aufgrund einer neuen verbesserten Röhrentechnologie sind CT Nutzer in der Lage schnellere CT Scans bei gleichzeitig hoher Ortsauflösung oder Scans mit verbesserter Ortsauflösung ohne Geschwindigkeitsverlust durchzuführen.

Erhöhte Effizienz und Qualität durch Sonderlösungen im Bereich der digitalen Röntgenprüfung

H. Schulenburg¹, L. Schulenburg¹

¹ VisiConsult, Stockelsdorf

Unternehmen stehen heutzutage unter enormen Druck durch eine globalisierte Wirtschaft und steigende Qualitätsanforderungen. Die fortschreitende Digitalisierung durch Detektoren stellt Prüfverantwortliche vor Herausforderungen im Bereich Training oder Zertifizierung. Auf der anderen Seite ermöglichen die neuen digitalen Technologien einen hohen Automatisierungsgrad. Durch kundenspezifische Prüflösungen kann der Zeit- und Personalbedarf stark reduziert werden. Gleichzeitig ist es hierdurch möglich die Prozesssicherheit und Fehlerwahrscheinlichkeit signifikant zu senken. Etliche Branchen haben diese Prozesse bereits adaptiert: Die Automobilindustrie zum Beispiel ist bereits auf vollautomatische Systeme (ADR) direkt in der Produktionsstraße umgeschwenkt. Die Luftfahrtindustrie, getrieben von hohen Qualitätsstandards (NADCAP, BSS etc.) und starkem Kostendruck, setzt auch vermehrt auf digitale und automatisierte Systeme.

VisiConsult X-ray Systems & Solutions GmbH, als führender Hersteller von Sonderanlagen im Bereich Röntgenprüfung (RT), hat die Philosophie, dass sich niemals der Prozess an das Prüfsystem anpassen sollte, sondern die Anlage an den Prozess. In diesem Vortrag wird der Weg zum optimalen Prüfsystem anschaulich beschrieben und mit Beispielen unterfüttert. Es wird auf grundsätzliche technische, als auch kommerzielle Aspekte ganzheitlich eingegangen. Dieses Wissen ist von elementarer Bedeutung für NDT-Manager und Prüfverantwortliche, die zwangsläufig in den nächsten Jahren vor die Frage einer hohen Investition im Röntgenbereich gestellt werden, um den neuen Anforderungen und Standards zu entsprechen. Die Erfahrung zeigt, dass in breiten Teilen unserer Industrie kostspielige Fehlentscheidungen aufgrund von fehlenden Informationen getroffen werden. Hierbei wird gleichzeitig auf die diffuse Angst vor Automatisierung als Jobkiller eingegangen. Die Digitalisierung und Automatisierung ist nicht mehr aufzuhalten – für Deutschland bietet sie allerdings mehr Chancen als Gefahren.

- Einführung digitale Röntgenprüfung: visuell, DR, CT, ADR
- Prozess zur Einführung einer DR Anlage
- Adaption und Zertifizierung
- Beispiele aus diversen Branchen

Neues Wanddickenmessgerät mit A-Bild und B-Bild-Funktion

A. Bodi¹, M. Lucas¹

¹ SONOTEC, Halle (Saale)

Das SONOWALL 70 ist ein portables Handgerät, bei dessen Entwicklung die Vereinfachung und Beschleunigung des Prüfvorganges, der Ausschluss möglicher Fehlerquellen sowie die übersichtliche Darstellung der Ergebnisse im Vordergrund stand.

Als erstes Prüfgerät aus dem Markt besitzt das SONOWALL 70 eine intelligente, kabellose Prüfkopferkennung. Die damit verbundene erweiterte Prüfkopfverwaltung ermöglicht die Hinterlegung prüfkopfspezifischer Daten. So können beispielsweise DAC-Kurven, Vorlaufängen und Seriennummern direkt im Prüfkopf gespeichert werden.

Neben den verschiedensten Anwendungen zur Wanddickenmessung kann das Gerät durch ein Upgrade zum Materialprüfgerät erweitert werden.

Dank seiner kompakten Größe, einem Gewicht von nur 990 g trotz robustem Aluminiumgehäuse, dem hochauflösenden und entspiegelten Grafikdisplay sowie Schutzklasse IP 67 eignet sich das Gerät ideal für raue Prüfumgebungen.

Eine intuitive Bedienoberfläche, das klar strukturierte Menü und die Darstellung aller Menüpunkte in Volltext vereinfacht und beschleunigt die Geräteeinstellung und verringert das Risiko von Fehleinstellungen. Auf dem großformatigen 5“ Zoll Grafikdisplay (800x480) kann der Prüfer alle für ihn relevanten Messwerte und Geräteeinstellungen wie Wanddicke, A-Bild und individuell angepasste Prüfparameter auf einen Blick erkennen.

Berührungslose Ultraschallprüfungen mit Ankopplung über Luft – Neuentwicklungen für die Praxis

W. Hillger¹, L. Bühling¹, D. Ilse¹

¹ Ingenieurbüro Dr. Hillger, Braunschweig

Die luftgekoppelte Ultraschallprüftechnik (LUS) vermeidet die Nachteile der Koppelmittel bei der konventionellen Prüftechnik. Beispielsweise kann das Koppelmittel Wasser in den Testkörper eindringen und dort Schäden hervorrufen, und es verursacht unter anderem Kalkablagerungen, Algenwuchs und Korrosion an Scanmechaniken. Der Haupteinsatz von LUS liegt vor allem bei Bauteilen, die nur mit niedrigen Frequenzen geprüft werden können, beispielsweise CFK-Sandwichbauteile. Für diese Bauteile des Luft- und Raumfahrtbereichs wurden Anlagen mit robotergestützten Scansystemen wie für den EC 145 Heckausleger und für Nutzlastverkleidungen von Satelliten mit Verfahrwegen von über 20 m realisiert. Eine breite Anwendung von LUS ist jedoch noch nicht gegeben. Gründe hierfür sind sicherlich, dass die Impuls-Echo-Technik nicht eingesetzt werden kann und das Bauteil in den meisten Fällen beidseitig zugänglich sein muss. Ferner sind für eine breitere Anwendung Weiterentwicklungen vor allem für monolithische CFK-Bauteile hinsichtlich einer höheren Auflösung erforderlich.

Der Vortrag berichtet über Weiterentwicklungen aus unserem Hause wie ultra-rauscharme Vorverstärker, die auch in den Empfangsprüfkopf integriert sein können, Prüfkopf-Arrays mit acht Elementen, die die Prüfzeit für einen Quadratmeter Fläche von 28 auf 4 Minuten herabsetzen, vom Einsatz der Pitch und Catch-Technik sowie von dem LUFO-Verbundprojekt NOISYK, in dem unter anderem der Einsatz von Lamb-Wellen untersucht wird.

Maßgeschneiderte Ultraschall-Lösungen für komplexe Anwendungen am Beispiel von Rollenprüfköpfen

T. Bruch¹, W. Zhang¹, P. Buschke¹, S. Falter¹, J. Ininger¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

In Zeiten von gestiegenen Materialanforderungen können komplexere Prüfaufgaben durch den Einsatz von Standardprüfköpfen nicht komfortabel gelöst werden. Ein höheres Maß an Anpassung von Prüfköpfen und Prüfablauf an das anwenderspezifische Problem ist nötig. GE Inspection Technologies wird dieser Herausforderung durch die Spezialisten in den Applikationslaboren gerecht, welche maßgeschneiderte Lösungen zusammen mit dem Anwender entwickeln.

Rollenprüfköpfe ermöglichen eine „fast trockene“ Ankopplung an komplexen Geometrien, und können als Einschwinger oder Linien-Array Ausführung im Impuls-Echo Verfahren, oder als Zwei Schwinger Ausführung in Durchschallungstechnik eingesetzt werden. Die von GE Inspection Technologies entwickelten Rollenprüfköpfe decken einen großen Anwendungsbereich ab. Auf die Prüfproblematik zugeschnittene Lösungen reichen von der Prüfung von Verbundwerkstoffen (CFK und GFK) in der Luftfahrt, dem Bahnsektor und dem Windenergiesektor; über Prüfung von Laserschweißnähten und Falzklebeverbindungen im Automobilssektor; bis hin zum Einsatz bei der automatisierten Schweißnahtprüfung. Rollenprüfköpfe zeichnen sich durch ihre flexible Ankoppelbedingungen aus, so dass diese Prüfköpfe zur Prüfung komplexer Geometrien wie z. B. der Querfehlerprüfung bei unbearbeiteten Schweißnähten eingesetzt werden können. Zudem ermöglichen Rollenprüfköpfe in Verbindung mit handlichen Führungsmechaniken eine effiziente Prüfungsdurchführung, sowie gleichmäßige Bedingungen bei der Ankopplung. In Kombination mit Linien-Arrays wird so eine verlässliche Prüfung von großen Flächen bei gleichzeitiger Aufzeichnung von ortsgetreuen Koordinaten ermöglicht.

Es werden Lösungen aus den einzelnen Sektoren vorgestellt, welche die Weiterentwicklung von Rollenprüfköpfen für die unterschiedlichsten Anwendungen illustrieren. Zudem werden weitere Anwendungsschwerpunkte aus der Sonderprüfkopfentwicklung vorgestellt.

Ein modernes Prüfsystem für (fast) alle Anwendungen

H. Ballmann¹, A. Gänßmantel¹

¹ ROSEN Germany, Stutensee

ROSEN Group – Industrial Diagnostics, hat ein Prüfsystem entwickelt, das in den meisten industriellen Anwendung mit unterschiedlichen Prüftechnologien einsetzbar ist.

Hybride Anwendungen, ausgehend von einem Basissystem, für konventionelle, Phased-Array und EMAT Ultraschall-Anwendungen sowie Wirbelstrom, Streufluss und sonstige magnetische Prüftechnologien sind konfigurierbar.

Was für die Hardware des Basissystems gilt, gilt auch für die Bedien- und Auswerte-Software. Ausgehend von einer Grundfunktionalität werden die notwendigen Softwaremodule zu einer Gesamtanwendung konfiguriert.

Der Baukasten zum Aufbau von komplexen Prüfsystemen wird anschaulich erläutert.

Interessante Anwendungen in den Verfahren UT, MT und PT (Handgeräte und Sondermaschinenbau)

W.A.K. Deutsch¹

¹ KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau, Wuppertal

Im Rahmen des Vortrags werden aktuelle Entwicklungen der Firma KARL DEUTSCH gezeigt:

- bildgebende Ultraschallprüfung mit dem ECHOGRAPH 1095 (B-Bild, TOFD)
- mobiles GEKKO Phased-Array-Prüfgerät mit ortsgetreuer Datendarstellung (TFM Total Focusing Method) im Einsatz bei der DGZfP
- aktuelle Beispiele aus dem Sondermaschinenbau: UT, MT und PT-Prüfanlagen

Wirbelstromprüfung mit wegbasiertem Filter: Prüfen bis zum Stillstand

A. Gopalan¹, S. Lentz¹

¹ Rohmann, Frankenthal

Die passende Einstellung der Filter in Bezug auf Fehlergröße, Sensorwirkbreite und Oberflächengeschwindigkeit ist entscheidend für eine erfolgreiche Wirbelstromprüfung. Oft kann jedoch keine konstante Oberflächengeschwindigkeit hergestellt werden. Hier kamen in der Vergangenheit Filternachführungen zum Einsatz – die Zeitkonstanten wurden automatisch der ermittelten Materialgeschwindigkeit angepasst. Diese Methode stößt an ihre Grenzen, wenn die Geschwindigkeit zu klein wird, so dass insbesondere die Hochpassfilter nicht mehr stabil zu realisieren sind. Spätestens beim Materialstillstand versagt die Technik vollständig.

In den digitalen Wirbelstromprüfgeräten von Rohmann der neuen Generation wird statt der Filternachführung ein wegbasierter Filtermodus angeboten. Hier werden die Filter nicht wie üblich in der Zeitdomäne berechnet, sondern basierend auf der von der Anlage gelieferten Weginformation. Dies führt dazu, dass die Filter unabhängig von der Materialgeschwindigkeit bis zum Stillstand und ohne Artefakte durch abgestufte Filter funktionieren. Selbst wenn bei einer dynamischen Prüfung auf dem Fehler angehalten wird und später weitergeprüft wird, wird der Fehler vollständig bewertet. Dies ermöglicht neue Einsatzgebiete, speziell bei getakteten Prüfungen an Langprodukten. Auch sind bei Prüfungen an rotierenden Teilen signifikante Taktzeitreduzierungen möglich, da nicht auf das Erreichen einer Nenndrehzahl gewartet werden muss, sondern sofort aus dem Stillstand heraus geprüft werden kann. Die theoretischen Hintergründe dieser neuen Technologie werden erläutert und Beispiele aus der Praxis gezeigt.

Erweiterte Inspektion und Interpretation in der fluoreszierenden Magnetpulver- und Eindringprüfung durch optimierte UV LED Leuchten mit erweiterter Funktionalität

M. Breit¹

¹ RIL-CHEMIE, Kleinblittersdorf

Der Technologiewechsel bei UV Strahlquellen von entladungslampen basierten UV Lampen zu LED basierten UV Leuchten bietet vielfältige neue Möglichkeiten die die fluoreszierende Prüfung nicht nur besser und zuverlässiger machen, sondern auch eine effizientere Durchführung ermöglichen, die Betrachtung ermüdungsfreier machen und den Prüfprozess optimieren können. Der Vortrag zeigt die neuesten Möglichkeiten die die UV LED Technik in der ZfP aktuell schon ermöglicht und gibt einen Ausblick auf die zukünftigen Möglichkeiten sowie die aktuellen und kommenden Anforderungen von Seiten der Normung.

Prüfanlagensystem für die Magnetpulverprüfung mit simultaner Strom- und Felddurchflutung für Prüfstücke von 700 bis 2500 mm Länge und einer Halbkreisüberlaufspule als zusätzliche Feldspule sowie Hochleistungs-LED UV-A Flächenleuchten mit passiver Kühlung

N. Riess¹, R. Link²

¹ Helling, Heidgraben; ² Unternehmensber. Dr. Rainer Link, Kerpen

Magnetpulverprüfanlagen mit simultaner Strom- und Felddurchflutung für den Nachweis von Oberflächenfehlern in Längs- und Querrichtung wurden bisher für Prüfstücke mit einer Länge von 450 und 700 mm standardmäßig angeboten.

In diesem Vortrag wird das Prüfanlagensystem HELLMAG Universalsystem 700-2500 AC/DC für die Magnetpulverprüfung mit gleichzeitiger Strom- und Felddurchflutung vorgestellt. Das Prüfsystem wird entsprechend den Anforderungen für Prüfobjekte mit einer Einspannlänge zwischen 700 und 2500 mm gefertigt. Ermöglicht wurde dies durch technische Weiterentwicklungen, die sich an den physikalisch sinnvollen Grenzen orientieren und eine normgerechte Prüfung erlauben. Die Parameter der Anlage im Betrieb und die gemessenen magnetischen Feldstärken werden mit den von der Norm vorgegebenen Werten verglichen.

Sollte in einem speziellen Prüfproblem die geforderte Magnetfeldstärke der Felddurchflutung nicht ausreichen, so ist ein Anschluss für eine Überlaufspule vorgesehen.

Als eine mögliche Version kann eine Halbkreissspule angeschlossen werden, die für Anwendungen im Bereich der Prüfung von Achswellen im Eisenbahnwesen entwickelt wurde und als zusätzliche Feldspule hierfür geeignet ist, da das Prüfteil sowieso aus prüftechnischen Gründen um 180 Grad gedreht werden muss.

Gesteuert wird die Anlage ebenso wie eine zusätzliche Feldspule über eine SPS-Steuerung für alle Betriebsparameter, für die Anlagenüberwachung, Magnetisierung, Entmagnetisierung und Stromstärken. Auf einem Touch-Panel werden alle Parameter sowie der Zustand der Anlage dargestellt und die gewünschten Einstellungen eingegeben.

Die UV-A Beleuchtung erfolgt über LED-Hochleistungsdiode. Eine neu entwickelte Konstruktion der LED-Leuchten erlaubt auch bei den hier erforderlichen Flächenleuchten eine passive Kühlung bis zu einer Umgebungstemperatur von 50 °C.

Hochauflösende Thermografiesysteme in der Wärmefluss-Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung

A. Kipp¹

¹ InfraTec, Dresden

Bei der industriellen Fertigung neuer Produkte kommen heutzutage oftmals komplexe und zugleich teure Materialien und Bauteile zum Einsatz. Deren Prüfung mit zerstörenden Methoden kann hohe Kosten verursachen.

Dagegen sind Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) günstiger, lassen den Zeitaufwand sinken und verbessern so die Qualitätssicherung. Unternehmen, die auf ZfP setzen, verzeichnen unter dem Strich einen deutlichen Gewinn an Qualität und Produktivität. Deshalb gewinnt die Wärmefluss-Thermografie als ein bildgebendes ZfP-Verfahren in unterschiedlichsten Industriezweigen immer mehr an Bedeutung.

Der Vortrag verdeutlicht, wie hochauflösende Thermografiekameras den zeitlichen und lokalen Verlauf eines Wärmeflusses sowie die daraus resultierende Temperaturverteilung an der Oberfläche des Prüfobjektes erfassen. Es wird aufgezeigt, welche Eigenschaften des Prüfobjektes diesen Wärmefluss beeinflussen, wie die Prüfmethode flexibel für verschiedene Materialien und Materialkombinationen eingesetzt werden kann und wie von Auffälligkeiten auf verschiedene Defekte geschlussfolgert werden kann.

Mobile wiederkehrende Ultraschallprüfungen an Güterwagenradsatzwellen (ohne Längsbohrung)

P. Archinger¹, W. Rösch², K. Rohde³, A. Weber³

¹ GMH Prüftechnik, Nürnberg; ² RöschConsult Group, Reinheim; ³ AREVA, Erlangen

Neben der Prüfung von längsgebohrten Radsatzwellen die längst Alltag in den Betriebswerken und bei der Instandhaltung von Radsätzen geworden ist, hat auch die Prüfung von Güterwagen-Radsatzwellen ohne Längsbohrung mehr und mehr an Bedeutung gewonnen. Nicht zuletzt durch verschiedene Vorkommnisse in der Vergangenheit ist die Prüfung von Güterwagenradsatzwellen immer wieder in der Diskussion.

Der wesentliche Diskussionspunkt sind die Kosten, welche für die Prüfung aufgewendet werden müssen. Diese werden mehrheitlich durch den notwendigen Ausbau des Radsatzes aus dem Güterwagen, dem Transport zur Prüfstation und der dadurch erzwungenen Stillstandszeit verursacht.

Moderne Prüfverfahren erlauben es zwischenzeitlich aber die Radsatzwelle ohne Entfernung der (unbeschädigten) Lackschicht und im eingebauten Zustand zu prüfen, wodurch sich die genannten Kostenfaktoren wesentlich reduzieren lassen. Das Fahrzeug steht dem Betrieb zudem in sehr kurzer Zeit wieder zur Verfügung.

In enger Zusammenarbeit zwischen RoeschConsult, GMH Prüftechnik GmbH und Areva mit Unterstützung vom Fraunhofer IZFP, entstand ein effizientes und einfach zu handhabendes Prüfsystem, welches zukünftig die Prüfung von Güterwagenradsatzwellen im eingebauten Zustand wesentlich vereinfachen wird und damit dazu beiträgt die Kosten für die Prüfung erheblich zu reduzieren.

Der Vortrag beleuchtet neben dem aktuellen technischen Stand auch die allgemeine Vorschriftenlage und vermittelt einen Eindruck über die potentiellen Einsatzbereiche. Er zeigt Wege und Möglichkeiten für die sehr effiziente Prüfung von Radsatzwellen im eingebauten Zustand mittels modernster Phased Array Technik und cleveren Manipulatorsystemen auf und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und Konzepte.

Die Idee einer optimierten Konstruktion von Radsatzwellen aus prüftechnischen Gesichtspunkten in Kombination mit weiteren mobilen Prüfsystemen und Dienstleistungen für Radsatzkomponenten runden diesen Vortrag ab.

Automatisierte ZFP im Kontext von Industrie 4.0 und kollaborativer Robotik

R. Söhnchen¹

¹ Automation W+R, München

Die zerstörungsfreie Prüfung steht durch globalen Lieferströme, Rückrufaktionen, komplexere Bauteildesigns, Sicherheitsanforderungen als auch die steigende Prüfgeschwindigkeit vor neuen Herausforderungen. Globale Warenströme und komplexere Lieferketten erhöhen den Prüfaufwand.

Die Qualitätskosten der kompletten Wertschöpfungskette werden sich erhöhen. Die ZFP ist kostenintensiv und bietet noch nicht erschlossene Automatisierungspotentiale.

Mehrere Trends sind in diesem Umfeld sichtbar:

- Bessere Unterstützung der Prüfer durch Systeme zur Entscheidungshilfe
- Automatisierte Handlings- und Prüfungsautomaten auch bei schnellen Typenwechseln

Die Autision Group, ein Verbund aus mehreren starken Partnern, bietet automatisierte Komplettlösungen in der zerstörungsfreien Prüfung durch die Kombination aus Oberflächenprüfung, Messtechnik und Robotik an.

Die zerstörungsfreie Prüfung kann unter anderem durch unsere Produkte den Benetzungstest – bonNDTinspect®, die automatisierte Rissprüfung – Autoflux® oder die Unterstützung des Prüfers durch kollaborative Robotik erfolgen.

Die Auswertung der Daten erfolgt automatisch durch das System und wird dokumentiert. Nicht nur die Ergänzung und Entlastung der Prüfer erfolgt, sondern ein Nachweis für die Produktqualität ist vorhanden.

Mit der neuen Welt der kollaborativen Robotik bekommen wir in der ZFP die Möglichkeit, auch komplexe Aufgaben mit geringen Stückzahlen zu automatisieren.

Schwierige Prüfarbeitsplätze können so unterstützt werden:

- Unterstützung bei ZFP Entscheidungen über IO oder NIO
- Weniger körperliche Arbeit, z. B. durch Griff in die Kiste oder kollaborative Roboter
- Automatische Auswertungen und Klassifizierungen

Im Kontext von Industrie 4.0 und kollaborativer Robotik möchten wir innovative Ansätze für die ZFP der Zukunft aufzeigen.

Anwendungen von automatisierten Prüfrobotern

U. Rös¹, V. Klein², W. Zhang¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth; ² GE Inspection Robotics, Zürich, Schweiz

Oft sind Prüflokalitäten nur schwer oder auch gar nicht zu erreichen. Teure, inflexible und insbesondere zeitaufwändige Maßnahmen wie Gerüstbau oder Krane verbunden mit erweitertem Personenschutz sind dann oft der einzige Weg die gesetzte Prüfaufgabe lösen zu können.

Mit der FAST Plattform haben GE Inspection Technologies und GE Inspection Robotics Lösungen entwickelt, die obige Einschränkungen zum Teil eliminieren können.

Magnetische Räder an zwei unabhängig voneinander steuerbaren Fahrwagen bilden den Rahmen für ein flexibles Robotersystem, das Prüfausrüstung zuverlässig vor Ort bringt. Ob innen oder außen, ob eben oder gebogen: Die FAST-Plattform ist bestens gerüstet bis zu 12 kg Prüfausrüstung aufzunehmen und diese an unwirtlichen Orten zum Einsatz zu bringen. Alle Fahrbewegungen werden zentral von einem Bedienrechner gesteuert. Die FAST Plattform wird komplett über Ethernet gesteuert und hat einen Industrie Gigabit Ethernet Switch an Bord. Dadurch kann das System ohne grossen Aufwand mit zusätzlichen Achsen, Kameras und anderen Prüfgeräten erweitert werden.

Die FAST Plattform ermöglicht zusammen mit unseren Prüfgeräten CaZoom, USIP 40 oder Mentor UT mechanisierte Prüfungen, die früher nur schwer durchführbar waren. So erlaubt beispielsweise eine verfahrbare Achse am Roboter die Prüfung von größeren Flächen in flexibler Auflösung, typischerweise als Korrosionsprüfung an Tankböden, Rohren, Behältern oder Bauwerken. In der Praxis unvermeidlich auftretender Schlupf wird erkannt und automatisch kompensiert, wodurch sichergestellt wird, dass Fehlstellen im C-Bild auch dort dargestellt werden, wo sie sich real befinden. Auch Schweißnähte mit nicht trivialen oder variierenden Schweißnähten können mit dem Fast System bildgebend geprüft werden. In diesem Fall sorgt eine autonom arbeitende Schweißnahtverfolgung dafür, dass die Schweißnaht auch dort ist, wo die Prüfköpfe sie erwarten. Durch die flexiblen Prüfkopfaufnahmen und die in großen Bereichen konfigurierbaren Prüfgeräte kann das Fast System an vielen Stellen die manuellen Prüfungen durch mechanisierte und insbesondere bildgebende Prüfung ersetzen und so die Prüf- und Dokumentationsqualität signifikant verbessern.

Revision der ISO 17011 und ISO 17025 – was bleibt und was ist neu?

A. Kinzel¹

¹ Niedersächsische Geschäftsstelle für Grundsatzfragen in der Materialprüfung und Konformitätsbewertung, Garbsen

Die DIN EN ISO/IEC 17025 als Akkreditierungsnorm wird in 2017 grundlegend erneuert erscheinen. Dies betrifft nicht nur die Struktur der Norm (High-Level-Structure), die damit den ebenfalls bereits überarbeiteten Normen wie bspw. der ISO 17020 oder ISO 17065 angepasst wurde. Es gibt auch verschiedene inhaltliche Änderungen. Bspw. ist der risikobasierte Ansatz neu in dieser Norm. Auch Fragen zu Unteraufträgen und die Inanspruchnahme sonstiger externer Dienstleistungen ist neu zusammengefasst. Ebenso sind Änderungen bzgl. der metrologischen Rückführung erkennbar. Ein Praxiswerkzeug zur Umsetzung der Revision kann dabei für die Labore sich als hilfreich erweisen.

Die Änderungen haben Auswirkungen auf die Prüflabore. Gleichzeitig ist die DIN EN ISO/IEC 17011 geändert worden, die Vorgaben für die Akkreditierung und die damit verbundene Begutachtung macht und sicher auch Auswirkungen auf das neue Überwachungskonzept der DAkkS haben wird.

Alte Bekannte im neuen Gewand: zertifizierte BAM-Schwärzungstreppen zur Densitometerkalibrierung

U. Zscherpel¹, S. Bär¹, U. Ewert¹

¹ BAM, Berlin

Ein Ringversuch des Fachausschusses Durchstrahlungsprüfung brachte es 1979 zutage: ein geräte- und herstellerunabhängiges Hilfsmittel zur Kalibrierung von Densitometern für die genaue Messung der diffusen optischen Dichte D von Röntgenfilmen ist erforderlich, um eine hinreichende Genauigkeit von $\Delta D = \pm 0,05$ im praktischen Einsatz zu gewährleisten. Die festgestellten Abweichungen zwischen verschiedenen damals marktüblichen Geräten waren wesentlich größer, so dass eine geeignete Kalibrierung und Überprüfung notwendig ist. Die „BAM-Schwärzungstreppen“, belichtet auf einen herkömmlichen Röntgenfilm mit Röntgenstrahlung, war geboren, sie wurde seitdem 1000de mal verkauft, ihr Vertrieb weltweit nimmt immer noch zu!

Mittlerweile haben sich die Randbedingungen etwas geändert, akkreditierte Prüflaboratorien benötigen heute zertifizierte Referenzmaterialien zur Gerätekalibrierung. Auch die Normung ist nicht stehengeblieben, die alte DIN 4512:1973 zur photographischen Sensitometrie wurde mittlerweile durch die ISO 5:2009 abgelöst, bei ASTM gibt es die E 1079-10 zur Densitometerkalibrierung. Damit haben sich verschiedene technische Randbedingungen geändert, die auch die Messwerte der alten „Filmschwärzung“ zur heute üblichen optischen Dichte des Filmes verändert haben.

Die BAM hat alle diese Veränderungen aufgegriffen und hält die entsprechende hochgenaue Messtechnik zur Messung der diffusen optischen Dichte mit einer Genauigkeit besser als $\Delta D = \pm 0,003$ als offizielles BAM-Referenzverfahren vor und ist dafür nach ISO 17025 akkreditiert. Dieses konnte auch in Ringversuchen mit dem NIST bestätigt werden, da die PTB mittlerweile die Messung optischer Filmdichten aufgegeben hat, die Messtechnik wurde 2006 an die BAM umgesetzt. In einem letzten Schritt wurde nun beantragt, die bisherigen „BAM-Schwärzungstreppen“ in das Register der offiziellen Europäischen Zertifizierten Referenzmaterialien (ZRM) aufzunehmen.

Oberflächenvorbereitung für ZfP: Normierung, Umsetzung in der Praxis und Einfluss auf die Prüf-Resultate

P. Roth¹

¹ Jet Clean Systems, Brugg, Schweiz

Zur Durchführung aller gängigen Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) müssen die Oberflächen der zu prüfenden Bauteile gewisse Anforderungen erfüllen.

Diese Anforderungen sind in den jeweiligen Normen der Verfahren in qualitativer Weise beschrieben. Seit jeher werden diverse Strahlverfahren sowie manuelle Verfahren wie Bürsten und Schleifen zur Erreichung der geforderten Oberflächenqualität angewendet. Diese Verfahren beeinflussen alle, aber auch die Oberfläche der Bauteile und somit die Resultate der Zerstörungsfreien Prüfung.

In der Praxis entsteht dabei ein typischer Zielkonflikt: Die Bauteile müssen meist möglichst schnell und günstig gereinigt werden, was zur Verwendung von diversen Low-Cost-Verfahren als auch zur Anwendung von möglichst leistungsstarken Verfahren führt. Je mehr Energie jedoch in die Oberfläche eingebracht wird und je qualitativ schlechter die Oberfläche vorbehandelt ist, umso stärker werden nachfolgende ZfP-Verfahren beeinflusst. Die Auswirkungen dieser Beeinflussung sind jedoch bisher nicht wissenschaftlich untersucht und/oder publiziert worden.

Dieses Referat befasst sich nun im Spannungsfeld dieses Zielkonflikts mit der konkreten Anwendung an Bauteilen aus der Kraftwerksindustrie, zeigt erste Resultate diverser Verfahren zur Oberflächenvorbereitung auf die ZfP-Prüfung auf und bringt diese in Zusammenhang mit eventuell fehlender oder ungenügend definierten Angaben in Normen.

Die Eindringprüfung Auswahlkriterien für den jeweiligen Einsatz des Eindringsystems

H.W. Berg¹, M.L. Wolf¹

¹ BMB, Heilbronn

- Kunde/Endnutzer verlangt die Eindringprüfung der Teile/Komponenten.
- Welches Eindringmittelsystem muss bei dieser Prüfanforderung eingesetzt werden?
- Wer erstellt die Vorgabe, welches Eindringmittelsystem eingesetzt werden muss?
- Gibt es immer wieder Eindringssysteme, die eingesetzt werden, nach dem Motto „das machen wir schon immer so“.
- Oder hat sich die Prüfanforderung geändert und das Prüfsystem müsste eigentlich gewechselt werden, was ist zu tun?
- Eine wichtige Entscheidung also welches Eindringssystem für die jeweilige Anwendung ausgewählt werden muss. Dies ist jedes Mal eine Herausforderung für den PT Stufe 3 Verantwortlichen.

Anwendungsbeispiele werden aufgezeigt, auch unter Berücksichtigung der aktuellen Normen, für die Auswahl des richtigen Eindringsystems und welche Kriterien eingehalten werden müssen um die Prüfanforderungen zu erfüllen.

Talbot-Lau Röntgen-Interferometrie für die zerstörungsfreie Prüfung

Y. Shashev¹, A. Kupsch¹, A. Lange¹, S. Evsevlev¹, R. Britzke¹, G. Bruno¹,
B.R. Müller¹

¹ BAM, Berlin

Im vergangenen Jahrzehnt sind gitterinterferometrische Röntgenabbildungen zunehmend in den Fokus des Interesses gerückt. Sie sind insbesondere dann Vorteil, wenn der in der Standardradiographie erreichbare Kontrast nicht genügt, schwach absorbierende Mikro- und Nanostrukturen abzubilden.

Auf Kosten mehrerer Aufnahmen gestattet die Talbot-Lau Gitterinterferometrie, die Beiträge aus Absorption, Refraktion und (refraktiver) Streuung zu trennen. Dazu werden die Störungen der Interferenzmuster von Phasengittern ausgewertet. Im Gegensatz zu einer Vielzahl anderer refraktionsbasierter Abbildungsmethoden kann diese Technik mit konventionellen Röntgenröhren (mit divergenter, polychromatischer Strahlung) angewendet werden. Damit ist die Technik geeignet, typische ZfP-Fragestellungen zu lösen.

Hier stellen wir Untersuchungen zur Effizienz von Phasengittern vor. Die Visibilität (d. h. die Höhe der Oszillation im Interferenzmuster) wird als Funktion verschiedener geometrischer Parameter verfolgt. Eine Rotation um die Achse parallel zu den Gitterstegen ändert die Form des Gitterprofils (d. h. die Verteilung der Phasenschiebungen). Die kontinuierliche Variation des Winkels und des Detektionsabstandes führt zur Identifikation von ausgezeichneten Kombinationen mit maximaler Visibilität, wobei die Abstände deutlich geringer sind als im Standardaufbau mit senkrechter Gitterbestrahlung.

Unsere Studie umfasst Simulationen für monochromatische Quellen und den Vergleich zu experimentellen Ergebnissen mit der Synchrotronstrahlung.

In der Literatur wurden die Vorteile der Talbot-Lau Interferometrie für die zerstörungsfreie Prüfung von Faserkompositen und Verbundwerkstoffen demonstriert. Hier werden als Beispiele Messungen an Aluminiumtitanat (Al₂TiO₅) Pulver gezeigt.

Möglichkeiten zur Extraktion akustoelastischer Konstanten aus dem Nichtlinearitätsparameter akustischer Oberflächenwellen in metallischen Werkstoffen

M. Rjelka¹, B. Köhler¹, A. Mayer²

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² Hochschule Offenburg

Zerstörungsfreie Verfahren zur Messung von Eigenspannungen erfordern, abhängig vom gewählten Verfahren, die Kenntnis gewisser Kopplungskonstanten. Im Falle von Ultraschallmessverfahren sind das neben den elastischen Konstanten zweiter Ordnung (SOEC) vor allem die Konstanten dritter Ordnung (TOEC). Elastische Konstanten fester, metallischer Bauteile werden in der Regel in Zugversuchen bestimmt. Zur Ermittlung der TOEC werden diese mit Ultraschallmessmethoden kombiniert. Durch äußere Einflüsse, wie etwa mechanische Nachbehandlungen der zu untersuchenden Bauteile können sich diese Konstanten jedoch ändern und müssen folglich direkt am veränderten Material bestimmt werden.

Mithilfe von Simulationen wird die Ausbreitung der zweiten Harmonischen und der nicht-linear erzeugten Oberflächenwellen in Wellenmischexperimenten analysiert und der akustische Nichtlinearitätsparameter (ANP) bzw. der Kopplungsparameter aus der Amplitudenentwicklung berechnet. Insbesondere wird untersucht, welchen Einfluss ein gegebenes Tiefenprofil der TOEC auf den ANP hat (Vorwärtsproblem) und inwiefern sich aus den Messungen des ANP auf ein vorliegendes Tiefenprofil der TOEC schließen lässt (inverses Problem). Außerdem wird diskutiert, welchen Einfluss lokale Änderungen der SOEC auf den ANP haben können und wie groß diese Änderungen sein dürfen, um die TOEC dennoch bestimmen zu können. Die Untersuchungen hierzu wurden auf der Basis eines 3D-FEM Modells mit zufällig orientierten Mikrorissen durchgeführt. Die numerischen Rechnungen zeigen dabei auch eine gute Übereinstimmung mit einem aus der Literatur bekannten und für dieses Problem erweiterten, analytischen Modell. Neben der rissinduzierten Nichtlinearität kann bei diesem auch die Gitternichtlinearität berücksichtigt werden.

Zerstörungsfreie Prüfung zur effizienteren Ermittlung von Werkstoffwöhlerlinien

P. Starke¹, C. Boller¹

¹ Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Die Ermittlung einer Werkstoffwöhlerlinie, die zur Abschätzung von Bauteillebensdauern benötigt wird, erfordert ca. 20-30 Ermüdungsversuche unter einstufiger Beanspruchung. Dieser Aufwand ist oft nicht vertretbar. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie durch Kombination von ZfP, der Digitalisierung der Messtechnik und Signalverarbeitung mit einer einzigen Werkstoffprobe eine komplette Werkstoffwöhlerlinie ermittelt und zusätzlich noch weitere Informationen bezüglich des Ermüdungsverhaltens gewonnen werden können. Mit der gleichzeitigen Reduktion von Versuchsaufwand und -kosten entsteht ein erheblicher Vorteil gegenüber der konventionellen Ermittlung von Ermüdungsdaten wie auch gegenüber etablierten Kurzzeitverfahren, wenn es gelingt, eine Vielzahl an Werkstoffeffekten an einer einzelnen Probe mittels Datenanalyse zu separieren und dies als Grundlage für die Ermittlung von Werkstoffwöhlerlinien zu nutzen.

In diesem neuen Verfahren SteBLife (Stepped Bar Fatigue Life Evaluation), welches am LZfPQ der Universität des Saarlandes entwickelt wurde, werden eine gestufte Ermüdungsprobe mit mehreren Prüfstrecken eingesetzt und die lokalen Werkstoffreaktionen über zugeordnete Messgrößen der ZfP erfasst. In ersten Untersuchungen für Proben aus C45E wurden die Werkstoffreaktionen mittels Infrarotkamera und einem selbstentwickelten mikro-magnetischen Messsystem auf der Basis von Hall-Sensoren gemessen.

Die Grundidee der SteBLife Prüfstrategie ist ein gestufter Werkstoffprobentyp. Die drei Prüfstreckendurchmesser führen zu unterschiedlichen lokalen Spannungen, wodurch in einem einzelnen Einstufenversuch das Wechselverformungsverhalten von drei Spannungshorizonten abgebildet werden kann. Auf der Basis dieser Temperaturverläufe kann die Wöhlerkurve nach der SteBLife Methode mit nur einem einzigen Versuch berechnet werden. Die hier vorgestellte Vorgehensweise reduziert nicht nur Versuchszeit und -kosten zur Ermittlung einer Werkstoffwöhlerlinie um einen Faktor 30 oder mehr als 95 %, sondern führt auch noch zu erheblichen neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen hinsichtlich des nichtlinearen Schadensakkumulationsverhaltens eines Materials. Dies kann zudem der ZfP ein vollkommen neues und vielversprechendes Anwendungsfeld eröffnen.

Synchrotron-Refraktion mit in-situ-Zugbelastung zur Charakterisierung der Schadensentwicklung in Metall-Matrix-Kompositen

R. Laquai¹, B.R. Müller¹, J. Nellesen², M.P. Hentschel¹, A. Kupsch¹, W. Tillmann³

¹ BAM, Berlin; ² RIF, Dortmund; ³ TU Dortmund

Die Synchrotron-Refraktions-Topographie basiert auf der Brechung von Röntgenstrahlung an den Grenzflächen zwischen Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex. Refraktionseffekte verändern die Ausbreitungsrichtung der Röntgenstrahlung, welche mit Hilfe der Methode des Analyser-Based Imaging analysiert wird. Dabei wird ein Silizium-Einkristall im Strahlengang zwischen Probe und Detektor platziert. Dieser Analysator-Kristall filtert, innerhalb seiner Streuebene, die Röntgenstrahlung gemäß ihrer Ausbreitungsrichtung. Durch das Rastern verschiedener Winkelpositionen des Analysator-Kristalls erhält man das Winkelspektrum der von der Probe gebrochenen Strahlung. Aus dieser Rocking Curve lässt sich die spezifische innere Oberfläche der Probe bestimmen. Diese Information wird über einen 2D-Detektor mit einer nominellen Pixelgröße von 3,6 µm gewonnen. Die Installation einer Zugprüfmaschine ermöglicht es die Proben in verschiedenen Lastzuständen in-situ zu untersuchen. Damit ist es möglich die spezifische innere Oberfläche in Abhängigkeit der Last darzustellen und so Schädigungsmechanismen abzuleiten. Der Vorteil bei der Ausnutzung des Refraktionseffekts gegenüber der einfachen Durchstrahlung ist die höhere Sensitivität gegenüber Defekten mit geringem Volumen aber großer Oberfläche. Somit werden auch Mikrorisse und, speziell bei Kompositen, die Enthaftung zwischen Matrix und Verstärkung (Partikel, Fasern) erfasst. In dieser Studie wurden Metall-Matrix-Komposite bestehend aus einer Aluminium-Matrix verstärkt mit Aluminiumoxid-Partikeln untersucht. Hierzu wurden knochenförmige Zugproben präpariert, deren Messlänge einen rechteckigen Querschnitt von 1,7 mm × 1,3 mm aufwies. Die Proben wurden einem Zugversuch unterzogen, welcher in Intervallen unterbrochen wurde. Bei jeder Unterbrechung wurde unter quasi-statischer Last die Rocking Curve gemessen und ein Radiogramm der spezifischen inneren Oberflächen berechnet. Dabei konnte ab dem Erreichen einer Last von ca. 600 N ein Anstieg der spezifischen inneren Oberfläche beobachtet werden. Demgegenüber zeigen die zum Vergleich durchgeführten Durchstrahlungsaufnahmen keinerlei Defekte. Daher belegt diese Untersuchung das Potential der Refraktion-Topographie zur frühzeitigen Erkennung von Schädigungen mit hoher Empfindlichkeit.

Ultraschallprüfung zur fertigungsbegleitenden Qualitätssicherung von Wälzlagern und zur wiederkehrenden Bauteilprüfung von im Betrieb befindlichen Wälzlagern

G. Vogt¹, S.B. Vogt¹

¹ VOGT Ultrasonics, Burgwedel

Durch steigende Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Wälzlagern nimmt die Ultraschallprüfung als zerstörungsfreies Prüfverfahren einen steigenden Stellenwert in der Qualitätssicherung ein. In der Fertigung werden hochbelastete Lagerbauteile wie Lagerringe und Wälzkörper hinsichtlich ihrer Fehlerfreiheit produktionsbegleitend ultraschallgeprüft. Dabei kommen auch innovative Ultraschallprüfverfahren, wie die Phased Array Technologie zum Einsatz. Im Prüflabor werden begleitend zu Langzeitbelastungsuntersuchungen frequenziell Ultraschallprüfungen an Bauteilen durchgeführt und mit den Ergebnissen der Belastungen korreliert. Wiederkehrende Ultraschallprüfungen an im Einsatz befindlichen, zwischenzeitlich ausgebauten Lagern von Windkraftanlagen und Wälzkörpern geben Aufschluss über WEC-Schädigungen. Dies sind Fehlstellen im Material, wie Risse, Gefügeänderungen und Einschlüsse.

Durch die hohen Anforderungen erfolgt die Prüfung quasi berührungslos in Tauchtechnik. Die Bauteile werden in der Prüfanlage rotationssymmetrisch unter Wasser gedreht und so an einem Prüfkopf bzw. mehreren Prüfköpfen über 360° vorbeigeführt. Dabei verfolgt der Prüfkopf die Geometrie des Bauteils so, dass den Einschallwinkel in das Material oder der Auftreffwinkel auf den Funktionsbereich über die Höhe des Lagerringes gleich bleibt. So können Scanpläne für nahezu beliebige Geometrien automatisiert abgefahren werden. Die Ergebnisse werden in Form von bildgebenden Abwicklungen und Anzeigenlisten ausgewertet. Gegebenenfalls vorhandene Fehler werden bezüglich ihrer Größe und Tiefenlage bewertbar. Derartige Prüfanlagen haben mehrere Linearachsen, die den Prüfkopf im Raum bewegen und einen Drehteller, der das Bauteil zentriert und mit hoher Rotationsgeschwindigkeit dreht. Individuell einstellbare Prüfprogramme bieten die Möglichkeit der Fehlerprüfung unter verschiedenen Winkeln. Je nach zu erwartenden Fehlern erfolgt eine optimierte Einschallung, sodass die zu erwartenden Fehlerbereiche möglichst unter 90° zu ihrer Ausdehnung beschallt werden. Um auch schräg liegende Anzeigen, die den Ultraschall nicht reflektieren, dennoch detektieren zu können, wird zusätzlich mit der Rückwandabschattung gearbeitet. Der Vortrag zeigt unterschiedliche Anforderungen und erzielbare Ergebnisse im Praxisbeispiel.

Hochgenaue automatisierte Wanddickenmessung und ihre Grenzen

H. Rast¹, W.A.K. Deutsch¹, D. Schäle¹

¹ KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau, Wuppertal

In vielen Fertigungsprozessen ist aufgrund enger Fertigungstoleranzen die präzise Bestimmung der Wandstärke notwendig. Häufig ist dabei eine taktile Bestimmung schwierig, wenn nicht sogar unmöglich. Die Ultraschalltechnik bietet sich hier häufig als Alternative an. Moderne ein-, oder mehrkanalige Elektroniken verfügen über verschiedene Methoden der Signalauswertung und liefern Genauigkeiten im μm -Bereich und eine sehr große Wiederholgenauigkeit. Die absolute Genauigkeit wird hierbei weniger von der Elektronik, sondern mehr von der konkreten Anwendung eingeschränkt.

In diesem Beitrag wird zunächst das Prinzip der hochgenauen Wandstärkenmessung erläutert. Dabei wird aufgeführt welche Genauigkeit erreichbar ist und wo die Grenzen liegen. Anschließend werden die Besonderheiten der automatisierten Messung beleuchtet und mit praktischen Beispielen belegt.

Einsatz der induktiv angeregten Shearografie für die zerstörungsfreie Prüfung von hochfesten Strukturklebungen

I. Kryukov¹, S. Böhm¹

¹ Universität Kassel

Zum Fügen von unterschiedlichen Materialien ohne thermische Gefügebeeinflussung und zur Realisierung von Gewichtseinsparungen hat das Kleben in den vergangenen Jahren in den industriellen Anwendungen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Der Klebprozess ist jedoch ein empfindlicher Fertigungsprozess, bei dem ein hohes Maß an Überwachung und Dokumentation des Fertigungsprozesses notwendig ist. Darüber hinaus erfordern modernes Qualitätsmanagement und die Produkthaftung, die Qualität der erzeugten Produkte lückenlos zu erfassen und zu dokumentieren. Die aktuell eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) wie Ultraschall- oder Durchstrahlungsprüfung sind aufgrund der hohen Prüfdauer häufig nicht innerhalb der Serienfertigung realisierbar, sodass in der Praxis meist auf den Einsatz zerstörender Prüfverfahren ausgewichen wird.

Die Shearografie ist ein optisches, gut automatisierbares zerstörungsfreies Prüfverfahren, welches sich auch für den Einsatz zur Qualitätskontrolle von Klebverbindungen anbietet. Bei diesem großflächigen und berührungslosen Verfahren wird durch kohärente Beleuchtung das entstehende Speckle-Muster der Oberfläche des Prüfobjektes erfasst. Aus dem Vergleich von Speckle-Mustern zweier Belastungszustände lassen sich orts aufgelöst Änderungen von Deformationen bestimmen. Zur Belastung des Prüfobjektes haben sich thermische oder mechanische Anregungsarten (z.B. Halogenlampen, Unterdruck usw.) bewährt. Fehler in einer Klebnaht führen zu einer lokalen Änderung der Verformung und können mit der Shearografie detektiert werden. Somit lassen sich Fehlstellen aufgrund der lokalen Änderungen der Steifigkeit im Bauteil detektieren.

Im Rahmen dieses Papers wird das Einsatzpotential der Shearografie zur Ermittlung unterschiedlicher Fehlerarten (fehlender Klebstoff, Poren im Klebstoff sowie Kissing Bonds) dargestellt. Die Deformationen werden durch Induktionsanregungen erzeugt, wobei artgleiche und artungleiche Strukturklebungen verschiedener Werkstoffe (Tiefziehstahl, CFK) hinsichtlich der Fehlererkennung verglichen werden. Als Klebstoff wird ein 2K-PUR-Klebstoff eingesetzt.

Entwicklung eines praxistauglichen ultraschallbasierten Messverfahrens zur qualitativen Bestimmung von nichtmetallischen Einschlüssen in Aluminium-Formgusslegierungen

T. Waschkies¹, A. Reuther¹, R. Licht¹, M. Weikert-Müller¹, F. Walte¹, B. Valeske¹, F. Feikus²

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken; ² RWTH Aachen

Der verstärkte Trend zum Leichtbau führt auch bei Bauteilen aus Aluminium-Formgusslegierungen zu immer dünneren Wanddicken. Daneben steigen im Motorenbau die mechanischen und thermischen Belastungen. Daraus ergibt sich u. a. die Forderung nach immer höherer, insbesondere zyklischer Belastbarkeit mit längerer Lebensdauer und verbesserter Betriebsfestigkeit der entsprechenden Aluminiumwerkstoffe und Gussteile, die ihrerseits Ungängen, wie z. B. nichtmetallische Einschlüsse, immer weniger toleriert.

Im Rahmen eines öffentlich geförderten Projekts der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) wurde ein Messverfahren entwickelt und in realen Aluminiumschmelzen validiert, um nichtmetallische Einschlüsse in Aluminium-Formgusslegierungen nachzuweisen.

Der Fokus lag hierbei auf der Entwicklung eines kostengünstigen Messverfahrens, welches dennoch einen Nachweis von sehr geringen Verunreinigungsgraden und eine qualitative Unterscheidung zwischen hoher, mittlerer und niedriger Partikelbelastung erlaubt. Hierzu wurde zunächst ein Modellsystem erarbeitet, welches bei Raumtemperatur eine Entwicklung und grundlegende Qualifizierung des Messverfahrens ermöglicht. Hieran wurden die optimale Messfrequenz sowie der prinzipielle Messaufbau abgeleitet. Die Entwicklungsschritte sowie die in Aluminiumschmelzen erzielten Ergebnisse werden im Rahmen des Vortrags vorgestellt.

RoboCT – Roboterbasierte XXL-Mikro-Computertomographie an Großbauteilen im Automobilbau

W. Holub¹, M. Amr¹, C. Kretzer¹, P. Jahnke²

¹ Fraunhofer EZRT, Fürth; ² BMW, München

Röntgen-Durchstrahlungsprüfung ist das etablierte Mittel der Wahl zur Qualitätssicherung von Guss- und Schweißbauteilen – nicht nur im Automobilbau – und Röntgen-Computertomographie (CT) ein mächtiges Verfahren, um die Ursache unklarer Befunde der Durchstrahlungsprüfung durch die gebotene vollständige 3D-Information zu identifizieren. Ebenso wird die CT, wegen deren präziser Darstellung der Strukturen in inhomogenen Materialien, bereits vorzugsweise für die Prüfung von Proben und Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt.

Derweil können diese Methoden heute in der Praxis nur Objekte von begrenzter Größe und geometrischer Komplexität adressieren. Große Kfz-Bauteile wie Seitenrahmen, Heckklappe oder fertig verarbeitete Karosserien können bisher nur unter Laborbedingungen mit immensem Aufwand an sehr wenigen entsprechend mächtig ausgerüsteten Standorten untersucht werden.

Ein Ansatz, diese Großbauteile für die mächtige Röntgenprüfung zu erschließen, besteht darin, Strahlenquelle und Detektor des röntgenbildgebenden Systems durch Industrieroboter am Prüfobjekt zu positionieren anstatt mittels der üblichen hochpräzisen Achssysteme von Röntgenanlagen im Labor. Die Herausforderung liegt nun darin, die verlorene Genauigkeit des Manipulators algorithmisch zu kompensieren, sodass die – vor allem für Mikro-Computertomographie – nötige Präzision erreicht wird, um zuverlässig die geforderten Details im Objekt darzustellen.

Am Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik haben wir in der Forschung für Automobilbau sowie Luft- und Raumfahrt die nötigen Verfahren zur Anwendung von roboterbasierter CT entwickelt und unter anderem gemeinsam mit der BMW Group Anwendungen an unterschiedlichen Kfz-Großbauteilen verschiedener Materialien mit entsprechend vielseitigen Aufgabenstellungen untersucht.

Wir präsentieren die exemplarische Anwendung und Ergebnisse von RoboCT sowie einen roboterbasierten Röntgen-Durchstrahlungsablauf mit eskalierender Computertomographie an Großbauteilen wie dem CFK-Seitenrahmen des BMW i3 sowie der Aluguss-Heckklappe eines BMW 5er Touring.

Laser-angeregte Lockin-Thermografie zur zerstörungsfreien und berührungslosen Schichtdickenmessung von thermisch gespritzten Beschichtungen

S. Lindemann¹, R. Schaller¹

¹ Daimler, Stuttgart

Werkstoffe werden heutzutage aus zahlreichen Gründen beschichtet. Die Anforderungen an die Beschichtung sind häufig dekorativer oder funktioneller Natur, wobei insbesondere Funktionsschichten kaum noch aus unserem Alltag wegzudenken sind. Diese kommen zum Einsatz, wenn eine Applikation besondere Anforderungen an den Korrosions- oder Wärmeschutz oder an die tribologischen Eigenschaften stellt. Da der Beschichtungswerkstoff diese Funktion übernimmt, hat die Sicherstellung seiner Schichtdicke eine hohe Priorität. Diese Studie beschäftigt sich speziell mit der zerstörungsfreien und berührungslosen Schichtdickenmessung von thermisch gespritzten Zylinderlaufflächen mittels Laser-angeregter Lockin-Thermografie. Unter Beachtung der Anforderungen an eine Inline-Prüftechnik (kurze Prüfdauer, hohe Reproduzierbarkeit) wird deren Messgerätefähigkeit bei verschiedenen Lockin-Frequenzen bewertet. Den Untersuchungen liegt dabei ein Teilespektrum zugrunde, das die gesamte zu erwartende Produktionstoleranz abdeckt und daher eine Kalibrierung des Prüfverfahrens möglich macht. Außerdem werden die zur Schichtdickenmessung herangezogenen Phaseninformationen auf Plausibilität mit der Theorie der thermischen Wellen überprüft. Des Weiteren wird untersucht, ob eine eindeutige Korrelation zwischen dem Phasenwinkel aus der Lockin-Thermografie und der Materialdicke aus der Röntgen-Computertomografie besteht. Durch eine optimale Wahl der Modulationsfrequenz kann der Messfehler der Thermografie minimiert werden, obwohl sich der Werkstoff nachweislich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befindet.

Ultraschallprüfung von Klebeverbindungen im Automobil-Karosseriebau

R. Albrecht¹, P. Buschke², W. Zhang²

¹ Volkswagen Sachsen, Zwickau; ² GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

In den letzten Jahren nimmt Kleben als Fügetechnik im Rohbau von Automobilkarossen einen immer größeren Stellenwert ein. Getrieben wird dieser Trend unter anderem von der fortschreitenden Gewichtsreduktion im Fahrzeugbau, wobei Klebstoffe sowohl zur Abdichtung als auch zur Steigerung der strukturellen Festigkeit eingesetzt werden. Der Einsatz verschiedener Materialien (Stahl, Aluminium, Composites, Kunststoffe) und deren Kombinationen bilden ebenfalls die Basis für die Klebung als Fügetechnik. Allerdings bietet auch Kleben, wie eigentlich jeder Fertigungsprozess, keine 100%ige Prozesssicherheit und erfordert eine Prüfung, die sowohl in Stichproben zerstörend als auch zerstörungsfrei erfolgen kann, wobei sich die zerstörungsfreie Prüfung insbesondere produktionsbegleitend als 100% Qualitätskontrolle im Ausgang anbietet.

GE Inspection Technologies hat diesen Trend aufgenommen und zusammen mit dem Volkswagen Werk in Zwickau eine neuartige, praxisnahe Applikationslösung zur zerstörungsfreien Prüfung von Falzklebeverbindungen (und weiteren Anwendungen) mittels Ultraschallprüfung entwickelt. Sowohl der Ultraschallsensor als auch die Gerätetechnik (Phased Array) wurden speziell für diesen Anwendungsfall weiterentwickelt.

Risse an gekerbten kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten zerstörungsfrei charakterisiert mit Röntgenverfahren

V. Trappe¹, S. Hickmann¹, A. Kupsch¹, B.R. Müller¹, R. Laquai¹, M. De Monte²

¹ BAM, Berlin; ² Robert Bosch, Renningen

Die guten mechanischen Eigenschaften von kurzfaserverstärkten Kunststoffen mit thermoplastischer Matrix, gepaart mit der Verfügbarkeit wirtschaftlicher Verarbeitungsprozesse führt zum zunehmenden Einsatz im Automobilbau. Diese Werkstoffklasse wird auch für Strukturbauteile verwendet, deren Versagen die Gebrauchsfähigkeit des Fahrzeugs ganz oder teilweise beeinträchtigen und ggf. auch die Betriebssicherheit gefährden kann. Insbesondere die Rissentwicklung an Kerben ist dabei für den Konstrukteur von besonderem Interesse.

In früheren Untersuchungen konnte mittels der Röntgenrefraktionstopographie im Labor und begleitender hochauflösender Röntgen-Computertomographie an der BAMline am BESSY II gezeigt werden, dass Proben, die mit einer über dem Querschnitt gleichmäßig verteilten Nennspannung beaufschlagt werden, eine spezifische Schädigungsentwicklung aufweisen. Dabei bilden sich im Volumen zuerst verteilte Mikrorisse an den Faserfilamentenden und an den Fasermantelflächen, je nach Orientierung und Spannungszustand. Diese Mikrorisse wachsen mit zunehmender Schwingspielzahl zu Agglomerationen von Mikrorissen zusammen, die schließlich in der Dimension weniger Millimeter einen technischen Anriss bilden.

Jüngst wurde nun untersucht, ob dieses Degradationsverhalten an Kerben qualitativ in gleicher Weise auftritt. Hierzu wurden seitens des Projektpartners BOSCH Proben aus PA66 mit 35 Gew.% Kurzglasfaserverstärkung gefertigt, in die eine ca. $10 \times 0,4 \text{ mm}^2$ (Kerbradius 0,2 mm) große Mittelkerbe eingebracht wurde. Aus Vorversuchen und rechnerischen Betrachtungen war bekannt, dass ausgehend von der Mittelkerbe jeweils zu den Seiten der Proben Ermüdungsrisse auftreten werden. Mittels Röntgenrefraktionstopographie wurden die Faserorientierungsverteilung in der Umgebung der Kerbe und die Mikrorissbildung mit Labormitteln bestimmt. Wegen der geringen Ortsauflösung von ca. 1 mm wurde an der BAMline mit Diffraction-Enhanced-Imaging die Probe flächig um die Kerbe mit einer Ortsauflösung von ca. 5 μm untersucht, um die im Labor mit der SAXS-Anlage bestimmte Mikrorissbildung zu verifizieren. Im Rahmen des Beitrages werden die Ergebnisse aus beiden Verfahren einander gegenübergestellt und im Bezug auf das spezifische Degradationsverhalten der kurzfaserverstärkten Thermoplaste diskutiert.

Automatisierte Luftultraschallprüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen im Karosseriebau

N. Lehmann¹, A. Tegtmeier¹, S. Jüttner²

¹ Porsche Leipzig; ² Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Das Widerstandspunktschweißen gilt als dominierendes Fügeverfahren für den Karosseriebau in der Automobilindustrie. Entscheidendes Qualitätsmerkmal für punktförmige Schweißverbindungen von Stahl- und Aluminiumlegierungen stellt der Schweißlinsendurchmesser dar. Zunehmend werden konventionelle Einzelschwinger-Prüfsysteme durch bildgebende Systeme ersetzt, welche durch die Verwendung von Phased Array- oder Matrixprüfköpfen ein farbcodiertes C-Bild aus der Fügeebene liefern. Die Durchführung und Bewertung der Ultraschallprüfung ist bis heute subjektiv vom Prüfpersonal abhängig und die Ankopplung erfolgt stets mit Koppelmittel, was eine Automatisierung bisher verhindert.

Die Luftultraschalltechnologie als zerstörungsfreies Prüfverfahren besitzt für das Prüfen von Widerstandspunktschweißverbindungen sehr großes Potential. Im Rahmen der aktuellen Untersuchungen soll die luftgekoppelte Ultraschalltechnik qualifiziert werden, um zukünftig eine automatisierte, kontaktfreie ZfP von Widerstandspunktschweißverbindungen zu ermöglichen. Durch den Einsatz von niederfrequenten, fokussierten Luftultraschallwandlern in Kombination mit einem Industrieroboter werden neben der Transmissionsmessung auch die Messungen in einseitiger V-Anordnung untersucht und erprobt. Durch die gezielte Anregung von geführten Ultraschallwellen in den dünnen Karosseriebaublechen ist es möglich, die Dimension der Schweißverbindung in der Fügeebene durch die Detektion der abgestrahlten "leaky waves" zu bestimmen. In diesem Beitrag werden zuerst Ergebnisse zur Luftultraschallmessung von Widerstandspunktschweißverbindungen vergleichend mit der Kontakt-Ultraschalltechnologie vorgestellt, bevor die prinzipielle automatisierte Durchführbarkeit überprüft wird.

Quantitative Bewertung künstlicher und natürlicher Fehler in Faserverbundwerkstoffen mit aktiver Thermografie und Ultraschall

C. Maierhofer¹, R. Krankenhagen¹, M. Röllig¹, S.M.H. Hosseini¹, T. Heckel¹, M. Gaal¹, F. Schadow¹, D. Brackrock¹, M. Gower², M. Lodeiro², G. Baker²

¹ BAM, Berlin; ² National Physical Lab., Teddington, Großbritannien

Faserverstärkte Kunststoffe werden immer häufiger zur Verbesserung der Effizienz und Zuverlässigkeit von Anlagen und Komponenten in vielen Industriebereichen der Energieerzeugung (z.B. in Rotorblättern von Windkraftanlagen und Gezeitenkraftwerken, Triebwerksgehäusen, flexiblen Öl- und Gasleitungen) eingesetzt. Weiterentwicklungen in der Materialzusammensetzung und im Herstellungsprozess sowie der Einsatz in neuen Anwendungsbereichen unter wechselnden Umgebungsbedingungen und Belastungen steigert auch den Bedarf an innovativen zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP). Im EMRP (European Metrology Research Programme)-Projekt VITCEA werden daher komplementäre ZfP-Verfahren (Scherografie, Mikrowellenverfahren, Ultraschall und aktive Thermografie) weiterentwickelt und validiert. Ziel ist die Verbesserung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit quantitativer Angaben zu typischen Fehlern und damit die Erhöhung der Akzeptanz von ZfP-Verfahren in der Industrie.

In Zusammenarbeit mit den Industriepartnern wurden Probekörper mit künstlichen und natürlichen Fehlstellen geplant und hergestellt. Als Matrixmaterialien wurden Epoxid und Polyamid 12 und zur Verstärkung Kohlenstoff- und Glasfasern eingesetzt. Die Orientierung und Lagenanordnung der Fasern wurde variiert. Hergestellt wurden die Probekörper mittels Prepreg-Technologie und verschiedenen Vakuuminfusionsverfahren. Natürliche Fehlstellen wurden in quasistatischen Zugversuchen und mittels Impactschädigung erzeugt. Im Beitrag werden verschiedene Techniken der aktiven Thermografie mit Blitz-, Impuls- und Lock-in- Anregung und des Ultraschalls mit Matrixarray und Luftankopplung bewertet und miteinander verglichen. Berücksichtigt wurden sowohl Anordnungen in Reflexions- als auch in Transmissionskonfiguration. Kriterien der Bewertung waren der Nachweis der Fehlstellen, das jeweils gemessene Signal-zu-Rauschverhältnis und die Möglichkeiten zur Bestimmung der Tiefenlage und lateralen Ausdehnung der Fehlstellen.

A new mode of acoustic NDT via Resonant Air-Coupled Emission (RACE)

I. Solodov¹, A. Dillenz², M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart; ² edevis, Stuttgart

Resonant modes of NDT which make use of local damage resonance (LDR) have been developed recently and demonstrated a significant increase in efficiency and sensitivity of hybrid acousto-optical inspection techniques by laser vibrometry, ultrasonic thermography and shearography. In this paper, a new fully-acoustic version of resonant NDT is demonstrated for near-surface defects in composite materials relevant to automotive and aviation applications. The technique is based on an efficient activation of defect vibrations by using a sonic/ultrasonic wave matched to a fundamental LDR frequency of the defect. On this condition, all points of the faulty area get involved in synchronous out-of-plane vibrations which produce a similar in-phase wave motion in ambient air. This effect of resonant air-coupled emission (RACE) results in airborne wave emanating from the defect area which can be received by a commercial microphone (low LDR frequency) or an air-coupled ultrasonic transducer (high frequency LDR). A series of experiments confirm a feasibility of both contact and non-contact versions of the technique for NDT and imaging of simulated and realistic defects (cracks, delaminations, disbonds) in composites.

Numerische Untersuchungen zur Luftultraschallprüfung von faserverstärkten Kunststoffen

M. Gaal¹, M. Diekjakobs¹, S.M.H. Hosseini¹

¹ BAM, Berlin

Luftultraschall wird immer häufiger für die Prüfung von anisotropen Faserverbunden eingesetzt. Meistens wird in Durchschallung geprüft, aber bei der einseitigen Zugänglichkeit muss eine Art Tandemtechnik mit Anregung von geführten Wellen angewendet werden. Bei beiden Techniken ist der Signal-Rausch-Abstand wegen der niedrigen akustischen Impedanz der Luft deutlich kleiner als bei einer typischen Prüfung in Kontakttechnik. Bei der Tandemtechnik wird das Signal zusätzlich durch eine größere Divergenz und Dämpfung geschwächt. Deshalb ist es wichtig, die Anregung, Ausbreitung und Detektion von geführten Wellen in Faserverbunden zu verstehen. In diesem Beitrag wird ein Finite-Elemente-Modell für die Simulation von luftgekoppelter Anregung und Ausbreitung von geführten Wellen in Faserverbunden vorgestellt und mit Messungen verglichen. Insbesondere wurde die Wellenausbreitung und Modenkonversion in der Nähe von Schäden in mehreren Parameterstudien untersucht.

Schnelle, zerstörungsfreie Prüfung an 3D-Leichtbaukomponenten aus hybriden Werkstoffen mit Luftultraschall

W. Essig¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Der steigende Einsatz von hybriden Leichtbaukomponenten im Automobilbau bringt gleichzeitig neue Herausforderungen für die Prüfbarkeit mit Methoden der zerstörungsfreien Prüfung. Vor allem die korrekte Anhaftung und Verbindung verschiedener Werkstoffe aneinander stellt ein sicherheitsrelevantes Prüfproblem dar. Unzureichende Anhaftung oder eine Ablösung zwischen den einzelnen Werkstoffen führt unweigerlich zu einem drastischen Abfall der mechanischen Eigenschaften. Daher ist es extrem wichtig, diese Grenzflächen qualitativ schnell zu untersuchen, möglichst schon in der Produktion. In dieser Arbeit wird anhand mehrerer hybrider Leichtbaukomponenten vorgestellt, wie mithilfe von Luftultraschall und geführten Wellen eine schnelle Prüfung der Bauteile möglich ist. Hierzu wurde die Methode der Schrägeinschallung verwendet, bei der der Luftultraschall unter einem bestimmten Winkel auf das Bauteil eingeschallt wurde, um somit eine geführte Welle zu generieren. Die sich in eine Richtung ausbreitende Welle konnte anschließend an einer anderen Stelle des Bauteils wieder detektiert werden. Die in der Amplitude und Phase enthaltenen Informationen geben Aufschluss über die lokal mechanischen Eigenschaften des Bauteils und konnten für eine Charakterisierung herangezogen werden. Befinden sich Sender und Empfänger an gegenüberliegenden Seiten des Bauteils und führt man einen Linienscan durch, erhält man eine über die Bauteilbreite integrierte Information über den Zustand des Bauteils. Durch die Kombination dieses Verfahrens mit einer robotergestützten, automatisierten Prüfung konnte eine schnelle Prüfung und Charakterisierung erzielt werden.

Einseitige Luftultraschallprüfung von Blechverbindungen – Eine Sache der Geometrie

M. Kiel¹, R. Steinhausen¹, A. Bodi²

¹ Forschungszentrum Ultraschall, Halle (Saale); ² SONOTEC, Halle (Saale)

In der Produktion von Halbzeugen für Massengüter ist das Fügen von Metallwerkstoffen häufig vollautomatisiert und robotergeführt. Zwar ist gewünscht, dass der Prozess durch die Automatisierung stets gleich abläuft, die Gewissheit darüber kann aber immer nur eine anschließende Prüfung der Werkstücke liefern.

In der hier vorgestellten Prüfsituation handelt es sich um die Untersuchung einer laserunterstützten Stoßschweißnaht von Stahlblechen. Bei diesem Prozess wird ein hochenergetischer Laser verwendet, um Stahlbleche unterschiedlicher Dicke von 0,8 bis 1,6 mm miteinander zu verbinden. Derartige Verbindungen werden z.B. im Automobilbereich verwendet, um einen Übergang zwischen dickeren stabilen Konstruktionsteilen zu weniger beanspruchten Teilen geringerer Wandstärke zu schaffen. Die Qualität der Schweißnaht hängt von sehr vielen Parametern ab. Eine mögliche Fehlerquelle ist u.a. der kurzzeitige Verlust der Laserleistung, was zu einer Unterbrechung der Schweißnaht führt.

Die einseitige Messanordnung besteht aus zwei Luftultraschallwandlern auf jeweils einer Seite der Schweißnaht. Die sich innerhalb der Bleche und über die Schweißnaht hinweg ausbreitende Lambwelle wird gemessen und analysiert. Die Anordnung der Wandler kann bedingt durch die einfache Geometrie zweier auf Stoß aneinander geschweißter Bleche so gewählt werden, dass keinerlei zusätzliche Abschattung der sich in Luft ausbreitenden Ultraschallwelle nötig ist. Das Verfahren ist demzufolge vollständig berührungslos. Die Ultraschallmessung kann direkt am Schweißroboter erfolgen, da nicht erst die Abkühlung der Bleche abgewartet werden muss.

In unserem Beitrag stellen wir die Möglichkeiten aber auch die Grenzen der Methode dar. Wir betrachten die Ergebnislage als Vergleich von Amplituden- und Laufzeitbewertung der Ultraschalldaten. Dabei werden sowohl das Auflösungsvermögen und die Empfindlichkeit der Messung als auch die Einflüsse der Wandlerjustage und die Anforderungen an die Roboterführung betrachtet. Die Einflüsse der unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten der Lambwelle beim Verschweißen von zwei unterschiedlich dicken Blechen sowie der Abweichung von der optimalen Prüfkopfführung werden in Hinblick auf die Robustheit der Bestimmung der Fehlergröße diskutiert.

Ein neuer Modellierungsansatz für Ultraschalldoppelbrechung

P. Fey¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Faserkunststoffverbunde werden in zunehmendem Maße in Leichtbauanwendungen eingesetzt, die nicht nur die Mobilität auf der Straße, in der Luft und zu Wasser effizienter und sicherer gestalten, sondern auch in Ingenieursbauwerken und Sportgeräten. Da sie sich in ihrer Mikrostruktur deutlich von den bisher verwendeten und gut erforschten metallischen Werkstoffen unterscheiden, werden daran angepasste zerstörungsfreie Prüfmethoden nötig.

Während Ultraschallmethoden meist darauf ausgerichtet sind, möglichst kleine Defekte detailliert abzubilden, versucht die hier vorgestellte Ultraschalldoppelbrechung, die Auswirkungen der Defekte auf die Steifigkeit des Materials zu quantifizieren. Dazu nutzt sie aus, dass in endlosfaserverstärkten Kunststoffen durch die Fasern in jeder Lage mechanische Vorzugsrichtungen entstehen. Durch diese wird die Phasengeschwindigkeit von Transversalwellen abhängig von ihrer Polarisationsrichtung.

Es wird ein eindimensionales numerisches Modell für die Ausbreitung von Ultraschallpulsen, das die Polarisationsrichtungsabhängigkeit der Phasengeschwindigkeit, Reflexion und Transmission der Transversalwellen an Grenzflächen zwischen Faserlagen sowie Streuung innerhalb der Lagen beschreibt, aufgestellt. Damit berücksichtigt es mehr Effekte als bisherige speziell für die Ultraschalldoppelbrechung entwickelte Modelle, welche meist Streuung und Reflexionen vernachlässigen oder nur für kontinuierliche Signale anwendbar sind. Im Vergleich zu Verfahren, die auf der Thomson-Haskell-Methode, auf Elastodynamischer Finiter Integrationstechnik (EFIT) oder Gauß'schen Wellenpaketen beruhen und ebenfalls zur Simulation der Ultraschalldoppelbrechung geeignet wären, liefert es durch die Eindimensionalität zwar weniger Details, erfordert aber auch eine wesentlich weniger aufwändige Werkstoffcharakterisierung.

Das Modell wird zunächst mit Fit-Algorithmen zur Bestimmung der Phasengeschwindigkeiten und Streukonstanten an Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff genutzt. Anschließend werden mit diesen Werten für verschiedene Lagenaufbauten die Messergebnisse vorhergesagt. Der Schädigungsverlauf an CFK-Zugproben wird in Form der Schubsteifigkeitsabnahme einzelner Lagen quantitativ nachvollzogen.

Ultraschall-Simulation unter Berücksichtigung einfacher Streuvorgänge auf Basis eines Mikrostruktur-Modells für polykristalline Werkstoffe

D. Dobrovolskij¹, M. Spies², S. Hirsekorn³

¹ Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern; ² Fraunhofer IZFP, Saarbrücken; ³ Saarbrücken

Methoden der zerstörungsfreien Prüfung tragen wesentlich zur Bewertung der Integrität von Bauteilen bei und sind nicht nur in sicherheitsrelevanten Bereichen von besonderer Bedeutung. Bei der Ultraschallprüfung von grobkörnigen Werkstoffen führt die gefügebedingte Schallschwächung dazu, dass ein Fehler in größerer Tiefe mit geringerer Energie getroffen wird und somit auch weniger reflektiert. Die Streuung der Ultraschallwellen an den Korngrenzen führt zu erhöhtem Rauschen, da auch Streusignale den Ultraschallempfänger erreichen. Diese Effekte führen zu geringen Signal-Rausch-Abständen, insbesondere bei großen Wanddicken. Beim Einsatz von Simulations-Codes zur Prüfplanung müssen daher Schallschwächung und Kornstreuung explizit berücksichtigt werden.

In diesem Beitrag berichten wir über unseren Ansatz, das Simulationsverfahren der Generalisierten Punktquellensynthese (Generalized Point Source Superposition, GPSS) mit streutheoretischen Zusammenhängen applikationsspezifisch zu modifizieren. Die Streutheorie beschreibt die Streuvorgänge in makroskopisch homogenen Werkstoffen für mikroskopische Streuer und ermöglicht somit die Berechnung von lokalen Streukoeffizienten in Abhängigkeit von der Frequenz und der Größe der Streuer. Ein räumliches stochastisches Modell für das Korngefüge wurde mit der GPSS-Methode und der Streutheorie kombiniert und ermöglicht die Berechnung von Ultraschallsignalen, beispielsweise in Form von A-Scans. Da das verwendete stochastische Modell jeweils zufällige Realisierungen für das Korngefüge generiert, wird über eine große Anzahl von Realisierungen die statistische Variation der im Werkstoff vorliegenden Kornstruktur abgebildet. Durch gezielte Parameteränderungen hinsichtlich der Korngrößenverteilung kann die Auswirkung auf die Ultraschallsignale in Abhängigkeit der Prüffrequenz simuliert werden. Die Berechnung von Fehlersignalen beispielsweise für Kreisscheibenreflektoren erlaubt eine Quantifizierung von zu erwartenden Signal-Rausch-Verhältnissen für die jeweilige Kornstruktur. Wir stellen entsprechende Ergebnisse vor.

Amplitudenbasierte Fehlergrößenbewertung mit SAFT: Auf dem Weg von der bildlichen Darstellung zum Messverfahren

H. Mooshofer¹, R. Boehm², W. Heinrich³, K. Fendt⁴, M. Goldammer¹, K. Kolk⁵,
J. Vrana⁶

¹ Siemens, München; ² BAM, Berlin; ³ Siemens, Berlin; ⁴ FAU Erlangen-Nürnberg, Erlangen; ⁵ Siemens, Mülheim a. d. Ruhr; ⁶ iNDEC – International NDE Consulting, München

Die Größenbewertung von Anzeigen und die Bestimmung der Nachweisgrenze spielen bei der Ultraschallprüfung eine zentrale Rolle: Sie stellen sicher, dass kritische Ungängen erfasst und bruchmechanisch behandelt werden können.

Bei SAFT wird bisher die Größe von Ungängen dadurch bestimmt, dass die räumliche Anzeigenausdehnung im Rekonstruktionsergebnis ausgewertet wird, d. h. die Anzahl von Voxel über die sich eine Anzeige erstreckt. Auf diese Weise lassen sich jedoch nur Defektanzeigen bewerten, die größer oder gleich der Wellenlänge sind. Bei kleinen Defekten versagt diese Methode, d. h. es ist keine Größenbewertung möglich. Außerdem bietet diese Methode keine Aussage über die Nachweisgrenze des Verfahrens.

Ein Hauptvorteil von SAFT gegenüber der konventionellen Ultraschallprüfung ist aber gerade die Verbesserung der Nachweisgrenze, denn SAFT steigert das SNR gegenüber dem Gefügerauschen und reduziert statistisches Rauschen. Um diesen Hauptvorteil nutzen (und quantifizieren) zu können, wird für SAFT eine Methode zur Nachweisgrenzenbestimmung und zur Größenbewertung der Anzeigen kleiner Ungängen benötigt.

Neben ihrer räumlichen Ausdehnung lassen sich Anzeigen im SAFT Ergebnis auch durch ihre Amplitude charakterisieren, wenn die Prüfkopfeigenschaften und die geometrischen Verhältnisse beim Scan berücksichtigt werden. Genauer gesagt durch die Amplitudensumme, in die – neben der Echoamplitude – auch die winkelabhängige Streucharakteristik eingeht.

In diesem Beitrag wird dargelegt, dass sich die Amplitudensumme zur Nachweisgrenzenbestimmung und zur Größenbewertung kleiner Ungängen eignet. Es wird der Zusammenhang zwischen der Amplitudensumme und der Größe von Ungängen dargestellt, und es wird gezeigt, dass auch die Anzeigenposition und die Form des Prüfobjektes eine Rolle spielen können. Auf dieser Basis wird eine Methode zur Größenbestimmung kleiner Anzeigen im SAFT-Ergebnis entwickelt. Damit lässt sich das SAFT-Ergebnis als Ersatzfehlergröße darstellen, so wie das bei konventioneller Ultraschallprüfung z. B. mit Hilfe von AVG-Diagrammen erfolgt. Durch die Vervollständigung um die Größenbewertung ist SAFT nicht mehr nur ein bildgebendes Verfahren, sondern es kann vielmehr als vollwertiges Messverfahren dienen.

Mehrschlitzblende für die bildgebende Röntgenrückstreutechnik zur Untersuchung von CFK-Strukturen

F. Wieder¹, U. Ewert¹, G.-R. Jaenisch¹, C. Bellon¹, J. Vogel¹, C. Brandt²

¹ BAM, Berlin; ² Airbus, Bremen

Eine Mehrschlitzblende für die Messung von Röntgenrückstreubildern mit einseitigem Zugang von Strahler und Kamera wurde entwickelt. Nach der erfolgreichen Erprobung von Einfachschlitzblenden zur Untersuchung von CFK-Bauteilen aus der Luftfahrt wird hier eine neue Blende mit höherer Effizienz vorgestellt. Die gestreute Strahlung wird mit mehreren parallelen Schlitzen gleichzeitig erfasst. Die Abbildung besteht aus einer Überlagerung mehrerer Bilder, die durch eine numerische Aperturfokussierung und eine Entzerrung korrigiert wird. Die Bildintensität sollte hier proportional zur Schlitzzahl ansteigen. Verschiedene Blendenformen wurden entworfen und deren Abbildungseigenschaften mittels Computersimulation untersucht. Die Simulationen wurden mit aRTist und dem Monte Carlo-Simulator McRay durchgeführt. Eine entsprechende Blende wurde mittels additiver Fertigung hergestellt und wird erprobt. Die Anordnung von Röntgenröhre und Kamera kann in verschiedenen Winkeln erfolgen. Diese Anordnung hängt von den geometrischen Bedingungen vor Ort ab. Die Aperturfokussierung basiert auf einer Entfaltung des gemessenen Bildes mittels eines blendengeometrieabhängigen Kernels. Hier werden verschiedene Entfaltungs-Methoden erprobt, wie die Fourier-basierte Entfaltung, Tikhonov-Regularisierung und Variationsanalyse. Die Messungen an CFK-Bauteilen erfolgt im Vergleich zu den Aufnahmen mit der Einfachschlitzblende und der Durchstrahlung.

Numerical NDE – Eine freie und erweiterbare Modulbibliothek zur numerischen Simulation von ZfP-Verfahren auf Basis von akustischen und elastischen Wellen

F. Schubert¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden

In den vergangenen 20 Jahren sind im Fraunhofer IKTS (vormals IZFP-D) eine Reihe von Simulationstools auf Basis der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT) entstanden und in Form der solverbasierten und anwendungsspezifischen Modulbibliothek „Numerical NDE“ in zahlreichen F&E-Projekten eingesetzt und weiterentwickelt worden. Diese Simulationstools werden nunmehr schrittweise in einer leistungsfähigen Basisversion zur freien Verfügung gestellt. Den Anfang machte kürzlich Numerical AE3D, ein Solver zur Berechnung und Visualisierung raumzeitlicher Schallemissionskaskaden sowie der von ihnen erzeugten elastischen Wellen. Als zweites Modul wird im vorliegenden Tagungsband Numerical GWT3D-P zur Berechnung und Visualisierung von geführten Wellen in Plattengeometrien vorgestellt. Eine analoge Version für geführte Wellen in Rohren ist aktuell in Vorbereitung. In Zukunft sollen weitere Solver zu verschiedenen ZfP-Anwendungen zur Verfügung gestellt werden, u.a. zur Impakt-Echo-Methode, zur Ultraschall-Tauchtechnik und Phased Array-Prüfung sowie zur Schallfeldberechnung von Prüfköpfen. Mit den Simulationstools der Numerical NDE-Plattform können idealisierte Messdatensätze erzeugt und als Grundlage für Test, Validierung und Weiterentwicklung von bildgebenden Verfahren und Signalverarbeitungsalgorithmen verwendet werden. Außerdem können komplexe Wellenausbreitungsphänomene im Detail studiert und für didaktische Zwecke aufbereitet und visualisiert werden. Die Solver von Numerical NDE bestehen jeweils aus einer Windows-EXE mit frei editierbarer Texteingabedatei, die z.B. auch von einer externen GUI erzeugt und gesteuert werden kann. Die Programme generieren Rohdaten in Form von ASCII- oder Binärdateien, die von externer Software gelesen, weiterverarbeitet und visualisiert werden können. Die freie Basisversion der Solver kann bei Bedarf jederzeit durch kunden- und anwendungsspezifische Funktionen erweitert werden. Im Gegensatz zu vielen heute verfügbaren kommerziellen Softwarelösungen setzt Numerical NDE auf separate hochspezialisierte, aber dennoch einfach zu bedienende sowie rasch und flexibel weiterentwickelnde Module, die durch ihre standardisierten Ein- und Ausgabeschnittstellen problemlos in kundeneigene Softwareumgebungen eingebettet werden können.

**Durchstrahlungs-Wissen.
Röntgentechnik als produktionstechnisches Kontrollverfahren
bis ca. 1939**

G. Luxbacher¹

¹ TU Berlin

Conrad Röntgen hatte von Anfang an auch die technische Anwendung seiner Strahlen im Blick. Dennoch wurden sie nach aktuellem historischen Kenntnisstand bis in die 1920er Jahre überwiegend im medizinischen Bereich eingesetzt. Große Aufmerksamkeit wurde der physikalischen Forschungstechnologie der Feinstrukturaufklärung von Kristallgittern zuteil. Die Frühgeschichte der Grobstrukturaufklärung auf dem Gebiet der industriellen Produktionstechnik ist hingegen vergleichsweise wenig erforscht. Der Beitrag bietet einen Überblick über dieses Gebiet im internationalen Kontext und widmet sich dabei vor allem der Frage der Herkunft und dem „Zuschnitt“ von technisch-naturwissenschaftlichem Wissen für die jeweils geforderten technisch-praktischen Belange.

Entwicklung und industrieller Einsatz der Ultraschalltechnik in Deutschland und in der Sowjetunion bis 1945

Y. Koshelev¹

¹ TU Berlin

Die Nutzbarmachung des Ultraschalls als Medium für technische Zwecke geht auf die Ortungstechnik zurück. Erst mit den Arbeiten des russischen Physikers Sergej Sokolow wird sie in den späten 1930er Jahren zum zweiten großen zfp-Medium der damaligen Zeit, erweitert durch die späteren Arbeiten von Firestone in den USA. Der Beitrag untersucht die bisherigen historischen Ergebnisse in kritischer Weise und unternimmt einen deutsch-russischen Vergleich. Dabei ist festzustellen, dass die Ultraschalltechnik deutlich früher im praktischen industriellen Einsatz war.

Entwicklungen zur Anwendung der Zerstörungsfreien Prüfung in der DDR in den Jahren 1958 bis 1989

D. Linke¹, S.Rühe²

¹ Magdeburg; ² PLR Prüftechnik Linke & Ruhe, Magdeburg

Es werden Ergebnisse aus praktischen Untersuchungen und Tätigkeiten in der Prüfpraxis dargestellt, die zur Erarbeitung von verbindlichen Prüftechnologien und -vorschriften führten. Sie wurden erarbeitet im Kombinat für Dieselmotoren und Industrieanlagen Karl Liebknecht (SKL) Magdeburg. Die Anwendungen beziehen sich auf die Ultraschall-, Magnetpulver-, Wirbelstrom- und Röntgenprüfung an Schmiedeteilen, Gussstücken und Schweißverbindungen. Im Kombinat SKL wurden Dieselmotoren und Chemieanlagen (Behälter, Rohrleitungen und Rohrsysteme) mit einer großen Fertigungstiefe hergestellt. Dazu gehörten eine eigene Gießerei, Schmiede, Härtereie und diverse mechanische Werkstätten.

Veränderungen bei der Verfügbarkeit von erfahrenem zFP-Fachpersonal Wie kann das erworbene „Know-how“ und „know-why“ gesichert werden?

F. Mohr¹

¹ Mohr-NDE-Consultant, Rosstal

Betrachtet man die derzeitige Situation von erfahrenem, qualifiziertem zFP-Personal, so erkennt man gegenüber der Situation vor 10 Jahren Veränderungen. Blickt man aber noch in die nahe Zukunft, so zeichnet sich doch eine enorme Veränderung in der Welt der Qualitätssicherung im Generellen und dem zu Folge auch beim Personal ab. Viel Erfahrung geht uns in den nächsten Jahren verloren, aber wie soll die nächste Generation die Erfahrung sammeln, wenn es in Deutschland die Möglichkeiten es Heranführens an die „high-Tec-“ Fragestellungen nicht gibt? Wie kann die reichhaltige Erfahrung übertragen werden oder zumindest gesichert werden? Auf was basiert die Qualitätssicherung? Auf dem Wissen über die Materialbeschaffenheit, das Materialverhalten, auf die Prozesskenntnisse der Herstellung und der Bearbeitung, d. h. auf Erfahrung. Ein weiterer Aspekt ist aber das Vertrauen und hier speziell das Vertrauen in den Prüfer und Gutachter, also in die Person. Für viele Jahre war die Großindustrie der Treiber für die Entwicklung und den Fortschritt in der Methodik zur Qualitätsüberwachung mit zFP-Methoden. Hier wurden Anforderungen gestellt, Mittel freigegeben, Förderprogramme initiiert und Personal ausgebildet. Nun verliert gerade die treibende Kraft der Vergangenheit zusehend ihre Bedeutung in Deutschland. Stahlindustrie, Kraftwerksindustrie und Chemieindustrie verlagert sich in andere Erdteile oder verliert ihre Marktstellung durch Änderungen im Umweltbewusstsein oder durch politische Vorgaben.

Qualitätssicherung ist in der heutigen industriellen Welt ein Kostentreiber. Erst wenn ein Schadensfall eintritt, wird Ursachenforschung betrieben, es werden Maßnahmen beschlossen, und zwar nur für diesen Fall und dann beruhigt sich das Ganze wieder. Also warum mehr als zwingend nötig an vorausschauender Qualitätssicherung bereitstellen. Warum also in stetige Aktualisierung und Verbesserung investieren?

Noch haben wir eine Veränderung in der Hand. Das Interesse, Wissen weiter zu geben ist groß. Jedes Unternehmen ist auf sich gestellt. In diesem Vortrag möchte ich Ansätze und Möglichkeiten aufzeigen, die es schon jetzt gibt, um einen Wissenserhalt bzw. einen Wissenstransfer zwischen den erfahrenen Spezialisten, den Verbänden und der Industrie erfolgreich zu installieren.

E-Learning-Konzept und –Umsetzung auf Basis von „Wissensinseln“ in der beruflichen Qualifizierung am Beispiel der Ultraschallprüfung

H. Rieder¹, I. Rieder-Dillhöfer², A. Günther³, R. Holstein⁴

¹ Saarbrücken; ² Rieder Kommunikation, Saarbrücken; ³ Minervis, Saarbrücken;

⁴ DGZfP Ausbildung und Training, Berlin

Auf zurückliegenden Tagungen der DGZfP haben wir die Möglichkeiten von E-Learning in der beruflichen Qualifizierung für die zerstörungsfreie Prüfung am Beispiel der Ultraschallprüfung vorgestellt, bewertet und einige Konzepte und Werkzeuge exemplarisch aufgezeigt.

Unser Ergebnis ist, dass durch Anwendung von geeigneten E-Learning Methoden und multimedialen Werkzeugen der Lernerfolg und die Vermittlungsqualität nachweislich gesteigert werden kann. Die Einführung von E-Learning Methoden in der ZfP betreffen vorrangig die interaktive und multimediale Gestaltung der Lerninhalte, die Abwicklung der Lernprozesse über Internet/Intranet sowie die netzbasierte, lernbegleitende Kommunikation zwischen Lerner und Tutor. Komplexe Inhalte können durch Integration von Simulationswerkzeugen, Visualisierungstools, Sprache und Animationen deutlich einfacher vermitteln. Zusätzlich können im Vorfeld der Weiterbildung unterschiedliche Qualifikationsvoraussetzungen der Teilnehmer gezielt im Sinne einer Wissensharmonisierung ausgeglichen werden.

Im vorliegenden Beitrag wird ein zwischenzeitlich umgesetztes E-Learning Konzept in Form von „Wissensinseln“ vorgestellt und diskutiert. Neben der fachlichen, medialen Umsetzung wird auch die organisatorische Einbindung der Umsetzung in den Ablauf der DGZfP Ausbildung und Training GmbH betrachtet. Wir möchten an den erarbeiteten Beispielen auf der Basis der OpenSource-Lernplattform ILIAS einige Ergebnisse der Umsetzung vorstellen.

Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz von TFM in der Prüfpraxis

T. Orth¹, N. Chichkov¹, O. Nemitz¹, T. Schmitte¹, M. Spies², H. Rieder²

¹ Salzgitter Mannesmann Forschung, Duisburg; ² Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Bildgebende Verfahren spielen in der Ultraschallprüftechnik eine immer größere Rolle. Die „Total Focusing Method“ (TFM) wird dabei gerne als der „gold standard“ bezeichnet, weil sich theoretisch eine optimale Fokussierung in einem abzubildenden Gebiet dadurch erreichen lässt, dass alle Sender – Empfänger Paare separat aufgezeichnet werden („Full Matrix Capture“ – FMC) und in der Nachbearbeitung der Daten die Verzögerungsgesetze sukzessiv für jede Gitterzelle des abzubildenden Gebiets angewendet werden.

Die theoretischen Hintergründe dieses Verfahrens sind mittlerweile weit entwickelt. Die Anwendungsbeispiele beschränken sich aber in der Regel auf einfache Bauteilgeometrien und künstliche Referenzreflektoren wie z.B. Flachbodensackloch- oder Querbohrungen. Seit kurzem sind auch (Hand-) Geräte kommerziell auf dem Markt verfügbar und auch in der Simulationssoftware CIVA ist diese Art der Rekonstruktion implementiert.

Bei einer betrieblichen Anwendung werden nicht nur die Möglichkeiten zur Fehlercharakterisierung genutzt, zunehmend wird auch eine exakte Größenbestimmung immer wichtiger. Die dabei geforderte Genauigkeit führt das Verfahren oft an seine Grenzen.

Dieser Beitrag stellt neben dem aktuellen Stand dieser Technik auch dessen praktische Anwendbarkeit in den Vordergrund. Dabei werden natürliche Fehler mit dem TFM-Verfahren, aber auch mit konventionellen und Phased-Array-Techniken untersucht und den entsprechenden Schlifffbildern gegenübergestellt. Die Möglichkeiten zur Größenbestimmung werden an praktischen realen Beispielen kritisch diskutiert. Dabei werden Einflussfaktoren wie anisotrope Werkstoffeigenschaften, Bauteilgeometrien und Anschallmöglichkeiten mit und ohne Sprung berücksichtigt.

Optimierung der Total Focusing Method für die Prüfung von CFK-Werkstoffen

J.-C. Grager^{1,2}, H. Mooshofer¹, E. Eschler², C.U. Große²

¹ Siemens, München; ² TU München

„Full Matrix Capture“ (FMC) ist eine immer populärer werdende Technik zur Ultraschalldatenerfassung. Hierbei wird ein Rohdatensatz erstellt, der sämtliche Zeitsignale aller Sender-Empfänger-Elementkombinationen eines Phased-Array-Prüfkopfes beinhaltet. Diese Daten können mit geeigneten Rekonstruktionsalgorithmen bildgebend verarbeitet werden, wobei häufig die „Total Focusing Method“ (TFM) verwendet wird.

Die TFM basiert in ihrer allgemeinen Form auf einem Linienquellenmodell, wonach sich zylindrische Wellenfronten im Prüfbjekt ohne Richtwirkung mit einer isotropen Schallgeschwindigkeit ausbreiten. Diese Idealisierungen sind bei isotropen Werkstoffen oft ausreichend oder können, wie hier gezeigt, entsprechend angepasst werden (z. B. durch Berücksichtigung der Richtcharakteristik der Einzelelemente). Bei der TFM-Rekonstruktion von FMC-Daten anisotroper und inhomogener CFK-Werkstoffe sind diese Vereinfachungen jedoch nicht zutreffend, weshalb dieser Algorithmus speziell an die Prüfung von Faserverbundwerkstoffen angepasst werden muss, um eine sinnvolle Bildgebung zu ermöglichen bzw. um diese zu optimieren.

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen erfolgten FMC-Messungen an CFK-Prüfkörpern mit Querbohrungen. Im ersten Schritt der TFM-Optimierung wurde die anisotrope Schallgeschwindigkeit des CFK-Materials mit der „Backwall Reflection Method“ experimentell bestimmt und in der TFM berücksichtigt. Dadurch konnten die aufgezeichneten Reflektorsignale phasengleich überlagert und somit direkt in den Ergebnisbildern dargestellt werden.

Eine weitere Optimierung der TFM führte zu einer Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses der Querbohrungen sowie zu einer verbesserten Nachweisbarkeit von oberflächennahen Reflektoren, indem zur Rekonstruktion einzelner Voxel nicht alle aufgezeichneten Zeitsignale der FMC-Informationsmatrix verwendet wurden. Die Signalauswahl erfolgte dabei anhand eines experimentell bestimmten Grenzwinkels in der Bildebene bezogen auf die akustische Achse der Prüfkopfelemente. Durch diesen Ansatz werden zur Intensitätsberechnung tieferliegender Bildpunkte mehr Signale zur TFM-Rekonstruktion herangezogen. Somit kann die stärker gerichtete Schallausbreitung in CFK näherungsweise berücksichtigt werden, was sich positiv auf die Bildqualität auswirkt.

Untersuchung der Abbildungseigenschaften bildgebender Verfahren mittels synthetischer Ultraschalldaten am Beispiel der Total Focusing Method

M. Spies¹, H. Rieder¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Neuere Entwicklungen im Bereich der Ultraschallverfahren basieren vor allem auf der Phased-Array-Technik, die ein Fokussieren und Steuern von Schallfeldern ermöglicht. Der zu den klassischen Beam-Forming-Verfahren alternative Ansatz der ‚Full-Matrix-Capture‘ (FMC) besteht darin, alle paarweisen Sender-Empfänger-Elementkombinationen bei der Datenaufnahme durchzutakten und so die volle Daten-Matrix aufzuzeichnen. Die Bildgebung mittels der sogenannten Total Focusing Method (TFM) erfolgt dann durch Anwendung der Delay Laws zum Fokussieren durch algorithmische Datenverarbeitung. Solche bildgebenden Verfahren gewinnen eine immer größere Bedeutung, denn neben der Detektion und Lokalisierung von unzulässigen Fehlstellen geht es verstärkt um die Quantifizierung, also die Vermaßung der Fehler und deren Charakterisierung nach Art, Geometrie und Orientierung. Die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Rekonstruktionsverfahren hängt dabei applikationsspezifisch von den Material- bzw. Bauteilparametern einerseits und der Fehleranordnung bzw. – geometrie andererseits ab.

In unserem Beitrag berichten wir über Untersuchungen, die wir im Hinblick auf die Abbildungseigenschaften des TFM-Verfahrens durchgeführt haben. Unter Verwendung von Querbohrungen als Modellfehler haben wir für einen handelsüblichen Phased-Array-Prüfkopf (16 Elemente, Frequenz 5 MHz) die FMC-Datenaufnahme mittels Generalisierter Punktquellensynthese simuliert. Die TFM-Bildgebung auf Basis dieser synthetischen Ultraschalldaten haben wir für unterschiedliche Szenarien durchgeführt, bei denen exemplarisch die Fehlerparameter ‚Bohrungsdurchmesser‘ und ‚Abstand zweier Querbohrungen‘ sowie das Niveau des Rauschuntergrunds im Bezug auf das betrachtete Material variiert wurden. Solche a-priori-Untersuchungen der Abbildungseigenschaften - auch für konkurrierende Verfahren – helfen bei der Bewertung, ob sich der im Vergleich zu konventionellen Verfahren höhere Aufwand hinsichtlich Gerätetechnik und Datenaufnahme für die jeweilige Prüfapplikation lohnt.

Iterative Fehlerrekonstruktion zur verbesserten Bildgebung bei randomisierter Ultraschall-Datenaufnahme mittels Phased-Arrays

D. James¹, F. Kraemer², H. Rieder³, M. Spies³

¹ Universität Göttingen; ² TU München, Garching; ³ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Der Einsatz von Ultraschallverfahren auf der Basis von Phased-Arrays ist durch die Möglichkeit des Fokussierens für ein breites Spektrum von Prüfproblemen vorteilhaft. Klassisch wird durch die Anwendung entsprechender Verzögerungszeiten („Delay Laws“) beim Ansteuern der einzelnen Array-Elemente ‚parallel‘ fokussiert. Ein alternativer, als Full-Matrix-Capture (FMC) bekannter Ansatz besteht darin, alle paarweisen Sender-Empfänger-Elementkombinationen bei der Datenaufnahme durchzutakten und so die volle Daten-Matrix aufzuzeichnen. Die Delay Laws werden dann beim Post-Processing angewandt, es handelt sich also um ein ‚sequentielles‘ Fokussieren durch algorithmische Datenverarbeitung, bekannt als Total Focusing Method (TFM).

Fehlerrekonstruktionen mittels TFM zeichnen sich durch ein in der Regel hohes Signal-Rausch-Verhältnis und durch gute Abbildungseigenschaften aus. Allerdings wird im Vergleich zur klassischen Phased-Array-Anwendung für eine Full-Matrix-Capture-Messung ein Mehrfaches an Zeit zur Datenaufnahme benötigt. In unserem Beitrag betrachten wir daher einen Ansatz zur randomisierten FMC-Datenaufnahme. Die zugrunde liegende Idee besteht in der Durchführung überlappender Messungen, bei denen verschiedene Array-Elemente zu zufällig gewählten Zeitpunkten angesteuert werden. Durch die entsprechend kürzere Messzeit pro Ansteuerung wird eine Reduktion der Gesamtdatenaufnahmezeit erreicht. Zur Reduktion der durch die zufällige Überlagerung entstehenden Artefakte bei der anschließenden Rekonstruktion mittels sequentieller Fokussierung verwenden wir einen iterativen Algorithmus. In unserem Beitrag erläutern wir die Vorgehensweise und stellen verschiedene Szenarien vor, bei denen dieser neue Ansatz Vorteile gegenüber einer FMC-Messung mit anschließender TFM-Rekonstruktion liefert. Im Hinblick auf konventionell mittels IE-Kontakttechnik an stark schallschwächenden Bauteilen akquirierten Ultraschalldaten betrachten wir ferner, inwiefern sich der iterative Rekonstruktionsalgorithmus zur verbesserten Fehlerabbildung eignet.

Bewegungsinduzierte Wirbelstromprüfung von Verbundmaterialien

H. Brauer¹, S. Gorges¹, M. Ziolkowski^{1,2}

¹ TU Ilmenau; ² Westpomeranian University of Technology Szczecin, Polen

Die Entwicklung moderner Produkte erfordert in zunehmendem Maße den Einsatz innovativer, an den Anwendungsfall angepasster Materialien. Das trifft in besonderem Maße auf den Leichtbau, die Luft- und Raumfahrt sowie den Automobilbau zu, wo verstärkt Verbundmaterialien eingesetzt werden. Damit wächst aber auch der Bedarf an geeigneten Prüftechniken, die in der Lage sind, sowohl die aktuellen Materialeigenschaften als auch Anomalien oder Defekte zu identifizieren. In diesem Sinne wird an der TU Ilmenau seit einigen Jahren an Verfahren gearbeitet, bei denen das Wirkprinzip der bewegungsinduzierten Wirbelstromprüfung (MECT) zur Anwendung kommt. Dabei werden aufgrund einer Relativbewegung eines statischen Magnetfeldes und des Prüfkörpers Lorentzkräfte generiert, die am Magnetsystem gemessen werden können. In dem Beitrag wird gezeigt, dass ausgehend von der Lorentzkraft-Wirbelstromprüfung (LET) auch Verbundmaterialien mit dieser Technik geprüft werden können.

So wurden zu Testzwecken Alucubond-Platten auf einem vorhandenen LET-Labormessplatz vermessen, kleine Defekte in den Aluminiumschichten lokalisiert und diese Fehlstellen mittels numerischer Simulationen rekonstruiert. In einer weiteren Studie wurden Defekte detektiert, die in speziell präparierten GLARE-Platten (aus dem Rumpf vom Airbus A350) in verschiedenen Tiefen in einer Aluminiumlage eingearbeitet worden sind. Die Bleche wurden auf einer im Labor vorhandenen Multi-Messplattform, die mit verschiedenen Magnetsystemen ausgestattet wurde, vermessen. Numerische Simulationen haben eine gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation ergeben.

Die Untersuchung von kohlefaserverstärkten Verbundstoffen (CFK) stellt aufgrund der deutlich geringeren elektrischen Leitfähigkeit und der weitgehend unklaren Modellierungsansätze für die Beschreibung der Wirbelstromverteilungen eine besondere Herausforderung dar. Aus diesem Grund wurden leistungsstärkere Magnetsysteme und empfindlichere differentielle Sensoren bestehend aus einem Permanentmagnetsystem und passiven Spulen entwickelt und an im Labor gefertigten CFK-Testkörpern erprobt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Verwendung problemangepasster Magnet-Sensor-Module eine Defektdetektion an Verbundmaterialien mittels MECT-Methoden möglich ist.

Charakterisierung von porösen carbonfaserverstärkten Kunststoffbauteilen mit optisch angeregter Puls-Thermographie

G. Mayr¹, K.-H. Gresslehner¹, G. Hendorfer¹

¹ FH Oberösterreich, Wels, Österreich

In der Luftfahrtindustrie stellt die zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen auf verdeckte Fehlstellen einer der kritischsten Aspekte in der Konstruktion und Fertigung dar. Eine nicht gänzlich zu vermeidende Fehlerklasse bei kohlefaserverstärkten Kunststoffen ist der Einschluss von gasgefüllten Poren, der sogenannten Porosität. Matrixdominierte mechanische Eigenschaften nehmen stark mit steigender Porosität ab.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer modellbasierten Analysemethode zur quantitativen Bestimmung der Porosität mittels der Puls-Thermographie. Die von dem Material- und der Mikrostruktur abhängige Temperatur wird berührungslos mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet. Die thermische Anregung erfolgt mittels leistungsfähiger Blitzröhren. Durch die Anpassung von Lösungen der Wärmeleitungsgleichung an das gemessene Temperaturfeld kann die Temperaturleitfähigkeit bestimmt werden. Eine Weiterentwicklung von Materialmodellen auf Basis der Effektiv-Medium-Theorie wird für die quantitative Bestimmung der Porosität in einem repräsentativen Elementarvolumen genutzt. Voraussetzung für die Anwendung dieser Theorie ist die statistisch homogene Verteilung der Poren, welche durch die Analyse der Mikrostruktur mit Korrelationsfunktionen bestimmt wird. Diese neu entwickelten Materialmodelle ermöglichen erstmals eine direkte Berechnung der Porosität anhand der orts aufgelösten Messung der Temperaturleitfähigkeit.

Die Charakterisierung der Porosität mit modellbasierten Auswertemethoden der Thermographie wurde an 116 CFK Proben mit einer Porosität von 0 % bis 18 % durchgeführt. Um den Einfluss der Probendicke mit zu berücksichtigen, wurden mehrlagige Proben untersucht. Durch einen Vergleich der Thermographie Ergebnisse mit denen der 3D-XCT und der Ultraschallprüfung konnten die rekonstruierten Porositätswerte validiert werden. Die Genauigkeit ist vergleichbar mit der Ultraschallprüfung, wobei jedoch die Thermographie deutliche Vorteile bei der Prüfung von großflächigen und komplex geformten Bauteilen, wie Turbinenmantelstromgehäuse und Flügelverkleidungen, aufweist. Durch einen Vergleich der Materialmodelle mit Simulationen konnte eine maximale Ortsauflösung bei der Porositätsmessung mit $(2 \times 2) \text{ mm}^2$ ermittelt werden.

Online-Thermografie zur Optimierung des Reparaturprozesses von CFK-Strukturen

P. Menner¹, A. Hess², S. Grill², D. Holder³, A.-H. Thellmann⁴

¹ edevis, Stuttgart; ² C. & E. Fein, Schwäbisch Gmünd-Bargau; ³ Universität Stuttgart; ⁴ DLR Stuttgart

Die zunehmende Verbreitung von CFK-Strukturen erfordert geeignete Reparaturkonzepte für den Fall, dass solche Strukturen beschädigt werden. Die Entfernung der geschädigten Schichten kann durch den Einsatz eines Lasers präziser und somit reproduzierbarer erfolgen als bei den derzeit eingesetzten abrasiven Verfahren. Dadurch kann eine maximale Festigkeit der Reparaturstelle erzielt werden. Um den Abtragungsprozess zu beschleunigen, sollten nur die tatsächlich geschädigten Bereiche entfernt werden, was wiederum eine schnelle ZfP-Methode zur Bestimmung der Fehlerposition und -größe erfordert. Zu diesem Zweck eignet sich die Thermografie sehr gut.

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit dem Förderprogramm Photonics Research Deutschland geförderten Forschungsprojekt PRECISE (13N12919) wird ein Laserscanner nicht nur zum Materialabtrag, sondern auch zur thermischen Anregung für die Defektdetektion genutzt. Eine IR-Kamera nimmt dabei den Laserscan sowie die darauffolgende Abkühlung auf. Mittels Bildverarbeitung wird dann der geschädigte Bereich ermittelt und an den Laserscanner zurückgegeben, der diese Information dann im darauffolgenden Abtragungsschritt nutzt. Dadurch wird das Abtragsvolumen minimiert und somit der Prozess beschleunigt. Aufgrund der präzisen Abtragung kann auch eine maximale Festigkeit der reparierten CFK-Struktur erzielt werden.

Dieser Beitrag stellt die gesamte Prozesskette von der Defektdetektion über die Laser-Abtragung mit online-thermografischer Unterstützung bis hin zur Reparatur vor.

Ermittlung der kritischen Dehnung faserverstärkter Kunststoffe mithilfe der Schallemissionsanalyse

F. Willems¹, J. Benz¹, M. Kreuzbruck¹, C. Bonten¹

¹ Universität Stuttgart

Im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen, wie beispielsweise Metalle, zeigen Kunststoffe eine ausgeprägte Abhängigkeit von vielen verschiedenen Einflüssen wie Belastungsart, Zeit, Temperatur, etc. Dieses viskoelastische Werkstoffverhalten tritt bereits bei Raumtemperatur und geringer Belastung ein und muss dementsprechend bei der Bauteilauslegung berücksichtigt werden. Vor allem aber ist die Ermittlung eines geeigneten Versagenskriteriums deutlich komplexer als für linear elastische Werkstoffe.

Meist wird mit unterschiedlichen Hypothesen eine Vergleichsspannung errechnet und mit der zulässigen Spannung verglichen. Die zulässige Spannung berechnet sich dabei aus einem Festigkeitskennwert sowie aus Sicherheits- und Abminderungsfaktoren. Diese Abminderungen werden multipliziert und führen zum Teil zur drastischen Absenkung des Kennwertes. Letztendlich führt dies meist zur Überdimensionierung von Kunststoffbauteilen. Um dies zu vermeiden können Kunststoffe auch mithilfe einer zulässigen Dehnung ausgelegt werden. Die zulässige Dehnung errechnet sich dabei aus der kritischen Dehnung und den Sicherheitsfaktoren. Zusätzliche Abminderungsfaktoren werden hierbei nicht berücksichtigt, da die kritische Dehnung unabhängig von den oben benannten Einflüssen ist. Zur Ermittlung der kritischen Dehnung existieren bereits unterschiedliche Methoden, jedoch sind diese sehr zeitaufwändig und meist auf eine bestimmte Werkstoffklasse beschränkt, zum Beispiel transparente Kunststoffe. Dieses Problem kann mithilfe der Schallemissionsanalyse gelöst werden. Die Schallemissionsanalyse ist ein quasi-zerstörungsfreies Prüfverfahren mit welchem irreversible Schädigungen in Werkstoffen bereits bei geringfügiger Belastung mittels geeigneter Sensoren festgestellt, aufgezeichnet und damit sichtbar gemacht werden können. Die erfassten Schallemissionen werden dabei durch plötzliche Verformung eines unter Spannung stehenden Werkstoffes erzeugt und können durch Mikro-Rissentstehung, Rissfortschritt oder plastische Verformung auftreten. In einem angepassten Zugversuch kann somit durch die Korrelation von auftretenden Schallemissionssignalen und der Mikrorissinitiierung die kritische Dehnung innerhalb weniger Minuten ermittelt werden.

RailRoadRunner – Innovatives Schienenprüfgerät setzt neuen Stand der Technik

G. Hanspach¹

¹ Vossloh Rail Services, Berlin

Für die Gewährleistung eines sicheren Fahrbetriebs auf den Schienen und eine effiziente Instandhaltungsplanung sind manuelle Schienenprüfgeräte in Ergänzung zu den Schienenprüfzügen ein probates und bewährtes Mittel. Wesentlich ist neben der gleichen Prüfqualität zwischen Zug und Handgerät die Generierung von validen Daten, die mit Bestandsdaten abgeglichen werden können und nach der Inspektion dokumentiert archiviert zur Nachweisführung vorliegen.

Um diesen Anspruch zu erfüllen und die bisherige Lücke zu schließen wurde das neue Ultraschall-Schienenprüfgerät „RailRoadRunner (RRR)“ entwickelt und nach einem umfangreichen Testprogramm in die Anwendung gebracht.

Der RailRoadRunner übernimmt ergänzend zur Nachortung der vom Schienenprüfzug gefundenen Unregelmäßigkeiten die Regelinspektionen auf kürzeren Streckenabschnitten sowie in Weichen, Kreuzungen und Bahnhöfen. Mit dem eingesetzten Ultraschallprüfverfahren werden Unregelmäßigkeiten im Werkstoff sowie innere Fehler der Schiene zuverlässig mit einer sehr hohen Wiederholgenauigkeit dedektiert. Die Schiene wird mit 9 Prüfköpfen und Einfallswinkeln untersucht. Alle Schienenfehler in Kopf, Steg und Fuß sind mit dem RailRoadRunner in Echtzeit auf einem vom Kunden konfigurierbaren Tough Screen bei Tag und Nacht erkennbar. Die erfassten Daten, z. B. in Form von B-Scans, dokumentieren dauerhaft den Schienenzustand zum Zeitpunkt der Inspektion. Ein abnehmbares Tablet, Kohlefaserbauweise des Rahmens, Detektion von Squats und tieferen Head Checks, softwaregesteuerte Wasserventile, exakte Spurführung und Ortszuordnung der Daten über ein Tracking-System bei Vor- und Rückwärtsbetrieb sind nur einige der vielen großartigen Innovationen des Gerätes. Manuelle Standardprüfköpfe, z.B. für die Prüfung der Schmiedebereiche, können zusätzlich angeschlossen und die Daten gespeichert werden.

Die Entwicklung des Prüfsystems basiert u. a. auf den Erfahrungen von mehreren auf verschiedenen Schienenprüfzügen eingesetzten Prüfsystemen, die in verschiedenen Ländern in Europa im Einsatz sind.

Neuerungen in der automatisierten zerstörungsfreien Prüfung und Bewertung an Radsatzkomponenten von Schienenfahrzeugen

W. Schäfer¹, M. Schuppmann¹, T. Schwender¹, W. Kappes¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Radsätze von Schienenfahrzeugen, insbesondere von Hochgeschwindigkeitszügen, unterliegen hohen dynamischen Belastungen. Die Radsatzkomponenten müssen deshalb sowohl in der Fertigung als auch in der Instandhaltung einer zerstörungsfreien Prüfung zum Nachweis von fertigungsbedingten bzw. im Betrieb entstandenen Materialfehlern unterzogen werden. Das Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP entwickelt seit Beginn der 80er Jahre zusammen mit Entwicklungspartnern der Industrie Prüfverfahren und Prüfsysteme einschließlich Prüfelektronik, Sensorik und Prüfsoftware, die im Bereich der Fertigung und Instandhaltung zum Einsatz kommen.

Neue Entwicklungen der Prüfelektronik, der Prüfdurchführung, der Auswertung und der Bewertung ermöglichen einen hohen Automatisierungsgrad mit kürzeren Taktzeiten im industriellen Einsatz und sichern somit die Wirtschaftlichkeit. In unserem Beitrag berichten wir über die Vorteile der neuen IUSE Prüfelektronik, über die Anpassung von Phased Arrays an die Oberflächenkontur der Radlaufläche, sowie über die automatisierte Auswertung (Clustering und KSR-Bestimmung) und automatisierte Bewertung.

Schnelle Ultraschallprüfung von längsgebohrten Eisenradsatzwellen mit Phased Array Rotationsscanner

R. Boehm¹, T. Heckel¹, W. Spruch², T. Beggerow²

¹ BAM, Berlin; ² Büro für Technische Diagnostik, Brandenburg

Im Rahmen des Europäischen Projektes RAAI* wird speziell für längsgebohrte Eisenbahn-radsatzwellen von Hochgeschwindigkeitszügen eine Phased Array Technik angepasst, mit dem Ziel einer nahezu 100%igen Rissprüfung (Tiefe 2-3 mm) ohne die Demontage der Wellen und einer Prüfzeitreduzierung um 75%.

Die Technik arbeitet mit einem Phased Array, bei dem die Schwingerelemente auf einem Kegelstumpf angeordnet sind. Für die Abtastung in Umfangsrichtung erlaubt das Phased Array die schnelle Rotation und zusätzlich das Fokussieren und Schwenken des Schallbündels. In Richtung der Achse wird das Prüfkopfsystem mechanisch bewegt.

In vorangegangenen Projekten ist das Prinzip dieser Prüftechnik entwickelt und die Tauglichkeit gezeigt worden. Die jetzigen Arbeiten haben insbesondere die Optimierung der Sensortechnik an die o.g. Aufgabe zum Ziel. Wegen der ungewöhnlichen Geometrie des Arrays sind umfangreiche Simulationsrechnungen nötig, um die Auswirkung von zahlreichen Parametern auf die Schallfeldform und letztlich auf die Empfindlichkeit und die Ortsauflösung zu untersuchen und die Konstruktionsdaten zu bestimmen.

Zur Validierung der Prüftechnik werden Tests an typischen Eisenbahn-radsatzwellen durchgeführt. Der Einsatz von unterstützenden Signalverarbeitungs-algorithmen bei der Auswertung der Prüfergebnisse zur sichereren Fehlererkennung ist u. a. wegen des möglichen geringen Messpunktabstandes für diese Prüftechnik besonders vielversprechend. Der Stand der Entwicklung wird gezeigt.

* Whole Life Rail Axle Assessment and Improvement Using Ultrasonic Phased array and Corrosion Inspection Systems" (RAAI)

Induktionsthermografie: Normung und die Anwendung an Bahnkomponenten

S. Bessert¹, U. Netzelmann¹, M. Finckbohner¹, A. Ehlen¹, B. Valeske¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Die induktiv angeregte Thermografie ist ein berührungsfrei arbeitendes und automatisierbares zerstörungsfreies Prüfverfahren, das sich bei der Prüfung auf Oberflächenfehler als Alternative zur Magnetpulverprüfung anbietet. Da bei vielen neuen Prüfverfahren die flächendeckende industrielle Verbreitung durch fehlende Richtlinien und Normung behindert wird, wurden im Rahmen des TNS-Projekts „InduNorm“ (2014-2016) Grundlagen für eine Normung geschaffen. Dazu wurde eine Arbeitsgruppe bestehend aus Forschungseinrichtungen und Industrievertretern gebildet, in der ein erster Normvorschlag entstand.

Neben der Erstellung eines Normvorschlags wurden auch einige fachliche Fragestellungen behandelt, die die Normung unterstützen sollen und in den Vorschlag eingingen. Von Interesse ist z. B. die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Induktionsthermografie, die auf unterschiedlichen Prüfanlagen erhalten wurden. Erstmals wurde die Abhängigkeit des thermischen Kontrasts von der Induktionsfrequenz an einem ferritischen Stahl untersucht. Andere Untersuchungen behandelten die gegenüber Metallen schlecht elektrisch leitenden Materialien CFK, Graphit und SiC. Es wurde schließlich ein Vorschlag für Bezugskörper zur Überprüfung und Justierung des Gerätesystems formuliert.

Die rege Beteiligung der Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe erlaubt es, dass nun ein bereits relativ reifer Normentwurf vorliegt, der beim DIN als Grundlage für ein formelles Normungsprojekt dient, das am 1.6.2016 begonnen wurde.

Anwendungsperspektiven für diese Prüftechnik ergeben sich u. a. in der Bahntechnik. In dem Vortrag wird die automatisierte Prüfung von fabrikneuen Bahnradern gezeigt.

Inline-Ultraschallprüfung von extrudierten Produkten aus Kompositen

T. Dierker¹, L. Hagner¹

¹ NetCo Professional Services, Blankenburg

Eine Möglichkeit zur Substitution tropischer Harthölzer ist der alternative Einsatz von extrudierten Produkten aus einem Holz- Kunststoffgemisch. Neben einer mindestens vergleichbaren Haltbarkeit können diese Produkte in fast beliebigen Querschnitten gefertigt werden. Ausgangsstoffe für diese WPC- Produkte (wooden plastic composites) sind Sägespäne und ein Granulat aus Polypropylen sowie unterschiedliche Farbstoffe. Auf Grund schwankender Parameter der Ausgangsprodukte, insbesondere des Holzanteils (Temperatur, Feuchte, Dichte), bedarf es einer ausgeklügelten Prozesssteuer- und Regelungstechnik, um eine qualitativ hochwertige Produktion zu sichern. Problematisch ist insbesondere auch, dass sich einige Messgrößen, wie z.B. die Rohmassentemperatur praktisch kaum ermitteln lassen und damit wichtige Messgrößen im Regelkreis fehlen. Entsprechend Bedeutung gewinnt die Qualitätskontrolle, die auf Grund der starken Dynamik bei den Eingangsgrößen auch als zerstörungsfreie Prüfung unmittelbar nach der Extrusion erfolgt. Die Inspektion findet mittels luftgekoppeltem Ultraschall in Transmission statt. Die Messergebnisse für typische Produktfehler werden unter Berücksichtigung des Frequenzbereiches zwischen 50 und 300 kHz sowie verschiedener Sendesignalkodierungen vorgestellt. Als Referenz dienen jeweils computertomographische Untersuchungen. Die Weiterverarbeitung der Messdaten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Oberflächenprofile und spezieller, methodenbasierender Probleme (Luftkopplung) wird diskutiert. Schließlich wird als weiterer Schwerpunkt der komplizierte Weg zu einer stabilen und angemessenen Bewertung der Messergebnisse als Rückmeldung in die Produktion dargestellt. Es werden deterministisch arbeitende, schwellwertbasierende Verfahren mit solchen auf Basis künstlicher Intelligenz verglichen.

Tomographische Abbildung mit Ultraschall, Radar und Röntgen zur Detektion von Fäule in Holzstämmen

M. Schickert¹, F. Bonitz¹, A. Ulanov¹, B. Müller¹, S. Chmara², N. Ruminski², P.-E. Reppenning², L. Blüthgen³, P. Flade³, J. Wiedemann³

¹ MFPA Weimar; ² FFK Gotha; ³ Institut für Holztechnologie, Dresden

Fäule in Holzstämmen ist ein qualitätsminderndes Merkmal, das die weitere Verwendung einschränkt. Ist das Ausmaß des Fäulebefalls bekannt, kann die wirtschaftliche Verwertung optimiert werden. Zur Detektion der Fäule in Fichtenstämmen wurde ein kombiniertes tomographisches Messsystem für Ultraschall- und Radarwellen aufgebaut, mit dem Änderungen in den elastischen und den elektromagnetischen Eigenschaften von Holzstämmen abgebildet werden können.

Dafür wurde ein Messaufbau für tomographische Transmissionsmessungen entwickelt. Die Messungen wurden in einer Fächerstrahl-Anordnung durchgeführt und anschließend zu zweidimensionalen Ultraschall- und Radar-Tomogrammen der Holzstämmen rekonstruiert. Röntgentomographische Messungen mit einem kommerziellen Röntgenscanner dienten als Referenz für die Dichteverteilung im Material. Außerdem wurden die Ergebnisse mit holzphysikalischen und holzbiologischen Untersuchungen, z.B. der Materialfeuchte, Druckfestigkeit und Dichte, abgeglichen.

Mit diesen Verfahren wurden umfangreiche vergleichende Messungen durchgeführt. Für die anschließenden Korrelationsuntersuchungen standen Messergebnisse von 11 Messgrößen an identischen Querschnittebenen in 33 Stammabschnitten zur Verfügung. Die Resultate werden bezüglich der Detektion und Klassifikation von Fäule in den Holzstämmen diskutiert. Darauf aufbauend wird ein automatisiertes Messsystem zur Bestimmung der Holzfäule konzipiert.

Prüfung von WPC-Dielen mit dem nicht-ionisierenden Durchstrahlungsverfahren NIDIT

J.H. Hinken¹, C. Ziep¹

¹ FI Test- und Messtechnik, Magdeburg

Die Röntgendurchstrahlungsprüfung mit ihren hohen Sicherheitsauflagen kann in gewissen Fällen durch die einfacher anzuwendende Mikrowellendurchstrahlungsprüfung NIDIT (NonIonizing Direct Imaging Testing) ersetzt werden. Das gilt dann, wenn die Prüfobjekte aus elektrisch isolierendem Material bestehen und die hohe Ortsauflösung, die die Röntgendurchstrahlung bietet, in dem Maße nicht benötigt wird. Ein Beispiel dafür ist die In-line-Prüfung von WPC (wood plastic composite)-Terrassendielen, die im Extrusionsprozess hergestellt werden.

Ein diese Situation simulierender, labormäßiger 24-GHz-Prüfplatz hat die Hauptkomponenten Mikrowellengenerator, Antenne, Halterung und labormäßige Verfahrenrichtung der Prüfobjekte, Mikrowellen absorbierende Folie, Wärmebildkamera und PC. Die auf der Vorderseite des Prüfobjektes gleichmäßig einfallende Mikrowellenstrahlung wird im Prüfobjekt in ihrer Verteilung durch zu erkennende Fehler beeinflusst und trifft entsprechend ungleichmäßig auf die Mikrowellen absorbierende Folie hinter dem Prüfobjekt auf. So erhält die Folie eine den vorhandenen Fehlern entsprechende Wärmeverteilung, die von der Wärmebildkamera aufgenommen und über einen Computer unmittelbar als Flächenbild dargestellt wird.

Die Prüfobjekte sind unter anderem zwei ebene massive und eine profilierte massive WPC-Diele. Zum Teil sind sie fehlerfrei, zum Teil enthalten sie lokalisierte und bekannte, aber visuell nicht erkennbare Spaltrisse. Eine weitere, profilierte Hohlkammer-Diele aus dem Handel enthält Hohlkammerverschlüsse und offenbar eine Vielzahl visuell nicht erkennbarer unbekannter Fehler.

Alle diese Fehler erzeugen deutliche Auffälligkeiten bei der Prüfung mit dem NIDIT-Verfahren. Dabei wird von der Differenzmethode Gebrauch gemacht, indem vom aktuellen Prüfbild ein Referenzbild abgezogen wird. Bei der hier simulierten In-line-Prüfung ist das Referenzbild jeweils das Bild des unmittelbar vorangehenden Dielenabschnittes. Es handelt sich also um eine gleitende Differenzbildung.

Die Prüfergebnisse werden als Videosequenzen dargestellt und im Vortrag präsentiert.

Dieser Beitrag soll als Beispiel für die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des NIDIT-Verfahrens bei der ZfP von Kunststoffprodukten und weiteren elektrisch isolierenden Produkten verstanden werden.

4D Röntgen-Computertomografie mittels konventioneller Labor CTs: Möglichkeiten und Einschränkungen

B. Plank¹, D. Salaberger¹, G. Rao¹, A. Amirkhanov¹, J. Kastner¹

¹ FH OÖ Forschung & Entwicklung, Wels, Österreich

In Bauteile zu schauen um die innere Geometrie sowie Struktur dreidimensional zu charakterisieren ist mittlerweile ein Standard-Anwendungsgebiet der Röntgen-Computertomografie (XCT). Viele Fragen bleiben jedoch ungelöst, da oft eine Vielzahl an Fertigungs- oder Schädigungsschritten bei statischen 3D-XCT Daten übersprungen werden. Es fehlt eine vierte Dimension (4D) wie z.B. eine zeitliche Komponente zwischen den einzelnen Schritten. Ist diese vierte Dimension vorhanden, kann von 4D-XCT gesprochen werden. Im Rahmen von diesem Beitrag werden ausgewählte 4D-XCT Versuche, durchgeführt an Laborgeräten, präsentiert und die Möglichkeiten und Einschränkungen dieser diskutiert. Es gibt vier verschiedene Arten um konventionelle 4D-XCT-Daten zu erhalten. Die erste (I) Möglichkeit für 4D-XCT kann auch „post-mortem“ durchgeführt werden. Dabei werden ident gefertigte Bauteile im Ausgangszustand und später nach unterschiedlichen thermischen-, chemischen oder mechanischen Beanspruchungen tomografiert und die Veränderungen dokumentiert. Bei „ex situ“ Versuchen (II) wird an einer einzigen Probe nach definierten Zeit- oder Lastintervallen der Versuch (außerhalb eines XCT Gerätes) angehalten, die Probe tomografiert und im Anschluss der Versuch wieder fortgesetzt. Als weitere (III) Möglichkeit gibt es den „unterbrochenen in situ Versuch“, dabei wird ein Belastungszustand während der Zeitdauer einer Tomografie möglichst konstant gehalten, danach die Belastung stufenweise erhöht und die Probe erneut tomografiert. Als letzte Möglichkeit bieten sich „in situ“ (IV) Tomografien an. Dabei ist es wichtig die Scanzeiten möglichst gering zu halten oder entsprechend langsame Prozesse zu untersuchen um Bewegungsartefakte zu minimieren. In diesem Beitrag wird anhand von in situ XCT (IV) Scans an nassen Holzproben das Schwindungsverhalten in allen drei Raumrichtungen beurteilt oder das Verhalten von Porosität im Epoxidharz während eines Aushärtevorgangs gezeigt. In unterbrochenen Zugversuchen (III) wird das Schädigungsverhalten von kurzglasfaserverstärkten Kunststoffen auf Faserebene charakterisiert und quantifiziert. Mittels eines Talbot-Laut Grating Interferometer XCT Systems lassen sich durch unterbrochene ex situ Dauerschwingversuche (II) frühzeitige Materialschädigungen darstellen.

Digitalisierung und Industrie 4.0 – Chancen, Risiken und Aufgaben für die ZfP

R. Hanke¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Schon seit Jahren zeichnet sich für das Forschungsgebiet der ZfP ein Paradigmenwechsel ab. Vor dem Hintergrund der Diskussionen zum Thema »Industrie 4.0« und der zunehmenden Digitalisierung lässt sich ein bevorstehender tiefgreifender Wandel prognostizieren. Eine direkt ableitbare Konsequenz dieses »Digitalen Wandels« ist das rasant anwachsende Datenvolumen (Big Data):

- Daten, die als neuer Rohstoff der Zukunft verstärkt an Bedeutung gewinnen werden.
- Daten, die Informationen beinhalten, die vielfach auf Grund ihrer Komplexität nicht mehr allein mit Standardmethoden der Mustererkennung extrahiert werden können.

Aus den hochdimensionalen Messwerten komplexer Sensorsysteme (d.h. beispielsweise auch auf Basis klassischer mono- oder multimodaler ZfP-Techniken) müssen also mittels intelligenter, lernender Algorithmen jene Informationen selektiert werden, aus denen sich nachfolgend geeignete Maßnahmen, z. B. zur Steuerung und Optimierung von Prozessen, denen eine Mensch-Material- oder Maschine-Material-Interaktion zu Grunde liegt, ableiten lassen.

Neue Aufgaben und Herangehensweisen einer »modernen ZfP« werden sich zukünftig also verstärkt am Bedarf nach beherrschten Prozessen orientieren und damit sehr viel intensiver Aspekte des »zerstörungsfreien Monitorings« zur Erfassung und Beeinflussung von Eigenschafts- und Zustandsgrößen mit all seinen Möglichkeiten der Prozessregelung und -steuerung adressieren.

In diesem Impulsvortrag wird Prof. Randolf Hanke, Institutsleiter des Fraunhofer IZFP, am Beispiel des Produktlebenszyklus – vom Rohstoff über die Materialentstehung, Produktentstehung, Produktbetrieb bis zur Produktwiederverwertung/Recycling – dieses Themenfeld im Hinblick auf Aufgaben, Herausforderungen und Möglichkeiten für die ZfP beleuchten und Fragestellungen wie den Bedarf und die Notwendigkeit nach zukünftigen intelligenten Sensorsystemen zur Diskussion stellen.

Optisch angeregte Lockin-Thermografie mit VCSEL-Array

M. Rahammer¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Optisch angeregte Thermografie ist ein anerkanntes und weit verbreitetes berührungsloses Prüfverfahren. Es wird meist zur Schadensdetektion oder zur Qualitätskontrolle und Materialcharakterisierung eingesetzt. Neben den bekannten Anregungsformen Blitzthermografie und Lockin-Anregung gibt es neuere Ansätze mit Frequenz- oder Phasenmodulierten Quellen. Diese konnten bisher aber kaum verifiziert werden, da leistungsstarke, modulierbare Lichtquellen bisher fehlten. Selbiges gilt für die photothermische Materialcharakterisierung, die bisher nur punktförmig verfügbar ist.

Die Verwendung eines neuartigen hochintegrierten und brillanten VCSEL-Arrays (vertical cavity surface-emitting laser) verbindet die hohe zeitliche Flexibilität einer Laserquelle mit der vollflächigen Abstrahlungscharakteristik eines Arrays. Es ermöglicht die Verschmelzung der beiden Regime Puls- und Lockinanregung in einem einzigen Gerät und bietet gleichzeitig eine spektrale Trennung der Anregungsquelle von der Detektionswellenlänge.

Die aktive Thermografie zeichnet sich bisher als ein (zerstörungsfreies) Prüfverfahren aus. Mithilfe der neuen Strahlungsquelle wird es möglich sein, eine Vereinheitlichung der verschiedenen thermografischen und photothermischen Materialprüf- und charakterisierungsverfahren in einem flächigen und gleichzeitig quantitativen Messverfahren zu erreichen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden erste Ergebnisse einer thermografischen Prüfung mittels VCSEL-Anregung gezeigt und mit bisherigen Methoden verglichen. Hierzu gehört die quantitative Prüfung von Standardprüfkörpern wie Sacklochbohrungen, sowie die Detektion von Impactschäden in CFK. Auch die Prüfung von blankem, poliertem Metall ist aufgrund der günstigen Absorptionsbanden und der hohen Leistungsdichte nun möglich. Aufgrund der hohen Modulationsgeschwindigkeit sind auch flächige, hochfrequente Lockin-Thermografiemessungen zur Schichtdickenbestimmung möglich.

Aktuelle Anwendungen der Thermografie in Forschung und Entwicklung für den Leichtbau im Bauwesen

K. Mandel¹, S. Gelbrich¹, H. Funke¹, S. Nitsche¹, R. Lange¹

¹ TU Chemnitz

Zur Umsetzung innovativer Lösungen für den Leichtbau im Bauwesen sind Entwicklungsprozesse auf Material-, Struktur- sowie Systemebene erforderlich. In all diesen Bereichen spielen Temperaturverteilungen sowohl während der Herstellung als auch während der Anwendung von Leichtbauelementen eine wichtige Rolle. Die berührungslose Messung von Temperaturfeldern mit Hilfe einer Wärmebildkamera bietet hierfür eine skalenübergreifende Lösung. In diesem Beitrag sollen aktuelle Anwendungen der aktiven und passiven Thermografie im Material-, Struktur- und Systemleichtbau vorgestellt werden.

MATERIALLEICHTBAU

Chemisch gebundene Keramiken als alternative mineralische Matrixmaterialien für Verbundwerkstoffe zeichnen sich durch exotherme Aushärtereaktionen aus. In der Materialentwicklung ist die Kenntnis der lokalen Aushärtetemperaturen von großer Bedeutung. Zur berührungslosen Messung des Temperaturverlaufs über der Zeit und der Oberfläche wird daher die Thermografie genutzt.

STRUKTURLEICHTBAU

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Relativverfahren sowie die Beurteilung der Dämmwirkung und Wärmeverteilung von Leichtbeton-Verbunddämmsteinen mit innovativen Füllungen erfolgt mit Hilfe der Wärmebildkamera. Thermografiebasierte Emissionsgradmessungen an neuartigen Dämmelementen ermöglichen Berechnungen zum Wärmeübergang. Die aktive Thermografie bietet Möglichkeiten zum Auffinden von Inhomogenitäten in Kunststoff- und Mineralmatrixverbunden und ist damit ein attraktives Werkzeug zur Qualitätskontrolle in Leichtbaustrukturen.

SYSTEMLEICHTBAU

Funktionsintegrierte Leichtbausysteme, wie z.B. Kombimodule zur Nutzung von Solarenergie, erfordern häufig einen gezielt eingestellten Wärmeübertrag. Die Thermografie ermöglicht die Beurteilung der Funktionsfähigkeit und hilft bei der Lokalisierung defekter Photovoltaikmodule oder Leckagen in der Solarthermieanlage.

3D-Formbestimmung mit integrierter thermografischer Qualitätsprüfung

E. Jonietz¹, R. Krankenhagen¹, M. Noack², K. Gensecke², E. Wiedenmann²

¹ BAM, Berlin; ² Aimess Services, Burg

Sowohl die 3D-Formbestimmung als auch die Thermografie sind Verfahren der Qualitätssicherung. Im vorgestellten Projekt wird versucht, die beiden Methoden zusammenzuführen.

Das Prinzip des für die Formbestimmung verwendeten 3D-Scanners beruht auf dem bereits bekannten Verfahren der Streifenlichtprojektion. Die Neuartigkeit des hier verwendeten 3D-Scanners besteht darin, dass nicht im sichtbaren, sondern im infraroten Spektralbereich gearbeitet wird. Dadurch wird es möglich, nicht die Reflexion, sondern die Wärmestrahlung des Prüfobjektes nach Absorption der eingebrachten Strahlung auszuwerten. Dies ermöglicht erstmals transparente und stark absorbierende Oberflächen zu erfassen. Die Anregung mit Wärmestrahlung stellt das Bindeglied zum Verfahren der aktiven Thermografie für die Detektion verdeckter Schäden dar. Bei letzterem Verfahren wird der Wärmestau über Defekten beim Eindringen der Wärme in die Tiefe des Materials gemessen. Dabei stellen Defekte eine Störung des 3D-Scan-Verfahrens dar, während umgekehrt unregelmäßig geformte Oberflächen das thermografische Verfahren erschweren, d. h. der Messeffekt eines der Verfahren ist ein Störeffekt für das jeweils andere Verfahren.

Es wird zum einen der Frage nachgegangen, inwieweit das 3D-Scan-Verfahren durch verdeckte thermische Defekte beeinträchtigt wird, und zum anderen die Möglichkeit untersucht, den vorhandenen 3D-Scanner auch für die aktive Thermografie einzusetzen. Vor allem die dem 3D-Scan-Verfahren innewohnende Beleuchtung mittels Streifenlicht wird dabei hinsichtlich ihrer Eignung für die aktive Thermografie untersucht, da sie dort mangels der Verfügbarkeit geeigneter Lichtquellen bislang wenig verbreitet ist. Es werden vor allem GFK-Proben und CFK-Proben mit künstlich eingebrachten thermischen Defekten untersucht. Vornehmlich untersucht wird dabei, ob eine Erwärmung mit Streifenmuster gegenüber der gängigen flächigen Erwärmung Vorteile bietet. Es werden die Möglichkeiten und Grenzen der vorhandenen Messapparatur für die Defekterkennung aufgezeigt.

Thermografie mit optimierter Anregung für die quantitative Untersuchung von Delaminationen in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen

J.P. Müller¹, S. Götschel², M. Weiser², C. Maierhofer¹

¹ BAM, Berlin; ² Zuse-Institut Berlin (ZIB)

Da kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) in anspruchsvollen sicherheitsrelevanten Einsatzgebieten wie im Automobilbau und in der Luftfahrt eingesetzt werden, besteht ein zunehmender Bedarf an zerstörungsfreien Prüfmethoden. Ziel ist die Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit der eingesetzten Bauteile. Aktive Thermografieverfahren ermöglichen die effiziente Prüfung großer Flächen mit hoher Auflösung in wenigen Arbeitsschritten. Ein wichtiges Teilgebiet der Prüfungen ist die Ortung und Charakterisierung von Delaminationen, die sowohl bereits in der Fertigung als auch während der Nutzung eines Bauteils auftreten können, und dessen strukturelle Integrität schwächen.

In diesem Beitrag werden CFK-Strukturen mit künstlichen und natürlichen Delaminationen mit Hilfe unterschiedlich zeitlich modulierter Strahlungsquellen experimentell untersucht. Verwendet werden dabei Anregungen mit Blitzlampen und mit frequenzmodulierten Halogenlampen. Mittels Filterfunktionen im Zeit- und Frequenzbereich wird das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR) der detektierten Fehlstellen optimiert. Verglichen werden anschließend die Nachweisempfindlichkeit, das CNR und die Ortsauflösung der zu charakterisierenden Delaminationen für die unterschiedlichen Anregungs- und Auswertungstechniken. Ergänzt werden die Experimente durch numerische Simulationen des dreidimensionalen Wärmetransportes.

Das VCSEL-Laser Array – Durch strukturierte Erwärmung mit einer neuartigen Hochleistungslichtquelle verdeckte Defekte thermografisch detektieren

M. Ziegler¹, E. Thiel¹, T. Studemund¹

¹ BAM, Berlin

Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSELs) sind Diodenlaser, welche Laserstrahlung mit gutem Strahlprofil senkrecht zur Chipoberfläche emittieren. Aufgrund dieser vertikalen Bauweise können sie in großen Arrays zu vielen tausenden einzelnen Lasern zusammengefasst werden. Solch ein VCSEL-Array vereint das schnelle zeitliche Verhalten eines Diodenlasers mit der hohen optischen Bestrahlungsstärke und dem großen Beleuchtungsbereich von Blitzlampen oder LEDs und kann damit potentiell alle herkömmlichen Lichtquellen der Thermografie ersetzen.

Darüber hinaus kann der Prüfkörper mithilfe dieser Lichtquelle strukturiert erwärmt werden, da einzelne Bereiche des VCSEL-Arrays unabhängig voneinander angesteuert werden können. Dieser neue Freiheitsgrad ermöglicht die Entwicklung neuer thermografischer ZfP-Verfahren. Wir demonstrieren diesen Ansatz anhand eines für die konventionelle Thermografie nur sehr bedingt lösbaren Prüfproblems, der Detektion vertikal zur Oberfläche ausgerichteter, sehr dünner, verdeckter Defekte in metallischen Werkstoffen. Wir erzeugen hierzu destruktiv interferierende thermische Wellenfelder. Defekte im Einflussbereich dieser thermischen Wellenfelder stören die destruktive Interferenz und erlauben eine hochsensible Detektion bis in Tiefen jenseits der üblichen thermografischen Faustformel, ohne Referenz und ohne Oberflächenbehandlung.

ZfP bei wiederkehrenden Prüfungen an überwachungsbedürftigen Anlagen im Rahmen der novellierten BetrSichV

A. Hecht¹

¹ Freinsheim

Die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) regelt nicht nur die Verwendung von Arbeitsmitteln sondern enthält ebenso zusätzliche Vorschriften zur Prüfung von Überwachungsbedürftigen Anlagen, siehe auch Produktsicherheitsgesetz (ProdSG), Abschnitt 9. Dieser Vortrag hat die Wiederkehrenden Prüfungen an Druckanlagen im Fokus (BetrSichV, Anhang 2, Abschnitt 4), wie sie typischerweise in der Chemischen und Petrochemischen Industrie anzutreffen sind. Zerstörungsfreie Prüfungen kommen dort oft als ergänzende Maßnahmen zu den Technischen Prüfungen zum Zuge. Unter besonderen Umständen können sogar die Besichtigungen im Rahmen Innerer Prüfungen sowie die Festigkeitsprüfungen vollständig durch Zerstörungsfreie Prüfungen ersetzt werden (Ersatzprüfungen). Insofern haben Zerstörungsfreie Prüfungen im Rahmen der BetrSichV einen hohen Stellenwert.

Im Vortrag wird sowohl auf die Aufgaben und Pflichten des Betreibers als auch auf die der Zugelassenen Überwachungsstelle (ZÜS) eingegangen. Die eigentliche Durchführung von Wiederkehrenden Prüfungen ist Aufgabe der ZÜS. Im Falle der eben genannten zerstörungsfreien Ersatzprüfungen ist jedoch der Betreiber für die Erstellung eines Prüfkonzeptes verantwortlich, das durch die ZÜS gebilligt werden muss. Welche Rolle nimmt eine Stufe-3-Person in dieser Thematik ein?

Anders als bei der Herstellung von Druckgeräten nach europäisch harmonisierten Normen, in denen Art und Umfang von zerstörungsfreien Prüfungen an Schweißnähten recht genau festgeschrieben sind, richten sich Art und Umfang der ZfP im Rahmen Wiederkehrender Prüfungen nach möglichen Schädigungen und sind auf Basis einer entsprechenden Gefährdungsbeurteilung durch den Betreiber im Prüfkonzept umzusetzen.

Bei der Erstellung solcher Prüfkonzepte ist das Technische Regelwerk der BetrSichV hilfreich, die „Technischen Regeln für Betriebssicherheit“ (TRBS), und hierbei vor allem die TRBS 1201 und die TRBS 2141-2. Wird nach den Empfehlungen der letztgenannten TRBS vorgegangen, kann der Betreiber für sich geltend machen, dass die Vorschriften der BetrSichV eingehalten wurden.

Am Beispiel eines dynamisch belasteten Druckbehälters in einer Druckanlage wird ein entsprechendes Prüfkonzept vorgestellt und erläutert.

Wirbelstromprüfung an Composite-Druckgefäßen

R. Casperson¹, D. Munzke¹, R. Pohl¹

¹ BAM, Berlin

Composite-Druckgefäße für den Gefahrguttransport sowie für Wasserstoff- und Erdgasfahrzeuge bestehen aus einem lasttragenden Composite und einer gasdichten, metallischen oder polymeren Barrierschicht (Liner). Zur Untersuchung des Alterungsverhaltens solcher Composite-Druckgefäße wird in der BAM das interdisziplinäre Themenfeldprojekt COD-AGE durchgeführt. Ziel des Projektes ist die Entwicklung von Methoden und Modellen zur Beschreibung und Bestimmung des Alterungsverhaltens von Carbonfaser-Compositen am Beispiel von Druckgefäßen, um eine bessere Vorhersage der Alterung und der sicheren Gebrauchsdauer zu ermöglichen.

Ein Schwerpunkt in diesem Projekt ist die Bereitstellung geeigneter ZFP-Methoden. Dabei geht es sowohl um versuchsbegleitende Prüfungen, als auch um die mögliche Entwicklung von Prüfeinrichtungen für den späteren praktischen Gebrauch. In diesem Vortrag werden Prüfsysteme und Prüfergebnisse der „konventionellen“ Wirbelstromprüfung vorgestellt. In einem ersten Schritt wurden Versuche an bereits geschädigten Druckgefäßen durchgeführt. Dabei wurden Druckgefäße mit den Materialpaarungen Stahl-CFK, Aluminium-CFK und Kunststoff-CFK untersucht. Die Dicken der CFK-Schichten reichten hierbei von ca. 4 mm bis ca. 8 mm. Anfangs wurden die Gefäße mit verschiedenen Sensoren von außen geprüft. Es konnten sowohl Beschädigungen des metallischen Liners, als auch Strukturen des CFK-Geflechts nachgewiesen werden. In einem zweiten Schritt wurden die Gefäße von innen geprüft. Hierbei bestand die besondere Herausforderung in der Prüfung eines Zylinders von 150 mm Durchmesser durch einen Zugang von nur 15 mm Durchmesser.

Mit den bei diesen Vorversuchen optimierten Prüfsystemen wurden dann begleitende Prüfungen bei Alterungsversuchen durchgeführt. In den Alterungsversuchen wurden Druckbehälter mit einem ca. 2 mm dicken Aluminiumliner und ca. 8 mm dicker CFK-Ummantelung untersucht. Typisches Einsatzgebiet solcher Flaschen sind Atemschutzgeräte bei der Feuerwehr. Die verschiedenen Prüfsysteme und die mit ihnen erzielten Ergebnisse werden vorgestellt.

Praxiseinsatz eines zertifizierten Prüfkonzeptes bei der wiederkehrenden Prüfung von Druckbehältern

R. Weiß¹, D. Dickebohm²

¹ CSW Engineering, Saarbrücken; ² EnBW Kernkraft, KKW Philippsburg

Die Betriebssicherheitsverordnung sieht für Druckbehälter alle 5 Jahre eine innere Prüfung und alle 10 Jahre eine Festigkeitsprüfung vor. Hierzu ist es notwendig, dass die Druckbehälter bei diesen Prüfintervallen außer Betrieb genommen werden. Dies ist nicht nur mit einem hohen Kostenaufwand verbunden, sondern beinhaltet zusätzlich noch einige Risiken, wie z. B. Umwelt-, Arbeitssicherheitsrisiken.

Durch den Einsatz von innovativen Prüfkonzepten und Prüftechnologien konnte ab 2014 auf einer Gasspeicheranlage die Festigkeitsprüfung und die innere Prüfung mehr als gleichwertig ersetzt werden. Das Prüfkonzept wurde allgemein gültig durch den zuständigen ZÜS zertifiziert und ist somit die Basis für die einzelnen Behälterprüfkonzepte. Auch in der seit Februar 2015 gültigen neuen Betriebssicherheitsverordnung spricht man von Prüfkonzepten als Ersatz für die bisherige innere Prüfung und die Festigkeitsprüfung.

Zudem können durch den Einsatz solcher Technologien ein Mehrwert für das Lebensdauermanagement von Druckbehälter, ein Umstieg auf eine zustandsorientierte Instandhaltung und eine Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit erreicht werden.

Das Prüfkonzept besteht aus einer bedarfsorientierten Kombination von verschiedenen zFP-Verfahren, wobei der wesentlichste Teil durch die Ultraschallprüfung mittels Phased-Array geleistet wird.

Da die Phased-Array-Prüfung noch nicht vollständig in den Regelwerken verankert ist, wurde eine Qualifizierung der Phased-Array-Prüfmethode in Anlehnung an die ENIQ-Richtlinie VGB R-516 „Methodik für das Vorgehen bei Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen“ an Vergleichskörpern mit natürlichen und künstlichen Referenzfehlern durchgeführt.

In diesem Vortrag wird über die Erfahrungen bei der Erstellung von Behälter bezogenen Prüfkonzepten und bei der Anwendung der in den Prüfkonzepten spezifizierten Prüfungen am Beispiel von Druckbehälterprüfungen in Erdgasspeicheranlagen berichtet und die erzielten Ergebnisse dargestellt.

Komposit-Druckbehälter-Innenprüfung mit UT Phased-Array

M. Blankschän¹, D. Brackrock¹

¹ BAM, Berlin

Komposit-Druckgefäße für den Gefahrguttransport sowie für Wasserstoff- und Erdgasfahrzeuge bestehen aus einem lasttragenden Faserverbund und einer gasdichten, metallischen oder polymeren Barrierschicht (Liner). Das Schädigungsverhalten des Faserverbundwerkstoffes und der Barrierschicht ist in erster Linie von den komplexen Wechselwirkungen zwischen der Nennlast (Druck) und den anderen Lastaspekten (Temperatur, Feuchte etc.) abhängig. Die besonderen Werkstoffeigenschaften und deren Kombination erschweren die zuverlässige Beurteilung des Integritätszustands von Komposit-Druckgefäßen und vergleichbaren Komposit-Anwendungen.

Aktuelle ZfP-Verfahren sind nicht oder nur bedingt für die Schadensüberwachung von Komposit-Druckbehältern geeignet. Ziel ist es daher, durch wiederkehrende Prüfungen Eigenschaftsänderungen der untersuchten Komposit-Druckbehälter qualitativ und ggf. quantitativ zu erfassen und zu bewerten.

Im Vortrag wird die zum Einsatz gekommene teilautomatisierte Innenprüfung in Tauchtechnik vorgestellt. Die umfangreichen Untersuchungen wurden mit einem Phased-Array-Ultraschallgerät und einer speziellen Prüfkopfführung realisiert. Als Prüfobjekte kamen Komposit-Druckbehälter mit Testreflektoren und realistischen Schädigungen, sowie unterschiedlichen Liner Materialien als Referenz zum Einsatz. Es werden experimentelle Prüfergebnisse präsentiert, welche die Detektion von realistischen Fehlstellen an Komposit-Druckbehältern zum Ziel haben.

EMUS-Prüfung als Alternative und Ergänzung zur Wirbelstromprüfung von Rohrleitungen

B. Heutling¹, H.-J. Uebrig², M. Awerbuch², S. Köllner², E. Köllner²

¹ GSI – SLV, Hannover; ² Delta Test, Hambühren

Die Prüfung von Rohren und Rohrleitungen wird in vielen Fällen mittels der Wirbelstromprüfung manuell oder teil-mechanisiert durchgeführt. Aufgrund des Skineffekts ist die Leistungsfähigkeit des Wirbelstromverfahrens hinsichtlich der prüfbaren Wanddicke begrenzt, so dass zwar die Vielzahl der dünnwandigen Rohre von Wärmetauschern und Kondensatoren mit großer Detailgenauigkeit und Präzision geprüft werden kann. Sobald jedoch die Wanddicke größer wird, nimmt die Aussagefähigkeit der Wirbelstromtechnik sehr schnell ab.

Daher wird immer versucht, aussagefähige Technologiealternativen zu finden, um auch dickwandigere Objekte, wie z. B. Rohre und Rohrleitungen, prüfen zu können. Dazu gehören das Ultraschall basierte IRIS-Verfahren sowie die elektromagnetischen Fernfeld- und Impulswirbelstromverfahren. Alle weisen in bestimmten Bereichen besondere Vorzüge und in anderen auch Nachteile auf, so dass sich letztlich keine alleinige ideale Prüftechnik etabliert hat.

In diesem Beitrag wird nun die praktische Applizierbarkeit eines optimierten Prüfsystems, das elektromagnetisch erzeugten Ultraschall nutzt, für die Prüfung von dickwandigen Prüfstücken wie Rohrleitungen untersucht und gegen die Leistungsfähigkeit anderer Prüftechnologien abgegrenzt sowie erste Ergebnisse von praktischen Einsätzen vorgestellt.

Hochauflösende laminographische 3D-Rekonstruktion der Rissfelder von großen Betonblöcken mit Impaktschäden

U. Ewert¹, M. Tschaikner¹, B. Redmer¹, A. Deresch¹, S. Hohendorf¹, O. Paetsch²

¹ BAM, Berlin; ² Zuse-Institut Berlin (ZIB)

Um die Stabilität von Gebäuden nach Kollisionen bewerten zu können, wurden Beton-testkörper mit einer Größe von $1,5 \times 1,5 \times 0,3 \text{ m}^3$ mit unterschiedlicher Impakt-Beanspruchungen geschädigt. Ausgehend vom Impakt-Bereich entwickelten sich dabei durchgehende Rissfelder. Zur Bewertung der tiefenabhängigen kumulativen Risschädigung und der Rissform sollte eine Hochenergie-Computer-Tomographie angefertigt werden. Die Durchstrahlung in Längsrichtung (1,5 m) erwies sich als problematisch. Mit dem verfügbaren Betatron von 7.5 MV wurden die Testkörper daher mittels einer koplanaren Translationslaminographie untersucht. Um hochauflösende 3D-Rekonstruktionen zu erhalten, wurden mehrere Scans mit verschiedenen Detektorpositionen in horizontaler und vertikaler Richtung durchgeführt. Die Projektionen wurden dabei an verschiedenen Detektorpositionen gemessen, um die effektive Detektorfläche zu vergrößern. In horizontaler Richtung wurde eine Detektorfläche von $160 \times 40 \text{ cm}^2$ und in vertikaler Richtung eine Detektorfläche von $40 \times 120 \text{ cm}^2$ genutzt. Ein spezielles Kreuzlaminographie-Rekonstruktionsprogramm wurde entwickelt, um diese Projektionen für eine 3D-Rekonstruktion zu verwenden. Die Segmentierung und Visualisierung der Rekonstruktionsergebnisse zeigten je nach verwendetem Bildverarbeitungssystem und den darin verfügbaren Algorithmen deutliche Unterschiede. Da die Betonstruktur (abhängig von Zuschlagstoffen) der Rissverteilung überlagert ist, wird der Rissverlauf teilweise unterbrochen rekonstruiert. Er wurde mittels spezifischen Verfolgungsalgorithmen zu einer zusammenhängenden Rissstruktur bestimmt. Die verwendeten Algorithmen werden am Beispiel der Visualisierung der Rissfelder diskutiert.

Moderne Inline-Röntgenprüfung von Kolben bis Kurbelgehäusen

C. Kretzer¹, S. Oeckl¹, T. Stocker¹

¹ Fraunhofer, EZRT, Fürth

Dank der Verfügbarkeit von neuen Röntgenkomponenten und schnelleren Rechnern lassen sich heutzutage die Zeiten für die automatische 2D-Röntgenprüfung oder Computertomographie (CT) deutlich verkürzen. Dies ermöglicht in vielen Bereichen und bei vielen Anwendungen eine 100 % Prüfung der Bauteile direkt in der Produktion.

Diese Technologien ermöglichen es auch zusätzlich wertvolle Informationen über den Herstellungsprozess zu gewinnen. Hierfür erfolgt nicht nur eine Gut/Schlecht-Sortierung der Bauteile, sondern es werden viele Informationen über vorhandene Fehlstellen gesammelt. Diese Informationen können danach in einer vernetzten Produktionsumgebung direkt genutzt werden, um Parameter der Produktion zu beeinflussen und somit Ausschuss zu reduzieren. Aus einer zerstörungsfreien Prüfung wird somit ein Prozessmonitoring.

Die Vision hinter diesen Entwicklungen ist hierbei die „ausschussfreie Produktion“. Wenn nun nicht nur kritische, sondern auch unterkritische Defekte detektiert werden, kann über eine Trendanalyse rechtzeitig eingegriffen werden, bevor ein Schlecht-Bauteil produziert wird.

Der Vortrag zeigt die Entwicklungen des Fraunhofer EZRT auf dem Weg zu einer „ausschussfreien Produktion“. Es werden neueste Technologien der Inline-Röntgenprüfung gezeigt mit Rückkopplung von Ergebnissen an die Produktion, neue Entwicklungen im Bereich der Rekonstruktion zur Beschleunigung der Messzeit bei Inline-CT-Systemen und unterschiedliche Anlagenkonzepte für eine flexible und automatisierte Inline-Röntgenprüfung.

Effiziente Unterdrückung von Streustrahlung für produktionsnahe industrielle Computertomographie

O. Brunke¹, E. Neuser¹, A. Suppes¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Wunstorf

Die industrielle Computertomographie ist zu einer etablierten Technologie bei Defektdektion und Metrologie im Rahmen von Produktionsüberwachung komplexer und teurer oder sicherheitsrelevanter Bauteile avanciert. Als Beispiel kann die Prüfung von Gussteilen und neuerdings auch von 3D-gedruckten Bauteilen für Automobil- und Luftfahrtindustrie genannt werden. Dabei besteht eine besondere Herausforderung darin, hohe Taktraten mit hohen Anforderungen an die Bildqualität zu vereinbaren. Insbesondere für schwer durchstrahlbare Bauteile ist die Streuung von Röntgenstrahlen einer der Hauptfaktoren, welcher zu einer starken Artefaktbildung und damit zur Verschlechterung von Bildqualität führt. In der Literatur sind Ansätze bekannt, bei welchen die Artefaktunterdrückung auf der Simulation der Streustrahlung unter Verwendung von CAD Daten o.Ä. beruhen. Das neue hier vorgestellte Verfahren basiert auf direkter Messung der Streustrahlung, minimiert ihren Einfluss für jedes Voxel und ist auch auf unbekannte und Multimaterial-Objekte anwendbar. Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse zwischen der konventionellen (langsamen) Fächerstrahl-CT, der von Streustrahlartefakten stark beeinflussten konventionellen Kegelstrahl-CT und der neuen Streustrahlreduktionsmethode verglichen. Es wird deutlich, dass das neue Verfahren sowohl den Durchsatz erhöhen kann, als auch die Inspektionsergebnisse insbesondere für schwer durchstrahlbare Objekte wesentlich verbessern kann. Des Weiteren hat die neue Scantechnologie nicht nur das Potential, die herkömmliche 2D-CT zu ersetzen, es werden auch Beispiele gezeigt, wo 300 kV Mikrofokus CT Inspektion für Applikationen potentiell nutzbar wird, die derzeit eine erheblich aufwändigere 450 kV Technik erfordern würden. Darüber hinaus werden auch Beispiele gezeigt, wie die neuartige Technologie die Ergebnisse im Bereich 3D-Metrologie beeinflussen kann. Bei Verwendung von automatischen Verfahren zur Oberflächenextraktion erlaubt die neue Methode die Durchstrahlung von mehr Material (bis zu 30 %), ohne die Lage der extrahierten Oberflächen negativ zu beeinflussen. Oder andererseits, bei denselben durchstrahlten Längen, führt die Artefaktreduktion zur exakteren Oberflächenextraktion und damit zu verbesserten metrologischen Ergebnissen.

Schnelle Porenanalyse zur automatischen Bewertung von Leichtmetallguss mittels Inline CT Inspektion

B. Reimann¹, L. Hagner¹

¹ Microvista, Blankenburg

Die Porenanalyse an Leichtmetallguss auf der Basis computertomografischer Digitalisierungen ist inzwischen weitverbreitet und hat die Bewertung durch metallografischen Schliff deutlich zurückgedrängt. Die Vorteile einer 3-dimensionalen Analyse sind allgemein bekannt und Gegenstand von Normungsprozessen. Die Suche nach Poren in einem Volumen stellt allerdings auch völlig andere Anforderungen an die anzuwendenden Algorithmen. Selbst bei guten Digitalisierungen treten leicht positive oder negative Fehldetektionen auf. Kommen die bei realen Bauteilen unvermeidlichen Artefakten hinzu, so verkompliziert sich die Fehlersuche weiter deutlich. Moderne Software zur Porensuche bietet deshalb auch eine ganze Reihe von Parametrierungsmöglichkeiten, deren richtige Handhabung nur noch dem erfahrenen Bediener möglich ist. Inline oder @-line Scans zur schnellen Analyse und Bewertung kleinerer und mittlerer Losgrößen erfordern eine adäquate Auswertegeschwindigkeit. Langwierige, iterative Annäherung an optimale Analyseergebnisse sind in diesem Kontext oft nicht wirtschaftlich. Im Vortrag wird ein Porensuchalgorithmus vorgestellt, der auch in artefaktbehafteten Bereichen mit hoher Wahrscheinlichkeit richtig detektiert. Er beruht auf der statistischen Auswertung der Schnittbilder und berücksichtigt dessen lokale Besonderheiten. Ein weiteres, praxisnahes Detektionsproblem tritt bei offenen Poren im oberflächennahen Bereich auf. Mit dem im Vortrag beschriebenen Verfahren können diese Poren detektiert werden und darüber hinaus mit tiefer gelegenen Poren in einen auswertbaren Zusammenhang gebracht werden. Auf diese Weise sind auch Aussagen zur Dichtheit in bestimmten Bauteilbereichen möglich.

Einfluss von Streustrahlung und Methoden zur Streustrahlreduktion in der Computertomographie

B. Kratz¹, F. Herold¹, J. Tamm¹

¹ YXLON International, Hamburg

Röntgenstrahlung kann durch Interaktion mit Materie gestreut werden. Im schlimmsten Fall werden die gestreuten Quanten so abgelenkt, dass sie vom Detektor als zusätzliches, abgeschwächtes Signal interpretiert werden. Zwar erhöht sich dadurch scheinbar das Signal-zu-Rausch-Verhältnis, das gestreute Signal enthält jedoch nicht die gewünschten Bildinformationen. Diese Einflüsse führen in den Projektionsbildern zu reduziertem Kontrast und Unschärfen. In der Computertomographie (CT) entstehen im Volumen ähnliche Fehler wie durch Strahlaufhärtung. Es kommt zu einem Werteabfall im homogenen Material (Cupping). Außerdem ergeben sich Artefakte in Form von Verbindungen zwischen Objektkanten.

Insbesondere bei Aufnahmen mit einem Kegelstrahl und einem Matrixdetektor treten diese negativen Effekte im Vergleich zu einer Fächerstrahlaufnahme und einem kollimierten Zeilendetektor verstärkt auf. In der Vergangenheit wurden zahlreiche unterschiedliche Ansätze vorgestellt, die zu einem reduzierten Einfluss von Streustrahlung auf die resultierende Volumenqualität führen sollen.

Im Rahmen dieser Studie werden vier Ansätze exemplarisch vorgestellt, die basierend auf unterschiedlichen Strategien zu einer Streustrahlreduktion führen. Dabei handelt es sich zum einen um einen softwarebasierten Ansatz, dem eine Monte-Carlo-Simulation des Streustrahleinflusses zu Grunde liegt. Er benötigt keine zusätzliche CT-Aufnahme, sondern kann auf den ursprünglichen Projektionsbildern angewendet werden. Der zweite Ansatz basiert auf einem zusätzlichen Objekt im Strahlengang, einem sogenannten Beam-Stop-Array, mit dem eine zweite CT-Aufnahme durchgeführt wird. Auf Basis der zusätzlichen Informationen werden die Streueinflüsse bestimmt und korrigiert. Als dritter Ansatz wird eine Signalmodulation betrachtet, die ebenfalls ein zusätzliches Objekt, eine Modulatorplatte, im Strahlengang erfordert. Als letztes Beispiel wird ein Ansatz betrachtet, der auf Basis einer zweiten CT-Aufnahme mit einem Schlitzkollimator vor der Röntgenröhre die Streueinflüsse korrigiert. Es werden die generellen Vorgehensweisen der Verfahren zur Streustrahlreduktion vorgestellt sowie ihre individuellen Vor- und Nachteile betrachtet.

Selektive Bestimmung der Lagenorientierung von Kohlefaserkompositen mittels winkelaufgelöster Hochfrequenzwirbelstromtechnik

M. Schulze¹, P. Krüger¹, H. Heuer¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden

Werkstoffe aus Kohlefaserkompositen werden bereits vermehrt im Automobilbau eingesetzt und haben sich in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften bewährt. Aufgrund der oftmals sehr komplexen Fertigungsverfahren ist es notwendig, Fabrikationsfehler im unverharteten als auch konsolidiertem Zustand zerstörungsfrei prüfen zu können. Hierfür eignen sich die Hochfrequenzprüfsysteme der EddyCus®-Serie zur bildgebenden Wirbelstromprüfung. Die Erzeugung von hochauflösenden C-Scans benötigt jedoch – bedingt durch die abrasternde Messdatenaufnahme – eine gewisse Zeit bis auswertbare Bilddaten verfügbar sind. Oftmals reicht jedoch die genaue Kenntnis der Lagenorientierung an spezifischen Punkten auf dem Bauteil um Aussagen zur mechanischen Festigkeit ableiten zu können. Hierfür werden aktuell Probekörper aus dem Bauteil herausgelöst und anschließend computertomografisch geprüft. Aus diesem Datensatz wird dann ein tiefenaufgelöstes Lagenprofil erstellt. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde versucht, die computertomografische Messung durch eine selektive winkelaufgelöste Wirbelstromprüfung zu substituieren. Hierzu wurde ein geeigneter Prototyp aufgebaut und anhand von unterschiedlichen Lagenaufbauten evaluiert. Die mit diesem neuartigen Geräteprototypen aufgenommenen Messdaten, die in Form von Polardiagrammen dargestellt werden, zeigen eine eindeutige Korrelation zu den CT-Aufnahmen. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird der aktuelle Stand der Technik, ein Ausblick hin zur geplanten Verwendung in einem Handgerät, sowie verschiedene Messergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Fortschrittliche Prüfmethoden zur Prüfung von CFK-Großkomponenten mit komplexer Geometrie

M. Okulla¹, U. Düfert¹, A. Bulavinov², R. Pinchuk²

¹ MT Aerospace, Augsburg; ² I-Deal Technologies, Saarbrücken

Die Bauteile aus CFK stellen vom Gesichtspunkt der prozessbegleitenden Qualitätssicherung und Qualitätsprüfung eine Herausforderung dar, was einerseits auf ihre Materialeigenschaften, andererseits auf ihre teilweise sehr komplexe Form zurückzuführen ist. Die konstruktions- und fertigungstechnisch optimierten CFK-Komponenten weisen in Bezug auf die Prüftechnik eine Tendenz zu immer komplexeren Bauteilen hinsichtlich Geometrie und innerem Aufbau auf. Diese Teile haben in der Regel zahlreiche, oft zweiachsig gekrümmte Oberflächen unterschiedlichster Krümmungsradien und viele verschiedene Materialmischungen. Das macht sie zu prüftechnisch „schwierigen“ Objekten für die Ultraschallprüfung. Dennoch ist die Ultraschallprüfung in der industriellen Qualitätskontrolle am meisten verbreitet.

Erschwerend dazu kommt die in manchen Fällen „überdurchschnittliche“ Baugröße von zu prüfenden CFK-Komponenten, die neben „gewöhnlicher“ Herausforderungen hinsichtlich Ultraschallprüftechnik Spezialansätze zur Handhabung von großen Datenmengen und Visualisierung von großflächigen Strukturen erfordert.

Am Beispiel der CFK-Boosterprüfung werden im aktuellen Beitrag fortschrittliche Methoden zur Prüfung von großen und komplexen CFK-Bauteilen erläutert, welche auf der Basis der Sampling Phased Array Technik entwickelt und in der Vorserienprüfung erfolgreich umgesetzt wurden. Die schnelle Datenerfassung und automatische Auswertung der Ultraschallprüfergebnisse wird hierbei durch adaptive Rekonstruktionstechniken realisiert, die teilweise stark variierende Bauteilgeometrien in Echtzeit berücksichtigen. Eine dreidimensionale, geometrietreue Erfassung und dreidimensionale Rekonstruktion des Bauteilvolumens ermöglicht trotz große Bauteilabmessungen eine schnelle Bauteilbewertung.

Entwicklung eines Messverfahrens zur CFK-Rohrprüfung mittels luftgekoppelten Ultraschalls

S. Joas¹, W. Essig¹, F. Fröhlich¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Leichtbauwerkstoffe wie Faserkunststoffverbunde (FKV) werden aufgrund ihrer hohen Steifigkeit und Festigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht bereits in einer Vielzahl von technischen Systemen eingesetzt. Neben der Luft- und Raumfahrt zählen auch die erneuerbaren Energien sowie zunehmend der Automobilbereich zu den Anwendungsgebieten. Bei der Detektion von herstellungs- und betriebsbedingten Schäden kommt der zerstörungsfreien Materialprüfung mittels luftgekoppelten Ultraschalls eine tragende Rolle zu. Hierdurch ist es möglich, Bauteile berührungslos und ohne Koppelmedium auf mögliche Defekte zu untersuchen.

Anhand von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffrohren mit unterschiedlichen Geometrien konnte die Eignung des luftgekoppelten Ultraschalls zur Defekterkennung demonstriert werden. Hierfür wurden berührungslos geführte Wellen im Rohr angeregt, welche entlang des Bauteilquerschnitts verliefen. Anhand des Amplituden- und Phasenverlaufs der Wellen konnten innerhalb kurzer Messzeiten von wenigen Sekunden in verschiedenen Axial- und Umfangslagen Fehler nachgewiesen werden. Das entwickelte Prüfverfahren bietet ein hohes Potential für die Qualitätskontrolle in der Serienfertigung und soll in weiteren Arbeiten insbesondere hinsichtlich der zeitintensiven Auswertetechnik optimiert werden.

Bildgebende Terahertz-Prüfung für die Inline-Kontrolle

B. Baccouche¹, F. Friederich¹

¹ Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern

In den letzten Jahren entwickelte sich die bildgebende 3D Terahertz-Prüfung zu einer herausragenden zerstörungsfreien Prüftechnik für dielektrische Materialien und Verbundwerkstoffe. Viele der bisherigen Konzepte beruhen auf quasioptischen Einzelsensorsystemen in Verbindung mit mechanischen Scannern. Während sich derartige Systeme insbesondere für Voruntersuchungen und Stichprobenkontrollen eignen, sind sie in vielen Fällen für großflächige Materialinspektionen ungeeignet. Neuartige ausgedünnte Terahertz-Array-Konzepte bieten hierfür eine geeignete leistungsfähige und kosteneffiziente Lösung auf Grundlage der digitalen Bildgebung. Ein entsprechendes System mit einem Betriebsfrequenzbereich von 75 bis 110 GHz wurde im Rahmen der hier zugrundeliegenden Arbeiten entwickelt. Gegenstand dieses Beitrags ist die Gegenüberstellung der Leistungsfähigkeit dieses Systems, insbesondere im Hinblick auf Geschwindigkeit und Bildqualität, gegenüber quasioptischer Einzelsensorsysteme auf Basis vergleichbarer Hochfrequenzkomponenten. Dabei werden weiterhin schnelle Bildrekonstruktionsmethoden adressiert, welche den industriellen Einsatz für die Inline-Kontrolle ermöglichen.

Ultraschallthermografie auf Basis Lokaler Defektresonanzen

M. Rahammer¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Die ultraschallangeregte Thermografie (UTT) zeichnet sich vor allem durch ihre hohe Defektselektivität bei gleichzeitig sehr schneller Durchführung aus. Ersteres resultiert in sehr eindeutigen, benutzerfreundlichen Ergebnissen. Vor allem für Risse und rissähnliche Schäden wie Delaminationen ist in fast allen Materialien innerhalb weniger Sekunden ein Defektsignal verfügbar. Statt den aus der Ultraschallprüfung bekannten Geräten mit hohen Frequenzen (MHz), finden in der UTT üblicherweise leistungsstarke Sonotroden aus der Kunststoff-Schweißtechnik Einsatz. Hohe Leistungen sind notwendig, um sicher ausreichend Energie am Defekt zu gewährleisten.

Mit dem Prinzip der lokalen Defektresonanz eröffnen sich neue Möglichkeiten, den Energiebedarf (elektrisch und akustisch) zu senken und es ist der Einsatz von kleinen Piezo-basierten Schwingern möglich. Defekte werden dabei als separates Volumen mit einer fixen Geometrie und Masse modelliert und eine eigene Resonanzfrequenz zugeordnet. Flutet man nun das zu prüfende Bauteil mit Schall von genau dieser Frequenz, so beginnt der Defekt stark zu schwingen, während das restl. Bauteil kaum bis gar nicht schwingt. Da die schwingende Masse sehr klein ist, kann auch die notwendige Anregungsenergie sehr klein gewählt werden. Die resonante Verstärkung der Schwingungen im Defektbereich ermöglicht eine energieeffiziente Anregung desselbigen. Diese Schwingung führt entsprechend den bekannten Prinzipien der UTT (Rissuferreibung, Hystereseverluste) zur Erwärmung. Experimente zeigen, dass akustische Energien im mW-Bereich ausreichen, um Temperaturen im K-Bereich zu erzeugen. Auch Thermografiesysteme im mittleren Preissegment können dies auflösen.

Die größte Hürde ist die fehlende Information der Defektresonanzfrequenz von unbekanntem Defekten. Der Frequenzbereich in dem diese liegen lässt sich aber erfahrungsgemäß stark eingrenzen. Mittels breitbandiger Sweep-Anregung kann auch bei unbekanntem Bauteilen das Prinzip der Defektresonanz genutzt werden, um so mobile Ultraschallthermografieanwendungen realisierbar zu machen.

Automatisierte Ultraschallprüfung von CLAD-Rohren

J. Beißel¹, J. Ininger², B. Kenfenheuer², D. Norton²

¹ Eisenbau Krämer, Kreuztal; ² GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

Die weltweite Nachfrage nach Öl & Gas, bleibt, ungeachtet der Unbeständigkeit des Ölpreises, weiterhin sehr hoch. Neue, natürliche Öl- und Gasquellen sind vielversprechend, enthalten jedoch häufig Kombinationen aus aggressiven Medien. Das Marktinteresse an Methoden, welche die damit verbundene Korrosion vermeiden können, ist hoch. Eine dieser Methoden besteht im Einsatz von Rohren, welche auf Ihrer Innenseite mit einer korrosionsbeständigen Legierung plattiert sind, sogenannte CRA oder CLAD- Rohre.

Die Qualitätsanforderungen der Gas- und Ölindustrie für CLAD-Rohre sind in den vergangenen Jahren stetig gewachsen. Die zerstörungsfreie Prüfung und insbesondere die Ultraschallprüfung spielen dabei eine zentrale Rolle und in den aktuellen Prüfspezifikationen legen die Gas- und Ölkonzerne hohe Standards für die Prüfung der verschiedenen Werkstoffe und unterschiedlichen Schweißnähte fest. Konventionelle Ultraschallprüfsysteme können diese Anforderungen kaum erfüllen.

Wie sich gezeigt hat, stößt der Einsatz von konventioneller Ultraschalltechnik hinsichtlich der Genauigkeit und Flexibilität an seine Grenzen, um CLAD-Rohre aus verschiedenen Hochleistungswerkstoffen und Dimensionen im Bereich der Schweißnähte anforderungs- und produktionsgerecht prüfen zu können. Moderne automatisierte und lasergesteuerte Prüfanlagen auf Basis der Phased-Array Technologie verfügen aber genau über diese Präzision bei gleichzeitiger Flexibilität.

Zusammen mit der Firma Eisenbau Krämer (EBK) – einem führenden Hersteller in der Produktion von CLAD-Rohren– entwickelte und baute GE Sensing & Inspection Technologies GmbH leistungsfähige Prüfanlagen für höchste Prüfanforderungen für den Standort Kreuztal. Um die Prüfung der CLAD-Rohre zu ermöglichen wurden Phased-Array Prüfkopfsysteme entwickelt und anschließend in einem aufwendigen Verfahren getestet, integriert und optimiert. Mithilfe einer neuen flexiblen Einstellmöglichkeit dieser Hochleistungsprüfsysteme und der vollständigen Automatisierung der Prüfmechanik, gelang auf diese Weise die Integration in den Produktionszyklus, so dass schließlich die Qualifizierung durch unabhängige internationale Prüfstellen und Abnahmegesellschaften erreicht werden konnte.

Vollautomatische Kurbelwellen-Prüfanlage zur Bestimmung der Einhärtungs-Härtetiefe (SHD)

M. Becker¹, N. Brosta¹, H.-R. Herzer¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Bei der zerstörungsfreien Messung der Einhärtungs-Härtetiefe in Tiefen größer einem Millimeter stellt Ultraschallrückstreuung seit vielen Jahren ein zuverlässiges Mittel dar, um Härte-tiefen umwandlungsgehärteter Bauteile zu bestimmen. Die Vorteile der kalibrierungsfreien Messung sowie des robusten Messverfahrens werden weltweit in der Qualitätssicherung und der Fertigung geschätzt. Basierend auf der Ultraschall-Hardware des Fraunhofer IZFP finden sich Handprüfsysteme von der Automobilbranche bis hin zum Energiesektor.

Dieses Messverfahren wurde in einem Großprojekt in eine vollautomatische SHD Kurbelwellenprüfanlage umgesetzt, die selbsttätig innerhalb von 20 Minuten eine komplette LKW-Kurbelwelle prüft und bewertet, wobei die Anzahl der zu prüfenden Baureihen sowie Messstellen frei durch den Kunden definiert werden können. Die vorgestellte Anlage ist in der Lage die Zuführung sowie Messungen für mehrere spezifizierte Baureihen in den Radien und den Lagersitzen auf allen Pleuel und Hauptlagern vollautomatisch durchzuführen. Neben den Messungen, die in den entsprechenden Schnittebenen, vergleichbar zu zerstörenden Messungen liegen, sind bisher nicht realisierbare auf dem Lager umlaufende sowie parallele Messspuren möglich. Für die Bedienung und das Einlegen wird lediglich ein geschulter Arbeiter benötigt. Dies führt neben einer kalkulierbaren Prozesszeit zu vollständig vergleichbaren Ergebnissen, die digital vorliegen und automatisch in die kundeneigenen Dokumentationssysteme übermittelt werden können.

Die größten Herausforderungen dieses Systems lagen einerseits in der Entwicklung möglichst flexibel einsetzbarer Prüfköpfe für verschiedene Durchmesser sowie die Erhöhung der Verschleißbeständigkeit im Vergleich zur manuellen Prüfung. Bei der verwendeten Software handelt es sich ebenfalls um eine Neuentwicklung, die sowohl die Zuordnung der Bauteiltypen zu ihren Prüfabläufen als auch zur Programmierung neuer Prüffolgen eingesetzt werden kann.

Insgesamt stellt dieser Prototyp einen Erfolg auf ganzer Linie dar, da sich das System inzwischen mehr als 18 Monate erfolgreich im industriellen Einsatz befindet.

Die Ultraschallprüfung der Randzone von Grobblechen mit Phased-Array Technik

T. Schmitte¹, N. Chichkov¹, T. Orth¹, M. Rühle², S. Kämpgen²

¹ Salzgitter Mannesmann Forschung, Duisburg; ² Salzgitter Mannesmann Grobblech, Mülheim

Die Ultraschallprüfung von Grobblechen besteht im Wesentlichen aus einer Dopplungsprüfung mit konventionellen SE-Prüfköpfen. Typische Referenzreflektoren sind Flachbodenbohrungen in verschiedenen Tiefen, wobei Inhomogenitäten möglichst bis zum Rand nachgewiesen werden müssen. Allerdings kann bei den normalerweise verwendeten, recht großen Schwingern immer ein gewisser ungeprüfter Bereich am Rand entstehen. Dieses Problem wird verschärft, falls die Blechränder eine Abweichung von der idealen Form (planparallele Oberflächen und senkrechte Kantenfläche) aufweisen. Im Falle des Einsatzes einer Blechschiere kann dieser Fall regelmäßig auftreten. Die Formabweichung besteht dann aus abgerundeten Kanten auf der einen und Graten auf der anderen Seite.

Ziel dieses Projektes ist nun die Verringerung eines ungeprüften Bereichs auch bei Vorliegen starker Formabweichungen, um steigende Qualitätsansprüche zu erfüllen. In unserem Beitrag wird gezeigt, dass dieses Problem mittels Einsatz eines Phased-Array Systems gelöst werden kann, wobei geeignete Verzögerungsgesetze verwendet werden, um die Formabweichung der Kante zu kompensieren.

Anhand von Ergebnissen aus Labor- und Betriebsversuchen wird das Vorgehen demonstriert. Darüber hinaus wird die, durch Formabweichung der Kante, entstehende Verzerrung des Schallfeldes dargestellt. Für diese Messungen verwenden wir den sog. Photoelastic-Imager, der auf der Sichtbarmachung von Ultraschall durch Doppelbrechung in Glas basiert.

Bewertung der Zuverlässigkeit geschweißter Komponenten unter Einbeziehung von Ultraschallprüfungen an realistischen Testfehlern

A. Jüngert¹, S. Dugan¹, G. Wackenhut¹, R. Lammert¹, M. Spies², H. Rieder²

¹ MPA Universität Stuttgart; ² Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Hinsichtlich des Lebensdauer-Managements sicherheitsrelevanter Konstruktionen wie Komponenten in Kernkraftwerken stellen die Fertigungsqualität und das Altern von Bauteilen und Materialien entscheidende Faktoren dar. Materialfehler müssen bereits in einem frühen Stadium detektiert und korrekt bewertet werden. Die Ultraschallprüfung von Austenit- und Mischnähten, wie beispielsweise als Rohrumfangsnähte in Kernkraftwerken ausgeführt, ist – bedingt durch deren Kornstruktur – jedoch immer noch mit Unsicherheiten behaftet. In einem laufenden Forschungsvorhaben wird eine bruchmechanische Bewertungsmethodik zur Zuverlässigkeitsbewertung von Rohrnähten entwickelt. Diese erlaubt eine quantitative Beschreibung der Unsicherheiten, die aufgrund der probabilistischen Verteilung der Materialeigenschaften und Fehlercharakteristika entstehen. Die Methodik beinhaltet (i) die Zusammenstellung einer umfangreichen Datenbasis mit Materialkennwerten für Austenit- und Mischnähte aus der Literatur und aus Werkstoffprüfungen, (ii) die Auswertung von statistischen Verteilungen und (iii) die Entwicklung eines Bewertungsansatzes hinsichtlich des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Zuverlässigkeit der Ultraschallprüfung dieser Schweißnähte. Durch Kombination der Ergebnisse der statistischen Bewertung der Materialeigenschaften und der ZFP-Ergebnisse wird eine Methodik zur bruchmechanischen Bewertung der Zuverlässigkeit der Komponente entwickelt. Erste experimentelle Untersuchungen wurden an repräsentativen Testkörpern mit realistischen Fehlern durchgeführt. Auf Basis der akquirierten Datensätze wurde eine POD-Analyse durchgeführt, um die problemspezifische Fehlerauffindwahrscheinlichkeit quantitativ zu charakterisieren. Dieser Beitrag stellt vorläufige Ergebnisse vor, ebenso wie die weiter im erwähnten Forschungsvorhaben geplanten Arbeiten.

Aktueller Stand der Diskussion zur Zuverlässigkeit der ZfP und den menschlichen Faktoren

M. Bertovic¹, D. Kanzler², M. Pavlovic¹, R. Holstein³

¹ BAM, Berlin; ² Applied Validation of NDT, Berlin; ³ DGZfP Ausbildung und Training, Berlin

Dass die Zuverlässigkeit der ZfP eine sehr wichtige Rolle bei der Bewertung sicherheitsrelevanter Systeme spielt, ist bekannt. Laut dem modularen Zuverlässigkeitsmodell für zerstörungsfreie Prüfprozesse hängt die Zuverlässigkeit von der innewohnenden (physikalisch-technischen) Fähigkeit der Prüfsystems, den Anwendungsparametern, den menschlichen Faktoren und dem organisatorischen Kontext ab. Seit Einführung des Modells während des ersten Workshops zur Zuverlässigkeit der ZfP (European-American Workshop on Reliability of NDE) wurde das Modell in weiteren fünf Workshops stetig weiterentwickelt, diskutiert und an den Stand der Wissenschaft angepasst. Ziel des Vortrags ist es den aktuellen Stand der Diskussion und die neusten Fragestellungen der internationalen Zuverlässigkeitsgemeinschaft vorzustellen. Im Einzelnen werden die Entwicklung fortgeschrittener Modelle zur Bewertung der Probability of Detection (POD), Bewertungsansätze im Bereich Structural Health Monitoring und Fragestellungen zu den menschlichen Faktoren dargestellt. Besonderer Wert wurde sowohl auf die Entwicklung, als auch auf die Anwendung der Ansätze in der industriellen Praxis gelegt.

Quantitative Lösungen zur Kombination theoretischer Analysen mit praktischen Demonstrationen bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit von ZfP-Systemen

D. Algernon¹, S. Feistkorn¹, M. Scherrer¹

¹ SVTI, Wallisellen, Schweiz

Insbesondere in sicherheitstechnisch relevanten Anwendungsbereichen der ZfP sind die Anforderungen an die Zuverlässigkeit hoch. Branchenspezifisch existieren dementsprechend Prozesse, welche die Bestimmung der Zuverlässigkeit von Prüfsystemen zum Ziel haben. Eine finale Quantifizierung von Zuverlässigkeit bedingt jedoch zunächst geeigneter Formen, diese in ihren tatsächlichen Elementen zu erfassen.

Grundsätzlich kann bei der Ermittlung des Leistungsvermögens von ZfP-Systemen in zwei Formen der Überprüfung unterschieden werden, nämlich in theoretische Analysen und praktische Demonstrationen. Während letztere versuchen die unter nachgestellten Realbedingungen erbrachten Befunde mit dem wahren Zustand zu vergleichen, wird in theoretischen Analysen gegebenenfalls unter Zuhilfenahme von Simulationen oder anderen Berechnungen versucht das Leistungsvermögen sinnvoll zu erschließen. Beide Formen fließen im Normalfall in die Beurteilung von Prüfsystemen ein. Übergänge ergeben sich in natürlicher Weise schon dann, wenn Zielobjekte wie z. B. Risse, Einschlüsse oder auch Materialunterschiede für die praktische Demonstration nachgebildet werden, was bereits theoretische Überlegungen notwendig macht.

Während Ergebnisse praktischer Demonstrationen mittels Statistik gut quantifizierbar sind, ist diese Quantifizierung für theoretische Analysen nicht trivial. Zentrale Fragestellungen sind u. a. das Ergebnis und die Beweiskraft der Analyse für sich sowie zusammenfassende Angaben über deren Kombination mit praktischen Demonstrationen.

Eine Möglichkeit bietet die Anwendung des in der Kerntechnik entwickelten und auf dem Bayes'schen Wahrscheinlichkeitsbegriff basierenden Ansatzes in Hinblick auf die Qualifizierung gemäß der Methodik des European Network for Inspection and Qualification (ENIQ). Die Umsetzung dieses Ansatzes bedarf gut fassbarer Kriterien.

Die Thematik wird an zwei unterschiedlichen Anwendungsgebieten beleuchtet. Als erstes sei die Herangehensweise in der Kerntechnik angeführt, in welcher praktische Demonstrationen fester Bestandteil der Zertifizierung von Prüfsystemen sind. Als zweites Beispiel sei die derzeitige Situation der ZfP von Betonbauteilen im Bauwesen behandelt, wo praktische Demonstrationen derzeit erst beginnen in die Praxis einzufließen.

Zukünftige Möglichkeiten und Pflichten der zerstörungsfreien Prüfung

D. Kanzler¹, M. Pavlovic², M. Bertovic²

¹ Applied Validation of NDT, Berlin; ² BAM, Berlin

In unserer heutigen Zeit werden die Zwischenräume innerhalb der einzelnen Abteilungen eines Betriebs und zwischen einzelnen nationalen oder globalen Akteuren immer wichtiger: Produzierbarkeit vs. Wirtschaftlichkeit, Fortschritt vs. Nachhaltigkeit. Auch die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) – bisher hauptsächlich als Endkontrolle oder Wartungselement wahrgenommen – kann und sollte im Wandel der Digitalisierung und Industrie 4.0 einen neuen Stellenwert erhalten.

Die ZfP kann schon während der Konstruktion helfen, sichere und zuverlässige Produkte zu erstellen. Jedoch müssen dafür eine adäquate Informationskultur und die notwendigen Kennzahlen vorhanden sein. Objektive, probabilistische Kennzahlen (wie die POD – Auffindwahrscheinlichkeit) sind hierbei der Schlüssel. Diese müssen jedoch unbedingt an Prüfverfahren, Prüfgegenstand und Prüfbedingung angepasst werden, da sonst die gesamte Aussage in Frage zu stellen ist.

Im Vortrag werden Beispiele aus der Anwendung gezeigt, die die Aussagekraft der Kennzahl aber auch die Sorgfalt, mit denen die einzelnen Aussagen genutzt werden, unterstrichen werden soll. Die Bewertung von Daten realer Fehler, die Anpassung an die Bruchfestigkeit und die Betrachtung von mehreren Prüfparametern am Beispiel der Bewertung von radiographischen, Ultraschall- und Wirbelstromprüfung werden in dem Vortrag gezeigt.

Fortgeschrittene Automatisierung bei der Prüfung von Blankstahl für Luftfahrtanwendungen

J. Maier¹, J. Schmelting², C. Asche², S. Falter²

¹ Böhler Edelstahl, Kapfenberg, Österreich; ² GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

Die Ultraschallprüfung von Stabstählen konnte durch den Einsatz von umrundenden Phased-Array Prüfköpfen eine signifikante Verbesserung der Prüfung verbunden mit einer Vereinfachung der Anwendung erfahren. Das sogenannte ROWA Arrangement, das zur Ankopplung der umrundenden Phased-Array Prüfköpfe an den Stabstahl einen rotierenden Wassermantel einsetzt, hat sich in der Praxis bewährt.

Stähle, die zum Einsatz in Luftfahrtssystemen vormals mit Rotationsprüfanlagen, bei erforderlich höherer Genauigkeit sogar in Tauchttechnik, geprüft wurden, können heutzutage mit Phased-Array Prüfanlagen verlässlich geprüft werden. Die Einfachheit der Anwendung macht den Einsatz des Phased-Array Systems attraktiv. Um die für Luftfahrtstähle notwendigen hohen Anforderungen an die Prüfgüte und Wiederholbarkeit zu erfüllen, die mit Tauchttechnikanlagen zu erreichen sind, ist es aber notwendig, erweiterte Maßnahmen zu treffen.

Es muss einerseits sichergestellt werden, dass die Prüfempfindlichkeit und die Prüfhomogenität der Vielzahl der virtuellen Prüfköpfe über den gesamten Querschnitt des Materials gegeben sind, andererseits muss eine flexible Verfahrensweise gefunden werden, um mit den auf hohen Prüf- und Empfindlichkeitsstandards beruhenden Herstellerspezifikationen, mit denen der Prüfer von Stählen für die Luftfahrtindustrie umgehen muss, verfahren werden soll.

Wir zeigen auf, wie das mithilfe eines vollständig automatisierten Kalibrierprozesses und dessen Integration in die Prüfsoftware umgesetzt worden ist. Beginnend mit der Definition der durch die Standards vorgegeben Teststäbe werden Empfindlichkeitsabgleich und Kalibrierung der DAC-Kurven automatisiert durchgeführt und die Ergebnisse verwaltet. Darüber hinaus kann die Prüfhomogenität im sogenannten Empfindlichkeitswelligkeitstest über den gesamten Querschnitt des Prüfstabes vermessen und dokumentiert und auf diese Weise eine möglichst perfekte Abbildung der herausfordernden Prüfstandards des Luftfahrtsegments hergestellt werden.

Darauf basierend soll auch erstmals eine Diskussion darüber geführt werden, inwieweit automatisierte Prüfanlagen den Anforderungen des kürzlich verabschiedeten Standards ISO 18563-3 genügen können, der seinerseits klare Forderungen an die Qualifizierung einer Phased-Array Prüfung im täglichen Betrieb stellt.

Noncontact NDT and Defect Imaging via Resonant Sonic Activation of Damage

I. Solodov¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

A selective acoustic activation of defects based on the concept of Local Defect Resonance (LDR) enables to enhance considerably the intensity of defect vibrations and makes it possible to reduce the input acoustic powers to the levels permissible for noncontact nondestructive inspection. Since for cm-size defects in composite materials, the LDR frequencies lie in the low kHz-range the resonant noncontact activation shifts to an audible frequency range and is provided by conventional sonic equipment. In this paper, a feasibility of the resonant noncontact inspection is validated for the most “problematic” methodologies of nonlinear, thermosonic and shearosonic NDT that usually require an elevated acoustic power and, therefore, a reliable contact between the specimen and the transducer. In contrast, the noncontact versions developed employ commercial loudspeakers which can simultaneously insonify large areas and applied for a contactless sonic inspection of different materials and various scale components.

Charakterisierung von Keramik-Matrix-Kompositen mittels hochfrequenter Wirbelstromtechnik

S. Hillmann¹, M. Kyrychenko², M. Schulze¹, H. Heuer¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² TU Dresden

Kompositmaterialien aus keramischer Matrix nehmen zunehmend Einzug in technischen Strukturen, in denen eine raue Umgebung vorherrscht, wie beispielsweise sehr hohe Temperaturen, Korrosion oder sehr hohe mechanische Kräfte. Diese Materialien verbinden den Vorteil klassischer Kohlefaserverbundwerkstoffe, nämlich in Faserrichtung sehr hohe Kräfte aufnehmen zu können bei vergleichsweise geringem Gewicht der Komponenten, mit den positiven Materialeigenschaften von Keramiken wie hohe Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit sowie Festigkeit. Damit sind diese Verbundwerkstoffe erstmals für hochbelastete Bauteile zum Beispiel in Triebwerken einsatzfähig. Die Nachteile der Technologie sind ähnlich gelagert wie seinerzeit bei der Einführung der reinen Kohlefaserverbundwerkstoffe: das Bauteilverhalten über den Lebenszyklus der Bauteile ist relativ wenig bekannt, und damit auch die relevanten Materialfehler; ebenso wenig sind zerstörungsfreie Prüfmethoden für diese Materialien bekannt und erprobt. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird eine Evaluationsstudie an Kohlefaser-Keramik-Verbundmaterialien an unterschiedlichen Zeitpunkten des Herstellungsprozesses vorgestellt und diskutiert. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Hochfrequenz-Wirbelstromtechnologie, die basierend auf umfassenden und langjährigen Erfahrungen des Projektteams an reinen Kohlefaserverbundwerkstoffen für diese neuen Werkstoffe optimiert worden ist. Die Wirbelstromergebnisse werden mit Referenzmessungen aus der Ultraschall- und Röntgentechnik ergänzt und bewertet.

ZfP Prüfbarkeit an Faserverbundbauteilen – ein Modell zur automatisierten Bewertung von Prüfsituationen

M. Mosch¹, C.U. Große²

¹ Airbus Helicopters, Donauwörth; ² TU München

Zwei dominierende Faktoren bei der Entwicklung von Luftfahrzeugen sind die Auslegung auf größtmögliche Sicherheit sowie eine möglichst hohe Gewichtsreduktion. Während der Entwicklungsphase von Bauteilen aus Faserverbundmaterialien werden die unterschiedlichen Anforderungen zu einem Bauteildesign verschmolzen. Es entstehen hochoptimierte Bauteile mit komplexem Aufbau und komplexer Geometrie die den entsprechenden Qualitätsanforderungen genügen müssen. Die zerstörungsfreie Prüfung liefert einen entscheidenden Beitrag zur Überprüfung dieser Qualitätsansprüche. Oft ist sie sogar die einzig industriell einsetzbare Möglichkeit. Entsprechend muss eine zerstörungsfreie Prüfbarkeit und ein möglichst geringer Prüfaufwand gewährleistet werden. Die frühzeitige Berücksichtigung von ZfP Belangen während des Konstruktionsprozesses bildet daher die Grundlage für eine effiziente und einfache Prüfung.

Der hier vorgestellte Ansatz ist, die Parameter der zerstörungsfreien Prüfung formal und standardisiert als Prüfsituation zu erfassen und entsprechend aufbereitet in der Konstruktionsphase eines Bauteils den Entwicklern zur Verfügung zu stellen. Aufbauend auf dieser generischen Beschreibung der Prüfung wurde ein Modell zur Analyse einer zerstörungsfreien Untersuchung entwickelt. Damit können die Eingabegrößen Bauteilgeometrie, verschiedene Anomalietypen und Prüfverfahren verknüpft werden. Somit kann beispielsweise der Prüfaufwand für ein Bauteil simuliert werden, es ist eine Aussage über die generelle Prüfbarkeit des Bauteils mit einer ausgewählten Prüfmethode möglich oder es können nicht prüfbare Bereiche eines Bauteils erkannt werden. Ein Abgleich mit tatsächlichen Messergebnissen von durchgeführten Prüfungen, beispielsweise aus der Serienproduktion, führt zu einer Präzisierung des Modells und erhöht die Aussagekraft. Dabei werden Informationen nicht bauteilspezifisch erkannt, sondern ihre Charakteristika generisch klassifiziert und somit übertragbar gemacht. Die Realisierung des Modells als Software und eine Kompatibilität zu CAD Anwendungen ermöglicht die Einbindung in den industriellen Konstruktionsprozess.

Es wird die Funktionsweise des Modells vorgestellt und es werden erste Simulationsergebnisse einer automatischen Prüfsituationsbewertung präsentiert.

Magnetische Streuflussprüfung in Kombination mit einer Wirbelstromapplikation zur Trennung von Störungen (Fehler, Ungängen) auf der Ober- und Unterseite von Tankbodenplatten aus ferromagnetischen Materialien.

M. Janßen¹

¹ Tuboscope Vetco, Celle

Seit Jahrzehnten entwickelt und betreibt die Firma Tuboscope Vetco aus Celle/Niedersachsen Prüfgeräte für die Inspektion von Tankbodenplatten aus ferromagnetischen Materialien.

Im Zuge der Weiterentwicklung des sogenannten FIT-Gerätes (Floor Inspection Tool) wurde u. a. das Entwicklungsziel definiert, ober- und unterseitige Störungen an Tankbodenplatten sicher zu unterscheiden. Nach Möglichkeit sollte die ursprüngliche Sensorik beibehalten werden.

Das existierende Gerät nutzt das magnetische Streuflussverfahren, um Störungen verlässlich auf der Ober- und Unterseite festzustellen. Eine Unterscheidung, ob sich die Störung auf der Ober- oder Unterseite befindet, war bisher nicht möglich.

In der Literatur finden sich Ausführungen zu Methoden, die eine Trennung der vorgenannten Störungen mittels Frequenzspektralanalyse beschreiben.

Ein weiterer Ansatz zur Unterscheidung von ober- und unterseitigen Störungen ist die Anordnung der Sensorik in verschiedenen Abständen zur Plattenoberfläche (Bestimmung des Gradienten der zu messenden Feldstärke, Auswertung der Steilheit).

Beide Ansätze versagen und führen nicht zur sicheren Trennung, wenn Störungen mit einer bestimmten Morphologie (Charakteristik) auftreten.

Der Vortrag stellt zunächst das existierende Gerät mit seinen Besonderheiten und Details vor. Danach werden die Modifikationen und die damit verbundenen Entwicklungsaufgaben beleuchtet. Der Vortragsschwerpunkt liegt auf der Problematik der Trennung von ober- und unterseitigen Fehlern, wenn die Störungen bestimmte Charakteristika aufweisen und natürlicher Herkunft (Korrosion) sind.

Das Gerät wurde zusätzlich – nachdem die o. g. Ansätze verworfen wurden – mit einer vergleichsweise aufwändigen Wirbelstromapplikation ausgerüstet. Nachvollziehbar wird dargelegt, wie tatsächlich die vorhandene Sensorik weiter genutzt werden konnte (ohne signifikante Änderungen).

Mit realen Messergebnissen wird beschrieben, wie die Trennung erfolgt und warum der Bediener keine zusätzlichen Einstellarbeiten vornehmen muss.

Schlussendlich wird verdeutlicht, dass die Kombination zweier etablierter Messverfahren (Streufluss, Wirbelstrom) zu dem gewünschten Entwicklungsziel führte.

RFT – Remote Field Wirbelstromtechnik, ein Verfahren für die Zustandsermittlung von Kesselwänden

J. Keil¹

¹ SGS Germany, Herne

RFT – Remote Field Wirbelstromtechnik ist ein Sonderverfahren, welches sich durch hohe Effizienz bei der Zustandsermittlung von Kesselwänden in fossilen Kraftwerken auszeichnet. Bisher wurde der Zustand von Kesselwänden mit punktuellen Ultraschall Wanddickenmessungen ermittelt. Neben einem hohen Personal- und Rüstaufwand hat die punktuelle Wanddickenmessung noch weitere gravierende Nachteile. Langsam einlaufende Wanddickenminderungen sind bei der konventionellen US-Wanddickenmessung stark vom verwendeten Prüfraster abhängig und können oft nicht detektiert werden. Weiterhin müssen die Prüfstellen für die Ankopplung des US-Prüfkopfes angeschliffen werden. Dieses führt bei einer nicht fachgerechten Durchführung oft zu einer weiteren Reduzierung der Wanddicken.

Im Gegensatz hierzu eignet sich das RFT Verfahren besonders, da die Wirbelstrommessung berührungslos erfolgt und in relativ kurzer Zeit sehr große repräsentative Bereiche der Kesselrohre geprüft werden können. Bedingt durch die große Eindringtiefe bei niedrigen Frequenzen, werden sowohl innere als auch äußere Fehlstellen und Wanddickenminderungen festgestellt.

Der Vortrag berichtet anhand eines Praxisbeispiels über die Prüfung eines Aschetrichters in einem fossilen Kraftwerk über die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens.

Lokalisierung und Quantifizierung von Rissen in Ermüdungsversuchen mit geführten Wellen

T. Gaul¹, B. Weihnacht¹, R. Neubeck^{1,2}, L. Schubert¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² TU Bergakademie Freiberg

Die Anwendung geführter Ultraschallwellen bietet besonders für den Einsatz auf großen Strukturen wie Behältern und Rohrleitungen viel Potential. Verteilte Sensornetzwerke erlauben die Bewertung ausgedehnter Überwachungsbereiche hinsichtlich Korrosion oder entstehender Risse. Dabei kann in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Wandler der Ort der Schädigung hinreichend genau bestimmt werden. Ein Hemmnis bei der Anwendung geführter Wellen ist die unzureichende Quantifizierung einer Unregelmäßigkeit gegenüber Ultraschall. Risse werden bereits zuverlässig detektiert und geortet, eine Bestimmung der Länge bzw. der Tiefe ist jedoch kaum möglich.

Zur Adressierung dieser Problemstellung werden in Ermüdungsversuchen realistische makroskopische Rissbilder erzeugt. In Vier-Punkt-Biegeversuchen werden geschweißte Stahlrohre periodisch belastet. Die einsetzende Materialermüdung führt zu Rissen im Bereich der Schweißnaht, die kontinuierlich wachsen. Mit auf der Struktur verteilten Sensorringen erfolgt während der Belastung ein periodisches Senden und Empfangen geführter Wellen. Für die Auswertalgorithmen besteht die Notwendigkeit bildgebende Verfahren weiterzuentwickeln, die Geometrie, Lage und Fehlertyp bestimmen können. Es wird auf Verfahren der Erdölprospektion mit elastischen Wellen zurückgegriffen. Diese arbeiten im Vergleich zum Ultraschall in einem niederfrequenten Bereich und bieten bereits weit fortgeschrittene Algorithmen, die auf schwach besetzte Sensornetzwerke und ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis optimiert sind und sich somit für die Zustandsüberwachung eignen.

In dem vorliegenden Artikel wird der verwendete Versuchsstand für Transmissions- und Reflexionsmessungen beschrieben. Weiterhin wird ein Überblick zu den verwendeten Verfahren zur Ortung und Quantifizierung der auftretenden Risse gegeben. Dabei erfolgt eine Unterscheidung in Migrations- und Inversionstechniken. Die aufgezeichneten Messdaten werden mit den genannten Algorithmen verarbeitet und die Ergebnisse abschließend dargestellt.

Groutüberwachung an Offshore-Windenergieanlagen mit geführten Wellen

B. Weihnacht¹, T. Gaul¹, R. Neubeck¹, K. Tschöke¹, L. Schubert¹, J. Eppler²,
H. Huhn³

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² Baltic Taucherei- und Bergungsbetrieb Rostock;

³ WindMW Service, Bremerhaven

Grout-Verbindungen stellen ein zentrales Element von Offshore-Monopilegründungen dar. Die Inspektionen von Grout-Verbindungen an Offshore-Windkraftanlagen erfordern derzeit oftmals eine kostenintensive Stilllegung der Anlage über mehrere Stunden. Verfahren zur Detektion von Fehlstellen in der Grout-Verbindung von der Erdplattform aus sind bisher nicht verfügbar. Der logistische Aufwand für wiederkehrende Prüfung übersteigt den der Onshore-Anwendungen um ein Vielfaches, so dass jede Zeitersparnis mit einer intensiven Kostenersparnis einhergeht.

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projektes „QS-M Grout“ konnten die technischen Voraussetzungen geschaffen und ein Offshore-Test erfolgreich durchgeführt werden. Dafür waren verschiedene Entwicklungsschritte notwendig, wie die Bereitstellung einer entsprechenden Messtechnik, die Modellierung der Wellenausbreitung und die Realisierung einer geeigneten Messanordnung für die harschen Umweltbedingungen. In diesem Beitrag soll es im Wesentlichen um die ersten Ergebnisse von Offshore-Messungen im Windpark Meerwind Süd/Ost gehen, die einen ersten Schritt zur Validierung der Messtechnik unter realen Bedingungen darstellen.

Die Messungen an einer realen Groutverbindung auf einer in Betrieb befindlichen Offshore-Windenergieanlage zeigen deutlich, dass es sich um eine Umgebung mit einer Vielzahl von elektrischen Störungen handelt, was sich auch in den Messdaten entsprechend niederschlägt und einen vermehrten Datenbearbeitungsaufwand darstellt. Die gewählte Messtechnik konnte mit diesen Offshore-Tests als geeignet verifiziert werden.

Dickenmessung dünner Anodisierungsschichten mit Mikrowellen

J.H. Hinken¹, M. Richter¹, C. Ziep¹, M. Mosch²

¹ FI Test- und Messtechnik, Magdeburg; ² Airbus Helicopters, Donauwörth

Anodisierungsschichten auf Aluminium und seinen Legierungen haben typischerweise Dicken bis zu 150 μm . Wenn nur Dicken von 0,5 bis 10 μm vorkommen, sind die Anforderungen an die Dickenmesstechnik hoch. So sollte die Auflösung bei 0,1 μm liegen.

Dafür wurde ein neues Gerät auf der Basis eines bisherigen Gerätes für die zerstörungsfreie Lackdickenmessung auf CFK entwickelt. Letzteres basiert auf der Nutzung von Mikrowellen bei 24 GHz und hat, je nach Ausführung, Messbereiche von 0 bis 500 μm und 0 bis 1000 μm . Kernelement ist ein kreiszylindrischer Hohlraumresonator, dessen ebene Bodenplatte durch die zu vermessende Bauteiloberfläche nachgebildet wird, und dessen H011-Mode genutzt wird. Unterschiedliche isolierende Beschichtungsdicken erzeugen unterschiedliche Resonanzfrequenzen. Diese werden gemessen und zur Bestimmung der Schickdicke weiterverarbeitet.

Das bisherige Gerät hat eine kreisförmige Abtastfläche mit einem Durchmesser von 18 mm. Es zeigte sich, dass das Gerät mit dieser Fläche bei den vorliegenden Genauigkeitsanforderungen zu empfindlich auf schon kleinste Oberflächenkrümmungen reagiert. Um die Abtastfläche zu verringern, wurde nun der Resonator mit einem Dielektrikum gefüllt, sodass bei gleichen Betriebsfrequenzen sich eine Reduzierung der Abtastfläche um den Faktor $1/\epsilon_r$ (ϵ_r Permittivität des Dielektrikums) ergab. Damit wurde die Krümmungsabhängigkeit akzeptabel klein.

Weitere Details zur notwendigen Änderung der Resonatorgeometrie wurden mit Hilfe numerischer elektromagnetischer Feldberechnungsverfahren unter Beibehaltung der bewährten H011-Mode ermittelt. Weiterhin wurde das numerische Auswerte- und Bedienverfahren der vorliegenden Aufgabenstellung angepasst.

Die Messprozedur wurde entwickelt: Die Gerätekalibrierung geschieht beim Hersteller und kann bei Bedarf wiederholt werden. Die Gerätejustierung erfolgt beim Anwender anhand von Referenzproben, deren Anodierungsschichtdicken z.B. per Querschliffmessungen bestimmt wurden.

Es wurden Untersuchungen zur einfachen (repeatability) und zur erweiterten (reproducability) Wiederholbarkeit unter Vergleichsbedingungen durchgeführt. Die Standardabweichung liegt in beiden Fällen bei 0,1 μm . Die Messgenauigkeit ist vor allem durch die Genauigkeit des Dickenwertes der Referenzprobe bestimmt.

Mobile Terahertzprüfung in der Kunststoffindustrie

S. Becker¹, A. Keil¹

¹ Becker Photonik, Porta Westfalica

Die vorliegende Präsentation ist eine kurze Zusammenfassung der in den letzten Jahren mit der neuen Terahertzprüftechnik gesammelten Erfahrungen in der Kunststoffindustrie. Dabei wird insbesondere beleuchtet, bei welchen Anwendungen Terahertz im Vergleich zu den etablierten Verfahren Ultraschall und Thermografie klare Vorteile hat.

Wir präsentieren Ergebnisse an glasfaserverstärkten Bauteilen, Schäumen bzw. Schaum-/Sandwichstrukturen und prozesswarmen Bauteilen. In diesen Anwendungsfällen kommen die Stärken der Terahertzprüftechnik voll zur Entfaltung:

1. Da es sich um elektromagnetische Strahlung handelt ist kein Kopplungsmedium notwendig und eine einseitige Prüfung unebener und /oder rauher Oberflächen ist i. d. R. problemlos möglich.
2. Akustisch und/oder thermisch isolierende Bauteile können gut untersucht werden.
3. Für einige Kunststoffe ist die Dämpfung der Terahertzstrahlung fast unabhängig von der Temperatur (im Bereich 20°C bis 100°C).
4. Die Detektierbarkeit von Defekten ist unabhängig vom Verhältnis der Defektgröße zur Tiefenlage des Defektes.

Dickenmessungen mittels Terahertz-Radar

N. Schreiner¹, F. Friederich¹

¹ Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern

Die Terahertz-Technologie hat sich inzwischen für Dickenmessungen von einzelnen Schichten innerhalb von Mehrschichtsystemen etabliert und befindet sich beispielsweise auf dem Weg in die Produktionskontrolle von Karosserielacken im Automobilbereich. Während für entsprechende Schichtsysteme mit Einzelschichten von wenigen 10 bis zu einigen 100 Mikrometern Dicke weitestgehend breitbandige gepulste Terahertz-Systeme zum Einsatz kommen, sind derartige Systeme oftmals für dickere Schichtsysteme mit bis zu mehreren Zentimetern Dicke, wie Kunststoffrohre und geschäumte Kunststoffmaterialverbände, ungeeignet. Abhilfe schaffen hierfür Terahertz-Radarsysteme, welche kontinuierlich ein frequenzmoduliertes Signal im unteren Terahertzfrequenzbereich senden und empfangen. Diese Systeme weisen, aufgrund ihrer geringeren Bandbreite eine geringere Auflösung, jedoch sehr gute inhärente Messgenauigkeit auf. Im unteren Spektralbereich sind die Materialien typischerweise wesentlich transparenter, weshalb schließlich eine sehr gute Eindringtiefe erreicht wird. Im Rahmen dieses Beitrags werden entsprechende Terahertz-Dickenmesssysteme mit Bandbreiten bis zu 180 GHz vorgestellt, welche im Kontext der zugrundeliegenden Arbeiten entwickelt wurden und für typische Kunststoffe eine Auflösung von etwa 600 Mikrometer erreichen. Neben dem Aufbau und der Funktionsweise dieser Systeme, werden, im Hinblick auf die Anwendung, explizit die messtechnischen Unterschiede zu den weitverbreiteten gepulsten Terahertz-Systemkonzepten herausgestellt.

Berührungslose, robotergestützte Schichtdickenmessung im industriellen Umfeld

J. Jonuscheit¹, J. Klier¹, D. Molter¹, S. Weber¹, G. von Freymann¹

¹ Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern

Zum Schutz oder zur Veredelung werden viele Werkstoffe gezielt beschichtet, wobei die Beschichtungen in zunehmendem Maße als Mehrschichtsystem aufgetragen werden. Solche Werkstoffbeschichtungen erfordern während oder nach dem Beschichtungsprozess eine Kontrolle hinsichtlich Materialeinsatz und Funktionalität. Dazu wird ein Messsystem benötigt, welches auch die Einzelschichtdicken innerhalb eines Mehrschichtsystems zerstörungsfrei, berührungslos und ohne Gefährdung des Benutzers ermitteln kann. Die Terahertz-Technologie hat in zahlreichen Laboruntersuchungen bewiesen, dass sie eine geeignete Technik zur Vermessung solcher Mehrschichtsysteme im technisch interessanten Dickenbereich von 10 – 200 µm ist.

Für den Einsatz im industriellen Umfeld müssen jedoch weitere Anforderungen erfüllt werden. Zur Integration in den Produktionsprozess muss gezeigt werden, dass der Sensor mittels Roboter positioniert werden kann. Ferner gibt es im kontinuierlichen Produktionsprozess immer Lagetoleranzen, so dass die Probe zur Messung nicht immer an der gleichen Stelle liegt. In einer Produktionshalle sind durch die Vielzahl an Maschinen immer Vibrationen vorhanden, die den Messprozess stören. Ein Messsystem muss mit diesen Störgrößen umgehen können. Zu diesem Zwecke wurde das Terahertz- Messsystem mit zusätzlicher Sensorik ausgestattet. In mehreren Feldversuchen in Produktionsstätten der Automobilindustrie wurde die Einsatzfähigkeit erfolgreich demonstriert.

In dieser Präsentation werden das Messsystem und der Einsatz der zusätzlichen Sensorik sowie die Ergebnisse der Feldversuche vorgestellt.

Poster

Meso-Makroskopische Modellierung des 3MA-Prüfsystems an pressgehärteten Bauteilen

Y. Gabi¹, J. Grimm¹, B. Wolter¹, B. Straß¹, R. Kern¹, C. Conrad¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Das Presshärten ist ein innovatives Herstellungsverfahren, u. a. für Verstärkungselemente der Fahrgastsicherheitszelle im Automobilbau. Diese Teile dienen der Verbesserung der Crashesicherheit und des Insassenschutzes. Demzufolge ist es unumgänglich, die Eigenschaften der crashrelevanten Bauteile, z. B. Härte, Eigenspannungen und andere Kenngrößen sowie Parameter der Mikrostruktur (Soft- und Hardzones, Übergangsbereiche) entsprechend zu beeinflussen. Um die Qualität dieser Eigenschaften zu überwachen, gehen die Hersteller von pressgehärteten Bauteilen zunehmend dazu über, die Kenngrößen und die Mikrostruktur der Bauteile mittels 3MA-Verfahren während der Herstellung zerstörungsfrei zu prüfen bzw. zu überwachen. Das so genannte 3MA-Prüfsystem, entwickelt am Fraunhofer IZFP, kombiniert hierzu vier verschiedene mikromagnetische Messmethoden: Oberwellenanalyse, Barkhausenrauschen, Mehrfrequenz-Wirbelstrom und Überlagerungsspermeabilität.

Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge zwischen Messergebnis, Mikrostruktur und Kenngrößen des Werkstoffs, war es erforderlich, die mit 3MA ermittelten elektromagnetischen Signale dieser Methoden zu simulieren. Die hier vorgestellten Simulationen beziehen sich auf zwei Methoden der 3MA-Prüftechnik, die Oberwellenanalyse und die Überlagerungsspermeabilität. Diese können durch die Verwendung einer zuverlässigen Zfp-Plattform auf FEM-Basis auch in komplexen Werkstoffstrukturen simuliert werden. Eine große Herausforderung bestand in der Entwicklung eines Modells, welches das implementierte Hysterese-Modell mit den skalenübergreifenden Geometrien und Zeitsignalen kombiniert. Zur Vermeidung von Speicherplatz- und Näherungsproblemen wurden Einzelberechnungen implementiert. Im mesoskopischen Modell ist das ferromagnetische Verhalten für quasistatische Bereiche anhand der physikalischen Formel von Jiles Atherton beschrieben. Die Ummagnetisierungsverluste sowie die Wirbelstrom- und frequenzabhängigen Verluste werden durch das Bertotti-Modell dargestellt.

Die Robustheit des FEM-Codes wird durch den Vergleich der FEM-Ergebnisse mit den experimentell ermittelten Messwerten nachgewiesen. Zusammenhänge zwischen mechanischen Eigenschaften und denen der 3MA-Messungen, aber auch den Simulationsergebnissen werden in diesem Beitrag eingehend erläutert.

Lokale zerstörungsfreie elektromagnetische Prüfung von Schnittkanten an FeSi 3%-Elektroblechen mittels 3MA

Y. Gabi¹, T. Müller¹, B. Wolter¹, B. Straß¹, R. Kern¹, C. Conrad¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Beim Schneiden von Elektroblechen werden Spannungen nahe der Schnittkante eingebracht. Diese beeinflussen die Permeabilität, indem sie die Verteilung der Flussdichte beeinträchtigen und damit direkt Einfluss auf die elektrischen Verluste nehmen, welche wiederum die Leistung elektrischer Anlagen vermindern. Untersuchungen über fertigungstechnisch bedingte Materialdefekte in Elektroblechen, welche oft als Kernstrukturen für Elektromotoren genutzt werden, sind notwendig und erfordern präzise Messverfahren. Es existieren unterschiedliche etablierte Prüfmethode, die direkt mit den Blochwandbewegungen und den Rotations-Phänomenen über die Verlustauswertung (Hysterese-, Wirbelstrom- und Zusatzverluste) zusammenhängen und somit Rückschlüsse auf die Mikrostruktur (Versetzungsdichte, Korngröße, etc.) erlauben. Diese Methoden liefern aufgrund der überwiegend globalen makroskopischen Messinformationen keine ausreichenden Datensätze, um die Komplexität der Auswertung lokaler Schädigungen verringern zu können. Daher müssen makroskopische Methoden mit lokalen kombiniert werden. Das IZFP bietet eine robuste Lösung zur Beurteilung der Schnittkanten an, welche auf vier mikromagnetischen Methoden beruht: Oberwellenanalyse, Barkhausenrauschen, Überlagerungspermeabilität und Mehrfrequenz-Wirbelstrom.

Zur besseren Interpretation der Korrelation zwischen Messwerten und mechanischen Eigenschaften, wurde eine ZfP-Plattform auf FEM-Basis entwickelt, welche das magnetische Verhalten der Messgrößen an Elektroblech simuliert. Unter Nutzung separierter Rechenoperationen wurde eine Berechnungsmethodik implementiert, um Speicher- und Konvergenzprobleme zu umgehen. Die Eigenschaften des Werkstoffes werden über das analytische quasistatische Jiles-Atherton-Modell beschrieben. Die klassischen sowie die Zusatzverluste werden durch das Formel-Modell von Bertotti repräsentiert. Erste Validierungen wurden durchgeführt, indem simulierte mit experimentell gewonnenen Ergebnissen verglichen wurden. Unterschiedliche Schnittkantenqualitäten werden durch drei Schneidwerkzeugzustände (scharf, halbscharf, stumpf) gezielt erzeugt und anschließend makroskopischen (Hysterese) und mikroskopischen (ZfP) magnetischen Parametern des Werkstoffes zugeordnet.

Methode zur automatischen Bestimmung der Projektionsgeometrie

P. Klein¹, F. Herold¹

¹ YXLON International, Hamburg

Die Verwendung von Industrierobotern (6-Achs-Gelenkarmroboter) als Manipulatoren in Computertomographie-Systemen (CT-Systeme) ermöglicht die Durchführung einer Vielzahl von Trajektorien, insbesondere auch solcher, die das Vollständigkeitskriterium nach Tuy-Smith erfüllen. So können Industrieroboter das Prüfteil in sechs Freiheitsgraden positionieren, während herkömmliche CT-Manipulatoren meist mit weniger Freiheitsgraden agieren. Zwar können Industrieroboter eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen CT-Manipulatoren darstellen, jedoch erreichen sie oft nicht die Positioniergenauigkeit dieser. In diesem Artikel soll daher eine neue Methode zur automatischen Bestimmung der Manipulator-Position, basierend auf Methoden der digitalen Bildverarbeitung, am Beispiel eines Industrieroboters als Manipulator, vorgestellt werden.

Es wird gezeigt wie mit Hilfe eines mit Röntgenmarkern bestückten Teilehalters die Position des Manipulators im CT-System zum Aufnahmezeitpunkt eines jeden Projektionsbildes automatisch bestimmt werden kann. Dazu wird einmalig a-priori Wissen über die geometrische Anordnung der Röntgenmarker aufgebaut, durch welches die Positionsbestimmung als Optimierungsproblem beschrieben werden kann. Damit wird die Position ermittelt, für welche die zu erwartenden Abbildungen der Röntgenmarker im Projektionsbild die geringste Abweichung mit denen im tatsächlichen Projektionsbild aufweisen. Darüber hinaus wird gezeigt, dass die auf diese Weise ermittelten Positionen des Manipulators zur Beschreibung der Abbildungsvorschrift des CT-Systems in Form einer Projektionsmatrix verwendet werden können und für die Durchführung einer auf exakten Positionsdaten basierenden Rekonstruktion verwendet werden kann. Dazu werden CT-Scans mit unterschiedlichen Trajektorien gezeigt und mit einer kommerziellen Rekonstruktionssoftware, auf Basis der mit der in diesem Artikel vorgestellten Methode bestimmten Positionsdaten, rekonstruiert. Für CT-Scans, deren Trajektorien eine automatische globale Geometrie-Korrektur ermöglichen, wird ein Vergleich der Rekonstruktionsergebnisse durchgeführt.

Numerical GWT3D-P – Ein freies Simulationstool zur Berechnung und Visualisierung von geführten Wellen in Plattengeometrien

F. Schubert¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden

In den vergangenen 20 Jahren sind im Fraunhofer IKTS (vormals IZFP-D) eine Reihe von Simulationstools auf Basis der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT) entstanden und in Form einer solverbasierten und anwendungsspezifischen Modulbibliothek in zahlreichen F&E-Projekten eingesetzt und weiterentwickelt worden. Diese Simulationstools werden nunmehr schrittweise in einer leistungsfähigen Basisversion zur freien Verfügung gestellt. Den Anfang machte kürzlich Numerical AE3D, ein Solver zur Berechnung und Visualisierung raumzeitlicher Schallemissionskaskaden sowie der von ihnen erzeugten elastischen Wellen. Als nunmehr zweites Simulationstool wird im vorliegenden Beitrag Numerical GWT3D-P vorgestellt (GWT-P: Guided Wave Testing in Plates). Das Programm erlaubt die freie Definition von Schallwandlern mit Anregung und Empfang von out-of-plane und in-plane-Schwingungskomponenten auf der Oberfläche einer dreidimensionalen Platte. Anschließend kann die Ausbreitung geführter Wellen von den Sendewandlern zu den Empfangswandlern berechnet und als zeitliche Abfolge von Wellenfrontschnappschüssen ausgegeben werden. Die Definition eines weitgehend frei zu definierenden Streuers in der ansonsten als homogen angenommenen Platte erlaubt die Untersuchung der Wechselwirkung verschiedener Wellenmoden mit einer Fehlstelle, wobei die gesamte Wellenphysik inklusive Beugung und Modenkonversion berücksichtigt wird. Auch stringerähnliche Strukturen auf der Oberseite der Platte, wie aus der Luftfahrt bekannt, lassen sich realisieren. Mit Numerical GWT3D-P können idealisierte Messdatensätze erzeugt und als Grundlage für Test, Validierung und Weiterentwicklung von GWT-Algorithmen genutzt werden. Der Solver besteht aus einer Windows-EXE mit frei editierbarer Texteingabedatei, die z. B. auch von einer externen GUI erzeugt und gesteuert werden kann. Das Programm generiert Rohdaten in Form von ASCII- oder Binärdateien, die von externer Software gelesen, weiterverarbeitet und visualisiert werden können. Die freie Basisversion des Solvers kann bei Bedarf jederzeit durch kunden- und anwendungsspezifische Funktionen erweitert werden. Neben der hier vorgestellten Plattenversion ist auch eine analoge Version für geführte Wellen in Rohren in Vorbereitung.

Systeme zur Korrosionsprüfung dünnwandiger Bauteile mit elektromagnetischem Ultraschall

M. Ganster¹, T. Müller¹, J. Oswald¹, C. Weingard¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Dünnwandige Metallbauteile, z.B. Rohre und Masten, sind oftmals Umwelteinflüssen, wie Bodenfeuchte, Feuchtigkeit im Inneren des Rohres oder Luftverschmutzung, ausgesetzt. Diese Faktoren begünstigen oberflächennahe Korrosion und führen zu einer fortschreitenden Schwächung der Restwandstärke. Die Restwandstärke ist eine relevante Größe zur Abschätzung der Standsicherheit von Masten oder der Biegefestigkeit von Bauteilen. Aus diesem Grund ist es notwendig, tragende Strukturen unter mechanischer Belastung in Bezug auf ihren Wandabtrag zu überwachen. Da die betreffenden Bauteile teilweise unter der Erde liegen und auch gerade dort Korrosionsbildung zu erwarten ist, muss ein potentielles Prüfverfahren in der Lage sein, auch von außen nicht zugängliche Stellen sichtbar zu machen.

Die am Fraunhofer IZFP existierenden Systeme zur Korrosionsprüfung an dünnwandigen Bauteilen basieren daher auf Ultraschallwellen mit hoher Reichweite. Durch einen elektromagnetischen Ultraschall-Prüfkopf wird eine horizontal polarisierte, geführte Welle in der Rohrwand erzeugt, die sich im Material ausbreitet. Die eingesetzten Ultraschallmoden und der gewählte Frequenzbereich bewirken, dass die Dämpfung des Ultraschallsignals durch umliegendes Erdreich, Beton oder Korrosionsschutz so gering sind, dass die Welle eine Reichweite von mehreren Metern hat. Diese Technologie bildet die Basis für eine Reihe von Prüfsystemen. Beispielhaft dafür steht „LimaTest“, eine geschlossene Hardware- und Softwarelösung für die wiederkehrende Prüfung von Lichtmasten. Dieses System, das gemeinsam mit einem mittelständischen Partner initiiert wurde, ist bereits lange am Markt etabliert. Um die Anforderungen, die an moderne Prüf- und Monitoringsysteme gestellt werden, weiterhin zu erfüllen, erfolgte eine umfassende Erneuerung der Softwareanbindung der Geräte. Dies betrifft sowohl die Anbindung der Ultraschallelektronik als auch die Gestaltung der Benutzerschnittstelle mit aktuellsten Techniken. Durch diese Maßnahmen ist die Prüfmethode vollständig auf aktuelle Computersysteme adaptierbar und bietet einfachere Anpassungsmöglichkeiten für individualisierte Prüfsysteme.

RFID Sensor Systems Embedded in Concrete – Validation Experiments for long-term Monitoring

S. Johann¹, C. Strangfeld¹, M. Müller¹, B. Mieller¹, M. Bartholmai¹

¹ BAM, Berlin

Structural Health Monitoring (SHM) is an important part of buildings surveillance and maintenance to detect material failure as early as possible and to contribute in protection of structures and their users.

The implementation of Radio Frequency Identification (RFID) sensor systems without cable connection and battery into building components offers innovative possibilities to enable long-term in-situ SHM of addressed structures, bridges.

The objectives of the presented study are complete embedding of RFID sensors systems in concrete, full passive communication with the systems, at best for the whole life span of structures. One challenge for this task is the highly alkaline environment in concrete, which requires non-degrading and robust encapsulation.

Further Requirements are passive communication and energy supply, appropriate antenna design, placement and fixation in concrete, and the selection and implementation of sensors and connections.

The concept is to develop and optimize a simple and robust system, which meets the requirements, as well as comprehensive validation in concrete specimen and real world applications. Two different systems were developed (HF and UHF RFID, respectively).

First tasks were the implementation of analog sensors using the superposition principle for the signal adaption. Investigation of suitable materials for robust encapsulation and sensor protection against basic environments.

Four materials were investigated in pH13 solution for 14 days

- 3D-Printer-Polymer was completely resolved
- PVC has no noticeable decrease in weight
- (VitaPro) glass filter for the sensor protector, has weight loss 2.7%
- The epoxy resin has increased by 1.8% due to moisture expansion

Different concrete samples were prepared for the validation of the systems. RFID sensors were embedded in different integration depths. Investigate the energy- and data transfer through concrete, also with varying moisture content. Additionally, signal strength data was used to optimize and validate the antenna characteristics in concrete.

Next steps are to guarantee a sufficient energy supply for UHF RFID systems embedded in different concrete mixtures and further embedding the HF and UHF RFID systems in real bridges and buildings to validate the long term monitoring.

Herausforderungen einer vollautomatischen Inline 3D-CT Prüfung am Beispiel der Realisierung bei einem Automobil-Zulieferer

S. Gondrom-Linke¹, A. Kirste², J. Gudat²

¹ Volume Graphics, Heidelberg; ² ProCon X-Ray, Sarstedt

Die 3D-CT, hat sich in den letzten Jahren rasant weiterentwickelt und gerade in der jüngsten Vergangenheit derart an Akzeptanz und Verbreitung gewonnen, dass sie nunmehr zunehmend auch als Standardverfahren in echten Produktionsumgebungen angewendet wird. Allerdings herrschen in der Produktion völlig andere Randbedingungen und Anforderungen als im Labor. Sehr kurze Messzeiten im Produktionstakt haben gravierende Auswirkungen auf die Zahl der detektierbaren Röntgenphotonen und somit auf das erzielbare Signal-zu-Rausch Verhältnis im Vergleich zu gewöhnlichen 3D-CT Messungen. Letztendlich wird die erreichbare Kontrastauflösung und indirekt auch die maximal erreichbare Ortsauflösung negativ beeinflusst.

Am Beispiel der erfolgreichen Realisierung eines vollautomatischen Inline 3D-CT Systems bei einem Automobilzulieferer werden diese physikalischen Randbedingungen vorgestellt und diskutiert. Daraus werden Konsequenzen für zu verwendende Röntgenhardware, insbesondere die Röntgenröhre und den Detektor, aber auch die Reduktion von Compton-Streustrahlung abgeleitet. Weiterhin werden die speziellen Anforderungen an die Rekonstruktion, sowie die vollautomatische Detektion von Ungängen wie Poren, Lunkern, Einschlüssen und Maßhaltigkeiten behandelt und schlussendlich praktikable Lösungswege für die Realisierung von vollautomatischen Inline 3D-CT Prüfsystemen aufgezeigt.

RoboCT – Roboterbasierte XXL-Mikro-Computertomographie zur Eskalationsprüfung unklarer UT-Befunde an CFK-Großbauteilen in der Luftfahrt

W. Holub¹, M. Amr¹, C. Kretzer¹, W. Lenglachner², S. Renner²

¹ Fraunhofer EZRT, Fürth; ² FACC Operations, Ried im Innkreis, Österreich

Ultraschall ist das etablierte Verfahren zur Prüfung von Faserverbundbauteilen aus Luft- und Raumfahrt. Moderne, automatisierte Anlagen bieten die Möglichkeit, große und komplex geformte Bauteile in der Produktion in wirtschaftlichen Taktzeiten zu prüfen und die relevanten Fehlerbilder zu detektieren.

Derweilen liefert das übliche Ultraschall-Durchschallungsverfahren nur symptomatische Anzeichen für mögliche Abweichungen der inneren Struktur des Objekts, die in der Regel keine eindeutige Zuordnung zu konkreten Ursachen erlauben. Es treten regelmäßig Bauteile mit unklarem Befund auf, deren Ursachen durch Ultraschall nicht zweifelsfrei erklärt werden können. In der Folge durchlaufen Bauteile mit solchen Anzeigen aufwändige Berechnungen oder Reparaturen. Im ungünstigsten Fall enden sie als Ausschuss.

An kleinen Faserverbundbauteilen von Coupons bis hin zu einigen Dezimetern Durchmesser hat sich Röntgen-Computertomographie (CT) als Mittel der Wahl zur Prüfung und Materialcharakterisierung etabliert, vor allem weil dieses Verfahren die präzise räumliche Darstellung der inneren Struktur der Objekte erlaubt und somit die Detektion und Interpretation von Auffälligkeiten bis auf Detailebene einzelner Fasern ermöglicht. An Großbauteilen wie etwa Triebwerksgehäusen oder ganzen Spoilern ist CT bisher nur in sehr wenigen entsprechend mächtig ausgerüsteten Laboren möglich.

Am Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik haben wir in der Forschung für Automobilbau sowie Luft- und Raumfahrt die nötigen Verfahren zur Anwendung von roboterbasierter CT entwickelt und zuletzt im EU-FP7 Forschungsprojekt QUICOM mit Beteiligung von FACC an deren Roboterprüfzelle (die bereits für manuelle Röntgendurchstrahlungsaufgaben qualifiziert ist) wichtige Bausteine der Methode vervollständigt und diese Anlage für die RoboCT befähigt. Gemeinsam mit FACC haben wir Anwendungen an CFK-Luftfahrt-Großbauteilen mit vielseitigen Aufgabenstellungen untersucht.

Wir zeigen die Motivation und Ergebnisse von RoboCT zur eskalierenden CT an Störklappen eines Langstrecken-Verkehrsflugzeuges zur erfolgreichen Klärung eines unklaren Ultraschall-Befundes. Die CT-Bilder konnten deutlich die unkritische Ursache des UT-Befundes aufzeigen und sollen zukünftig beitragen, solchen Ausschuss zu reduzieren.

Verwendung von nichtkalibrierten Prüfkörpern zur Justage von industriellen Röntgensystemen als Basis der Anwendung einer helikalen Trajektorie zur Computertomographie

D. Matern¹, F. Herold¹

¹ YXLON International, Hamburg

Eine helikale Trajektorie in der Verwendung von industriellen Computertomographen (CT) kann aus unterschiedlichen Gründen erforderlich sein. Zum einen können dadurch die Kegelstrahlartefakte einer zirkularen Trajektorie vermieden werden, zum anderen wird der Messraum durch die helikale Trajektorie entlang der CT-Achse erweitert, wobei mehr Achsen als bei einer üblichen zirkularen Trajektorie bewegt werden müssen. Zum Beispiel wird zusätzlich die Probe während einer Rotation entlang der CT-Achse bewegt, oder gegenläufig hierzu Detektor und Röhre. Die dafür benötigten Achsen können Fehler aufweisen, wodurch eine fehlerhafte Positionierung entsteht; die Positionierung muss demnach zunächst kalibriert werden.

Viele Kalibrierverfahren basieren auf der Aufnahme bekannter Prüfkörper. Die Annahme ist in der Regel eine vorherige Kalibrierung des Prüfkörpers; Abweichungen in einer Messung im CT zu dieser werden dann verwendet, um die Fehlstellung zu bestimmen und anschließend zu korrigieren.

Die Kalibrierung der Prüfkörper ist zeit- und kostenaufwendig, da für gewöhnlich taktile Methoden verwendet werden. Dieses kann problematisch werden, wenn mit demselben Computertomographen sehr unterschiedliche Objekte analysiert werden sollen; unterschiedlich große Prüfteile werden mit unterschiedlicher Vergrößerung aufgenommen. Das bedeutet, dass zur Kalibrierung auch entsprechend unterschiedlich große kalibrierte Prüfkörper verwendet werden müssen. Zudem kann es umständlich oder nicht praktikabel sein, sehr kleine Prüfkörper taktil zu vermessen, da der Tastkopf entsprechend klein sein muss.

Diese Studie befasst sich mit der Verwendung nichtkalibrierter Prüfkörper zur Bestimmung einer Anlagengeometrie. Diese Prüfkörper besitzen zwei Eigenschaften, auf denen unsere Experimente aufbauen: Einerseits sind diese starr, das heißt, sie bewegen sich während eines Scanvorgangs ausschließlich entsprechend der eingestellten Trajektorie. Andererseits werden Markierungen im digitalen Röntgenbild erkannt. Diese Eigenschaften müssen alle Prüfkörper besitzen, die zur Kalibrierung verwendet werden; das heißt, unser Verfahren inkludiert keine zusätzlichen Annahmen. Dadurch entsteht ein allgemein verwendbarer Ansatz, um industrielle Computertomographen zu justieren.

Klick-CT: Entwicklung einer modulare und kompakten Sub-Mikro-CT Messtechnik bis 0,3 μm

A. Sigl¹, P. Hornberger¹, S. Zabler², M. Meier¹

¹ Fraunhofer IIS, Deggendorf; ² Fraunhofer IIS, Würzburg

Die Klick-CT ist ein modulares und kompaktes CT-System für höchste Ansprüche, welches vom Fraunhofer EZRT in Würzburg und Deggendorf entwickelt wurde. Das System tastet das Messvolumen mit bis zu 0,3 μm /Voxel ab und erzielt einen maximalen Messbereich von bis zu 5 mm im Durchmesser. Zudem erlaubt sie, dank ihres modularen Aufbaus, eine schnelle Umrüstung auf ein System für differentiellen Phasenkontrast und Dunkelfeld-CT. Sie ist somit hervorragend geeignet für Materialforschung zur Analyse dreidimensionaler Strukturen, wie z. B. Faserstoffe, Metallgefüge, granulare Stoffe und Schäume.

Die erste Version der Anlage besitzt eine 150 kV Mikrofokus-Quelle und eine hochauflösende Röntgenkamera mit einem vollautomatischen Wechselsystem für drei unterschiedliche Sichtfelder. Die Hauptanwendungsgebiete liegen in der Materialforschung, insbesondere für Verbundmaterialien im Leichtbau wie etwa CFK oder Glasfaserkomposite, bei denen die faserdichte oder die räumliche Orientierung ermittelt werden kann. Weitere Gebiete sind Metalllegierungen, bei denen der Phasenanteil und deren Form im Gefüge ermittelt werden kann, metallische und organische Schäume (Porengröße und deren Verteilung) sowie diverse Naturprodukte und deren Erzeugnisse wie Holz, Knochen, Stein, Papier und Naturfasern.

Der große Vorteil des Klick-CT Systems ist der modulare Aufbau, der eine sehr hohe Flexibilität der Anlage ermöglicht. Die Quelle und der Detektor sind mit einem Schnellwechselsystem ausgestattet, das es ermöglicht das Gesamtsystem, z. B. auf Phasenkontrast CT, umzurüsten. Die Maßhaltigkeit wird dabei von einer Ab-Werk Kalibrierung sowie einer semi-automatischen Re-Kalibrierung garantiert. Dies erlaubt die dauerhafte Maßhaltigkeit der Messung auf kleinster Skala und erspart das manuelle Justieren von Rekonstruktionsparametern. Ein weiterer Punkt ist die innovative Röntgenkamera, die sich bekannter Probleme wie Quellfleckdrift und Leistungsschwankungen entledigt. Diese Effekte treten bei herkömmlichen Mikro-CT-Systemen, aufgrund einer stark projektiven Vergrößerung auf.

Touchscreen Quality Map – komplexe Dokumentation von Anzeigen

H.W. Berg¹, M. Berg¹

¹ BMB, Heilbronn

Wo stehen wir aktuell?

Mittels Microsoft Excel werden viele Anzeigen in der fluoreszierenden Rissprüfung sowie im Röntgen vor allem bei Prototypen dokumentiert, um meist Gussprozesse in der Folge zu optimieren. Diese Art und Weise zeigt an sehr vielen Stellen, vor allem in der Ergonomie sowie den hohen Zeitverlusten bei der Eingabe von Messwerten, große Schwachstellen auf.

Wie könnte die Zukunft aussehen?

Ein smarter Weg der Dokumentation von Anzeigen steht im Fokus unserer Bemühungen. Hieran arbeiten wir gemeinsam mit einem der Deutschen Automobilisten seit Mitte 2016. Die Ergebnisse werden als Statusbericht kurz aufgezeigt, desweiteren gehen wir auf unsere Weiterentwicklung als Touchscreen Version ein, die auf Datenbanken (inkl. cloudbasierten Ansätzen sowie Logiken der Industrie 4.0) aufbaut.

Ziel unseres Posters

Anzuregen für einen ggf. künftigen DGZfP Arbeitskreis auf dem Feld der Dokumentation & Datenbanken, um hierdurch die Standards für morgen mit zu gestalten, die im Idealfall auch Anwendung in allen Industriesektoren finden.

Zukünftige Möglichkeiten und Pflichten der zerstörungsfreien Prüfung

D. Kanzler¹, M. Pavlovic², M. Bertovic²

¹ Applied Validation of NDT, Berlin; ² BAM, Berlin

In unserer heutigen Zeit werden die Zwischenräume innerhalb der einzelnen Abteilungen eines Betriebs und zwischen einzelnen nationalen oder globalen Akteuren immer wichtiger: Produzierbarkeit vs. Wirtschaftlichkeit, Fortschritt vs. Nachhaltigkeit. Auch die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) – bisher hauptsächlich als Endkontrolle oder Wartungselement wahrgenommen – kann und sollte im Wandel der Digitalisierung und Industrie 4.0 einen neuen Stellenwert erhalten.

Die ZfP kann schon während der Konstruktion helfen, sichere und zuverlässige Produkte zu erstellen. Jedoch müssen dafür eine adäquate Informationskultur und die notwendigen Kennzahlen vorhanden sein. Objektive, probabilistische Kennzahlen (wie die POD – Auffindwahrscheinlichkeit) sind hierbei der Schlüssel. Diese müssen jedoch unbedingt an Prüfverfahren, Prüfgegenstand und Prüfbedingung angepasst werden, da sonst die gesamte Aussage in Frage zu stellen ist.

Im Vortrag werden Beispiele aus der Anwendung gezeigt, die die Aussagekraft der Kennzahl aber auch die Sorgfalt, mit denen die einzelnen Aussagen genutzt werden, unterstrichen werden soll. Die Bewertung von Daten realer Fehler, die Anpassung an die Bruchfestigkeit und die Betrachtung von mehreren Prüfparametern am Beispiel der Bewertung von radiographischen, Ultraschall- und Wirbelstromprüfung werden in dem Vortrag gezeigt.

Assistenzsysteme für die manuelle Prüfung zur Qualitätssicherung im industriellen Umfeld

S. Lugin¹, M. Abosetta¹, S. Pushkarev¹, B. Valeske^{1,2}

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken; ² htw saar, Saarbrücken

Viele sicherheitsrelevante Komponenten und Strukturen im industriellen Umfeld stehen unter hohen thermischen und mechanischen Belastungen. Bereits kleine Defekte (innere Korrosion oder Risse) in Strukturen können zu einem möglichen Ausfall und Stillstand des gesamten technologischen Prozesses führen. Deswegen erfolgt die Qualitätssicherung dieser Komponenten mit zerstörungsfreien Prüfverfahren, die durch zertifizierte Prüfer in der Regel manuell durchgeführt wird.

Informations- und Kommunikationstechnologien in Form von Softwaresystemen bringen enorme Vorteile in der Qualitätssicherung im industriellen Umfeld. Durch die digitale Erfassung des manuellen Prüfprozess mit Kameras, die Verfolgung der Prüfkopfposition und automatischen Auswertung der Messsignale sowie der Erstellung des digitalen Prüfprotokolls wird eine neue Klasse von Prüfsystemen entstehen, die Abwicklung, Analyse und Kontrolle der manuellen Prüfung deutlich erleichtert.

Ziel ist die Entwicklung eines Assistenzsystems, das den ZfP-Prüfer bei der Durchführung der Prüfungen unterstützt und gleichzeitig eine automatisierte Dokumentation der Prüfdurchführung sowie der Messsignale und Prüfergebnisse ermöglicht.

Für Demonstration wird ein System mit Erweiterter Realität (Augmented Reality) für Wirbelstromprüfung vorgestellt.

Wavelet-Filter in Echtzeit bei der Prüfung von Präzisionsrohren

T. Schmitte¹, M. Kaack¹, O. Nemitz¹, T. Hinz¹, T. Orth¹

¹ Salzgitter Mannesmann Forschung, Duisburg

Nahtlose Präzisionsrohre werden durch Kaltziehen aus warmgewalzten Luppen hergestellt. Diese Produkte werden intensiven zerstörungsfreien Tests unterzogen, um immer weiter steigende Kundenanforderungen zu erfüllen. Eine etablierte Prüfmethode ist die Prüfung mit Wirbelstrom sowohl mit um das Rohr rotierenden Sonden als auch in der Geometrie einer Durchlaufspule. Unter gewissen Umständen ist es hier wünschenswert das Signal / Rausch – Verhältnis zu verbessern, um die Nachweisempfindlichkeit zu erhöhen.

Daher haben wir ein Filtersystem entwickelt, das in den analogen Signalpfad derartiger Prüfanlagen eingebaut werden kann. Das Filtersystem operiert in Echtzeit und basiert auf der Wavelet-Zerlegung des digitalisierten Signals. In der Wavelet-Domäne werden die Waveletkoeffizienten einer statistischen Analyse unterzogen und ggfls. nach einem einfachen Algorithmus verändert. Nach der Wavelet-Synthese werden die Signale wiederum analog ausgegeben, so dass eine nahtlose Integration in bestehende Anlagen möglich ist. Der Wavelet-Filter wurde auf einer angepassten FPGA-basierten Digitalkarte realisiert und kann mittels einer einfachen Software parametrisiert werden.

Dieser Beitrag erläutert die verwendeten Konzepte und stellt den Einsatz bei verschiedenen Wirbelstrom-Prüfanwendungen vor.

In einem Ausblick demonstrieren wir die Anwendung der gleichen Technik für die Ultraschallprüfung in der Präzisionsrohrfertigung.

Verbesserung und Qualifizierung der Ultraschallprüfung von Mischnähten im Primärkreis von KKW

S. Mitzscherling¹, E. Barth¹, S. Götschel², T. Homann¹, J. Prager¹, M. Weiser²

¹ BAM, Berlin; ² Zuse-Institut Berlin (ZIB)

Die im Primärkreislauf von Kernkraftwerken anzutreffenden austenitischen Schweiß- und Mischnähte sind nicht nur extrem sicherheitsrelevant, sondern stellen auch sehr hohe Anforderungen an die Materialprüfung. Neben der eingeschränkten Zugänglichkeit ist das makroskopische Gefüge der Schweißnaht für die Prüfung mit Ultraschall von höchster Bedeutung.

Um Materialfehler zuverlässig in Position und Größe bestimmen zu können, müssen die Kornorientierungen und die elastischen Konstanten des anisotropen Schweißnahtgefüges bekannt sein. Für die bildgebende Darstellung möglicher Materialfehler kommen folgende Arbeitsschritte zum Einsatz: Zunächst wird die Schweißnaht durchschallt, um mit einem inversen Verfahren wichtige Schweißnahtparameter wie beispielsweise die Kornorientierung bestimmen zu können. Auf der Basis dieser Parameter werden im nächsten Schritt die Schallwege mittels Raytracing (RT) simuliert. Zuletzt werden dieser RT-Simulation die Messdaten (A-Scans) von verschiedenen Sender- und Empfängerpositionen zugeordnet und nach der SAFT-Methode (Synthetic Aperature Focusing Technique) zeitaufgelöst überlagert. Die Kombination aus inversem Verfahren, RT und SAFT gewährleistet auch in anisotropen Werkstoffen eine ortsrichtige Visualisierung der Fehler.

Wir erläutern diese drei Verfahren und stellen die Prüfanordnung von Prüfkörpern mit künstlichen Testfehlern vor. Messdaten sowie deren Auswertung werden mit den Ergebnissen einer CIVA-Simulation verglichen.

Von Dünn bis Dick Sonderprüfungen mit der Phased-Array-Prüftechnik im Wanddickenbereich von 4 bis 400 mm

R. Weiß¹

¹ CSW Engineering, Saarbrücken

Die Phased-Array-Prüftechnik ist noch immer nicht vollständig in den Regelwerken verankert. Es fehlen noch immer die entsprechenden Produktnormen für die Standardisierung der Phased-Array-Prüftechnik. Auf Grund des großen Leistungsspektrums und des Nachweisvermögens wird diese Prüftechnik aber immer mehr von Kunden angefragt.

Wir als Dienstleister im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung haben in den letzten Jahren Schweißnahtprüfungen mit Phased-Array im Wanddickenbereich von 4 bis 400 mm, mit Werkstückgewichten von wenigen Kilogramm bis zu 120 Tonnen durchgeführt. Das Anwendungsspektrum erstreckte sich von austenitischen Kleinrohrleitungen mit 4 mm Wandstärke bis zu Engspaltschweißnähten mit einer Wanddicke von 400 mm und von Raumtemperatur bis zu einer Werkstücktemperatur von 120 °C.

Für alle durchgeführten Prüfungen wurde das Nachweisvermögen für die jeweilige Prüfungsaufgabe an Hand von Vergleichskörpern ermittelt. Auf eine ausführliche Qualifikation gemäß der ENIQ-Richtlinie „VGB R-516“ konnte in vielen Fällen verzichtet werden.

In diesem Vortrag geben wir Ihnen einen Überblick über die Möglichkeiten und Aussagekraft der Phased-Array-Prüftechnik in der praktischen Anwendung für Prüfungen im oben genannten Wanddickenbereich.

Methodische Entwicklung der akustischen Resonanzanalyse zur zerstörungsfreien Erkennung von ur- oder umgeformten Serienteilen mit unzulässigen Geometrieabweichungen – robuste Geometrieschätzung anhand gemessener Eigenfrequenzen

M. Heinrich^{1,2}, U. Rabe², B. Grabowski¹, B. Valeske^{1,2}

¹ htw saar, Saarbrücken; ² Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Die akustische Resonanzanalyse (ART) ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem Komponenten anhand ihrer Eigenfrequenzen hinsichtlich verschiedener Eigenschaften oder Qualitätsabweichungen untersucht werden können. Als vergleichendes Verfahren fokussiert die ART v. a. auf die 100 %-Prüfung metallischer oder keramischer Serienteile, die in großen Stückzahlen und mit geringen Taktzeiten gefertigt werden. Vorteilhaft bei der ART ist v. a. die prozessbegleitende und sekundenschnelle Prüfbarkeit des gesamten Bauteilvolumens.

Das Prinzip der ART beruht darauf, dass die maßgeblich durch die Geometrie und die Materialeigenschaften festgelegten Eigenfrequenzen eines Körpers von verschiedenen Abweichungen beeinflusst werden. So spiegeln sich Defekte, wie Risse oder unzulässige Geometrieabweichungen (Geometriefehler), in den Eigenfrequenzen eines Teils wider. Das Ziel der ART besteht somit in der Erkennung entsprechender Teile anhand gemessener Eigenfrequenzen, wobei eine Prüfentscheidung auf Basis einer Kalibrierung an zahlreichen repräsentativen Gut- und Schlecht-Teilen erfolgt. Bedingt durch geringfügige geometrische oder materialspezifische Unterschiede weisen jedoch auch nominell gleiche Gut-Teile i. d. R. nicht exakt identische Eigenfrequenzen auf. Daher ist eine verlässliche Erkennung qualitativ unzulänglicher Teile mit ART trotz empirischer Kalibrierung nicht trivial, denn die durch unzulässige Abweichungen bedingten Eigenfrequenzänderungen können durch den Einfluss zulässiger Bauteilvariationen überlagert werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts führen die htw saar, das Fraunhofer IZFP sowie zwei Industriepartner Untersuchungen zur eigenfrequenzbasierten Erkennung von Teilen mit Geometriefehlern durch. In früheren Veröffentlichungen wurde am Beispiel virtueller Modellteile mit FE-simulierten Eigenfrequenzen gezeigt, wie die Abmessungen eines Teils anhand seiner Eigenfrequenzen abgeschätzt werden können. Weiterhin wurde die Übertragung der Methodik auf reale Modellteile mit gemessenen Eigenfrequenzen vorgestellt. In diesem Beitrag wird dargestellt, wie sich praxisrelevante Störeinflüsse auf die Eigenfrequenzen eines Teils und die daraus abgeleiteten Geometrieschätzwerte auswirken. Es werden Ansätze zur Optimierung der Robustheit der Methodik präsentiert.

Phased-Array mit 3D-Visualisierung und modernster US-Elektronik

J. Ininger¹, D. Norton¹, B. Kenfenheuer¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

Aufgrund der weltweit ansteigenden Öl-Nachfrage stellen Pipeline-Rohre die wesentlichen Komponenten dar, um den Transport der höheren Öl-Nachfragemengen zukünftig strukturell bewältigen zu können. Gemäß verschiedenen Herstellungsstandards müssen die Rohre und insbesondere ihre Schweißnaht während dem Herstellungsprozess einer Qualitätsüberprüfung mittels Ultraschall unterzogen werden.

Neben dem erfolgreich erprobten und mittlerweile unverzichtbaren Einsatz der Phased-Array Technologie, kommen innerhalb dieses Prüfanlagentyps zwei weitere, neue Technologien zum Einsatz. Dabei handelt es sich einerseits um das „USIP|xx“-System, eine Elektronikplattform, die mit ihrer neuen Systemarchitektur den Kern für eine breite Palette an Ultraschallprüfanlagen bietet. Die USIP|xx Elektronik und die dazugehörige, neuentwickelte Auswerte-Software, in Kombination mit der Phased-Array Technologie und der motorisierten Prüfkopfverstellung, bietet ein hohes Maß an Flexibilität. So können beispielsweise Umrüstzeiten der Anlage, bedingt durch einen Wechsel der Rohrdimension, von unter 20 Minuten erreicht werden. Durch die hohe Datenübertragungsrate – basierend auf Standards der Telekommunikation – und durch die exzellente Signaldynamik ist eine extrem hohe Fehlerauffindwahrscheinlichkeit gewährleistet ohne Geschwindigkeitsverluste verbuchen zu müssen. Auf dieser Grundlage wird die softwareseitige 3D-Visualisierung – die zweite neue Technologie – von Anzeigen in der Schweißnaht zur exakten Lokalisierung der Fehler ermöglicht.

Weiterhin fungiert die detailliertere und umfangreichere Darstellung durch den Echtzeit Sektor-Scan und die Parallelansicht von bis zu 8 A-Scans als Einstell- und Auswertehilfe. Ausgehend vom Fokus der Prüfung kann die Anlage, unter Berücksichtigung höchster Industriestandards, wie zum Beispiel Shell DEP, oder DNV-OS-F101, einen Prüfungsablauf eines zu testenden Rohres innerhalb von 1,5 – 5 Minuten absolvieren. In der Gesamtkonstellation ist hierdurch eine bis zu 5-fach höhere Produktivität gegenüber bisherigen Systemen möglich.

Hochauflösende Reinheitsgradbestimmung – Fertigung von Referenzfehlern

D. Kotschate¹, D. Gohlke¹, S. Meinig¹, T. Kaszemeikat²

¹ BAM, Berlin; ² Laser- und Medizin-Technologie, Berlin

Regelwerke zur zerstörungsfreien Bestimmung des Reinheitsgrades wie das SEP 1927 und die ASTM E588 erreichen ihre Vergleichbarkeit unter Anwendung von – vergleichsweise einfachen – Referenzfehlern. Hinsichtlich Realisierbarkeit wird somit der Kompromiss zwischen Herstellung des Referenzfehlers und der erreichbaren Nachweisgrenze gefunden. Zur Weiterentwicklung über die Grenzen der SEP1927 hinaus, wurde der Versuch unternommen Fehler kleiner 500 μm herzustellen – welche aufgrund der geringen geometrischen Ausdehnung fertigungsbedingt schwierig zu realisieren sind. Bei den vergleichenden Untersuchungen kristallisierten sich zwei Fertigungsverfahren, Funkenerosion (EDM: electrical discharge machining) und die Fertigung der Bohrungen unter Verwendung eines Hochleistungslasers, als vielversprechend heraus. Zunächst wurden die Fehler mit beiden Verfahren in unterschiedlichen Größen (100, 250 und 100 μm) und Tiefen (1, 1,5 und 2 mm) unter Anwendung von computertomographischen Verfahren der Röntgenprüfung, die Geometrie der eingebrachten Fehlstellen und anschließend durch hochauflösende Tauchtechnikmessungen das Reflektionsverhalten charakterisiert.

Signalverarbeitung zur hochauflösenden Reinheitsgradbestimmung

D. Kotschate¹, D. Gohlke¹

¹ BAM, Berlin

Basierend auf aktuellen Regelwerken (SEP1927 und ASTM E588) stehen Möglichkeiten zur nichtinvasiven Beurteilung des zu untersuchenden Werkstoffes, in verschiedenen Qualitätsstufen bis zu einer Vergleichsfehlergröße von bis zu 300 Mikrometer zur Verfügung. Allerdings ist der realistische Nachweis und die Beurteilung von künstlichen sowie von natürlichen Fehlern kleiner 500 Mikrometer nur unter optimalen Voraussetzungen (bspw. Wahl des Prüfkopfes, Geometrie des Prüfobjektes, orts- bzw. zeitliche Auflösung der Messdatenaufnahme) und unter Einsatz von geeigneten Signalverarbeitungsalgorithmen möglich. Im Rahmen von Ringversuchen wurden daher verschiedene Methoden zur Aufbereitung der zu erfassenden Messdaten entwickelt und an verschiedenen Bauteilgeometrien und Werkstoffen getestet. Dabei stellten sich der spektrale Tiefenausgleich (SDAC) und die nichtlineare Bewertung einzelner Frequenzkomponenten des Nutzsignals als sehr vielversprechend heraus und die Nachweisbarkeit kleiner Fehler – im Bereich von 100-500 μm – konnte erfolgreich gesteigert werden.

Einfluss der Oberflächentopographie auf die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte zur zerstörungsfreien Charakterisierung von Widerstandspressschweißverbindungen

C. Mathiszik¹, T. Reinhardt¹, J. Zschetzsche¹, U. Füssel¹

¹ TU Dresden

Widerstandspressschweißverfahren gehören seit langem zu den etablierten Fügeverfahren. Insbesondere das Widerstandspunkt- und Buckelschweißen sind im Kraft- und Schienenfahrzeugbau, im Metallbau und in der Gerätetechnik weit verbreitet. Bei beiden Verfahrensvarianten ist die Schweißverbindung von außen nicht sichtbar, was eine große Herausforderung für die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) der Verbindung darstellt. Ultraschallbasierte Methoden, die sich bei der ZfP von Widerstandspunktschweißverbindungen etabliert haben, stoßen dabei allerdings beim Nachweis sogenannter Zinkkleber oder bei der Bewertung extremer Materialkombinationen mit sehr dünnen Blechen an ihre Grenzen. Bei der Untersuchung von Buckelschweißverbindungen ist die ZfP sogar noch problematischer, sodass sich bisher im industriellen Maßstab kaum Prüfmethode durchgesetzt haben.

Die zerstörungsfreie Charakterisierung der Anbindungsfläche durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte bietet genau bei diesen Problematiken ein großes Potential. Dabei wird die Fügestelle nach dem Schweißen magnetisiert. Anschließend wird die Restmagnetisierung flächig über der Fügestelle gemessen. Das Messergebnis wird durch die Oberflächentopographie beeinflusst, die im Wesentlichen durch den für das Widerstandspressschweißen typischen Elektrodeneindruck definiert wird.

Im Beitrag werden die Vor- und Nachteile dieser Methode der ZfP diskutiert und Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Oberflächentopographie auf das Messergebnis der zerstörungsfreien Charakterisierung der Anbindungsfläche von Widerstandspressschweißverbindungen durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte vorgestellt.

Numerische Simulation der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte zur Charakterisierung der Anbindungsfläche von Widerstandspressschweißverbindungen

J. Vinz¹, C. Mathiszik¹, J. Zschetzsche¹, U. Füssel¹

¹ TU Dresden

Widerstandspunkt- und Buckelschweißen gehören im Kraft- und Schienenfahrzeugbau, im Metallbau und in der Gerätetechnik zu den etablierten Fügeverfahren. Beide Verfahrensvarianten zeichnen sich durch ihre hohe Prozessgeschwindigkeit und Prozesssicherheit aus. Allerdings sind die Schweißverbindungen von außen nicht sichtbar, was eine große Herausforderung für die Beurteilung der Schweißqualität darstellt.

Um die Qualität einer Schweißverbindung zu beurteilen, werden nach dem derzeitigen Stand der Technik zufällig ausgewählte Proben mittels Zerstörender Prüfung (ZP), wie z. B. Meißeltest, verifiziert. Diese Prüfverfahren sind wirtschaftlich nicht nachhaltig und ressourcenineffizient. Daher werden zunehmend Alternativen untersucht, die eine zerstörungsfreie Beurteilung der Fügeverbindung ermöglichen. Hier haben sich im Bereich der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) von Widerstandspunktschweißverbindungen insbesondere ultraschallbasierte Systeme, wie das Impuls-Echo-Verfahren, durchgesetzt. Allerdings stoßen diese Methoden beim Nachweis sogenannter Zinkkleber oder bei der Bewertung extremer Materialkombinationen mit sehr dünnen Blechen an ihre Grenzen. Im Bereich des Widerstandsbuckelschweißens haben sich bisher kaum zerstörungsfreie Prüfverfahren durchsetzen können.

An der Professur für Fügetechnik und Montage der TU Dresden wurde ein Verfahren zur ZfP von Widerstandspunkt- und Buckelschweißungen entwickelt, das bei den genannten Problematiken großes Potential bietet. Hierbei lässt sich die Anbindungsfläche von Schweißpunkten in ferritischen Stählen mit Hilfe einer bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte charakterisieren. Für ein tieferes Verständnis der physikalischen Wirkungsweisen dieser Methode werden numerische Simulationsmodelle erarbeitet und mit experimentellen Versuchen validiert.

Dieser Beitrag präsentiert die Vorgehensweise und die Ergebnisse der numerischen Simulationen und den experimentellen Versuchen zur Charakterisierung der Anbindungsfläche von Widerstandspressschweißverbindungen durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte.

Elektromagnetische On-line-Prüfung stromdurchfluteter Werkstoffproben aus austenitischem Stahl unter Ermüdungsbeanspruchung

G. Seiler¹, P. Starke¹, C. Boller¹

¹ Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Der Überwachung von Werkstoffeigenschaften kommt in der Sicherheitsforschung alternder Infrastruktur eine stets wachsende Bedeutung zu. Veränderte Betriebsbedingungen, wie verlängerte Laufzeiten oder stärkere Netzschwankungen, im Zusammenhang mit der Energiewende bei Energieerzeugungsanlagen führen zu einer vermehrten thermischen und mechanischen Beanspruchung der metallischen Werkstoffe in diesen Reaktoren. Daher ist die Entwicklung von Verfahren zur Charakterisierung des Ermüdungszustandes dieser Werkstoffe in Abhängigkeit von thermomechanischen und korrosiven Einflüssen und somit zur Bewertung der verbleibenden Einsatzdauer ein wichtiges Forschungsziel. Ein wichtiger Beitrag in diesem Zusammenhang sind Kurzzeitverfahren, mit denen z. B. im Idealfall an einer einzigen Werkstoffprobe eine komplette Werkstoffwöhlerlinie in ca. 2 Stunden ermittelt werden kann. Um dies zu ermöglichen, sind zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Materialcharakterisierung erforderlich.

In einem laufenden Vorhaben werden im Verbund zwischen der MPA Stuttgart, dem Fachgebiet Werkstoffprüftechnik der TU Dortmund, der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit und dem Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung der Universität des Saarlandes Zug- und Ermüdungsversuche an dem austenitischen Stahl X6CrNiNb1810 unter betriebsrelevanten, teilweise extremen Bedingungen durchgeführt. Dazu gehören Temperaturen von Raumtemperatur bis 240 °C sowie der Einfluss verschiedener Medien, etwa Wasser unter Siedewasserreaktor-Bedingungen. In situ wird mittels zerstörungsfreier elektromagnetischer Verfahren kontinuierlich der Ermüdungszustand überwacht. Die Instrumentierung der Versuche besteht dabei aus einer Stromdurchflutung der Probe sowie Magnetfeldsensoren, mittels derer die mikrostrukturellen Veränderungen des Werkstoffs detektiert werden. In diesem Beitrag werden die Versuchstechnik sowie die ersten Ergebnisse vorgestellt.

Terahertzprüfung prozesswarmer Kunststoffbauteile

S. Becker¹, A. Keil¹

¹ Becker Photonik, Porta Westfalica

Die zerstörungsfreie Prüfung und Wanddickenmessung prozesswarmer Kunststoffbauteile ist häufig schwierig. Das für massive Bauteile in der Regel verwendete Verfahren ist Ultraschall. Mit zunehmender Temperatur nimmt allerdings die Dämpfung des Ultraschalls im Material stark zu, weshalb z. B. Wanddickenmessungen an Großrohren unmittelbar nach der Extrusion mit Ultraschall nicht möglich sind.

Erst seit wenigen Jahren stehen mobile Terahertz-Prüfsysteme kommerziell zur Verfügung. Diese Systeme arbeiten als FMCW-Radar in Reflexion bei Frequenzen von 0.1 THz bzw. 0.3 THz und können dielektrische Materialien im Volumen auf verborgene Defekte prüfen. Auch bei der Untersuchung von Schäumen und Sandwichbauteilen zeigt die Terahertzprüfung deutliche Vorteile im Vergleich zum Ultraschall und zur Thermografie. Untersucht werden können alle dielektrischen Materialien. Liegt ein Materialmix vor (z. B. Kunststoff/Metall), ist eine Prüfung bis zur ersten leitenden Oberfläche möglich.

In der vorliegenden Arbeit wurde mit Hilfe des neu entwickelten Terahertz-Prüfsystems SynViewMobil die Abhängigkeit der Dämpfung in verschiedenen Kunststoffen von der Temperatur untersucht. Dabei zeigt sich, dass es Kunststoffe wie z. B. Polyethylen (PE) gibt, die zwischen 20°C und 80°C fast keine Erhöhung der Dämpfung zeigen. Damit ergibt sich die Möglichkeit, an großen Bauteilen (wie z. B. Rohren) im prozesswarmen Zustand Wanddickenmessungen durchzuführen.

Das Gerät ist ein Handscanner, der mobil eingesetzt werden kann. Optional ist auch ein stationärer Einsatz als Prozessmonitor möglich.

Gemessen werden können Wanddicken im Bereich zwischen minimal 4 mm (mit 0.3 THz) und maximal über 100 mm (mit 0.1 THz). Mit dem Verfahren wird durch die Auswertung des Abstandes von Eingangs- und Rückwandecho die optische Dicke gemessen. Bei bekanntem Brechungsindex kann aus der optischen Dicke die geometrische Dicke problemlos bestimmt werden. Die erreichbare Genauigkeit beträgt bei der Verwendung von 0.1 THz wenige 1/10 mm.

Herzlicher Dank gilt dem Süddeutschen Kunststoffzentrum SKZ in Würzburg, insbesondere Herrn Dr. Kremling, für die Unterstützung bei der Durchführung der vorgestellten Messungen.

Charakterisierung von Polymerschäumen mittels zeitaufgelöster Terahertz-Spektroskopie

M. Werner¹, C. Kolb¹, G. Schober¹, S. Kremling¹

¹ SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Der zunehmende Leichtbau mittels Sandwichstrukturen oder die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Dämmelemente werden auch zukünftig die Nachfrage an geschäumten Kunststoffen deutlich steigen lassen. Dabei sind Rohdichte und Zellgröße die charakteristischen Kenngrößen von polymeren Schäumen, welche maßgeblich deren Qualität und damit Einsatzfeld bestimmen. Diese Kenngrößen werden meist visuell mittels optischer Mikroskopie oder Computertomografie bestimmt.

Die Terahertz (THz)-Technologie wurde bereits erfolgreich zur Bestimmung der Materialeigenschaften von Kunststoffen, wie beispielsweise des Füllstoffgehaltes, eingesetzt. Es hat sich gezeigt, dass in Kunststoffcompounds der Füllstoffvolumengehalt linear mit dem Brechungsindex im THz-Bereich skaliert. Übertragen auf polymere Schäume, welche als ein zweiphasiges System, bestehend aus Kunststoff und Gas, angesehen werden können, ist der resultierende Brechungsindex ein Maß für die Rohdichte des Schaums. Aufgrund der geringen Dichte von Schäumen resultiert dies in einem sehr geringen Brechungsindex, welcher als gewichteter Mittelwert von Polymer und Füllgas berechnet wird.

Die bei Schaumstoffen typischen Zellgrößen liegen im Mikrometer- bis Millimeterbereich, was der Wellenlänge typischer THz-Systeme entspricht. Zur Ermittlung der Zellgrößen wird die Abschwächung (Extinktion) des THz-Signals beim Durchgang durch einen Polymerschäum genutzt. Nach Berücksichtigung der materialspezifischen Absorption und Reflektion, beschreibt die Extinktion die Streuverluste im Schaum. Ist die Größe der Streuzentren (entspricht dem Durchmesser der Zellen) in der Größenordnung der Wellenlänge der einfallenden Strahlung, gibt die Mie-Theorie eine gute Beschreibung der Streueffekte. Die Mie-Theorie beschreibt die Streuung an idealen sphärischen Streuzentren. Polymerschäume besitzen jedoch häufig eine Verteilung von verschiedenen Zellgrößen und eine Variation der Geometrie. Der Vergleich von Simulationen mittels modifizierter Modelle der Mie-Theorie und realen Messungen erlauben Aussagen über Zellgrößenverteilungen.

Die Bestimmung von Rohdichte und Zellgröße mittels THz-Spektroskopie wird anhand verschiedener Polymerschäumproben exemplarisch gezeigt.

EddyCation für Android

G. Mook¹, Y. Simonin¹

¹ Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

EddyCation ist ein Wirbelstrom-Ausbildungskit. Eine Soundhardware wird über den USB-Port eines Windows-Notebook betrieben. Die Signalerfassung, -verarbeitung und Darstellung übernimmt das Notebook. Neben den Sensoren liegen dem Kit Testkörper für diverse Prüfaufgaben bei.

Der Erfolg des Gedankens, das Soundsystem für Wirbelstromaufgaben zu nutzen, war uns Anlass, EddyCation auf die Smartphone-Welt zu erweitern. Als erstes wird nun das Android-Smartphone zum Wirbelstromprüfgerät. Im Unterschied zur Windows-Version wird keine externe Box benötigt, sondern der Sensor direkt an die Klinkenbuchse für das Headset angeschlossen. Je besser das Soundsystem des Smartphones, desto besser sind die Wirbelstromsignale.

Das EddyCationSmart getaufte Kit enthält in der Basisversion einen Wirbelstrom-Absolutsensor mit sichtbaren Wicklungen und Testkörper aus diversen Metallen und Legierungen sowie Testkörper mit Schlitz- und Wandreduktionen. Die zugehörige App wird auf einem USB-Stick geliefert. Für Betreiber des Windows-Kits besteht die Möglichkeit, ihre EddyCation-Sensoren über ein Spezialkabel an das Smartphone anzuschließen.

Die Software beherrscht die Gestensteuerung für Abgleich, Verstärkung und Phase, kennt die bewährte Lift-Off-Automatik und kann Hoch- und Tiefpassfilter nutzen. Die Signale können im XY- und Yt-Mode dargestellt werden. Darüber hinaus gibt es einen interaktiven Signalrecorder.

ACFM® – kompakt erklärtM. Smith¹, C. Stapf²¹ TSC Inspection Systems, Milton Keynes, Großbritannien; ² Wilhelm Nosbüsch, Haan

ACFM ist ein elektromagnetisches ZfP Verfahren, das seit den 1980er Jahren stetig weiterentwickelt wird. Es bietet in verschiedenen Anwendungen erhebliche Vorteile gegenüber anderen Prüfverfahren.

ACFM – Das Verfahren

Die wechselstrominduzierte Feldmessung (ACFM) ist ein ZfP-Verfahren, das zum Detektieren, Lokalisieren und Vermessen von Oberflächenrissen in Metallen benutzt wird. Es eignet sich besonders gut zur Schweißnahtprüfung an Off-Shore-Konstruktionen, Unterwasserinstallationen, Pipelines, Containern und Tragwerken über ein weites Feld von industriellen Anwendungen hinweg. ACFM hat gegenüber anderen ZfP-Verfahren die Vorteile, dass damit die Fehlersuche auch unterhalb von Beschichtungen erfolgen kann, das Verfahren sehr unempfindlich gegenüber Lift-Off-Effekten der Sonden ist und keinen mechanischen oder elektrischen Kontakt erfordert. Weiterhin ist keine Kalibrierung durch den Benutzer erforderlich, um eine Risstiefe zu bestimmen. ACFM unterscheidet sich insofern erheblich von konventionellen Wirbelstromtechniken.

ACFM – Theorie

Erregerspulen induzieren einen Strom in der Oberfläche einer metallischen Struktur, senkrecht zum Magnetfeld und üblicherweise quer zur Schweißnaht. Dieser Stromfluss wird von jedem Oberflächenriss gestört. Ein Teil des Stroms wird von der Oberfläche abgezogen, während der Stromfluss unter dem Riss stattfindet. Dadurch wird die Stärke des magnetischen Feldes in der Mitte des Defekts reduziert.

Ein anderer Teil des Stroms fließt auf der Oberfläche um die Enden des Defekts herum; die dort erhöhte Stromdichte verstärkt das magnetische Feld an den Rissenden. Sensoren innerhalb des Prüfkopfes messen die Verzerrung des Magnetfeldes, ACFM Software errechnet daraus Länge und Tiefe des Defekts.

ACFM – Die Unterscheidungsmerkmale

Oberflächenrisse in metallischen Werkstoffen lassen sich auch unter Beschichtungen von mehreren Millimetern Dicke detektieren und vermessen.

Die Messgeschwindigkeit per handgeführtem Prüfkopf kann 50-100 mm/s betragen, bei Zwangsführung sind Geschwindigkeiten bis ca. 750 mm/s möglich.

Die gesamte Messung wird lückenlos aufgezeichnet und kann zu Nachprüfung und Audit verwendet werden. Eine fehlerträchtige und zeitaufwändige Kalibrierung an Vergleichskörpern durch den Prüfer ist nicht nötig.

Evaluation magneto-mechanischer Effekte in hochauflösenden Magnetfeldmessungen durch Neutronendiffraktion

R. Stegemann¹, S. Cabeza¹, V. Lyamkin², G. Bruno¹, M. Pelkner¹, R. Wimpory³, M. Boin³, A. Pittner¹, M. Kreuzbruck⁴

¹ BAM, Berlin; ² Universität des Saarlandes, Saarbrücken; ³ Helmholtz-Zentrum Berlin; ⁴ Universität Stuttgart

Die mechanische Spannung ist ein maßgeblicher Parameter ferromagnetischer Materialien. Wird ein solches Material unter die Curie Temperatur abgekühlt, zerfällt es spontan in nahezu selbstgesättigte magnetische Domänen. Diese Magnetisierung führt gleichzeitig zu einer Verformung der mit ihr gekoppelten Kristallgitter. Ein Effekt der auch reziprok gilt: wird die Gitterverformung durch eine Spannung behindert ändert sich zwangsweise der magnetische Zustand.

Man kann annehmen, dass zwischen unterschiedlichen, für sich aber homogen verspannten Werkstoffbereichen, lokale magnetische Streufelder auftreten, weil magneto-mechanische Effekte eine Inkompatibilität der Domänenstruktur induzieren. Bekanntlich bilden sich Spannungsgradienten nach Schweißprozessen durch ungleichmäßigen Wärmeeintrag, thermischer Dehnung, und unterschiedlichen Abkühlraten aus.

Unter dieser Prämisse untersuchen wir Wolfram-Inertgas geschweißte Blindnahtproben ($250 \times 100 \times 4,8 \text{ mm}^3$) aus einem hypoeutektoiden Baustahl. Der Spannungszustand der Proben wurde durch Neutronendiffraktometrie (ND) am Instrument E3 am Reaktor BERII (Helmholzzentrum Berlin, HZB) charakterisiert. ND ist ein Referenzverfahren für die quantitative Bestimmung von elastischen Dehnungen in kristallinen Materialien, deren Gitter selbst der Messmaßstab ist. Die Auswertung zeigt hohe Längsspannungen mit lokalen Maxima in Größenordnung von 600 MPa, die von umgebenen Druckspannungszonen kompensiert werden.

Zur Detektion der magnetischen Kleinststreufelder verwenden wir speziell designte GMR-Sensorik (GMR – Giant Magneto Resistance), die aufgrund der geringen Größe ihrer aktiven Sensorelemente hohe Ortsauflösung mit Sensitivität vereint. Die Visualisierung der Messergebnisse lässt eine klare magnetische Mesostruktur der Schweißnähte erkennen, in der die Streufelder lateral in Größenordnung des Erdmagnetfeldes variieren ($\sim 50 \mu\text{T}$). Wir zeigen durch einen Vergleich beider Messverfahren, dass lokale magnetische Streufeldmaxima mit Spannungsgradienten übereinstimmen können.

Bewertung der magnetischen Mikrostruktur für die Schadensfrüherkennung

R. Stegemann¹, M. Pelkner¹, N. Sonntag¹, M. Kreuzbruck², B. Skrotzki¹

¹ BAM, Berlin; ² Universität Stuttgart

Die Mikrostruktur ferromagnetischer Materialien hat einen maßgeblichen Einfluss auf deren magnetischen Eigenschaften. Gerade bei niedrigen Feldstärken zeigen sich Parameter wie Koerzitivität, Permeabilität und Verlustleistung hoch sensitiv.

Wir zeigen am Beispiel des unlegierten Baustahls S235JR, dass die magnetische Mikrostruktur an der Probenoberfläche mit inhomogenen Dehnungen übereinstimmt. Zur Detektion der Kleinststrefelder verwenden wir speziell designte GMR Sensorik, die Sensitivität (3mV/V/kA/m) mit hoher Ortsauflösung ($\sim 180\ \mu\text{m}$) vereint. Infolgedessen können wir auf eine aktive magnetische Anregung verzichten. Wir nutzen allein die sich durch magneto-mechanische Prozesse ausbildende „spontane“ magnetische Mikrostruktur des Materials. Das hervorragende Signal-Rausch-Verhältnis unserer GMR-Sensorik für inhomogene Streufelder erlaubt, schon kleine heterogene plastische Verformungen in Form und Position reproduzierbar zu visualisieren. Die zugehörigen Signale zeigen die typische Sequenz von erhöhten positiven und negativen Normalkomponenten wie sie bei einer Rissanzeige der aktiven Streuflussprüfung (MFL – Magnetic Flux Leakage) beobachtet wird.

Das neue Strahlenschutzrecht 2018 und seine Bedeutung für die Radiographie

C. Kaps¹, B. Sölter¹, A. Steege¹

¹ DGZfP, Berlin

Durch die europäische Richtlinie 2013/59/EURATOM (Euratom-Grundnormen) ist die Bundesregierung gemäß Artikel 106 dieser Richtlinie verpflichtet, die inhaltlichen Vorgaben bis 6. Februar 2018 in nationales Recht umzusetzen. Das Ziel des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) ist es, neben der Umsetzung der Richtlinie, gleichzeitig die Möglichkeit zu nutzen, das Strahlenschutzrecht zu modernisieren, praxistauglich zu verbessern und vollzugsfreundlicher zu gestalten.

Die Richtlinie 2013/59/EURATOM wird durch das neue Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) und weiteren Regelungen auf Verordnungsebene in das deutsche Recht eingehen. Das Strahlenschutzvorsorgegesetz, die Strahlenschutzverordnung und die Röntgenverordnung werden vom StrlSchG abgelöst werden.

Ca. 130 Verbände wurden bereits zu einer Stellungnahme zum Referentenentwurf des Strahlenschutzgesetzes aufgefordert, die mündliche Anhörung hierzu fand am 3. November 2016 beim BMUB in Berlin statt.

Interessant wird das Jahr 2017 unter dem Blickwinkel, dass die Regelungen auf Verordnungsebene erst noch erarbeitet werden müssen. Insbesondere, da die Trennung in Strahlenschutz- und Röntgenverordnung nicht fortgeführt wird. Auch die Anwender könnten diesen zeitlichen Druck im Februar 2018 zu spüren bekommen, wenn neben dem Strahlenschutzgesetz noch eine Vielzahl an Verordnungen rechtskräftig werden.

Der Vortrag soll den aktuellen Stand des Strahlenschutzgesetzes und der künftigen Verordnungen mit Blick auf die Radiographie wiedergeben.

Strahlungsthermometrische Charakterisierung und Kalibrierung von Thermografiekameras an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

J. Hollandt¹, B. Gutschwager¹, S. König¹, C. Monte¹

¹ PTB, Berlin

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt betreibt einen Messplatz zur strahlungsthermometrischen Charakterisierung und hochgenauen Kalibrierung von Thermografiekameras rückgeführt auf die Internationale Temperaturskala (ITS-90).

Der Messplatz verfügt über Wärmerohr-Hohlraumstrahler mit Aperturdurchmessern von bis zu 70 mm und bezüglich ihrer Temperaturhomogenität und ihres spektralen Emissionsgrads genau vermessene Flächenstrahler, um die Kalibrierung von Thermografiekameras über einen Temperaturbereich von -50 °C bis 500 °C zu ermöglichen. Temperatur und Luftfeuchtigkeit sind an dem Messplatz geregelt und einstellbar.

Mittels eines patentierten Verfahrens kann an dem Messplatz auch die Non-Uniformity-Correction (NUC) von Kameras sehr schnell und genau durchgeführt werden.

Der Messplatz und beispielhafte Ergebnisse an Infrarotkameras werden auf dem Poster vorgestellt.

Thermografische Beobachtung von Rissspitzen in Kunststoffen

M. Rahammer¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Die Energiefreisetzung beim Bruch von Kunststoffen ist zwar seit jeher von großem Interesse, konnte aber bisher nicht zufriedenstellend messtechnisch erfasst werden. Frühere Messungen aus der Literatur zeigen nur Momentaufnahmen ohne zeitliche Zuordnung, bzw. die auftretende Temperatur ohne genaue Ortsauflösung. Mikroskopische Erweichungs- oder gar Aufschmelzprozesse an der Rissspitze sind laut Literatur realistische Szenarien und würden die Bruchigenschaften und Schadenstoleranz von Kunststoffen in einer Weise beeinflussen, wie sie bisher bei der Auslegung von Bauteilen nicht berücksichtigt wurden. Nahe der Rissspitze hängt die Spannungsverteilung vom Phasenzustand des Kunststoffes ab, was das Risswachstum vielleicht sogar hemmen könnte. Die Zusammenhänge von Zähigkeit, Dehnrate und Risswachstum müssten dann völlig neu überdacht und entsprechende Materialmodelle aktualisiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit, werden Thermografie-Ergebnisse vorgestellt, welche mittels zeitlich hochauflösender thermografischer Messtechnik entstanden sind und die genannten Thesen unterstützen, da Temperaturen bis nahe an die Glasübergangstemperatur gemessen wurden. Die hier vorgestellten Messergebnisse zeigen erste Ansätze, die den Bruchvorgang und die dabei auftretenden Effekte und Mechanismen, auflösen und zuordnen können. Die Erkenntnisse, die auf diese Arbeiten aufbauen werden, können zu einem fundamentalen Überdenken bisheriger Bruchmodelle führen und somit die Auslegung und Schadensvorhersage von Kunststoffbauteilen weiter verbessern.

Anwendung des SAFT-Algorithmus bei der Ultraschallprüfung im ganzen Sprung

D. Algernon¹, S. Feistkorn¹, M. Scherrer¹

¹ SVTI, Wallisellen, Schweiz

Der unter dem Begriff Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT) bekannte Rekonstruktionsalgorithmus hat sich insbesondere bei der mechanisierten Ultraschallprüfung in einer Vielzahl von Anwendungen als zielführend erwiesen.

In seiner ursprünglichen Form berücksichtigt der Algorithmus direkte Schallwege, gemäß der Prüfung im halben Sprung. Die Einbeziehung zusätzlicher Reflexionen an einer planaren Grenzfläche ermöglicht die Anwendung des Algorithmus auf die Prüfung im ganzen Sprung. Einerseits bietet diese Art der Prüfung Vorteile bei eingeschränkter Zugänglichkeit, so dass eine höhere Prüfbereichsabdeckung erzielt werden kann. Speziell lässt sich jedoch durch die Einbeziehung von Modenumwandlungen in den Rekonstruktionsalgorithmus das Signal-Rausch-Verhältnis weiter verbessern sowie vertikale Grenzflächen wie u. a. auch Rissflanken besser rekonstruieren.

Klassische Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Schweißnahtprüfung werden ebenso wie exemplarische Anwendungen bei der Prüfung von Betonbauteilen des Bauwesens behandelt. Anhand von Daten, welche aus semi-analytischen Simulationsrechnungen gewonnen wurden, werden Möglichkeiten für den Einsatz des modifizierten Algorithmus demonstriert und auch unter dem Aspekt der Messunsicherheit diskutiert. Ebenfalls werden Lösungsansätze zur Berücksichtigung von Unsicherheiten hinsichtlich Lage und Beschaffenheit der jeweiligen planaren Grenzflächen erarbeitet.

3D Ultrasonic Inspection with Matrixeye

P. Anderle¹, P. Scharpenberg²

¹ WesDyne Sweden, Täby, Schweden; ² Westinghouse Electric Germany, Mannheim

Matrixeye is an advanced ultrasonic (UT) inspection instrument using a combination of advanced Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) and UT array probes.

The advanced SAFT makes it possible to acquire three dimensional (3D) images and considerable more precise information of the inspected volume.

With Matrixeye, it becomes possible to inspect many new materials for different applications where NDE technique is needed. The Matrixeye enables a wide range of inspections, from traditional steel welds to complex composite materials and accurate spot weld examinations.

Ultraschall-Rückstreuung: Bestimmung der Einhärtungs-Härtetiefe (SHD) und mehr

M. Becker¹, M. Stroh¹, N. Brosta¹, H.-R. Herzer¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Bei der zerstörungsfreien Messung der Einhärtungs-Härtetiefe in Tiefen größer einem Millimeter stellt Ultraschallrückstreuung seit vielen Jahren die Methode der Wahl dar, um Härtetiefen umwandlungsgehärteter Bauteile reproduzierbar zu bestimmen. Die Methode basiert auf der Streuung eingebrachter Transversalwellen am Gefügeübergang zwischen Härteschicht und Grundmaterial. Der Prüfkopf hierzu besteht aus einem Longitudinalwellenwandler, der auf einem prüfstellenspezifischen Vorlaufkeil im optimalen Winkel zur Erzeugung der Transversalwelle montiert ist. Bei den verwendbaren Koppelmedien handelt es sich zumeist um Öle oder wasserbasierte Koppelmittel.

Die Vorteile der kalibrierungsfreien Messung sowie des robusten Messverfahrens werden weltweit in der Qualitätssicherung und der Fertigung geschätzt. Basierend auf der Ultraschall-Hardware des Fraunhofer IZFP finden sich Handprüfsysteme von der Automobilbranche bis hin zum Energiesektor. Die Reproduzierbarkeit der Methode einerseits und hochwertige, zuverlässige Hardware in Verbindung mit einer guten Bedienbarkeit andererseits entscheiden über erfolgreiche Industriesysteme. Hierfür werden im IZFP kontinuierliche Weiterentwicklungen seitens der Prüfhard- und Software vorangetrieben, die sowohl in kostengünstigen Handprüfsystemen, als auch in vollautomatischen SHD-Prüfanlagen weltweit eingesetzt werden. Ebenso erfolgt für jeden Kunden eine persönliche Betreuung des Prüfproblems, da die bauteilspezifische Anpassung von Vorlaufkeilen und Abstimmung der Hardware auf die zu untersuchende Materialzusammensetzung für eine optimale Leistung von Handprüfsystemen sorgt. Bei vollautomatischen Prüfanlagen wird darüber hinaus die Entwicklung von mechanischen Komponenten und die Anpassung der Prüfsoftware komplett durch das IZFP betreut.

Neben den zuvor genannten Haupteinsatzgebieten bestehen viele weitere Möglichkeiten das Rückstreuverhalten von Ultraschallwellen zur Gefügeuntersuchung zu nutzen. Dazu zählen beispielsweise die Verwechslungs- bzw. Echtheitsprüfung von gehärteten Bauteilen und die Sicherstellung des fertigungsbedingten Urzustandes von Schweißnähten.

Intelligente Laufzeitmessung von Ultraschall-Signalen

M. Becker¹, M. Ganster¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Die genaue Bestimmung der Laufzeit von Ultraschallsignalen bildet die Grundlage für viele Prüfverfahren der ZfP. Die Genauigkeit der Laufzeitbestimmung und ihre Robustheit gegen externe Störeinflüsse ist damit eine für die Qualität der durchgeführten Prüfung maßgebliche Größe. Alle aktuell großflächig angewandten Verfahren weisen unter bestimmten Bedingungen Reproduzierbarkeitsprobleme auf. So kann zum Beispiel durch bestimmte Geometrien der durchschallten Körper eine Signaldeformation auftreten, was beispielsweise beim weit verbreiteten Verfahren der Laufzeitbestimmung durch Kreuzkorrelation zweier Signale zu beliebigen Abweichungen und Fehlbestimmungen führen kann. Es gilt hier, die Reproduzierbarkeit einer Messung zu erhöhen und, unter Verwendung von Vorabinformationen bezüglich Signalweg und deren Ausbreitung, die Genauigkeit und Unempfindlichkeit gegen Störgrößen zu verbessern.

Zu diesem Zweck arbeitet das Fraunhofer IZFP an der Entwicklung von Methoden zur Online-Bestimmung der Qualität der Laufzeitmessung und Evaluation geeigneter Signalverarbeitungsmittel zur Steigerung der Wiederholgenauigkeit und Verminderung des Einflusses systematisch auftretender Störgrößen. Dazu wird die Signalqualität bestimmt und bewertet, woraufhin darauf aufbauend passende Vorverarbeitungsalgorithmen und Mittel der Laufzeitbestimmung angewandt werden. Zur Durchführung dieser Vorverarbeitung kommen rechnergestützte, intelligente Verfahren zur automatisierten Bewertung von Signalen hinsichtlich Ähnlichkeit und Rauschbehaltung zum Einsatz. Zusätzlich wird auf einen Fundus von dynamisch angepassten Verfahren zur Laufzeitermittlung bzw. zur Erkennung nicht bestimmbarer Signalverläufe zurückgegriffen. Weiterhin wird die Möglichkeit untersucht, durch die Einbeziehung anwendungsspezifischer a priori-Informationen die Qualität der Laufzeitbestimmung insbesondere unter schwierigen Prüfbedingungen zu verbessern.

Verbesserung der Empfindlichkeit von Ferroelektret-Empfängern für Luftultraschall-Prüfung

R. Caldeira¹, J. Bartusch¹, F. Schadow¹, M. Gaal¹

¹ BAM, Berlin

Der immer steigende Bedarf nach Prüfungsverfahren von Verbundwerkstoffen eröffnet die Möglichkeit von Prüfverfahren mittels luftgekoppelten Ultraschalls. Die Steigerung der Empfindlichkeit der Luftultraschall-Wandler erhöht deren Einsatzbereich. Die größte Herausforderung des Verfahrens stellt die Impedanzanpassung an die Luft dar. Ende der 1990er Jahre entdeckte man in Ferroelektreten (geladenen zellulären Polymeren) das Potential zur Lösung dieser Problematik. Geladenes zelluläres Polypropylen, mit einer geringen akustischen Impedanz als bei den meist verwendeten piezoelektrischen Materialien, bietet eine deutlich bessere Anpassung an die Luft. Sein piezoelektrisches Verhalten mit einem piezoelektrischen Koeffizient d_{33} von 200-800 pm/V ähnelt dem von piezoelektrischen Keramiken. Grund für dieses Verhalten sind die polarisierten Zellen, die eine permanente Ladung erzeugen. Die permanente Ladung erzeugt ein starkes elektrisches Feld in der Folie. Eine auf die Oberfläche einwirkende Kraft staucht die Zellen, wodurch sich die eingeschlossenen Ladungsträger im Verhältnis zueinander bewegen. Durch diese Potential-Verschiebung entsteht eine Ladung auf der Oberfläche. Mit angelegter Vorspannung kann die Empfindlichkeit des Wandlers kontrolliert werden, indem die vorgegebene Polarisierung temporär unterstützt oder reduziert wird. In diesem Beitrag ist die Entwicklung eines Ultraschallempfängers aus geladenem zellulärem Polypropylen mit Anwendung der Vorspannung dargestellt. Eine Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands bei der Durchschallung eines Testkörpers um 12-15 dB wurde erreicht.

Prüfbrücke zur Ultraschall-Prüfung von Stabstahl

W.A.K. Deutsch¹, M. Joswig¹, R. Kattwinkel¹, H. El Takach¹, D. Jung²,
R. Jungermann², J. Kretzer², F. Hippenstiel²

¹ KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau, Wuppertal; ² BGH Edelstahl Siegen

Seit dem Jahr 2012 ist bei der BGH Edelstahl Siegen GmbH ein Prüfportal für Stabdurchmesser von 300 mm bis 1000 mm im Einsatz. Für die Ultraschallprüfung von Stäben mit Durchmessern zwischen 100 mm und 400 mm wurde in der Jahresmitte 2016 ein weiteres Prüfportal in Betrieb genommen. Diese neue Prüfanlage steht im Fokus dieses Beitrags.

Da die zu prüfenden Stäbe bis zu 18 m lang sind und das Transportkonzept nur eine seitliche Zuführung der Stäbe erlaubt, musste eine freitragende Prüfbrücke realisiert werden. Am linken Ende der Prüfbrücke wurde eine Kalibrierstation zur schnellen Überprüfung der Prüfempfindlichkeit aller Prüfköpfe installiert. Dadurch beträgt die Gesamtlänge der Prüfmaschine etwas mehr als 32 m, wovon 20,5 m freitragend sind. Zur Sicherstellung einer vollständigen Prüfung mit der erforderlichen Überlappung der Prüfspuren und der nötigen Prüfgeschwindigkeit sind sechs Prüfwagen im Einsatz. Jeder Prüfwagen beinhaltet je ein Prüfsystem für ferritische und austenitische Werkstoffe mit unterschiedlichen Prüffrequenzen. Eine aufwändige Schnellwechsel-Vorrichtung ermöglicht die Umstellung auf den zu prüfenden Werkstoff. Somit sind in der Anlage insgesamt 48 Prüfköpfe verbaut, von denen jeweils 24 Prüfköpfe aktiv sind. Jedes Prüfsystem arbeitet mit 4 Prüfköpfen: Die Prüfung des oberflächennahen Bereiches erfolgt mit einem SE-Prüfkopf auf 0,8 mm KSR. Die Prüfung des Kernbereichs erfolgt mit Senkrecht-Einschallung auf 1,0 mm KSR. Zwei Prüfköpfe sind zur Winkeleinschallung in beide Umfangsrichtungen vorgesehen und werden mit einer 3 mm-Längsbohrung abgeglichen.

Nach Einlegen der Stäbe werden die Prüfteile in Rotation versetzt und die Prüfsysteme von oben aufgesetzt. Jeder Prüfwagen fährt einen Teilbereich der Stablänge mit schraubenförmigen Prüfspuren zur vollständigen Abdeckung des Prüfolumens ab. Alle Prüfköpfe arbeiten in Spaltankopplung und sitzen in separaten, kardanisch aufgehängten Prüfkopfhaltern, die eine optimale Nachführung an der Staboberfläche liefern.

Die Anlage verfügt zudem über eine optische Stabenden-Überwachung mit einem Kamerasystem, eine Return-To-Defect-Funktion, eine komfortable C-Bild-Software mit einer 12-Uhr-Erkennung und eine Farbmarkiereinheit.

Berührungslose Inline Qualitätskontrolle von pultrudierten CFK-Tapes mit Luftultraschall und Thermografie

W. Essig¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Faserverstärkte Kunststoffe werden neben der Luft- und Raumfahrtindustrie zunehmend in der Automobil- und Sportindustrie eingesetzt. Die außerordentlich hohen, auf die Masse bezogenen Festigkeiten und Steifigkeiten zeichnen diese hochmodernen Werkstoffe aus. Vor allem mit endlosfaserverstärkten Kunststoffen können maßgeschneiderte, auf eine spezielle Belastung optimal ausgelegte Bauteile hergestellt werden. Dies wird ermöglicht, indem die Faserrichtungen entlang den Belastungsrichtungen ausgerichtet werden. Insbesondere der Einsatz von unidirektional verstärkten Tapes ermöglicht diese Art des flexiblen Lagenaufbaus. Zusammen mit einer thermoplastischen Matrix können diese Tapes in einem Pultrusionsverfahren hergestellt werden, dabei wird das Matrixmaterial über einen Extruder eingespeist.

In dieser Arbeit werden kohlenstofffaserverstärkte, thermoplastische Tapes mit einer Dicke von circa 0,2 Millimetern und einer Breite von circa 100 Millimetern mit Luftultraschall in Schrägdurchschallung und aktiver Thermografie untersucht. Hierzu wurde ein Prüfstand entworfen, der einen kontinuierlichen Pultrusionsprozess simuliert.

Verschiedene Scanansätze für die Luftultraschallprüfung mit einem Einkanalgerät wurden untersucht, sowie eine Methode, bei der die gesamte Tapebreite mithilfe von geführten Wellen auf einmal untersucht werden konnte. Hierzu wurde der Luftultraschall unter einem bestimmten Winkel auf das Bauteil eingeschallt, um eine geführte Welle zu generieren, die auf der anderen Tapeseite wieder detektiert und ausgewertet werden konnte. Zugleich konnte eine erste Aussage über den Faservolumengehalt der Tapes gemacht werden, indem die gemittelten Amplituden eines C-Scans ausgewertet und ein Qualitätskoeffizient berechnet wurde.

Vielversprechende Ergebnisse bei der Tapeprüfung mit aktiver Thermografie zeigen eine koordinatentreue Darstellung künstlich eingebrachter Defekte. Hierzu wurde das Tape lokal erwärmt und das Thermografiebild zeilenweise zeitlich ausgewertet. Eine diskrete Fouriertransformation ermöglicht anschließend die Detektion von Defekten, die visuell nur schwer detektierbar gewesen wären.

Ansatz für die Ermittlung der spezifischen Messunsicherheit eines zerstörungsfreien Prüfsystems

S. Feistkorn¹, D. Algernon¹, M. Scherrer¹

¹ SVTI, Wallisellen, Schweiz

Zerstörungsfreie Prüfsysteme werden in verschiedenen Industriezweigen wie der Kerntechnik oder der Luft- und Raumfahrt angewendet, um den aktuellen Zustand von Bauteilen zu erfassen sowie die Integrität von Komponenten nachzuweisen.

Im Rahmen von wiederkehrenden Prüfungen werden darum sicherheitstechnisch relevante Komponenten in definierten Zeitintervallen zerstörungsfrei geprüft. Diese Prüfung hat hierbei das Ziel, neue Anzeigen zu detektieren. Zusätzlich werden bekannte Anzeigen vorangegangener Prüfungen auf Veränderungen hin untersucht.

Werden nun Unterschiede in den Dimensionen einer bereits bekannten Anzeige festgestellt, stellt sich die Frage, worauf diese zurückzuführen sind. Auf der einen Seite ist ein betriebsinduziertes Wachstum der Anzeige denkbar, auf der anderen Seite kann die Ursache der Unterschiede in der Messunsicherheit des eingesetzten Prüfsystems begründet liegen. Um beide Ursachen voneinander trennen zu können, ist das Wissen über die spezifische Messunsicherheit des Prüfsystems unerlässlich.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, wie die Messunsicherheit eines Prüfsystems ermittelt werden kann, um ein mögliches Anzeigenwachstum von der Messunsicherheit eines Prüfsystems unterscheiden zu können.

Erste Ergebnisse der Tiefenbestimmung von kleinstflächigen Ermüdungsrissen

S. Feistkorn¹, G. Rössler¹, M. Scherrer¹

¹ SVTI, Wallisellen, Schweiz

Für die Bewertung der Zulässigkeit von oberflächentrennenden Fehlerstellen ist es unerlässlich, ein zuverlässiges zerstörungsfreies Prüfsystem zu besitzen, um deren Fehlerlängen- und Fehlertiefenausdehnung genau ermitteln zu können.

Durch die Winkeleinschallung können mit Hilfe von Transversalwellen oberflächentrennende Risse aufgrund des Winkelspiegeleffektes im ersten Schritt zuverlässig detektiert werden. Gelingt es nun durch eine geeignete Prüftechnik, die Fußpunktanzeige des Risses vom Beugungsecho der Rissspitze zeitlich aufzulösen, so kann aufgrund der Laufzeitdifferenz eine Tiefenausdehnung der Anzeige angegeben werden. Dies erfordert jedoch speziell bei kleinstflächigen Ermüdungsrissen (Länge von 6 mm, Tiefenausdehnung von 1 mm) eine angepasste Prüftechnik, die durch den Einsatz einer hohen Frequenz und eine starke Bedämpfung des Ultraschallprüfkopfes gekennzeichnet ist.

Für die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfsystems werden im Rahmen dieses Beitrages erste Ergebnisse von Untersuchungen an austenitischen Chrom-Nickel Stahlplatten mit verschiedenen kleinstflächigen Vergleichsreflektoren (drahterodierte Schlitz- und senkero-dierte Mikronuten) vorgestellt.

Die daraus entwickelte und optimierte Ultraschallprüftechnik wird dann eingesetzt, um an verschiedenen mechanischen Ermüdungsrissen die Tiefenausdehnung in Abhängigkeit der Rissöffnung zu messen. Nach dem Aufbrechen der Ermüdungsrisse werden die gemessenen Tiefenausdehnungen verglichen, um daraus geeignete Rahmenbedingungen für eine zuverlässige Prüftechnik herzuleiten.

Einfluss der Koppelmittelschichtdicke zwischen Prüfkopf und Bauteil auf das Vorzeichen des Reflexionskoeffizienten

P. Fey¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Für die Grenzfläche zwischen zwei Materialien mit den akustischen Impedanzen Z_1 und Z_2 wird der Reflexionskoeffizient normalerweise mit der Formel $R_{12} = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2)$ berechnet. Daher haben R_{12} und R_{21} entgegengesetzte Vorzeichen. Da es oft nicht möglich ist, die zwei Materialien ideal aneinander zu schweißen, wird üblicherweise ein Koppelmittel verwendet. Messungen mit Transversalwellen an einer Schicht Transversalwellenkopplmittels zwischen Aluminium, Stahl und PMMA (Plexiglas) zeigten, dass das Vorzeichen des von der Grenzfläche reflektierten Pulses von beiden Seiten gleich ist, also $R_{12} = R_{21}$ wäre. Dies fällt nur auf, wenn der A-Scan nicht gleichgerichtet dargestellt wird. Betrachtet man die Grenzschicht dagegen als dünnen Film zwischen zwei Medien, so wird klar, dass der Reflexionskoeffizient nicht nur von den Impedanzen der Materialien, sondern auch sehr empfindlich von der Dicke der Koppelmittelschicht abhängig ist. Dabei ändern sich nicht nur die Vorzeichen, sondern auch der Betrag. Während die Betragsänderungen bei der Messung mit PMMA-Vorlaufstrecken an Stahl in den meisten Fällen sehr gering sind, treten sie bei Messung an Faserkunststoffverbunden erheblich deutlicher auf und können Amplitudenschwankungen von bis zu 3 dB bei Transversalwellen und über 10 dB bei Longitudinalwellen ausmachen. Daher sollte das Wissen um diese Effekte bei der Ausbildung von Prüfern für Faserkunststoffverbunde dringend berücksichtigt werden.

Echtzeit Multi Focus Scanning

M. Ganster¹, H. Theado¹, T. Schwender¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Bei der fokussierenden Ultraschall-Phased-Array-Prüfung werden die Einzelsignale der Array-Elemente elektronisch derart phasenverzögert, dass sich bei ihrer Addition eine konstruktive Überlagerung für Ultraschallsignale aus der gewünschten Region ergibt und somit eine maximale Prüfempfindlichkeit für diesen Ort erreicht wird. Da in der realen Prüfsituation die Lage von Fehlstellen beliebig sein kann, muss u. U. an mehreren Orten fokussiert werden, um alle potentiell möglichen Anzeigen mit einer der Anforderung genügenden Empfindlichkeit darzustellen. Dies kann z. B. durch mehrere aufeinanderfolgende Prüftakte mit jeweils unterschiedlichen Fokuspunkten geschehen, deren Daten in der Nachbearbeitung zu einem Prüfergebnis über die gesamte Bauteiltiefe zusammengefasst werden. In der industriellen, automatisierten Prüfung, wo besonders die Prüfgeschwindigkeit von hoher Bedeutung ist, stößt diese Methode allerdings schnell an ihre Grenzen.

Mit der am IZFP entwickelten Methode des Multi Focus Scanning wird diese Geschwindigkeitsbeschränkung durch hardwareimplementierte Echtzeitverarbeitung aufgehoben. Multi Focus Scanning erlaubt innerhalb eines einzigen Prüftaktes die Fokussierung auf gleich mehrere Fokuspunkte. Die Verarbeitung erfolgt dabei bereits unmittelbar nach der Datenaufnahme innerhalb der Prüfhardware und dadurch ohne nennenswerten Zeitverlust gegenüber einem konventionell fokussierten Phased-Array-Prüftakt. Zeitgleich besteht die Möglichkeit, die Apertur des Prüfkopfes dynamisch zu verändern, so dass für prüfkopfnaher Fokuspunkte zunächst nur eine kleine Apertur wirksam wird, welche mit fortschreitender Ultraschalllaufzeit bis zur maximalen Anzahl an Array-Elementen erhöht werden kann. Die Kombination von dynamischer Fokussierung und variabler Apertur ermöglicht die Phased-Array-Prüfung mit maximaler Empfindlichkeit über die gesamte Bauteiltiefe bei gleichzeitig hoher Prüfgeschwindigkeit. Multi Focus Scanning ist verfügbar für alle neuen Mehrkanalsysteme des Typs ETHUS, sowie als Firmware-Update für bestehende Systeme dieses Typs.

3D-Visualisierung von Ultraschall-Scandaten im Kontext zu Testmethoden für die Zulassung ziviler Luftfahrtkomponenten

A. Heinze¹

¹ IMA Dresden

Der Luftverkehr der Zukunft ist ein Motor für die Weiterentwicklung der globalen, hoch vernetzten Zivilisation. Bis 2050 soll die Zahl der Flüge allein in Europa von zurzeit knapp 10 Millionen auf rund 25 Millionen Flugbewegungen pro Jahr steigen. Dabei müssen die Megatrends Globalisierung, Logistik und Mobilität als Treiber hierfür mit den globalen Herausforderungen Ressourcenschonung, Umwelt- und Klimaschutz sowie Nachhaltigkeit balanciert werden. Energieeffizienz wird der Schlüssel sein, die notwendige Balance zu schaffen. Diese Entwicklungstrends sind mit dem Einsatz neuer energie- und ressourcensparender Materialien im Kontext neuer komfortabler und vernetzter Flugzeugzell- und Kabinenkonzepte verbunden und stellen hinsichtlich Aspekten wie Prüfung, Inspektion und Wartung zum Teil völlig neue Anforderungen an den Flugzeugbau und die Flugzeugwartung der Zukunft. Damit wachsen die Anforderungen an das Engineering, speziell auch an den Nachweis der Lebensdauer neuer Werkstoffe und Strukturen. Eine Vielzahl entwicklungsbegleitender Versuche ist von Nöten, um am Ende die Festigkeit der gesamten Luftfahrtstruktur nachzuweisen und deren Sicherheit zu gewährleisten.

Die IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH (IMA Dresden) bietet alle Möglichkeiten, Materialeinsatz und Konstruktionsprinzipien zu vergleichen, Berechnungsverfahren zu verifizieren und verschiedene Einflüsse auf die Festigkeit experimentell zu untersuchen, im Zusammenspiel mit zerstörungsfreien Prüfmethoden. Kleine Schäden infolge Ermüdung oder äußerer Einwirkung sind im Luftfahrt-Leichtbau kein Tabu, vielmehr Teil des Sicherheitskonzepts Schadenstoleranz und größter Bereich im Spektrum unserer Experimente. IMA Dresden untersucht, wann und wo Schäden entstehen, wie sie wachsen, welche Restfestigkeit verbleibt und wie eine Struktur etwa auf zyklische Lasten nach einem Einschlag (Impact) reagiert. Die Spezialisten für zerstörungsfreie Prüfung der IMA Dresden unterstützen dabei mit dem jeweils bestgeeigneten Verfahren in jeder Versuchs- und Inspektionsphase.

Im Posterbeitrag wird eine Übersicht über Werkstoffe und Testmethoden für Luftfahrtkomponenten gegeben und die 3D-Visualisierung von Ultraschall-Scandaten vorgestellt.

Mobile Ultraschallprüftechnik mit hohen Frequenzen

W. Hillger¹, L. Bühling¹, F. Beuße¹, A. Szewieczek¹

¹ Ingenieurbüro Dr. Hillger, Braunschweig

Um bildgebende Ultraschallprüfungen vor Ort durchführen zu können, haben wir das mobile Ultraschallprüfsystem MUSE (Mobile Ultraschall-Einheit) entwickelt. Das System besteht aus einem mobilen Scanner, einem portablen Ultraschallprüfsystem und einem Wasserumlaufsystem zur Ankopplung mit einem speziellen Prüfkopfadapter. Da die Anforderungen der Ultraschallprüftechnik immer höher werden, wurde ein neuer Prüfkopfadapter entwickelt, der auch den Einsatz von hochfrequenten und fokussierten Prüfköpfen erlaubt. Bisher verursachten die Koppelschichten des Adapters eine zu hohe Schallschwächung bei diesen Frequenzen.

Realistisch sind nun maximale Prüffrequenzen von bis zu 65 MHz, die z. B. die Prüfung von CFK-Tapes mit einer Dicke von 0,5 mm erlauben. Weitere Anwendungen sind Fügeverbindungen an dünnen Blechen (bis herunter zu 0,2 mm Dicke).

Der Postervortrag beschreibt anschaulich das System und den Einsatz der neuen „lokalen Tauchtechnik“.

Qualität verpflichtet: Ultraschall-Probekörper in der Medizin

S. Kern¹, C. Pientschke¹, M. Preuß¹, R. Steinhäusen¹, S. Poser², V. Cepus²

¹ Forschungszentrum Ultraschall, Halle (Saale); ² Polymer Service, Merseburg

Probekörper mit definierten Ungängen ermöglichen dem Materialprüfer, die korrekte Aufnahme und Interpretation von Ultraschallbildern zu erlernen bzw. anhand von Justierkörpern definierte und vergleichbare Prüfergebnisse zu erzielen. Die hohen Qualitätsansprüche verbinden Materialprüfer und Mediziner, die in der Aus- und Weiterbildung für die Ultraschalldiagnostik ebenfalls auf Probekörper zurückgreifen, die sogenannten „Phantome“. Neben der Einstellung des Ultraschallkontrastes wird dafür auch die Anpassung der Elastizität an die von Gewebe wichtiger. Grund ist die zunehmende Bedeutung der Sonoelastographie, welche die Elastizität von Organen quantifiziert. Derzeit ist das nur auf einer relativen Skala möglich, weil das Untersuchungsgerät und dessen Anwender signifikanten Einfluss auf die gewonnenen Werte haben. Elastographiephantome mit definierten elastischen Eigenschaften können eingesetzt werden, um die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Methode erheblich zu verbessern.

In unserem Beitrag stellen wir zwei Beispiele für die Phantomentwicklung vor. Dabei sind Materialentwicklung und -charakterisierung eng verzahnt. Der sonographische Kontrast war für ein Endosonographie-Trainingsgerät einzustellen. Es besteht aus einer Matrix mit Aussparungen für tierische Organe, an denen die Mediziner endoskopische Operationstechniken mit visueller Kontrolle durch bildgebenden Ultraschall üben. Als Koppelmedium wird Wasser verwendet. Der akustische Übergang zwischen Matrix und Wasser wurde durch eine gezielte Anpassung der akustischen Impedanz optimiert.

Außerdem stellen wir unsere Arbeiten zur Entwicklung von Elastographiephantomen vor. Verschiedene flexibel formbare Materialsysteme werden durch Zusammensetzung und Füllstoffe verändert. Die Charakterisierung der elastischen Eigenschaften der verwendeten Kunststoffe erfolgt mit einer winkelabhängigen Messung der Schall-Laufzeit, womit die longitudinale und transversale Schallgeschwindigkeit in den Proben ermittelt werden können. Daraus werden Elastizitätsmodul und Poissonzahl im Frequenzbereich von 1 bis 4 MHz bestimmt. Obwohl medizintechnisch motiviert, geben unsere Untersuchungen auch Impulse für die Materialcharakterisierung von Kunststoffen mit Ultraschall im industriellen Bereich.

Adaptives TFM bei unebenen Prüfteiloberflächen

S. Kierspel¹

¹ KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau, Wuppertal

Der Vortrag befasst sich mit der Weiterentwicklung der Total Focussing Methode (TFM) für unebene Prüfteiloberflächen. Mit dem „adaptiven“ TFM (ATFM) wird die Oberflächenstruktur von Prüfteilen vermessen und das Ergebnis in die Berechnung der Position von Anzeigen innerhalb des Prüfteiles mit einbezogen. Auf diese Weise können die Vorteile von TFM (lagegerechte Anzeige von Reflektoren, optimale Empfindlichkeit im gesamten Prüfbereich) auch auf Prüfteile mit unebener Bauteiloberfläche übertragen werden.

3D-SAFT auf vorverarbeiteten Ultraschallsignalen – schneller messen bei verbesserter Auflösung

J. Kirchhof¹, F. Krieg^{1,2}, F. Römer¹, A. Ihlow¹, A. Osman², G. Del Galdo¹

¹ TU Ilmenau; ² Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Die klassische Synthetic-Aperture-Focusing-Technique (SAFT) erlaubt eine fokussierte Abbildung von Defekten durch Aufnahme vieler A-Bilder an verschiedenen bekannten Positionen. In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit sich Verbesserungen bei SAFT durch Vorverarbeitung der A-Bilder mittels Entfaltung erreichen lassen. Dabei wird z. B. durch Orthogonal Matching Pursuit (OMP) aus der geträgerten Pulsfolge eine Menge von Dirac-Impulsen erzeugt. Das so vorverarbeitete Signal erfordert nun einerseits aufgrund der wenigen von Null verschiedenen Samples einen wesentlich geringeren Rechenaufwand beim SAFT, im gleichen Zug wird eine Erhöhung der Ortsauflösung erreicht. Denkbar erscheint dabei auch, die Vorverarbeitung direkt in neuartigen Prüfköpfen durchzuführen, um SAFT in Echtzeit in den Messvorgang zu integrieren. Die vorgeschlagene Signalverarbeitung wird exemplarisch mittels CIVA-Simulationen verifiziert.

Klebeprüfung von Frontscheiben mit der Phased-Array-Technologie

H. Küchler¹

¹ Olympus Deutschland, Hamburg

Aufgabenstellung:

Frontscheiben an Schienenfahrzeugen sind hohen Druck- und Zugbelastungen ausgesetzt. Die Prüfung der Verklebung ist mittels Sichtprüfung nicht möglich, weil die Scheibe an der Klebestelle geschwärzt ist. Die Phased Array Technologie bietet hier eine schnelle und einfache Möglichkeit, diese Klebung zu prüfen.

Ultraschall – Phased Array Prüfung

Lösung:

Eine Ultraschallwelle läuft durch die Frontscheibe und dann weiter in die Klebmasse. Berührt der Kleber die Scheibe nicht, so wird die Schallwelle komplett reflektiert. Läuft die Schallwelle weiter in den Kleber ist an der Übergangsstelle die Reflektion kleiner. Dieser Amplitudenunterschied wird im C-Bild farblich dargestellt.

Als Prüfgerät wurde ein Ultraschall-Phased-Array-Prüfgerät Omniscan SX und ein 3,5 MHz – Linienelementprüfkopf mit 64 Elementen genutzt.

Bewertung der Anzeigen:

Berührt der Kleber die Frontscheibe, so wird diese Fläche im C-Bild blau dargestellt. Ist dies nicht der Fall, erscheint diese Fläche im C-Bild rot und zeigt damit deutlich die Nichtklebung, da hier eine Direktreflektion vorliegt.

Dokumentation:

Die Daten können als C-Scan oder als Bericht im HTML - Format abgelegt werden.

Fazit:

- Schnelle einfache Prüfung der Klebung
- Dokumentation der Prüfung als C-Scan oder Report
- Deutlicher Zeitgewinn bei der Prüfung
- Durch das vereinfachte Handling ist der Ultraschallprüfer zu keiner Zeit überfordert
- Aufgrund der Darstellung des gesamten Prüfumfanges in einem Datensatz gehen keine relevanten Informationen verloren. Auch Jahre später können diese Prüfdaten für Vergleiche herangezogen werden.

Verfahren zur akustischen Detektion von Schadinsekten bei der Getreide- und Saatgutlagerung

U. Lieske¹, F. Duckhorn¹, C. Tschöpe¹, P. Harig², M. Pallmer², O. Röder³, E. Röder³

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² WTK-Elektronik, Neustadt; ³ EVONTA-Service, Radeberg

Getreide bildet eine der wichtigsten Grundlagen für die menschliche und tierische Ernährung. Wie jedes andere pflanzliche Produkt, so ist jedoch Getreide auch Nahrungsquelle für zahlreiche Insekten, die während des Pflanzenwachstums und der Lagerung das Korn befallen können. Jährlich werden etwa 10 % der weltweiten Getreideernte durch Schadinsekten vernichtet.

In der Praxis wird der Befall mit Schadinsekten im Rahmen von Stichproben durch visuelle Inspektion, Sieben oder Aufschwemmen der Getreidekörner dokumentiert. Es werden auch einfache Handgeräte mit Mikrofon und Verstärker eingesetzt, um Schädlingsbefall durch Fressgeräusche manuell zu erkennen.

Eine frühzeitige Diagnose des Auftretens von Vorratsschädlingen ist für die Einleitung von Gegenmaßnahmen und die Begrenzung des Schadens von großer Bedeutung.

Das hier vorgestellte Verfahren bietet die Möglichkeit, die auftretenden Geräusche automatisiert zu analysieren, und ermöglicht so eine schnelle und zuverlässige Erkennung von Schadinsekten.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die auftretenden Geräusche von Schadinsekten in den verschiedenen Entwicklungsstadien analysiert und eine geeignete Signalerfassungshardware für den Feldeinsatz entwickelt. Mit den implementierten Signalverarbeitungsalgorithmen der akustischen Mustererkennung erfolgt die automatisierte Auswertung und Klassifizierung der Schädlingsgeräusche.

Das Verfahren, die Hardware und die Messergebnisse werden vorgestellt.

Sende-Empfangs-Prüfköpfe auf Ferroelektret-Basis für Luftultraschall-Anwendungen

F. Schadow¹, M. Gaal¹, J. Bartusch¹

¹ BAM, Berlin

Leichtbaustrukturen aus Verbundwerkstoffen stellen einen immer größeren Anteil im Flugzeug- und Automobilbau dar. Hiermit steigt die Nachfrage nach zuverlässigen, zerstörungsfreien Prüfmethode, welche an solche Strukturen angepasst sind. Besonders Luftultraschall (LUS) eignet sich für diese Aufgabe, da hier kein Koppelmedium benötigt wird. Derzeit wird für diese Methode jedoch oft ein beidseitiger Bauteilzugang für eine Prüfung in Durchschallung vorausgesetzt. Handelsübliche Prüfköpfe für Luftultraschallanwendungen nutzen zudem meist Anpassschichten um den Impedanzunterschied zwischen Schwinger und Luft zu reduzieren. Sowohl Signal-Rausch-Abstand als auch die Bandbreite der resultierenden Prüfköpfe ist für viele Anwendungen jedoch nicht ausreichend. Durch den Einsatz von Ferroelektriten wie zellulärem Polypropylen (zPP) kann hingegen vollständig auf Anpassschichten verzichtet werden. Hierbei handelt es sich um polarisierte, zelluläre Polymerschichten mit sehr geringer Dichte, Steifigkeit und Schallgeschwindigkeit. In diesem Beitrag stellen wir drei verschiedene Sende-Empfangs-Prüfköpfe vor, welche auf zellulärem Polypropylen basieren. Anhand von Schallfeld, Signal-Rausch-Abstand und Sendepiegel werden diese Prüfköpfe charakterisiert. Die Ergebnisse werden mit den Ergebnissen von Referenzprüfköpfen ohne Sende-Empfangs-Charakteristik verglichen. Bei den Referenzprüfköpfen werden sowohl handelsübliche LUS-Prüfköpfe, sowie bisher entwickelte Prüfköpfe aus zellulärem Polypropylen berücksichtigt.

Flexibler Einsatz von Ultraschall-Prüftechniken am Beispiel des Kernmantels

P. Scharpenberg¹, T. Hötling¹

¹ Westinghouse Electric Germany, Mannheim

Detektion und Tiefenbestimmung von interkristalliner und strahlungsbeeinflusster Spannungsrissskorrosion (IGSCC/IASCC) mit Phased Array und TOFD.

Kombinierte Ultraschallprüfung von Rund- und Sechskant-Stangen

S. Standop¹, E. Szafarska¹, D. Koers¹, J. Bolten¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

Die Anforderungen an die Güte von Stangenmaterial – vor allem in der Luftfahrt- und Automobilbranche – steigen stetig an und somit auch der Bedarf nach automatisierter Ultraschallprüfung in der Fertigung. Rund- und Sechskant-Stangen bilden dabei die häufigste Form des Halbzeugs. Aufgrund ähnlicher Durchmesser- und Längenbereiche finden sich in vielen Werken gemeinsame Produktionslinien. Entsprechend gibt es ein Bestreben die entsprechenden Prüflinien zu vereinen, um das gesamte Produktsortiment mit geringem Aufwand und hohem Durchsatz zu prüfen.

Die Prüfaufgabe unterscheidet sich jedoch wesentlich zwischen Rund- und Sechskant-Material, da bei letzterem die exponierten Kanten einer erhöhten Beanspruchung im Endprodukt ausgesetzt sind. Neben der möglichst vollständigen Volumenprüfung ist damit die Prüfung der Oberfläche bis in die Ecken von besonderem Interesse.

GE Inspection Technologies bedient diese erweiterten Anforderungen durch Erweiterung bewährter Phased-Array-Prüfsysteme in Tauchtechnik (ROWA). Mittels Software-gesteuerter, adaptiver Delay-Berechnung und Blendenwahl kann das Schallfeld an die neue Geometrie des Prüfkörpers angepasst werden. Gleichzeitig bleiben die bewährte Flexibilität hinsichtlich des Durchmesserbereichs und die Auflösung auch bei Sechskant-Stangen erhalten, wobei Prüfgeschwindigkeiten von bis zu 1,5 m/s erreicht werden können. Das modulare Konzept der Anlagen erlaubt schnellste Umrüstzeiten, ohne wiederkehrende Anpassungen an Hard- und Software vornehmen zu müssen, und bietet die Möglichkeit zur Nachrüstung bestehender Prüfsysteme.

Fortschritte beim Einsatz von kommerziellen Robotern in der Ultraschall-NDT

S. Gripp¹, W. De Odorico¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Alzenau

Bei der Ultraschall-ZfP in automatisierten Prüfanlagen für die Fertigungskontrolle werden seit geraumer Zeit kommerziell erhältliche Knickarmroboter eingesetzt.

Wenn auch diese Anwendung nahe zu liegen scheint, so gilt es doch eine Reihe technischer Probleme zu meistern, die aus den spezifischen Anforderungen der US-Prüftechnik resultieren, und den Einsatz von Knickarmrobotern vor deutliche Probleme stellen. Dazu gehören insbesondere die Positionsgenauigkeit, die Triggererzeugung und der Signal-Stör-Abstand. Positionsgenauigkeit: Insbesondere bei Anwendung der Durchschallungsmethode müssen zwei Wasserdüsen (sog. „Squirter“) mit hoher Genauigkeit koaxial und senkrecht zur Bauteiloberfläche geführt werden. Da bei diesen sog. Doppelroboteranlagen keine mechanische Kopplung zwischen den Werkzeugen besteht, muß eine hochdynamische und hochgenaue Steuerung für ausreichende Koaxialität sorgen.

Triggererzeugung: Die UT-Technik verwendet einen punktförmig arbeitenden Messprozess, der entlang von mäanderförmigen Prüfspuren an äquidistanten Stützpunkten ausgelöst (getriggert) wird. Es wird also eine Triggerung benötigt, um den Messvorgang je Punkt auszulösen. Um beim Überqueren einer Fehlstelle in entgegengesetzten Richtungen auch die Ränder korrekt abzubilden, ist es von besonderer Wichtigkeit, dass die Position, an der der Messvorgang getriggert wurde, hinreichend äquidistant ist, und mit derselben Genauigkeit erzeugt wird, mit der die räumliche Positionierung vorgenommen wurde.

Signal-Stör-Abstand: Bekanntlich sind die an Püfköpfen empfangsseitig entstehenden Messsignale hochohmige Spannungen im Bereich weniger Millivolt, und ferner in Frequenzbändern im MHz-Bereich angesiedelt. Die Motorantriebe von Knickarmrobotern aber werden üblicherweise mit Schaltnetzteilen und hohen Antriebsspannungen betrieben, was besondere Maßnahmen zur Signalschirmung erforderlich macht.

Zu diesen und weiteren Aspekten werden Anwendungsbeispiele aus der jüngsten Vergangenheit gezeigt.

Mehrkanalige Ultraschallprüfköpfe zur koppelmittelfreien Prüfung

A. Mück¹

¹ SONOTEC, Halle (Saale)

Die koppelmittelfreie Prüfung von Bauteilen mit Hilfe von Luftultraschall hat insbesondere durch die Nutzung neuer Werkstoffe in den vergangenen Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Dem großen Vorteil des Verzichts auf ein Koppelmittel stehen Nachteile wie die hohen Übertragungsverluste gegenüber.

Zur Erhöhung der Sensitivität und zur Verbesserung des lateralen Auflösungsvermögens werden deshalb seit 20 Jahren fokussierende Luftultraschall-Prüfköpfe auf Basis von Piezokompositen eingesetzt. Die Herstellung gekrümmter Piezoelemente mit passender Transformationsschicht ist aufwendig und durch eine große Streuung der Eigenschaften gekennzeichnet. Aufgrund der Grenzen der Formbarkeit der Piezokomposite ist die Fokussierung nur in einem eingeschränkten Bereich möglich. Ein Ausweg ist die elektronische Fokussierung mit Hilfe der Phased-Array-Technik.

Vorgelegt werden mehrkanalige Luftultraschall-Prüfköpfe. Auf die Elektrode des 1-3-Piezokomposit-Schwingers ist ein Annular Array aufgebracht, wobei die Fläche der einzelnen Elemente gleich groß ist. Die Anpassung an Luft erfolgt über eine Schicht aus einem Glas-hohlkugel-Epoxidharz-Schaum. Eigenschaften wie die relative Sensitivität und das Schallfeld werden mit fokussierenden Einschwinger-Prüfköpfen verglichen. Anhand von Untersuchungen an Referenz-Prüfkörpern werden Vorteile und Einsatzgrenzen dargestellt.

Gegenüberstellung von Wirbelstromprüfung und aktiver Thermografie an CFK-Versuchskörpern

R. Pohl¹, R. Casperson¹, C. Maierhofer¹, J.P. Müller¹, M. Pelkner¹

¹ BAM, Berlin

In vielen Bereichen der Technik haben Konstruktionen unter Einsatz von CFK-Bauteilen und Komponenten die klassischen Metalle abgelöst. Die zerstörungsfreie Prüfung solcher CFK-Bauteile gewinnt somit zunehmend an Bedeutung. Ein mögliches Prüfverfahren ist dabei die Wirbelstromprüfung. Aufgrund der relativ geringen elektrischen Leitfähigkeit von CFK-Komponenten kommt hierbei häufig die sogenannte HF-Wirbelstromprüfung zum Einsatz. In verschiedenen Untersuchungen der BAM konnten jedoch auch mit Wirbelstromprüfsystemen in niedrigen Frequenzbereichen gute Ergebnisse erzielt werden. Um die Möglichkeiten und Grenzen dieser konventionellen Wirbelstromprüfung auszuloten, wurden Messungen an Versuchskörpern durchgeführt, welche bereits bei der Validierung der Blitz- und Lock-in-Thermografie für neue Verfahrensnormen erfolgreich eingesetzt wurden. Ein Typ dieser Versuchskörper sind Flachproben aus CFK von 6 mm Dicke. In diesen wurden Flachbodenbohrungen mit Durchmessern zwischen 4 mm und 24 mm eingebracht. Die Restwandstärken liegen zwischen 0,06 mm und 3,66 mm. Ein weiterer Typ CFK-Versuchskörper hat die Geometrie eines Stufenkeiles. Bei verschiedenen Stufenkeilen sind Wanddicken zwischen 1,4 mm und 5,4 mm realisiert worden. In diesen wurden künstliche quadratische Delaminationen mit Kantenlängen zwischen 2 mm und 20 mm eingebracht. Die Ergebnisse der Wirbelstromprüfung werden denen der aktiven Thermografie gegenübergestellt. Zur Nachbildung von Kompositwerkstoffen wurden die flachen Versuchskörper mit geeigneten Versuchskörpern aus Aluminium und Stahl kombiniert. Die Wirbelstromprüfungen wurden mit einem handelsüblichen Prüfgerät im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 3 MHz und entsprechend angepassten Sensoren durchgeführt.

Wasserbasierte fluoreszierende Eindringmittel

P. Classen¹

¹ Chemetall, Frankfurt a. Main

Farbeindringmittel bestehen aus einem oder mehreren Lösemitteln, dem Farbstoffsystem, Netzmitteln und Additiven. Bis dato werden vor allem Lösemittel auf Petroleum- oder Glykolbasis eingesetzt, welche einen negativen Einfluss auf die Umwelt haben und einen entsprechenden Aufwand in der Abwasserbehandlung. CHEMETALL hat ein gänzlich neues wasserbasiertes Eindringmittel-System auf Basis von Mikroemulsionen auf den Markt gebracht und möchte in dem DGZfP-Vortrag über erste Ergebnisse aus dem Markt als auch über entsprechende Ergebnisse bei der Abwasserbehandlung berichten.

Entwicklung einer integrierten Strukturüberwachung für Faserverbundbauteile im Automobil

K. Tschöke¹, T. Gaul¹, F. von Dungern², S. Linke², H. Wessel-Segebade³

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² INVENT, Braunschweig; ³ DGZfP, Berlin

Während der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Automobil hochattraktiv erscheint, sind einige Fragen noch ungeklärt. Eine dieser Fragen betrifft die Überwachung der Betriebssicherheit. Faserverbundwerkstoffe weisen ein anderes Schadensverhalten als bisherige Werkstoffe auf. Durch Stoßbelastung können Defekte entstehen, die durch visuelle Inspektion nicht erkennbar sind. Im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts CarbonSafe wird eine integrierte Lösung entwickelt, die die strukturelle Integrität von Bauteilen überprüfen kann.

Im Projekt wird ein aktives SHM-Verfahren zur werkstattseitigen Überwachung von Faserverbundwerkstoffen entwickelt. Das Messsystem ist dabei in das Bauteil integriert. Die Bewertung der Struktur erfolgt über ein extern angeschlossenes Diagnosegerät, welches in den Werkstattbetrieb integriert werden soll. Die Kommunikation zwischen Diagnosegerät und Sensorik erfolgt über ein Bussystem, wodurch das SHM-System im gesamten Fahrzeug mit einem Gerät gesteuert werden kann. Zusätzlich zur Strukturdiagnose wird eine Diagnose der Piezokeramik durchgeführt. Dabei werden beschädigte oder entkoppelte Sensoren identifiziert und von der Strukturbewertung ausgenommen.

In Laboruntersuchungen wurden piezoelektrische Wandler verschiedener Geometrie und Bauart hinsichtlich ihrer Eignung für automobiltypische Strukturen untersucht. Anschließend wurde die Funktionsfähigkeit eines SHM-Verfahrens sowohl simulationsgestützt als auch durch Laborversuche nachgewiesen. Die Erprobung des Systems wird durch umfangreiche Testfahrten an speziell ausgerüsteten Fahrzeugen ergänzt. Parallel dazu werden Schulungen und entsprechende Unterlagen erarbeitet, in die die Erfahrungen der Entwicklung und der Testfahrten einfließen. Diese Schulungsunterlagen dienen dazu, das entwickelte System zügig in die industrielle Anwendung zu transferieren und dessen Einsatz in Werkstätten durch geschultes Personal zu ermöglichen.

Hochmobiles System zur Ultraschall-Eigenspannungsmessung an Eisenbahnrädern

H.-R. Herzer¹, M. Becker¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Die Überprüfung des Eigenspannungszustandes von Eisenbahnrädern gehört seit Mitte der 1990er Jahre zum Standardverfahren im Rahmen der schweren Instandhaltung von klotzgebremsten Rädern. Das am Fraunhofer IZFP entwickelte UER-System ermöglicht seit nunmehr zwanzig Jahren die vollautomatische Messung und Bewertung des Eigenspannungszustandes und wird seither kontinuierlich weiterentwickelt, um dem technischen Fortschritt und den sich wandelnden Anforderungen seitens der Überprüfung Rechnung zu tragen.

Die hier vorgestellte Variante des UER-Systems ist der neue Maßstab für portable vollautomatische Eigenspannungsmessung hinsichtlich seiner Mobilität und autonomer Einsatzzeit im Dauerbetrieb. Der Vergleich zum Standard-UER zeigt, dass die gesamte Stromversorgung sowie der PC zur Bedienung und Datenverarbeitung im tragbaren Manipulator integriert sind, wodurch das System lediglich aus der Mess-Manipulationseinheit und dem dazugehörigen Referenzständer besteht. Daher hatte im Rahmen des Gehäuse-Redesigns die Gewichtseinsparung durch den Einsatz von Polymerbauteilen unter Erhaltung der mechanischen Stabilität und Medienbeständigkeit höchste Priorität. Hierzu sind alle bisherigen Bauteile kunststoffgerecht umkonstruiert und an die veränderten mechanischen Anforderungen einer integrierten Stromversorgung sowie der integrierten PC-Einheit angepasst worden. Die gesamte Elektronik wurde hinsichtlich ihrer Energieeffizienz optimiert und mit an den Verbrauch angepassten Lithium-Ionen Zellen versehen. Dadurch wurde die volle Funktionalität des Standard-UER Systems erhalten und dennoch für einen schnellen und räumlich hochflexiblen Anwendungsfall umgerüstet, der in einem modernen Arbeitsumfeld immer mehr an Bedeutung gewinnt.

Grundlagen des NIDIT-Verfahrens für die nicht-ionisierende Durchstrahlungsprüfung

J.H. Hinken¹, C. Ziep¹

¹ FI Test- und Messtechnik, Magdeburg

Eines der leistungsfähigsten Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung ist die Röntgen-Durchstrahlung. Insbesondere die unmittelbare, also direkte Bildgebung, die hohe Ortsauflösung und die Möglichkeit für eine Tomographie sind attraktiv. Jedoch sind Röntgenstrahlen ionisierend und damit gefährlich. Hohe und damit aufwändige Sicherheitsmaßnahmen sind erforderlich und schränken den Einsatz in der Praxis ein.

Wenn die Prüfobjekte aus elektrisch isolierendem Material bestehen und die hohe Ortsauflösung der Röntgenprüfung nicht zwingend erforderlich ist, bietet sich als Alternative die direkt bildgebende Prüfung mit Mikrowellen an. Mikrowellen sind nicht ionisierend und damit ungefährlich. Deswegen ist z. B. die gefahrlose Nutzung von Mobilfunktelefonen möglich.

Aus dem EMIR-Verfahren (ElectroMagnetic and InfraRed) – primär zur Vermessung der Richtcharakteristik von Antennen verwendet – wurde das NIDIT-Verfahren (NonIonizing Direct Imaging Testing) entwickelt. Dabei wird eine Mikrowellen- oder THz-Leistung über eine Antenne gleichmäßig verteilt auf ein Prüfobjekt gestrahlt, das elektrisch isolierend ist. Ein Großteil der Leistung tritt in das Prüfobjekt ein und wird dort durch gegebenenfalls vorhandene Fehler beeinflusst, so dass sie ungleichmäßig verteilt auf der Rückseite das Prüfobjekt verlässt. Eine dort platzierte, Mikrowellen absorbierende Folie erhält eine entsprechend ungleichmäßige Erwärmung, die von einer Wärmebildkamera oder einem angeschlossenen Computer unmittelbar als Bild zur Anzeige gebracht wird. Ungleichmäßigkeiten geben Informationen über die Fehler im Prüfobjekt.

Hier wird gezeigt, wie störende Hintergrundsignale, die durch das Messsystem selbst oder durch die Sollgeometrie des zu prüfenden Bauteils erzeugt werden, eliminiert werden können. Dazu wird vom aktuellen Bild das Bild eines Referenzsignals subtrahiert. Es werden Beispiele gezeigt für die Fälle, dass das Referenzsignal aus einem Gutteil, einem benachbarten, unmittelbar vorhergehenden Prüfbereich bei der Inline-Prüfung nach einer Extrusion oder einer benachbarten Periode einer gekachelten Struktur gewonnen wurde. In allen Fällen wird das Signal-zu-Stör-Verhältnis erheblich erhöht.

Weiterhin wird gezeigt, wie das Verfahren zu einem Reflexionsverfahren modifiziert werden kann.

Automatisierung für CT Anwendungen Integration von industriellen CT Systemen in die Produktionslinie

M. Wüstenbecker¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Ahrensburg

Die Computer Tomographie hat sich zu einem etablierten industriellen Prüfverfahren entwickelt. Die CT Prüfung geht in den letzten Jahren immer mehr von der einzelnen Stichproben Überprüfung hin zur 100%-Prüfung aller Bauteile in einer Produktionslinie. Dieses stellt neue Herausforderungen an die Hersteller bezüglich der geforderten Schnittstellen und Layouts von CT Systemen.

Aufgezeigt werden mögliche Prozessabläufe mit verschiedenen Zielsetzungen bis hin zur komplett vollautomatisierten Integration in eine Produktionslinie.

Weiterhin werden auch die Möglichkeiten der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, in Hinsicht auf die Be- und Entladung sowie Sortierung der Prüfobjekte dargestellt.

Ultraschall-Vorspannkraftmessung über den gesamten Lebenszyklus von Verschraubungen

M. Becker¹, N. Groß¹, H.-R. Herzer¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Vorgespannte Schraubenverbindungen stellen sowohl bei der Herstellung besondere Anforderungen an die Einstellung der Vorspannkraft, als auch im Einsatz an den Erhalt und die Überwachung ebendieser. Hierbei handelt es sich häufig um sicherheitskritische Verbindungen, die im Falle eines Versagens ein hohes Gefährdungspotential aufweisen.

Hier hält die Bestimmung der Vorspannkraft mittels Ultraschalllaufzeitmessung verschiedene Ansätze bereit, die es einerseits ermöglichen bereits bei der Herstellung von Verschraubungen die vorgegebenen Vorspannkraft mit hoher Präzision einzustellen und andererseits bestehende Verschraubungen im eingebauten Zustand auf Vorspannkraftverluste zu überprüfen. Am Fraunhofer IZFP entstanden bisher eine Vielzahl an ultraschallgesteuerten Online-Schraubersystemen, die ein hochpräzises Vorspannen von Verschraubungen der Größen M10 bis M72 und damit verbundenen Komponenten in der Produktion ermöglichen. Darüber hinaus befindet sich aktuell eine Zwei-Moden-Methode mitsamt der zugehörigen Ultraschalltechnik in der Entwicklung, die ohne Vorkenntnis der Ausgangslänge der Schraube den Nutzer in die Lage versetzt Vorspannkraft unbekannter Schrauben zu ermitteln. Dies ist im Hinblick auf Dienstleister von großer Bedeutung, da Produktion und Instandhaltung in vielen Industrie- und Wirtschaftsbereichen von verschiedenen Unternehmen durchgeführt werden, die keine bauteilspezifischen Daten austauschen.

Hier bietet der am IZFP entwickelte umfassende Ansatz die Möglichkeit Schraubenverbindungen über den gesamten Lebenszyklus zerstörungsfrei zu überwachen. Durch die verfügbaren On- und Offline-Methoden werden US-gestützte Einstellung der Vorspannkraft, wiederkehrende Überprüfungen sowie deren dauerhaftes Monitoring mit entsprechender Prüfhard- und Software aus einer Hand ermöglicht. Darüber hinaus sind kundenspezifische Mess- und Prüfsysteme durch jahrzehntelange Erfahrung in der Ultraschallspannungsmessung möglich.

Schallemissionsprüfung – Gegenwart und Zukunft!

H. Schubert¹, M. Löhrl¹, R. Dix¹

¹ GMA-Werkstoffprüfung, Düsseldorf

Die Nutzung der Schallemission als Prüfverfahren gewinnt durch die neuen DIN EN Normen, den langjährigen Erfahrungen und aufgrund der Zuverlässigkeit immer mehr an Bedeutung, Anerkennung und Akzeptanz. Die GMA-Werkstoffprüfung GmbH ein Member of Mistras Group möchte mit dem Poster über neue Systemkomponenten und über neue Anwendungen im Bereich der Schallemissionsprüfung (SEP) berichten.

Zur Mistras gehört nicht nur die GMA sondern auch Physical Acoustics Ltd., die sowohl eigene Schallemissionsgeräte und die dazugehörigen Systemkomponenten, wie z. B. Sensoren, Vorverstärker etc., herstellt und verkauft als auch entsprechende spezielle Dienstleistungen und Prüfungskonzepte anbietet.

Das Anwendungsspektrum der SEP erstreckt sich über eine relativ einfache Leckage-Überwachung, über die etwas aufwendigere Begleitung von Gas- und Wasserdruckproben bis hin zur komplexen kontinuierlichen Überwachung gesamter Anlagenkomponenten wie z. B. (Druck-) Behälter, Reaktoren oder Rohrleitungssysteme. Auch findet die SEP immer mehr Bedeutung im Bereich der Offshore-Windkraftanlagen sowie bei der Überwachung von Brücken und Tunneln. Je nach Anwendung und Einsatzgebiet kommen somit verschiedene Prüfsysteme und Sensoren zum Einsatz, um die unterschiedlichen Schallemissionsquellen (Schadensmechanismen) sicher und reproduzierbar zu detektieren und zu orten. Die Prüfung mit Hilfe der Schallemission kann zu einer Vielzahl von möglichen Ergebnissen (Nutz- und Störsignale) führen. Daher ist die richtige Auswahl des Prüfsystems und die richtige Analyse und Interpretation der aufgenommenen Signale entscheidend für den Erfolg oder Misserfolg der Prüfung. Hierfür werden langjährige Erfahrungen und spezielle Softwarekomponenten und Datenbanken benötigt.

Aufgrund der kontinuierlichen anwendungsspezifischen Weiterentwicklungen durch die Mistras Group von eigenen Systemkomponenten sind Prüfungen in explosionsgefährdete Bereichen sowie Prüfungen an heißen und sehr kalten Prüfobjekten oder schlichtweg besondere Anforderungen an die Software keine Ausschlusskriterien für eine erfolgreiche Schallemissionsanwendung. Alles ist nur eine Frage der richtigen Auswahl und gezielten Anwendung der Prüftechnik sowie der Kompetenz und die bereits gesammelten Erfahrungen des entsprechenden Anwenders.

Miniaturisiertes System zur intelligenten Signalverarbeitung

C. Tschöpe¹, F. Duckhorn¹, P. Blüthgen¹, C. Richter¹, G. Papsdorf², M. Wolff³

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² SINUS Messtechnik, Leipzig; ³ BTU Cottbus-Senftenberg

Viele technische Anwendungen liefern Signale, die bewertet werden müssen, sei es zur Gütebewertung von Produkten direkt nach dem Herstellungsprozess oder bei der Zustandsüberwachung von Verschleißteilen. Bereits auf vergangenen Tagungen wurden Methoden der akustischen Mustererkennung vorgestellt, die hervorragend für die anfallenden Prüfaufgaben geeignet sind.

Im Rahmen eines Verbundprojekts hat das Fraunhofer IKTS nun ein Hardware-Modul entwickelt, das eine mobile Datenerfassung und -auswertung ermöglicht. Die verwendeten Algorithmen basieren auf modernsten Methoden der künstlichen Intelligenz, wie Mustererkennung und Maschinelernen. Das Modul ist individuell für verschiedenste Prüfaufgaben anpassbar und zur Überwachung von Bauteilen, Materialien, Maschinen und ganzen Anlagen geeignet. Darüber hinaus ist es auch zur Auswertung nichttechnischer Signale (Sprache, Musik, Biosignale) anwendbar.

Wir möchten die Technologie vorstellen und die Ergebnisse diskutieren.

Annular Phased Array für die Ablösung der Mehrzonenprüfung von Flugzeugturbinenscheiben

M. Barth¹, T. Beggerow², M. Rjelka¹, W. Spruch², B. Köhler¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² Büro für Technische Diagnostik, Brandenburg

Die Anforderungen an die Materialqualität in verschiedensten Bereichen nehmen stetig zu. Insbesondere müssen Turbinen für Luft- und Raumfahrtanwendungen enormer Beanspruchung (z. B. hohe Temperaturen, extreme Zentrifugalkräfte) widerstehen können, welche u. a. den Einsatz sogenannter Superlegierungen erfordern.

Da die Prüfalternativen entweder zu aufwendig sind, nicht die gewünschte Auflösung erreichen oder nur dünne Geometrien zulassen, ist die Standardmethode zum Auffinden kleiner Fehler in Turbinenscheiben die Ultraschallprüfung. Die höchste Auflösung erreicht man dabei im Fokus des Schallfelds, sodass der Prüfling meist mit einem fokussierten Prüfkopf abgetastet wird. Um nun noch eine gute Auflösung über die gesamte Tiefe zu erhalten, wird jede Scheibe mehrmals mit verschiedener Fokustiefe gescannt. Diese Technik wird als Multizonenprüfung bezeichnet. Des Weiteren wird der Schall in Medien mit grober Kornstruktur, wie etwa Titanlegierungen für den Bau von Turbinenscheiben, stark gestreut und verdeckt damit die Signale möglicher Defekte.

Ziele dieser Arbeit waren zum einen die Reduktion der Prüfzeit durch einen geeigneten Ersatz für die konventionelle Multizonenprüfung und zum anderen die Unterdrückung der Rückstreuung und Verbesserung der Auffindbarkeit kleiner Fehler bis zu 0,2 mm KSR.

Zur Lösung wurde hier ein gekrümmter Gruppenstrahler entwickelt. Die Krümmung fokussiert das Schallfeld in natürlicher Weise auf die Rotationsachse des Wandlers. Darüber hinaus kann die Fokustiefe durch gezielte Verzögerung der Schüsse der Einzelelemente variiert werden. Aufbauend auf EFIT-Rechnungen, wurden die optimale Krümmung der Wandlerfläche sowie Aufteilung der Einzelflächen dabei mit einem eigens für dieses Projekt entwickelten Simulationstool gefunden. Des Weiteren wurde ein Algorithmus implementiert, der durch die Anwendung eines Satzes an Verzögerungszeiten im Sendefall und mehrerer Focal Laws im Empfangsfall in verschiedene Tiefen fokussieren kann (Dynamic Depth Focusing) und somit eine verbesserte Tiefenauflösung und erhöhte Fehlerauffindwahrscheinlichkeit gegenüber konventioneller Prüfung bietet. Die entsprechenden Ergebnisse der Untersuchungen an Turbinenscheiben mit dem entwickelten Gruppenstrahler und der dynamischen Fokussierung werden hier dargestellt.

Einfluss der Aufbaurichtung und Porosität additiv gefertigter Stahl- und Aluminiumwerkstoffe auf lokale akustische Eigenschaften

J. Prager¹, E. Köppen¹, D. Gohlke¹, J. Tenkamp², A. Kampmann², S. Siddique², F. Walther²
¹ BAM, Berlin; ² TU Dortmund

Die Ultraschallprüfung additiv gefertigter Metallbauteile setzt eine genaue Kenntnis der lokalen akustischen Eigenschaften des Werkstoffs voraus. Insbesondere bei bildgebenden Rekonstruktionsverfahren müssen Anisotropien berücksichtigt werden, um eine ausreichende Abbildungsgenauigkeit zu erhalten. Es ist davon auszugehen, dass der lagenweise Aufbau des Werkstoffs beim selektiven Laserschmelzen eine bevorzugte Korn- und Defektorientierung (z. B. Poren) erzeugt, die sich in einer akustischen Anisotropie widerspiegelt. Zudem wird erwartet, dass die besonders feine Kornstruktur Einfluss auf die Schallschwächung hat. Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, die akustischen Eigenschaften verschiedener additiv gefertigter Stahl- und Aluminiumwerkstoffe zu analysieren und die Ergebnisse mit konventionell gefertigten Werkstoffen zu vergleichen. In die Untersuchungen wurden dazu verschiedene Stahl- und Aluminiumproben (1.2709, 1.4404, AlSi10Mg) mit unterschiedlicher Aufbaurichtung (0°, 45°, 90°) charakterisiert. Die Ergebnisse aus Tauchtechnik- und Kontakttechnikuntersuchungen zeigen eine signifikante Abhängigkeit der Schallausbreitungsgeschwindigkeit von der Aufbaurichtung. Zudem werden örtliche Schwankungen der gemessenen Schallgeschwindigkeiten und ein Einfluss auf die Schallschwächung sichtbar. Um den Einfluss innerer Poren auf die akustischen Eigenschaften zu bewerten, wurden für ausgewählte Aluminiumproben (AlSi10Mg) die räumliche und statistische Verteilung der Porosität in Abhängigkeit der Aufbaurichtung mittels Röntgen-Computertomographie ermittelt. Zudem wurden Zugversuche durchgeführt, um zu bewerten, ob die unterschiedlichen akustischen Eigenschaften und die Porosität die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Hierbei konnte für die AlSi10Mg-Legierung festgestellt werden, dass sowohl die Schallausbreitungsgeschwindigkeit als auch der Elastizitätsmodul (-4,4 %) und die Zugfestigkeit (-7,9 %) mit steigender Porosität (0,01 % vs. 0,08 %) abfallen.

Albrecht, R.	Di.1.A.3	Britzke, R.	Mo.3.B.1
Algernon, D.	Mi.2.C.3, P35, P42	Brosta, N.	Mi.2.B.3, P37
Amirkhanov, A.	Di.2.D.4	Bruch, T.	Mo.2.A.6
Amr, M.	Di.1.A.1, P8	Brunke, O.	Mi.1.C.3
Anderle, P.	P36	Bruno, G.	Mo.3.B.1, P30
Archinger, P.	Mo.2.A.13	Bühling, L.	Mo.2.A.5, P47
Asche, C.	Mi.3.A.1	Bulavinov, A.	Mi.2.A.2
Awerbuch, M.	Mi.1.B.5	Buschke, P.	Mo.2.A.6, Di.1.A.3
Baccouche, B.	Mi.2.A.4	Cabeza, S.	P30
Baker, G.	Di.1.B.1	Caldeira, R.	P39
Ballmann, H.	Mo.2.A.7	Casperson, R.	Mi.1.B.2, P60
Bär, S.	Mo.3.A.2	Cepus, V.	P48
Barth, E.	P16	Chichkov, N.	Di.2.A.1, Mi.2.B.4
Barth, M.	P69	Chmara, S.	Di.2.D.2
Bartholmai, M.	P6	Classen, P.	P61
Bartusch, J.	P39, P54	Conrad, C.	P1, P2
Becker, M.	Mi.2.B.3, P37, P38, P66	De Monte, M.	Di.1.A.4
Becker, S.	Mi.3.C.2, P26	De Odorico, W.	P58
Beggerow, T.	Di.2.C.3, P69	Del Galdo, G.	P50
Beißel, J.	Mi.2.B.2	Deresch, A.	Mi.1.C.1
Bellon, C.	Di.1.C.4	Deutsch, W.A.K.	Mo.2.A.8, Mo.3.C.2, P40
Benz, J.	Di.2.B.4	Dickebohm, D.	Mi.1.B.3
Berg, H.W.	Mo.3.A.4, P12	Diekjakobs, M.	Di.1.B.3
Berg, M.	P12	Dierker, T.	Di.2.D.1
Bertovic, M.	Mi.2.C.2, Mi.2.C.4, P13	Dillenz, A.	Di.1.B.2
Bessert, S.	Di.2.C.4	Dix, R.	P67
Beuße, F.	P47	Dobrovolskij, D.	Di.1.C.2
Blankschän, M.	Mi.1.B.4	Duckhorn, F.	P52, P68
Blüthgen, L.	Di.2.D.2	Düfert, U.	Mi.2.A.2
Blüthgen, P.	P68	Dugan, S.	Mi.2.C.1
Bodi, A.	Mo.2.A.4, Di.1.B.5	Ehlen, A.	Di.2.C.4
Boehm, R.	Di.1.C.3, Di.2.C.3	El Takach, H.	P40
Böhm, S.	Mo.3.C.3	Eppler, J.	Mi.3.B.4
Boin, M.	P30	Eschler, E.	Di.2.A.2
Boller, C.	Mo.3.B.3, P24	Essig, W.	Di.1.B.4, Mi.2.A.3, P41
Bolten, J.	P57	Evsevleev, S.	Mo.3.B.1
Bonitz, F.	Di.2.D.2	Ewert, U.	Mo.3.A.2, Di.1.C.4, Mi.1.C.1
Bonten, C.	Di.2.B.4	Falter, S.	Mo.2.A.6, Mi.3.A.1
Brackrock, D.	Di.1.B.1, Mi.1.B.4	Feikus, F.	Mo.3.C.4
Brandt, C.	Di.1.C.4	Feistkorn, S.	Mi.2.C.3, P35, P42, P43
Brauer, H.	Di.2.B.1	Fendt, K.	Di.1.C.3
Breit, M.	Mo.2.A.10	Fey, P.	Di.1.C.1, P44

Finckbohner, M.	Di.2.C.4	Herold, F.	Mi.1.C.5, P3, P9
Flade, P.	Di.2.D.2	Herzer, H.-R.	Mi.2.B.3, P37, P63, P66
Friederich, F.	Mi.2.A.4, Mi.3.C.3	Hess, A.	Di.2.B.3
Fröhlich, F.	Mi.2.A.3	Heuer, H.	Mi.2.A.1, Mi.3.A.3
Funke, H.	Mi.1.A.2	Heutling, B.	Mi.1.B.5
Füssel, U.	P22, P23	Hickmann, S.	Di.1.A.4
Gaal, M.	Di.1.B.1, Di.1.B.3, P39, P54	Hillger, W.	Mo.2.A.5, P47
Gabi, Y.	P1, P2	Hillmann, S.	Mi.3.A.3
Gänßmantel, A.	Mo.2.A.7	Hinken, J.H.	Di.2.D.3, Mi.3.C.1, P64
Ganster, M.	P5, P38, P45	Hinz, T.	P15
Gaul, T.	Mi.3.B.3, Mi.3.B.4, P62	Hippenstiel, F.	P40
Gelbrich, S.	Mi.1.A.2	Hirse Korn, S.	Di.1.C.2
Gensecke, K.	Mi.1.A.3	Hohendorf, S.	Mi.1.C.1
Gohlke, D.	P20, P21, P70	Holder, D.	Di.2.B.3
Goldammer, M.	Di.1.C.3	Hollandt, J.	P33
Gondrom-Linke, S.	Mo.2.A.1, P7	Holstein, R.	Di.1.D.5, Mi.2.C.2
Gopalan, A.	Mo.2.A.9	Holub, W.	Di.1.A.1, P8
Gorges, S.	Di.2.B.1	Homann, T.	P16
Götschel, S.	Mi.1.A.4, P16	Hornberger, P.	P10
Gower, M.	Di.1.B.1	Hosseini, S.M.H.	Di.1.B.1, Di.1.B.3
Grabowski, B.	P18	Hötling, T.	P55
Grager, J.-C.	Di.2.A.2	Huhn, H.	Mi.3.B.4
Gresslehner, K.-H.	Di.2.B.2	Ihlow, A.	P50
Grill, S.	Di.2.B.3	Ilse, D.	Mo.2.A.5
Grimm, J.	P1	Ininger, J.	Mo.2.A.6, Mi.2.B.2, P19
Gripp, S.	P58	Jaenisch, G.-R.	Di.1.C.4
Groß, N.	P66	Jahnke, P.	Di.1.A.1
Große, C.U.	Di.2.A.2, Mi.3.A.4	James, D.	Di.2.A.4
Gudat, J.	P7	Janßen, M.	Mi.3.B.1
Günther, A.	Di.1.D.5	Joas, S.	Mi.2.A.3
Gutschwager, B.	P33	Johann, S.	P6
Hagner, L.	Di.2.D.1, Mi.1.C.4	Jonietz, F.	Mi.1.A.3
Hanspach, G.	Di.2.C.1	Jonuscheit, J.	Mi.3.C.4
Harig, P.	P52	Joswig, M.	P40
Hecht, A.	Mi.1.B.1	Jung, D.	P40
Heckel, T.	Di.1.B.1, Di.2.C.3	Jungermann, R.	P40
Heinrich, M.	P18	Jüngert, A.	Mi.2.C.1
Heinrich, W.	Di.1.C.3	Jüttner, S.	Di.1.A.5
Heinze, A.	P46	Kaack, M.	P15
Hendorfer, G.	Di.2.B.2	Kämpgen, S.	Mi.2.B.4
Hentschel, M.P.	Mo.3.B.4	Kampmann, A.	P70

Kanzler, D.	Mi.2.C.2, Mi.2.C.4, P13	Kryukov, I.	Mo.3.C.3
Kappes, W.	Di.2.C.2	Küchler, H.	P51
Kaps, C.	P32	Kupsch, A.	Mo.3.B.1, Mo.3.B.4, Di.1.A.4
Kastner, J.	Di.2.D.4	Kyrychenko, M.	Mi.3.A.3
Kaszemeikat, T.	P20	Lammert, R.	Mi.2.C.1
Kattwinkel, R.	P40	Lange, A.	Mo.3.B.1
Keil, A.	Mi.3.C.2, P26	Lange, R.	Mi.1.A.2
Keil, J.	Mi.3.B.2	Laquai, R.	Mo.3.B.4, Di.1.A.4
Kenfenheuer, B.	Mi.2.B.2, P19	Lehmann, N.	Di.1.A.5
Kern, R.	P1, P2	Lenglachner, W.	P8
Kern, S.	P48	Lentz, S.	Mo.2.A.9
Kiel, M.	Di.1.B.5	Licht, R.	Mo.3.C.4
Kierspel, S.	P49	Lieske, U.	P52
Kinzel, A.	Mo.3.A.1	Lindemann, S.	Di.1.A.2
Kipp, A.	Mo.2.A.12	Link, R.	Mo.2.A.11
Kirchhof, J.	P50	Linke, D.	Di.1.D.3
Kirste, A.	P7	Linke, S.	P62
Klein, P.	P3	Lodeiro, M.	Di.1.B.1
Klein, V.	Mo.2.A.15	Löhr, M.	P67
Klier, J.	Mi.3.C.4	Lucas, M.	Mo.2.A.4
Koers, D.	P57	Lugin, S.	P14
Köhler, B.	Mo.3.B.2, P69	Luxbacher, G.	Di.1.D.1
Kolb, C.	P27	Lyamkin, V.	P30
Kolk, K.	Di.1.C.3	Maier, J.	Mi.3.A.1
Köllner, E.	Mi.1.B.5	Maierhofer, C.	Di.1.B.1, Mi.1.A.4, P60
Köllner, S.	Mi.1.B.5	Mandel, K.	Mi.1.A.2
König, S.	P33	Matern, D.	P9
Köppen, E.	P70	Mathiszik, C.	P22, P23
Koshelev, Y.	Di.1.D.2	Mayer, A.	Mo.3.B.2
Kotschate, D.	P20, P21	Mayr, G.	Di.2.B.2
Krahmer, F.	Di.2.A.4	Meier, M.	P10
Krankenhagen, R.	Di.1.B.1, Mi.1.A.3	Meinig, S.	P20
Kratz, B.	Mi.1.C.5	Menner, P.	Di.2.B.3
Kremling, S.	P27	Mieller, B.	P6
Kretzer, C.	Di.1.A.1, Mi.1.C.2, P8	Mitzscherling, S.	P16
Kretzer, J.	P40	Mohr, F.	Di.1.D.4
Kreutzbruck, M. ...	Di.1.B.2, Di.1.B.4, Di.1.C.1,	Molter, D.	Mi.3.C.4
.....	Di.2.B.4, Mi.1.A.1, Mi.2.A.3, Mi.2.B.1,	Monte, C.	P33
.....	Mi.3.A.2, P30, P31, P34, P41, P44	Mook, G.	P28
Krieg, F.	P50	Mooshofer, H.	Di.1.C.3, Di.2.A.2
Krüger, P.	Mi.2.A.1	Mosch, M.	Mi.3.A.4, Mi.3.C.1

Mosch, M.	Mi.3.A.4, Mi.3.C.1	Reimann, B.	Mi.1.C.4
Mück, A.	P59	Reinhardt, T.	P22
Müller, B.	Di.2.D.2	Renner, S.	P8
Müller, B.R.	Mo.3.B.1, Mo.3.B.4, Di.1.A.4	Reuther, A.	Mo.3.C.4
Müller, J.P.	Mi.1.A.4, P60	Richter, C.	P68
Müller, M.	P6	Richter, M.	Mi.3.C.1
Müller, T.	P2	Rieder, H.	Di.1.D.5, Di.2.A.1, Di.2.A.3, Di.2.A.4, Mi.2.C.1
Müller, T.	P5	Rieder-Dillhöfer, I.	Di.1.D.5
Munzke, D.	Mi.1.B.2	Riess, N.	Mo.2.A.11
Nellesen, J.	Mo.3.B.4	Rjelka, M.	Mo.3.B.2, P69
Nemitz, O.	Di.2.A.1, P15	Röder, E.	P52
Netzelmann, U.	Di.2.C.4	Röder, O.	P52
Neubeck, R.	Mi.3.B.3, Mi.3.B.4	Rohde, K.	Mo.2.A.13
Neuser, E.	Mo.2.A.2, Mi.1.C.3	Röllig, M.	Di.1.B.1
Nitsche, S.	Mi.1.A.2	Römer, F.	P50
Noack, M.	Mi.1.A.3	Rös, U.	Mo.2.A.15
Norton, D.	Mi.2.B.2, P19	Rösch, W.	Mo.2.A.13
Oeckl, S.	Mi.1.C.2	Rössler, G.	P43
Okulla, M.	Mi.2.A.2	Roth, P.	Mo.3.A.3
Orth, T.	Di.2.A.1, Mi.2.B.4, P15	Rühe, S.	Di.1.D.3
Osman, A.	P50	Rühle, M.	Mi.2.B.4
Oswald, J.	P5	Ruminski, N.	Di.2.D.2
Paetsch, O.	Mi.1.C.1	Salaberger, D.	Di.2.D.4
Pallmer, M.	P52	Schadow, F.	Di.1.B.1, P39, P54
Papsdorf, G.	P68	Schäfer, W.	Di.2.C.2
Pavlovic, M.	Mi.2.C.2, Mi.2.C.4, P13	Schäle, D.	Mo.3.C.2
Pelkner, M.	P30, P31, P60	Schaller, R.	Di.1.A.2
Pientschke, C.	P48	Scharpenberg, P.	P36, P55
Pinchuk, R.	Mi.2.A.2	Scherrer, M.	Mi.2.C.3, P35, P42, P43
Pittner, A.	P30	Schickert, M.	Di.2.D.2
Plank, B.	Di.2.D.4	Schmelting, J.	Mi.3.A.1
Pohl, R.	Mi.1.B.2, P60	Schmitte, T.	Di.2.A.1, Mi.2.B.4, P15
Poser, S.	P48	Schober, G.	P27
Prager, J.	P16, P70	Schreiner, N.	Mi.3.C.3
Preuß, M.	P48	Schubert, F.	Di.1.C.5, P4
Pushkarev, S.	P14	Schubert, H.	P67
Rabe, U.	P18	Schubert, L.	Mi.3.B.3, Mi.3.B.4
Rahammer, M.	Mi.1.A.1, Mi.2.B.1, P34	Schulenburg, H.	Mo.2.A.3
Rao, G.	Di.2.D.4	Schulenburg, L.	Mo.2.A.3
Rast, H.	Mo.3.C.2	Schulze, M.	Mi.2.A.1, Mi.3.A.3
Redmer, B.	Mi.1.C.1	Schuppmann, M.	Di.2.C.2
Rehpenning, P.-E.	Di.2.D.2		

Schwender, T.	Di.2.C.2, P45	Valeske, B.	Mo.3.C.4, Di.2.C.4, P14, P18
Seiler, G.	P24	Vinz, J.	P23
Shashev, Y.	Mo.3.B.1	Vogel, J.	Di.1.C.4
Siddique, S.	P70	Vogt, G.	Mo.3.C.1
Sigl, A.	P10	Vogt, S.B.	Mo.3.C.1
Simonin, Y.	P28	von Dungern, F.	P62
Skrotzki, B.	P31	von Freymann, G.	Mi.3.C.4
Smith, M.	P29	Vrana, J.	Di.1.C.3
Söhnchen, R.	Mo.2.A.14	Wackenhut, G.	Mi.2.C.1
Solodov, I.	Di.1.B.2, Mi.3.A.2	Walte, F.	Mo.3.C.4
Sölter, B.	P32	Walther, F.	P70
Sonntag, N.	P31	Waschkies, T.	Mo.3.C.4
Spies, M.	Di.1.C.2, Di.2.A.1, Di.2.A.3, Di.2.A.4, Mi.2.C.1	Weber, A.	Mo.2.A.13
Spruch, W.	Di.2.C.3, P69	Weber, S.	Mi.3.C.4
Standop, S.	P57	Weihnacht, B.	Mi.3.B.3, Mi.3.B.4
Stapf, C.	P29	Weikert-Müller, M.	Mo.3.C.4
Starke, P.	Mo.3.B.3, P24	Weingard, C.	P5
Steege, A.	P32	Weiser, M.	Mi.1.A.4, P16
Stegemann, R.	P30, P31	Weiß, R.	Mi.1.B.3, P17
Steinhausen, R.	Di.1.B.5, P48	Werner, M.	P27
Stocker, T.	Mi.1.C.2	Wessel-Segebade, H.	P62
Strangfeld, C.	P6	Wiedemann, J.	Di.2.D.2
Straß, B.	P1, P2	Wiedenmann, E.	Mi.1.A.3
Stroh, M.	P37	Wieder, F.	Di.1.C.4
Studmund, T.	Mi.1.A.5	Willems, F.	Di.2.B.4
Suppes, A.	Mi.1.C.3	Wimporoy, R.	P30
Szafarska, E.	P57	Wolf, M.L.	Mo.3.A.4
Szewieczek, A.	P47	Wolff, M.	P68
Tamm, J.	Mi.1.C.5	Wolter, B.	P1, P2
Tegtmeier, A.	Di.1.A.5	Wüstenbecker, M.	P65
Tenkamp, J.	P70	Zabler, S.	P10
Theado, H.	P45	Zhang, W.	Mo.2.A.6, Mo.2.A.15, Di.1.A.3
Thellmann, A.-H.	Di.2.B.3	Ziegler, M.	Mi.1.A.5
Thiel, E.	Mi.1.A.5	Ziep, C.	Di.2.D.3, Mi.3.C.1, P64
Tillmann, W.	Mo.3.B.4	Ziolkowski, M.	Di.2.B.1
Trappe, V.	Di.1.A.4	Zscherpel, U.	Mo.3.A.2
Tschaikner, M.	Mi.1.C.1	Zschetzsche, J.	P22, P23
Tschöke, K.	Mi.3.B.4, P62		
Tschöpe, C.	P52, P68		
Uebrig, H.-J.	Mi.1.B.5		
Ulanov, A.	Di.2.D.2		