



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

DGZfP-JAHRESTAGUNG 2018

Zerstörungsfreie Materialprüfung

Kurzfassungen der
Vorträge und Posterbeiträge



Leipzig, 7. – 9. Mai 2018

ÜBERSICHT

Großer Saal

Montag, 7. Mai 2018

09:00 – 11:00	Eröffnungsveranstaltung
11:30 – 12:30	Mo.1.A Vorträge der Preisträger <i>A. Erhard, D. Treppmann</i>
13:30 – 14:30	Mo.2.A <i>Seite 12</i> Additive Fertigung und ZfP <i>C. Bockenheimer, C. Maierhofer</i>
15:00 – 16:40	Mo.3.A <i>Seite 22</i> Bauwesen <i>C.U. Große, A. Taffe</i>
17:00 – 18:00	Mo.4.A <i>Seite 104</i> Poster mit Kurzpräsentation <i>F. Ahrens</i>
18:30 – 21:30	Posterabend mit Prämierung

Dienstag, 8. Mai 2018

08:30 – 10:00	Di.1.A <i>Seite 37</i> ZfP im Zeichen der Digitalisierung <i>C. Pick, B. Valeske</i>
10:30 – 11:50	Di.2.A <i>Seite 50</i> ZfP Ausbildung <i>R. Holstein, A. Jung</i>
13:00 – 14:30	Podiumsdiskussion zum Thema „ZfP-Arbeitswelt der Zukunft“, Großer Saal
15:00 – 17:00	Mitgliederversammlung der DGZfP, Weißer Saal
20:00 – 24:00	Konferenzabend im Auerbachs Keller Leipzig

Mittwoch, 9. Mai 2018

09:00 – 10:00	Mi.1.A <i>Seite 64</i> Luftfahrt <i>D. Neumann, R. Stößel</i>
10:20 – 12:00	Mi.2.A <i>Seite 74</i> Algorithmen/Simulation I <i>M. Spies, N.N.</i>
12:30 – 13:50	Mi.3.A <i>Seite 90</i> Algorithmen/Simulation II <i>C. Boller, E. Niederleithinger</i>
14:10	Schlusswort

Mo.2.B

Oberflächenverfahren*H.W. Berg, S. Bessert*

Mo.3.B

Luftultraschall*J. Büchler, W. Hillger*

Mo.4.B

Poster mit Kurzpräsentation*A. Erhard*

Mo.2.C

Ultraschall Phased Array Technik*M. Kreuzbruck, H. Rieder*

Mo.3.C

Mikrowellen und Terahertz*J.H. Hinken, C. Stumm*

Mo.4.C

Poster mit Kurzpräsentation*M. Purschke*

Di.1.B

Faserkunststoffverbunde*M. Kreuzbruck, U. Rabe*

Di.2.B

Materialcharakterisierung*K. Szielasko, V. Trappe*

Di.1.C

Metallische Komponenten*F. Schlawne, D. Treppmann*

Di.2.C

Thermographie*M. Goldammer, U. Netzelmann*

Mi.1.B

Automobil*J. Frey, H.-G. Herrmann*

Mi.2.B

Klebeverbindungen*S. Becker, F. Friederich*

Mi.3.B

Zuverlässigkeit von ZfP-Verfahren*R. Holstein, K. Tschöke*

Mi.1.C

Durchstrahlungsprüfung*K. Bavendiek, M. Maisl*

Mi.2.C

Computertomographie*U. Ewert, S. Kasperl*

Mi.3.C

Ultraschallverfahren*A. Erhard, R.H. Koch*

Wir danken unseren Sponsoren für die freundliche Unterstützung.

Hauptsponsor:

KARL DEUTSCH

KARL DEUTSCH Prüf- und
Messgerätebau GmbH + Co KG

Sponsoren:



Block
Materialprüfungsgesellschaft mbH



BMB Gesellschaft für
Materialprüfung mbH



CEWUS Chemnitzer Werkstoff-
und Oberflächentechnik GmbH



DÜRR NDT GmbH & Co. KG



Erfurter Bahn GmbH



GMA-Werkstoffprüfung GmbH



Helling GmbH

DR. HILLGER

Ultraschallprüftechnik
www.dr-hillger.de

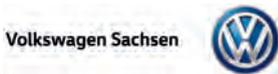
Ingenieurbüro Dr. Hillger



IT-Service Leipzig GmbH



Helmut Klumpf
Technische Chemie KG



MR Chemie GmbH

Nordinkraft AG

PELZ GmbH & Co. KG

PLR Prüftechnik Linke & Rühle GmbH

ROSEN Germany GmbH

SGS Germany GmbH

Tuboscope Vetco (Deutschland) GmbH

VOGT Ultrasonics GmbH

Volkswagen Sachsen GmbH

Wilhelm Nosbüsch GmbH

YXLON International GmbH

SONDERVERANSTALTUNGEN

Sonntag, 6. Mai 2018

Sitzung der DGZfP-Prüfungsbeauftragten 13:00 – 15:30 Uhr

KONGRESSHALLE am Zoo, Mahler-Saal

Sitzung der DACH-Zertifizierungsbeauftragten 15:30 – 17:30 Uhr

KONGRESSHALLE am Zoo, Leibniz-Saal

Montag, 7. Mai 2018

Sitzung der DGZfP-Mitgliedergruppe B 12:30 – 13:30 Uhr

KONGRESSHALLE am Zoo, Goethe-Saal

Sitzung der DGZfP-Mitgliedergruppe D 12:30 – 13:30 Uhr

KONGRESSHALLE am Zoo, Schumann-Saal

Dienstag, 8. Mai 2018

Sitzung des DGZfP-Fachausschusses Thermographie 12:00 – 13:00 Uhr

KONGRESSHALLE am Zoo, Goethe-Saal

Sitzung des DGZfP-Fachausschusses Mikrowellen-
und Terahertzverfahren 12:00 – 13:00 Uhr

KONGRESSHALLE am Zoo, Leibniz-Saal

Mitgliederversammlung der DGZfP 15:00 – 17:00 Uhr

KONGRESSHALLE am Zoo, Weißer Saal

RAHMENPROGRAMM

Sonntag, 6. Mai 2018

Begrüßungsabend 18:00 – 22:00 Uhr

Moritzbastei Leipzig

www.moritzbastei.de

Montag, 7. Mai 2018

Posterabend mit Prämierung 18:30 – 21:30 Uhr

KONGRESSHALLE am Zoo

Dienstag, 8. Mai 2018

Konferenzabend 20:00 – 24:00 Uhr

Auerbachs Keller Leipzig

(Einlass 19:30 Uhr)

www.auerbachs-keller-leipzig.de

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	70,00 €

- * inkl. Tagungsunterlagen, Pausenversorgung, Konferenzabend und Ticket ÖPNV
- ** inkl. Tagungsunterlagen, Pausenversorgung und Ticket ÖPNV
- *** inkl. Stadtführung am 07.05.2018, nachmittags, Posterabend, Konferenzabend, Mittagessen im Konferenzzentrum und Ticket ÖPNV; 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 Leipzig bereit (Öffnungszeiten s. unten). Das Namensschild gilt als Ausweis für die entsprechenden Tagungsveranstaltungen.

Stornierungsfristen (Eingangsdatum DGZfP):

Stornierung bis 26.03.2018: 50 % der Teilnahmegebühr

Stornierung ab 27.03.2018: keine Erstattung möglich

Berichtsband

ist in den mit * und ** gekennzeichneten Teilnahmegebühren enthalten

Tagungsort

KONGRESSHALLE am Zoo Leipzig
Pfaffendorfer Str. 31, 04105 Leipzig
www.kongresshalle.de

Tagungsbüro

6. Mai 2018	12:00 – 17:30 Uhr
7. Mai 2018	08:00 – 18:00 Uhr
8. Mai 2018	08:00 – 15:00 Uhr
9. Mai 2018	08:00 – 14:30 Uhr



Die Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung lädt zu ihrer diesjährigen Jahrestagung vom 7. bis 9. Mai nach Leipzig ein.

Leipzig blickt auf eine lange Geschichte zurück. Vor rund 850 Jahren wurde die Stadt am Schnittpunkt der wichtigsten Handelswege gegründet. Herausragende Ereignisse der deutschen Geschichte verbinden sich mit dem

Namen Leipzig. So begann hier 1539 die Reformation durch die Predigt von Martin Luther in der Thomaskirche. 1813 wurde vor den Toren der Stadt Napoleon in der Völkerschlacht geschlagen. Auch der Herbst 1989, der als die friedliche Revolution in die Geschichte einging, wird immer mit Leipzig und der Nikolaikirche verbunden werden.

Egal, ob es um eine der ältesten Hochschulen Deutschlands geht, an denen Richard Wagner, Karl Liebknecht und Johann Wolfgang von Goethe studierten, oder ob hier die erste Tageszeitung weltweit erschien, in Leipzig gibt es viel zu entdecken. Spuren der Vergangenheit ebenso wie Mut zu Innovation und Wandel. Leipzig ist ein wichtiger Standort für die Automobilzuliefererindustrie, Energiewirtschaft und Logistikbranche sowie ein überregional bekannter Banken- und Finanzstandort. Auch als Tagungsort ist Leipzig attraktiv: Das Kongresszentrum in der Innenstadt zählt zu den modernsten in Europa und ist technisch ausgelegt für anspruchsvolle Konferenzen.

Für das Tagungsprogramm wurden 123 Beiträge eingereicht. Mit 84 Vorträgen inklusive drei Hauptvorträgen und 35 Posterbeiträgen, davon 26 mit Kurzpräsentation, wird ein Programm angeboten, das dem bewährten Leitmotiv der Tagung „ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung“ neue Akzente verleiht.

Erneut im Programm ist eine Podiumsdiskussion, die am Dienstagnachmittag stattfinden wird. Das Thema „ZfP-Arbeitswelt der Zukunft“, schließt an die letztjährige Diskussion an, stellt aber nicht technische Aspekte, sondern die zukünftige Veränderung der Arbeitswelt in den Mittelpunkt. Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme, interessante Vorträge und Diskussionen und natürlich wieder auf viele persönliche Begegnungen in Leipzig.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Erhard'.

Dr. Anton Erhard
Vorsitzender der DGZfP e.V.



Sehr geehrte Teilnehmerinnen, sehr geehrte Teilnehmer, herzlich begrüße ich Sie zur Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. in der KONGRESSHALLE am Zoo!

Das über 1000-jährige Leipzig ist ein gutes Pflaster für renommierte Kongressveranstaltungen, umso mehr freue ich mich, dass Ihr angesehener wissenschaftlich-technischer Verein mit seinen mehr als 600 angeschlossenen Industrieunternehmen erstmals in unserer Stadt weilt. Kaum eine Branche, sei es in der Energie-, Chemie-, Automobil-, oder Luftfahrtindustrie, kommt ohne Qualitätssicherung aus; keine Verkehrstechnik, Industrieanlage oder Rohrleitung kann in Betrieb gehen oder diesen aufrechterhalten, ohne fortwährende Prüfungen. Unsichtbare Materialermüdung, feinste Haarrisse beispielsweise können unerkannt zu Katastrophen führen, allein an diesen beiden Beispielen wird offenkundig, welche Bedeutung die zerstörungsfreie Prüfung im Alltag für jedermann hat.

Und Leipzig ist auch deshalb ein gutes Pflaster für Ihren Aufenthalt, weil wir als traditionelles Kultur-, Handels- und Universitätszentrum viel Sehens- und Erfahrungswertes anzubieten haben: Die kontinuierlich gestiegene und weiter steigende Wirtschaftskraft, eine in den letzten Jahren von rund 20 Prozent (2006) auf unter acht Prozent (2017) gesunkene Arbeitslosenquote, der im Vergleich zu anderen deutschen Kommunen außerordentliche Bevölkerungsanstieg auf nunmehr rund 590.000 Bürgerinnen und Bürger per September 2017.

Neben den positiven ökonomischen Kennzahlen hat sich unsere Stadt zugleich als Touristenmagnet fest etabliert. Besuchen Sie einige unserer rund 15.000 Denkmale allein im Stadtgebiet, das Waldstraßenviertel mit seinen attraktiven Villen und repräsentativen Bürgerhäusern – es gilt als eines der größten erhaltenen Gründerzeitviertel in Europa, steht als Flächenarchitekturdenkmal unter Denkmalschutz. Außerdem werden Sie eindrucksvoll wiederhergestellte Grünanlagen, neu ausgebaute Wasserwege, die lebendige Innenstadt mit ihren zahllosen Kunst-, Kultur- und Einkaufsmöglichkeiten begeistern.

Verleben Sie erfolgreiche Tage in unserer Stadt, genießen Sie Leipzigs einzigartige Lebensqualität, die gastfreundliche Bevölkerung. Seien Sie willkommen zur Jahrestagung der DGZfP!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Burkhard Jung'.

Burkhard Jung
Oberbürgermeister der Stadt Leipzig

Post-Faktische Verunsicherung: Aufgaben einer zielführenden Risikokommunikation

Prof. Dr. Ortwin Renn

Institute for Advanced Sustainability Studies e.V. (IASS), Potsdam

Wir leben in einer Welt voller Zweifel und Widersprüche, wenn es um die Fragen nach dem Grad der Bedrohlichkeit und Gefährdung von technischen, gesundheitlichen oder ökologischen Risiken geht. Wie gefährlich ist Glyphosat für die Gesundheit des Menschen und für den Erhalt der Biodiversität? Welche Gefahren sind mit Nanopartikeln in Lebensmitteln verbunden? Können Schallwellen von Windanlagen Krebs auslösen? Alle diese Fragen bewegen Menschen und sie sind für ihre eigene Orientierung auf Informationen von Fachleuten, vor allem aus der Wissenschaft, angewiesen. Hier erleben sie aber häufig ein Wirrwarr an Behauptungen und Erklärungen, die zwischen Untergangspropheten und Verharmlosungen hin und her schwanken. Wem kann man noch glauben? Welche Rolle spielt in diesem Feld der Risikokommunikation die Wissenschaft? Welche sollte sie spielen? Und was kann sie tun, um dem Bedürfnis nach unparteiischer und problemgerechter Information entgegen zu kommen? Mit diesen Fragen beschäftigt sich der Vortrag von Ortwin Renn.

VORTRÄGE

Zerstörungsfreie Charakterisierung und Qualitätssicherung der Materialeigenschaften und Beständigkeit additiv gefertigter Kunststoffteile

P. Franz¹, C. Metz¹, D. Brackrock¹, C. Fischer², V. Wachtendorf¹, C. Maierhofer¹

¹ BAM, Berlin; ² SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Mit additiven Fertigungsverfahren hergestellte Bauteile und Produkte aus Kunststoffen werden zunehmend nicht mehr nur als Prototypen, sondern als voll funktionsfähige Bauteile und Produkte gefertigt. Bedingt durch die Fertigungsprozesse und den schichtweisen Aufbau resultieren physikalische Materialeigenschaften, die stark von den Fertigungsparametern abhängen und zudem anisotrop sind. Von den Fertigungsparametern werden auch die Oberflächeneigenschaften beeinflusst, sodass zu erwarten ist, dass sich die Beständigkeit gegenüber äußeren Umwelteinflüssen bei additiv gefertigten Bauteilen von der konventionell gefertigter unterscheiden kann. Nachfolgend wird daher die Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzeptes basierend auf spektroskopischen und zerstörungsfreien Prüfverfahren vorgestellt, in dem der Alterungsprozess von mittels Fused Deposition Modelling (FDM) und mittels Lasersintering (LS) hergestellten Probekörpern untersucht wird.

Unterscheidung verschiedener charakteristischer Defekte in mittels selektivem Laserschmelzen hergestelltem Ti-6Al-4V durch Röntgen-Refraktionsradiographie

R. Laquai¹, B.R. Müller¹, G. Kasperovich², G. Requena², G. Bruno¹

¹ BAM, Berlin; ² DLR – Institut für Werkstoff-Forschung, Köln

Das selektive Laserschmelzen (SLM) ist eine pulverbasierte, additive Fertigungsmethode, welche die Herstellung von komplex und individuell geformten Bauteilen ermöglicht. Im Laufe der vergangenen Jahre haben verschiedene Branchen, unter anderem die Luft- und Raumfahrt Industrie, begonnen diese Technologie intensiv zu erforschen. Insbesondere die Titanlegierung Ti-6Al-V4, welche aufgrund ihrer Kombination von mechanischen Eigenschaften, geringer Dichte und Korrosionsbeständigkeit häufig in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt wird, eignet sich für die Herstellung mittels SLM. Allerdings können durch nicht optimal gewählte Prozessparameter, welche für gewöhnlich in einer Energiedichte zusammengefasst werden, Defekte in den Bauteilen entstehen.

In dieser Studie wurde untersucht, in wie weit Röntgen-Refraktionsradiographie geeignet ist diese Defekte zu detektieren und zu charakterisieren. Bei der Röntgen-Refraktionsradiographie wird die Röntgenstrahlung, nachdem sie die Probe transmittiert hat, über einen Analysatorkristall gemäß der Bragg-Bedingung in den 2D-Detektor reflektiert und dabei nach ihrer Ausbreitungsrichtung gefiltert. Dadurch wird neben der Schwächung auch die Ablenkung der Röntgenstrahlung durch Refraktion im inneren der Probe zur Bildgebung ausgenutzt. Aus den aufgenommen Refraktionsradiogrammen kann der Refraktionswert berechnet werden. Dieser ist ein Maß für die Menge an inneren Oberflächen in der Probe. Zum einen konnte gezeigt werden, dass die Röntgen-Refraktionsradiographie Defekte detektieren kann, die kleiner sind als die Ortsauflösung des verwendeten 2D-Detektors. Zum anderen können zwei verschiedene Typen von Defekten unterschieden werden. Bei dem ersten Typ handelt es sich um runde Poren mit geringer innerer Oberfläche. Diese, sogenannten „keyhole pores“ sind charakteristisch für eine zu hohe Energiedichte während des SLM Prozesses. Bei dem zweiten Typ handelt es sich um nicht komplett aufgeschmolzenes Pulver. Diese Defekte zeichnen sich durch eine hohe innere Oberfläche aus und sind charakteristisch für eine zu geringe Energiedichte. Vergleichende Messungen mit hochauflösender Synchrotron CT und optischer Mikroskopie bestätigen die charakteristischen Formen der verschiedenen Defekte.

Prozesskontrolle bei der Extrusion von miniaturisierten Kathetern mit additiven Elementen

L. Hagner¹, T. Dierker¹, F. Trautmann¹

¹ NetCo Professional Services, Blankenburg

Bei der Herstellung von mehrlumigen Kathetern mit additiven Elementen müssen mittels geeigneter Prüftechnik verschiedene Prozessrisiken adressiert werden. Diese Prüftechnik muss ausreichend sensitiv auf die zu untersuchenden Merkmale, wie Wandstärkenveränderung und Poren reagieren, ohne dass die Produkte durch erhebliche Prüfkosten unzulässig verteuert werden. Im Beitrag werden Prüfkonzepte auf der Basis der Röntgen-Computertomographie und einer Kapazitätsmessung simulativ untersucht. Der praktische Aufbau eines kapazitiven Sensors für die Prüfung von Kathetern wird vorgestellt. Mit dem kapazitiven Sensor werden im Labor verschiedene experimentelle Untersuchungen durchgeführt und mit den Ergebnissen einer computertomografischen Referenzmessung verglichen.

System zur stereoskopischen Darstellung von Aufnahmen eines Endoskops

A. Bustani¹, M. Triebel¹

¹ STARS and BRANDS, Berlin

Stand der Technik

In der Industrie herrscht bisher zweidimensionale Bildgebung vor. Beispiele sind Röntgen, Durchleuchtung, digitale Durchleuchtung, Endoskopie, Mikroskopie oder Ultraschall. Einige dieser bildgebenden Verfahren werden zur Verbesserung der Darstellung dreidimensional zusammengesetzt, z. B. CT, MRT und Ultraschall. Dabei werden verschiedene Schichten der 3D-Bildung aneinandergereiht, um für den Betrachter ein dreidimensionales Bild zu ergeben.

Ziel ist dabei, dass sich der Nutzer eine bessere Vorstellung von der abgebildeten Strukturen machen kann. Ein großes Problem der konventionellen Bildgebung ist, dass insbesondere bei Echtzeitanwendungen, wie z.B. der Endoskopie oder der Mikroskopie die Erkennbarkeit der verschiedenen Strukturen aufgrund des planaren Bildeindrucks teilweise ungenügend ist.

Erfindung

Bisherige Methoden der dreidimensionalen Bildgebung erfolgen durch Zusammensetzung verschiedener Ebenen zu einem dreidimensionalen Modell (durch die Erzeugung dreidimensionaler Bilder durch Stereobildaufnahme (z. B. Stereoendoskopie), durch Bildaufnahme aus verschiedenen Richtungen oder Bildaufnahme unter verschiedener Beleuchtung. Hiermit sind verschiedene Nachteile verbunden. Auch gelingt die Anwendung häufig nicht in Echtzeit. Die Neuerfindung kompensiert diese Nachteile.

Im technischen industriellen Bereich erfolgt in Echtzeit eine Verbesserung der Bildwahrnehmung durch einen künstlichen dreidimensionalen Eindruck. Durch die Erfindung wird die insbesondere die Koordination zwischen Mensch und Maschine verbessert. Eine bessere Visualisierung hat für den Prüfer eine bessere Ergonomie und insbesondere eine erhöhte Sichtbarkeit von Prüfobjektent zur Folge.

Die Neuerfindung bietet die Möglichkeit, dem Prüfer durch die stufenlose Einstellung des 3D-Eindrucks eine Anpassung an seine individuellen Sehgewohnheiten zu erlauben. Mit zusätzlichen Modulen („Apps“) können neue Eigenschaften hinzugefügt werden. Hierzu zählen z. B. die interaktive Markierung besonders relevanter Strukturen, die 3D-Modellierung dieser Strukturen und die Wiedererkennung der Strukturen nach erneuter Bildgebung. Weitere Applikationen sind in der Lage, die dreidimensional erkannten Strukturen zu speichern und wiederzuerkennen.

Die digitale Bildkorrelation als Methode zur Qualitätssicherung von thermisch beschichteten Bauteilen

H.-G. Rademacher¹, S. Dieckmann², W. Tillmann²

¹ RIF, Dortmund; ² TU Dortmund

Das thermische Spritzen ist ein in der Industrie etablierter Beschichtungsprozess mit hohem Auftragswirkungsgrad. Eine Anwendung liegt in der Applikation von Verschleißschutzschichten. Gerade bei diesen Schichten gestaltet sich eine nachträgliche Bearbeitung als schwierig. Aber auch aus Effizienz- und Kostengründen sollte nicht mehr Material als notwendig aufgetragen werden. Daher ist die Kenntnis der aufgetragenen Schichtdickenverteilung eine wichtige Größe zur Qualitätssicherung. Aber auch für die stetige Verbesserung des Prozesses, beispielsweise durch Modifikation von Spritzdüsen, dient diese als wichtige Rückführungsgröße.

Zur Bestimmung können verschiedene Methoden zum Einsatz kommen. Die Erstellung eines Querschliffes ist zwar sehr präzise, liefert aber nur eine lokale Information und ist aufgrund ihres zerstörenden Charakters nicht praxistauglich. Am universellsten sind Messmethoden, die die Schichtdicke indirekt aus einer 3D-Oberflächenkontur ableiten. Dabei kann die Differenz aus zwei 3D-Messungen gebildet werden oder es wird, bei ebenen Bauteilen, eine Referenzebene zu Grunde gelegt. Soll die Messung prozessbegleitend durchgeführt werden, ohne das Bauteil ausbauen zu müssen, scheiden konventionelle Koordinatenmessmaschinen aus. Die Messdauer dieser Maschinen ist zudem sehr groß. Wünschenswert ist daher eine Methode, mit der die 3D-Konturerfassung flächig und möglichst in einer Messung erfolgt, um Störeinflüsse durch Relativbewegungen zwischen Messmittel und Bauteil zu minimieren.

Ein neuer Ansatz besteht darin, natürlich vorhandene bzw. künstlich aufgebrachte oder projizierte Muster zu nutzen, um mittels digitaler Bildkorrelation und Fotogrammetrie eine Formerrfassung innerhalb eines Zeittaktes durchführen zu können. Dieses Verfahren ist bisher eher aus dem Bereich der vollflächigen Dehnungsfeldmessung bekannt. Im Vortrag sollen die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens am Beispiel thermisch beschichteter Bauteile aber auch die Eignung für andere Anwendungsfelder diskutiert werden.

Rissprüfanlagen (MT & PT) für Bauteile aus den Bereichen Transport und Energie

W.A.K. Deutsch¹, O. Josek¹, T. Dierks¹, S. Robens¹, O. Goerz¹

¹ KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau, Wuppertal

Praxisbeispiele aus dem Sondermaschinenbau

- MT-Prüfung von Motorkomponenten mit Kamera-Auswertung
- MT-Prüfung mit Rundtisch für Lenkritzeln und Windkraftschrauben
- MT-Prüfung von Zahnstangen mit automatisierter Förderung
- MT-Prüfung von langen Profilen mit Überlaufspule
- PT-Prüfung von Motorkomponenten aus Edelstahl
- PT-Prüfung von Alu-Radträgern

Das Prüfverfahren Phased Array wurde neu in die DIN EN ISO 17635:2017-04 aufgenommen – Anwendungsmöglichkeiten und Beispiele für die Schweißnahtprüfung

H. Schneider¹, S. Keitel¹

¹ SLV Halle

Für die bildgebenden ultraschallbasierten Prüfverfahren Phased Array und TOFD sind seit einigen Jahren sogenannte Kombigeräte auf dem Markt vorhanden. Obwohl diese Prüfverfahren gegenüber der klassischen Ultraschallprüfung viele Vorteile bieten und seit Jahren erfolgreich intern eingesetzt werden, fand der Eingang in die Normen doch sehr zögerlich statt.

Im Jahre 2010 wurde das TOFD-Prüfverfahren in die DIN EN ISO 17635 „ZfP von Schweißverbindungen – Allgemeine Regeln für metallische Werkstoffe“ aufgenommen und hierfür sind die Durchführungs- und Bewertungsnormen für dieses Verfahren vorhanden.

In der letzten Aktualisierung der DIN EN ISO 17635 im April 2017 erfolgte die Aufnahme des Prüfverfahrens Phased Array. Für die Phased Array-Prüfung existiert seit 2013 eine Durchführungsnorm. Seit fast einem Jahrzehnt wurde darauf verwiesen, dass die Norm – der die Zulässigkeitsgrenzen zu entnehmen sind – in Kürze erscheinen werde. Nun ist die DIN EN ISO 19285 erschienen und liegt in der deutschen Übersetzung seit Dezember 2017 als endgültige Version vor.

Im Vortrag sollen die Möglichkeiten der Datenaufnahme der Phased Array Prüfung an Schweißnähten aufgezeigt werden. Ein großer Vorteil dieses Prüfverfahrens ist die Anpassung des Schallfeldes – natürlich in gewissen Grenzen – an die Prüfaufgabe. Hierbei ist entweder eine elektronische Sektorabtastung in einem gewissen Winkelbereich oder eine lineare elektronische Abtastung im festen Einschallwinkel möglich. Abhängig davon kann der Phased Array Prüfkopf im festen Abstand oder mäandernd zur Schweißnaht verschoben werden. Es soll beispielhaft die Bewertung der aufgenommenen Prüfdaten gemäß der DIN EN ISO 19285 gezeigt werden.

Der Vorteil der TOFD-Technik liegt darin, dass innenliegende Fehler nahezu unabhängig von der Fehlerlage durch eine Musterstörung nachgewiesen werden können. Das Ausmessen der Anzeige kann millimetergenau erfolgen. Allerdings ist diese Technik nur bei ferritischen Stählen und Aluminium anwendbar.

Ultraschalluntersuchungen an Rissfeldern in großen Schmiedekomponenten

A. Jüngert¹, C. Swacek², P. Gauder², X. Schuler¹

¹ MPA Universität Stuttgart; ² IMWF Universität Stuttgart

Bei der Herstellung großer Schmiedekomponenten können sich bei unsachgemäßer Verarbeitung oder ungünstiger chemischer Zusammensetzung Risse, z. B. in Form von wasserstoffinduzierten Rissbildungen (sog. Wasserstofflockenrisse), bilden. Derartige Rissbildungen wurden 2012 in den Belgischen Kernkraftwerke Doel 3 und Tihange 2 bei einer Sonderprüfung mittels Ultraschalltechnik in der drucktragenden Wand der Reaktor-druckbehälter (RDB) entdeckt. Dabei handelte es sich um zahlreiche, quasi-laminar über den gesamten Umfang angeordnete, rissartige Anzeigen, die dann mit Ultraschallverfahren vermessen und kartiert wurden.

In einem laufenden Forschungsvorhaben an der MPA Universität Stuttgart wird das Trag- und Versagensverhalten derartiger Rissfelder systematisch untersucht. Hierbei werden experimentelle Untersuchungen an verschiedenartigen Prüfkörpern mit künstlichen und realen Rissfeldern durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Experimente liefern die erforderlichen Eingangsgrößen für numerischen Berechnungsmodelle und bilden die Grundlage zu deren Verifikation.

Die MPA Universität Stuttgart verfügt aus früheren Forschungsvorhaben über mehrere Schmiedestücke, die zahlreiche Wasserstofflockenrisse enthalten und die für die Untersuchungen im laufenden Projekt geeignet sind. Diese Risse sind an den Schnittkanten der Schmiedestücke über Oberflächenrissprüfungen eindeutig zu lokalisieren. Zur Detektion der Risse im Volumen kommen Ultraschallverfahren zum Einsatz. Im Rahmen des Projekts ist es erforderlich, diese Risse möglichst genau zu lokalisieren und deren Größe und Orientierung zu kennen, um möglichst genaue Eingangsgrößen für Berechnungsmodelle zu erhalten. Anhand von Ultraschallmessungen an einem der Schmiedestücke wird untersucht, inwieweit eine Größenbestimmung der Einzelrisse möglich ist. Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich dadurch, dass Risse in größerer Tiefe durch näher zur Prüfoberfläche liegende Risse teilweise abgeschattet sein können, was die Detektierbarkeit entscheidend beeinflusst. Insbesondere wird auch untersucht, wie stark sich die nicht zu vermeidenden Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Ultraschallprüfköpfe bei wiederkehrenden Prüfungen auf die Größenbestimmung der Einzelrisse auswirkt.

Numerische und experimentelle Charakterisierung des Ultraschallfeldes eines Matrix-Arrays zur Untersuchung von Punktschweißverbindungen

R. Hipp¹, F. Schubert¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden

Bei der zerstörungsfreien Prüfung von Punktschweißverbindungen mit Hilfe von Matrix-Arrays sind die Nahfeld-Eigenschaften des ausgesendeten und empfangenen Schallfeldes von ausschlaggebender Bedeutung für die bildgebende Rekonstruktion, z. B. mittels TFM (Total Focusing Method). Durch den Mehrlagenaufbau der Blechkombination verbunden mit starken Mehrfachechofolgen im unverschweißten Bereich sowie die damit einhergehende Notwendigkeit, nur ganz bestimmte Elementgruppen in die Auswertung einzubeziehen, stellt die quantitative Charakterisierung des Arrays bzw. einzelner Elementgruppen ein wichtiges Hilfsmittel zur Optimierung und Validierung des Prüfsystems dar.

Im vorliegenden Beitrag werden numerische und experimentelle Untersuchungen des Schallfeldes von Matrix-Arrays vorgestellt und diskutiert. Dabei wird eine hybride Methode erläutert, wie durch die experimentelle Fernfeld-Vermessung eines transienten Schallfeldes dessen Nahfeld-Verhalten numerisch rekonstruiert und bildgebend dargestellt werden kann.

Möglichkeiten und Grenzen automatischer Merkmalerkennung am Beispiel von Risserkennungen in 3D-CT-Aufnahmen von Betonproben

O. Paetsch¹

¹ Zuse-Institut Berlin (ZIB)

Die Auswertungen der großen Datenmengen moderner bildgebender Verfahren der ZfP können manuell kaum noch bewältigt werden. Hochauflösende 3D-CT-Aufnahmen bestehen oft aus über 1000 Schichtbildern mit einer Datenmenge von mehreren Gigabytes. Aktuelle Computer können diese zwar problemlos visualisieren und erlauben somit eine visuelle Inspektion, aber die möglichst vollständige Erkennung bestimmter Merkmale in den Daten und deren qualitative wie quantitative Auswertung ist durch Experten manuell nicht mehr zu bewältigen. Das gilt insbesondere im Kontext der Schadensaufklärung für die quantitative Analyse verschiedenartig induzierter Risse in Betonen (z. B. durch mechanische Belastungen sowie Frost, Sulfat und Alkali-Kieselsäure-Reaktion).

Eine dazu notwendige Segmentierung und Merkmalerkennung kann nur automatisch durchgeführt werden. Dabei ergibt sich (auch fast automatisch) die Frage nach der Verlässlichkeit der verwendeten Algorithmen. Inwieweit kann man davon ausgehen, dass alle gesuchten Merkmale auch tatsächlich gefunden worden sind? Sind die gefundenen Merkmale quantitativ auswertbar und wie wirken sich Parameteränderungen auf die Ergebnisse aus? Sollten immer dieselben, einmal mit gutem Ergebnis angewandten, Parameter auch bei anderen Proben zur besseren Vergleichbarkeit genutzt werden?

Anhand eines Risserkennungsalgorithmus basierend auf Formerkennung und Bildverarbeitung wird die Problematik diskutiert. Als Grundlage zur Bewertung des Ansatzes dienen 3D-CT-Aufnahmen von geschädigten Betonprobekörpern und Proben, in denen sich aufgrund ihrer homogenen Materialstruktur mit einfachen Mitteln Risse sicher und eindeutig erkennen lassen.

Zur Auswertung der erkannten Risse gehört auch deren Einbettung in das umliegende Material. Das erfordert neben einer automatischen Risserkennung auch eine Segmentierung des gesamten Probekörpers in Zementsteinmatrix, Gesteinskörnung und Porenraum. Da eine solche Segmentierung aufgrund der Datenmenge nur schwer manuell erfolgen kann, werden erste Ergebnisse aus einer Segmentierung mit Hilfe selbstlernender Convolutional Neural Networks gezeigt.

Qualitätssicherung und Validierung der Anwendung zerstörungsfreier Prüfungen von Stahlbetonbauteilen im Bauwesen

D. Algernon¹, A. Walther², W. Denzel³, B. Ebsen⁴, S. Feistkorn¹, M. Friese⁵, C.U. Große⁶, S. Kathage⁷, S. Keßler⁸, C. Köpp⁹, M. Krause⁹, S. Maack⁹, M. Schickert¹⁰, A. Taffe¹¹, M. Wilcke², J. Timoveev⁹, J. Wolf¹²

¹ SVTI, Wallisellen, Schweiz; ² BauConsulting, Brandenburg; ³ DNS-Denzel Naturstein-schutz, Börtlingen; ⁴ HOCHTIEF Engineering, Mörfelden-Walldorf; ⁵ BAST, Bergisch Gladbach; ⁶ TU München; ⁷ Allied Associates Geophysical, Borken; ⁸ cbm, TU München; ⁹ BAM, Berlin; ¹⁰ MFPA Weimar; ¹¹ HTW, Berlin; ¹² DB Engineering & Consulting, Bremen

Stahlbetontragwerke sind eine wichtige Konstruktionsweise im Bauwesen und ein wachsendes Anwendungsfeld für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP). Zur Sicherung der Tragsicherheit, strukturellen Integrität, Bestimmung von Geometrien und zur Detektion konstruktiver Elemente wie z. B. Bewehrung, Verankerungen und Spannkanälen besitzen zerstörungsfreie Prüfverfahren in diesem Bereich inzwischen große Relevanz. Durch den bislang erreichten Fortschritt in der Forschung und Entwicklung haben moderne akustische und elektromagnetische Verfahren eine beachtliche Leistungsfähigkeit erreicht. Von Geräteherstellern sind diese in kommerziellen Produktserien umgesetzt worden und finden eine zunehmend breite Anwendung in der Praxis. In einigen anderen Anwendungsgebieten, in denen die ZfP bereits fester Bestandteil von Überwachungen ist, wie z. B. im Maschinenbau und insbesondere in der Kerntechnik und der Luftfahrt, existieren umfangreiche Qualitätssicherungssysteme für die konforme Anwendung und zuverlässige Einbeziehung der ZfP. Dem relativ jungen Entwicklungsstadium moderner ZfP für Betonbauteile entsprechend müssen solche Konzepte in diesem Bereich erst noch entwickelt bzw. implementiert werden.

Dementsprechend hat sich der Unterausschuss Qualitätssicherung des Fachausschusses ZfP im Bauwesen die Definition und Verbesserung der Qualität von ZfP-Anwendungen sowie insbesondere die verfahrensunabhängige Standardisierung von Prüfprozeduren und statistische Absicherung der Prüfergebnisse zum Ziel gemacht.

Die aktuellen Arbeitsfelder beinhalten die Entwicklung praxisgerechter Konzepte für Prüfprozeduren und deren Erprobung in einem Ringversuch sowie die Konzeption von Testkörpern hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte wie Parameterstudien, Validierung, Kalibrierung und Simulation. Dabei werden Ansätze anderer Branchen durchaus einbezogen, die Anpassung an die spezifischen Bedürfnisse und Gegebenheiten des Bauwesens wird jedoch als wesentlich angesehen und stellt somit eine wichtige Vorgabe dar.

Da die Tätigkeiten nicht auf einzelne Verfahren begrenzt sind, müssen generelle Vorgehensweisen entwickelt werden, die sich auf die jeweiligen Verfahren konkretisieren lassen. Der Vortrag gibt hierzu erste Einblicke in die Arbeit des Ausschusses.

Datengesteuerte Multisensor-Fusion zur Korrosionsprüfung von Stahlbetonbauteilen

C. Völker¹, S. Kruschwitz^{1,2}, G. Ebell¹

¹ BAM, Berlin; ² TU Berlin

Potentialfeldmessung (PM) ist die beliebteste Methode der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) zur Lokalisierung von aktiver Betonstahlkorrosion. PM wird durch Umweltfaktoren wie z. B. Feuchtigkeits- und Chloridgradienten im Bauteil beeinflusst, so dass die Sensitivität gegenüber der kleinen, aber gefährlichen Lochkorrosion gering ist. Wir zeigen in dieser Studie, wie zusätzliche Messinformationen mit Multisensor-Datenfusion genutzt werden können, um die Detektionsleistung zu verbessern und die Auswertung zu automatisieren. Die Fusion basiert auf überwachtem maschinellen Lernen (ÜML). ÜML sind Methoden, die Zusammenhänge in (Sensor-) Daten anhand vorgegebener Kennzeichnungen (Label) erkennen. Wir verwenden ÜML um „defekt“ und „intakt“ gelabelte Bereiche in einem Multisensordatensatz zu unterscheiden. Unser Datensatz besteht aus 18 Messkampagnen und enthält jeweils PM-, Bodenradar-, Mikrowellen-Feuchte- und Wenner-Widerstandsdaten. Exakte Label für veränderliche Umweltbedingungen wurden in einer Versuchsanordnung bestimmt, bei der eine Stahlbetonplatte im Labor kontrolliert und beschleunigt verwittert. Der Verwitterungsfortschritt wurde kontinuierlich überwacht und die Korrosion gezielt erzeugt. Die Detektionsergebnisse werden quantifiziert und statistisch ausgewertet. Die Datenfusion zeigt gegenüber dem besten Einzelverfahren (PM) eine deutliche Verbesserung. Wir beschreiben die Herausforderungen datengesteuerter Ansätze in der zerstörungsfreien Prüfung und zeigen mögliche Lösungsansätze.

Codawelleninterferometrie zur Detektion von Spannungszuständen in Betonbauteilen

E. Niederleithinger¹, M. Herbrand², M. Müller³

¹ BAM, Berlin; ² WTM ENGINEERS, Hamburg; ³ BASt, Bergisch Gladbach

Für die Definition realitätsnaher Bemessungsmodelle für das Tragverhalten bestehender Spannbetonbrücken sind Informationen zu im Bauteil stattfindenden Umlagerungsprozessen sowie die Druckspannungsverteilung infolge der Interaktion aus Biegung und Querkraft von Interesse. Dies kann mit konventioneller Messtechnik bislang nicht zweifelsfrei beantwortet werden. Ultraschallmessungen mit eingebetteten Sensoren könnten hier zukünftig eine sinnvolle Ergänzung zur konventionellen Messtechnik sein. Durch Einsatz einer neuartigen Auswertetechnik, der Codawelleninterferometrie (CWI), sind hiermit schon sehr kleine Änderungen im Material detektierbar.

Um diese neue Methodik über alle Beanspruchungsbereiche zu evaluieren, wurde das Forschungsprojekt „Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in den Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren“ durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) initiiert. In diesem Projekt wurden durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Ultraschall-Transducer in mehrere zweifeldrige Spannbetonträger des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen eingebettet, die anschließend bis zum Bruch belastet wurden.

Der Belastungsversuch an einem der Spannbetondurchlaufträger zeigte das große Potential dieser Methodik. Die im Netzwerk erfassten Änderungen der Ultraschallwellengeschwindigkeit geben die Spannungsverhältnisse im Längsschnitt des Trägers schon bei sehr niedrigen Belastungen qualitativ richtig wieder und zeigen bei hohen Belastungen eine gute Korrelation zum Rissbild. Dabei weisen räumliche Anomalien und Änderungen in der Charakteristik der Geschwindigkeitsänderungen oft schon auf Rissbildung hin, wenn diese noch nicht an der Oberfläche sichtbar ist. Dies zeigt das Potential im Hinblick auf eine Frühwarnung. Hierfür und ebenso in Bezug auf eine Quantifizierung der Effekte ist aber noch Entwicklungsarbeit notwendig.

Weitere Versuche zeigten, dass auch bei einer Halbierung der Transducerzahl auf gleicher Fläche noch verwertbare Ergebnisse zu erzielen sind. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Transducer nicht direkt am Ort der Änderung platziert werden müssen und einen relativ großen Bereich um die Transducer herum erfassen.

Anwendungspotenzial von Machine Learning in der ZfP im Bauwesen

D. Algernon¹, S. Feistkorn¹, M. Scherrer¹

¹ SVTI, Wallisellen, Schweiz

Die Anwendung effektiver, jedoch komplexer Ansätze der Datenanalyse im Sinne von Big Data, Machine Learning oder allgemein Data Science hat ihre Leistungsfähigkeit in diversen Bereichen technischer Anwendungen bereits unter Beweis gestellt. Neben breiten Anwendungsbereichen der Mustererkennung im Zusammenhang allgemeiner Sprach- oder Bilderkennung, sind derartige Analysekonzepte für die Lösung oft komplexer ZfP-Aufgabenstellungen ebenfalls relevant. Dies gilt insbesondere für die Unterstützung von Vorgehensweisen in der Auswertung, die nicht anhand einfacher Kriterien (z.B. Schwellwerte) definiert werden können. Derartige Szenarien sind u. a. in der ZfP von Betonbauteilen (ZfPBau) anzutreffen. Machine Learning-Konzepte sind in diesem Bereich bislang nur wenig verbreitet, haben jedoch in einzelnen Pilotprojekten teilweise ein hohes Potenzial aufgezeigt.

Die Bestrebungen der Erfassung, Organisation und Vernetzung vielfältiger Daten im Zusammenhang industrieller Prozesse, wie sie unter dem einschlägigen Begriff der Industrie 4.0 zusammengefasst werden und auch in Infrastrukturprogrammen wie der „intelligenten Brücke“ eine Bedeutung haben, schaffen ein breites Fundament für die Anwendung statistikgestützter Auswertelgorithmen wie dem Machine Learning.

Exemplarisch für die Anwendung von ZfP an Betonbauteilen seien Anknüpfungspunkte für die neuartigen Analysekonzepte u. a. am Beispiel des Impact-Echo (IE)-Verfahrens diskutiert. Dieses Verfahren erweist sich hinsichtlich der Ergebnisinterpretation in der Praxis oft als nicht trivial. Die Abgrenzung des Nutzsignals von Artefakten, wie beispielsweise den stark ausgeprägten Randeffekten oder weiteren im Modell nicht berücksichtigten Resonanzmoden, ist allein auf Grundlage von Schwellwerten kaum lösbar und bedarf einer ausreichenden Erfahrung. Hier wird ein möglicher Ansatzpunkt für den Einsatz von Machine Learning gesehen. Die grundsätzlichen Vorgehensweisen des Supervised Learning sowie des Unsupervised Learning werden in diesem Zusammenhang behandelt. Neben der technischen Umsetzbarkeit allein werden Aspekte wie die erzielbare Effektivität in Relation zum notwendigen Aufwand sowie die Validierbarkeit bzw. Quantifizierung von Zuverlässigkeit besonders betrachtet.

Prüfung von Rotorblattschalen mit Luftultraschall

M. Gaal¹, F. Schadow¹, D. Nielow¹, V. Trappe¹

¹ BAM, Berlin

Um den sicheren Betrieb von Windkraftanlagen zu gewährleisten, werden Rotorblätter nach der Fertigung und nach Reparatur mit verschiedenen zerstörungsfreien Verfahren auf Schäden untersucht. Bei der Fertigung von Blattschalen, die in einer Sandwich-Schalenbauweise gefertigt werden, entstehen Imperfektionen, die unter Belastung zu großen Rissen führen können. Zur Prüfung von Blattschalen wird unter anderem Ultraschallprüfung in Kontakttechnik eingesetzt. Um den Wartungsaufwand von Ultraschallanlagen zu reduzieren und um manche Kompositstrukturen vor Koppelmittel zu schützen, wird die Anwendung von Luftultraschall erforscht. Insbesondere große Fortschritte gibt es im Bereich der Entwicklung neuer Wandler.

In diesem Beitrag berichten wir über die Luftultraschallprüfung von Schalen für Rotorblätter. Es wurden typische Sandwichschalenstrukturen hergestellt und mit einem eigenentwickelten Schalenprüfstand unter simulierter Betriebsbeanspruchung belastet. Die in den Schalenprüfkörpern entstandenen Schäden wurden außerhalb des Prüfstandes mit Luftultraschall in Durchschallung untersucht. Es wurden fokussierende Wandler auf Basis von Ferroelektronen entwickelt und für diese Prüfungen eingesetzt. Mit zusätzlicher elektrischer Vorspannung konnte die Empfindlichkeit der Empfänger deutlich erhöht werden. Die nach dem Lastwechsel entstandenen Schäden in den Rotorblattschalen waren eindeutig zu detektieren.

Phased-Array-Prüfköpfe für die koppelmittelfreie Ultraschallprüfung

A. Mück¹, S. Scheunemann²

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

Die kontaktfreie Prüfung mittels luftgekoppeltem Ultraschall hat insbesondere aufgrund der Anwendung neuartiger Kompositmaterialien in den vergangenen Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Dem wesentlichen Vorteil des Verzichts auf ein Koppelmittel wie Wasser steht der Nachteil der hohen Verluste bei der Schallübertragung durch die Luft gegenüber. Diese erschweren eine Interpretation der Testergebnisse. Aus diesem Grund sind Verbesserungen des Prüfsystems und der einzelnen Komponenten notwendig.

Ein vielversprechender Ansatz ist die Anwendung der Phased-Array-Technik in der koppelmittelfreien Prüfung. Durch den Einsatz mehrkanaliger Ultraschallprüfköpfe und -geräte ist es möglich, das Schallfeld an die jeweilige Anwendung anzupassen und dadurch den Prüfprozess zu verbessern. Diese Technik wird seit mehreren Jahrzehnten bereits erfolgreich in der Medizin und industriellen Materialprüfung angewandt. Dennoch sind bisher nur wenige Systeme für die koppelmittelfreie Prüfung verfügbar. Ein Grund dafür ist, dass sich der Aufbau von Luftschallprüfköpfen stark vom Aufbau von Kontakttechnik- oder Tauchtechnikprüfköpfen unterscheidet. Das erfordert eine Adaption des Phased-Array-Konzepts an das Design von Luftschallprüfköpfen.

Im Vortrag werden neu entwickelte Phased-Array-Prüfköpfe für die koppelmittelfreie Ultraschallprüfung vorgestellt. Die Eigenschaften der Prüfköpfe, bezogen auf die Ultraschallerzeugung, wurden ausführlich untersucht und entsprechende Ergebnisse vorgestellt. Techniken wie die elektronische Fokussierung des Schallstrahls können auf dieser Basis angewandt und die Leistungsfähigkeit mit herkömmlichen einkanaligen Prüfköpfen verglichen werden. Abschließend werden die Möglichkeiten der neuen Prüfsysteme anhand von Anwendungsbeispielen demonstriert.

Luftgekoppelter Ultraschall – Vorstellung neuer Ansätze im Bereich der koppelmittelfreien Prüfung

E. Schönberg¹, R. Steinhausen², M. Pfeiffer³, A. Bodi¹, T. Gautzsch¹

¹ SONOTEC, Halle (Saale); ² Forschungszentrum Ultraschall, Halle (Saale); ³ IMA Dresden

Luftultraschallprüfverfahren gewinnen heute immer mehr an Bedeutung. Dies liegt in erster Linie an der Möglichkeit einer „koppelmittelfreien“ Prüfung und den damit verbundenen Vorteilen. Gleichzeitig entwickeln sich auch die Anlagentechnik und die Ultraschallwandler immer weiter. Die Luftultraschallprüfung kommt dabei überwiegend in der Prozesskontrolle in Produktionsketten zum Einsatz und ist ideal für die Prüfung von Materialien und Strukturen wie Verbundwerkstoffe, Verklebungen, Wabenstrukturen oder Schaumverbünde geeignet. So kann ein umfangreiches Spektrum an Prüfaufgaben wie Grenzflächendetektion, das Nachweisen von Inhomogenitäten oder die Detektion von Fremdkörpereinschlüssen abgedeckt werden.

Unser Beitrag soll einen Überblick über die Entwicklungen im Bereich der Luftultraschallprüfung geben und diese am Beispiel konkreter Prüfaufgaben vorstellen.

Entwicklung eines Vorlauftrichters zur Fokussierung von Luftultraschallprüfköpfen

W. Essig¹, J. Rittmann¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Luftgekoppelter Ultraschall erfreut sich eines stetig größer werdenden Einsatzspektrums in der zerstörungsfreien Prüfung von Kunststoffen, im speziellen bei Faserkunststoffverbunden. Aufgrund der niedrigen Prüffrequenzen, verglichen mit konventionellem Ultraschall, können auch stark schallschwächende Werkstoffe geprüft werden. Nachteilig an Prüfköpfen für Luftultraschall ist allerdings, dass entweder eine vorgegebene oder gar keine Fokussierung vorhanden ist. Auch der Einsatz von Vorlaufstrecken ist aufgrund der Luftankopplung nicht möglich.

Der Beitrag beschreibt die Entwicklung eines Vorlauftrichters, der für die Fokussierung beliebiger Luftultraschallprüfköpfe eingesetzt werden kann. Diverse Voruntersuchungen an mit Fused Deposition Modeling (FDM) hergestellten Trichtern zeigen erste vielversprechende Ergebnisse in Bezug auf die Verbesserung der Auflösung. Allerdings geht damit einher, dass das Signal-Rausch-Verhältnis erheblich sinkt. Auf die Voruntersuchungen aufbauende Simulationen mit ANSYS® untersuchen die Auswirkungen unterschiedlichster Parameter auf das Signal-Rausch-Verhältnis. So werden zum Beispiel der Werkstoff, die innere Struktur, die Geometrie und der Öffnungsdurchmesser des Vorlauftrichters simulativ optimiert. Anschließend werden die als am vielversprechendsten Designs als Prototypen mit diversen Verfahren hergestellt und evaluiert. Hierzu werden die jeweiligen Schallfelder mittels air-coupled vibrometry (ACV) vermessen, einem Verfahren, das die durch Luftultraschall herbeigeführten Druckunterschiede in der umgebenden Luft visualisiert. Somit können die simulativen Ergebnisse und die tatsächlichen Schallfelder bestätigt werden. Abschließende Messreihen an kohlenstofffaserverstärkten Bauteilen mit künstlich eingebrachten Defekten demonstrieren die Leistungsfähigkeit der Fokussierung durch Vorlauftrichter.

Laser-basierter Ansatz zur einseitigen, luftgekoppelten Ultraschallprüfung

B. Fischer¹, R. Sommerhuber¹

¹ XARION Laser Acoustics, Wien, Österreich

Bei der luftgekoppelten Ultraschallprüfung kommen normalerweise piezoelektrische Wandler zum Einsatz. Dabei wird zur Schallerzeugung eine Spannung an ein sich verformendes, piezoelektrisches Material angelegt. Zur Schalldetektion wird der Effekt umgekehrt, der Schalldruck erzeugt durch mechanische Verformung des Materials eine elektrische Spannung. Aufgrund der hohen Reflexionsverlusten an der Grenzfläche des Prüfkörpers, bedingt durch den Sprung der akustischen Impedanz, wird der Wandler hochresonant ausgelegt, um die geforderte Empfindlichkeit zu erzielen. Dies führt dazu, dass der Wandler über längere Zeit nachschwingt: Auch ein kurzer Spannungsimpuls von $1\mu\text{s}$ regt den Wandler zum Schwingen über eine Zeit von $100\mu\text{s}$ oder länger an. Bei der einseitigen Puls-Echo Messung gestaltet es sich daher schwierig, die Reflexionen an einem Materialfehler von jenen der Oberfläche zeitlich zu trennen.

Hier wird ein Ultraschall-Verfahren vorgestellt, welches neue Möglichkeiten in der einseitigen Puls-Echo Prüfung eröffnet. Dabei wird der Prüfkörper über einen kurzen Laserpuls akustisch angeregt, ohne ihn zu beschädigen. Alternativ kommt ein thermoakustischer Emitter zum Einsatz, der sich ebenfalls durch eine kurze Pulsdauer auszeichnet. Der Schall wird mit einem neuartigen, optischen Mikrofon detektiert. Dieses besteht aus zwei teildurchlässigen Spiegeln, die im Abstand von 2mm parallel zueinander angeordnet sind. Durchläuft eine Schalldruckwelle die Anordnung, kommt es zu einer interferometrisch detektierten Änderung der Intensität eines Laserstrahls, welcher mittels Glasfaserkabel mit der miniaturisierten Spiegeleinheit verbunden ist. Damit gelingt eine Impulstreue Detektion der Schallsignale, ohne Nachschwingen.

Verschiedene Konfigurationen und Anordnungen werden besprochen, Messungen von Kohlefaser-Verbundstoffen werden vorgestellt.

Berührungslose, robotergestützte Schichtdickenmessung im industriellen Umfeld

J. Jonuscheit¹, S. Weber¹, J. Klier¹, D. Molter¹, G. von Freymann²

¹ Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern; ² TU Kaiserslautern

Zum Schutz oder zur Veredelung werden viele Werkstoffe gezielt beschichtet, wobei die Beschichtung in zunehmendem Maße als Mehrschichtsystem aufgetragen wird. 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.

Der Einsatz im industriellen Umfeld stellt allerdings noch weitere Anforderungen an die Technik. Die Integration in den Produktionsprozess erfordert zum Beispiel einen Sensor, der mittels Roboter positioniert werden kann. Ferner gibt es im kontinuierlichen Produktionsprozess immer Lagetoleranzen, so dass sich die Probe zur Messung nicht immer an der gleichen Stelle befindet. In einer Produktionshalle sind zudem durch die Vielzahl an Maschinen immer Vibrationen vorhanden, die den Messprozess stören können. Das Messsystem muss mit diesen Störgrößen umgehen können.

Zur Erfüllung dieser anwendungsbedingten Anforderungen wird 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.

Berührungslose Detektion von Fehlstellen in Mehrschichtmaterialien

B. Jungstand¹, A. Göller¹

¹ hf sensor, Leipzig

In vielfältigen Industriezweigen nimmt die Verwendung von Mehrschichtmaterialien zu. Dazu gehören vor allem die Verpackungs- und Kunststoffindustrie. Für die fehlerfreie Herstellung solcher Materialien müssen auch kleine Fehlstellen wie Spleißstellen einzelner Lagen oder kurzzeitige, fehlerhafte Verklebungen der Lagen zerstörungsfrei während der laufenden Produktion erkannt werden. Dabei dürfen kleinere Veränderungen der Abstände zwischen Sensor und Material keine Falsch-Positiv-Erkennung erzeugen. Dies gilt ebenso für Veränderungen der Umgebungsbedingungen oder Medientemperatur. Zusätzlich ist ein großer Abstand zwischen Sensor und Material gewünscht, damit ein aufwändiges Einfädeln des Materials zu Produktionsbeginn entfallen kann und die Gefahr eines Verklemmens oder Beschädigen des Materials minimiert wird.

Die Fehlstellen im Material bewirken geringfügige Änderungen der dielektrischen Eigenschaften des Materials, die sich mit Mikrowellensensoren gut erfassen lassen. Hoch sensitive Messanordnungen mit Mikrowellenresonatoren machen jedoch geringe Abstände zwischen Material und Sensor notwendig. Mikrowellensensoren auf Basis von Antennen weisen jedoch nicht die geforderte Empfindlichkeit, insbesondere bei dünnen Materialien, auf.

Kombiniert man einen solchen Antennen-basierten Mikrowellensensor mit einem metallischen Reflektor so, dass sich das Material zwischen dem Reflektor und dem Sensor befindet, kann die Empfindlichkeit des Sensors stark erhöht werden. Durch die vollständige Reflexion des Mikrowellensignals am Reflektor ergibt sich ein doppelter Durchlauf der Welle durch das Material. Die konstante Geometrie erlaubt es in dieser Anordnung auch kleinere Veränderung der elektrischen Lauflänge der Welle in einer einfachen Amplitudenmessung sichtbar zu machen. Zusätzlich kann durch die Reflektorgröße die „Wirkfläche“ des Mikrowellensensors variiert werden.

Durch eine reine Betrachtung der Veränderung des Mikrowellensignals unter Verwendung spezieller Mittelwertfilter können alle im Vergleich zu Material langsam ablaufenden Prozesse herausgefiltert werden. Die Optimierung der Messfrequenz erfolgt dabei automatisch im Sensor.

Der Beitrag beschreibt den theoretischen Hintergrund derartiger Messsysteme, praktische Ausführungsmöglichkeiten und mögliche Anwendungen.

Zerstörungsfreie Prüfung industrieller Kunststoffschäume

P. Jatzlau¹, T. Gilch¹, S. Becker², A. Keil²

¹ TU München; ² Becker Photonik, Porta Westfalica

In der Industrie werden Kunststoffschäume vor allem für die thermische Isolierung und im Leichtbau eingesetzt. Anwendungen sind die Isolierung von Kryo- und Kühlsystemen, die Isolierung von Fernwärmerohren und der Leichtbau im Bereich von GFK-Sandwichbauteilen z. B. für Schienenfahrzeuge. Bei der Herstellung und dem Betrieb der o. g. Produkte können kritische Fehler im Schaum auftreten, die mit herkömmlichen Methoden (Ultraschall, Thermografie, Röntgen) in vielen Fällen nicht oder nur schlecht detektiert werden können. Dabei handelt es sich z. B. um Poren, Feuchtigkeit und Einschlüsse.

Eine vielversprechende Möglichkeit ist hier die vollelektronische Terahertz-/Millimeterwellen-Prüfung. Terahertz-Prüfsysteme dieses Typs 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. Untersucht werden können alle dielektrischen Materialien. Liegt ein Materialmix vor (z. B. Kunststoffschäum/Metall), ist eine Prüfung bis zur ersten leitenden Oberfläche möglich.

In der vorliegenden Arbeit wurden Referenzbauteile mit Flachbodenbohrungen (präparierte Poren) und Stufenkeil, Feuchtigkeit und leitenden oder dielektrischen Einschlüssen im Kunststoffschäum systematisch mit Terahertz untersucht. Dabei zeigte sich, dass neben Feuchtigkeit und Einschlüssen auch Flachbodenbohrungen und Stufenkeile im Schaum nachgewiesen werden können. Die Sichtbarkeit dieser Bohrungen bzw. Fräsungen hängt u. a. von der lateralen Ausdehnung, der Tiefe der Bohrung und ihrer Höhenposition ab. Feuchtigkeit und Einschlüsse sind auf Grund der hohen Reflektivität bzw. Absorption sehr gut sichtbar. Die Sichtbarkeit der Flachbodenbohrungen und Fräsungen beruht auf Brechung an den jeweiligen Kanten und ist deutlich geringer, aber gut im Vergleich zu etablierten Verfahren.

Prozess-Mikrowellenscannermodule EM VISION für die zerstörungsfreie dielektrische Materialprüfung

A. Göller¹, B. Jungstand¹

¹ hf sensor, Leipzig

Mikrowellen durchdringen nicht leitende Materialien und sind damit prinzipiell für deren zerstörungsfreie Prüfung und Messung von Stoffeigenschaften gut geeignet. Durch die Wechselwirkung mit deren dielektrischen Eigenschaften lassen sich unterschiedliche physikalische Parameter detektieren. Bisher werden Mikrowellensonden zur Feuchtemessung hauptsächlich als portable Rasterfeuchtemessgeräte sowie als Prozessmessgeräte für punktweise oder traversierende Messungen oder als schnelle Tischgeräte eingesetzt.

Im Vergleich zu anderen ZfP-Verfahren (optische, infraroptische, Ultraschall-, Röntgen-, radiologische, NMR- und Radarverfahren) haben scannende Mikrowellen-Messverfahren viele technische Vorteile. Sie nutzen die ortsabhängige Variation der dielektrischen Eigenschaften der Testobjekte aus und ermöglichen auch berührungslos eine echte Volumenwechselwirkung. Die flächenhafte Untersuchung erlaubt die Ermittlung der Verteilung verschiedener Materialparameter. Dazu gehören Feuchte, Dichte, Materialstruktur, die Geometrie von Schichtaufbauten, Störungen, Delaminationen, Verunreinigungen, die Anwesenheit von Objekten in geschlossenen nichtmetallischen Umverpackungen oder konstruktive Gegebenheiten. Wegen der sehr geringen Mikrowellenleistungen arbeiten Mikrowellenscanner völlig gefahrlos und benötigen keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen. Gegenüber einfachen Prozessfeuchtesensoren für punktweise Messungen wurden die neuen Mikrowellenscanner realisiert als scannende Mehrsondensysteme, die nach als Sensorzeilen oder Sensorarrays berührungslos arbeiten und bei Bedarf eine vollständige Prozessüberwachung ermöglichen.

Mit ihnen lassen sich viele Probleme der Materialfeuchtemessung z. B. in industriellen Trocknungsprozessen lösen, die heute noch nicht geregelt sind, so dass es zu Übertrocknungen und ungleichmäßiger Trocknung kommt. Damit werden eine wesentlich bessere Prozesskontrolle, erhebliche Energieeinsparungen und deutliche Verbesserungen der Produktqualität möglich. Für die kontinuierliche flächenhafte Überwachung von Materialkenngrößen in laufenden Produktionsprozessen, z. B. die Erfassung der Materialfeuchteverteilung, von Materialinhomogenitäten oder Leckagen in geschlossenen Verpackungen sind technisch und wirtschaftlich bessere Lösungen möglich.

Terahertz-Prüfung an Radarkuppeln

F. Friederich¹

¹ Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern

Die bildgebende Prüfung mittels Millimeter- und Terahertzwellen hat in der Vergangenheit ein hohes Anwendungspotential im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung von glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffen und anderen dielektrischen Materialien aufgezeigt. Entsprechende Strukturen werden typischerweise auch für Radarkuppeln von Flugzeugen eingesetzt. Neben routinemäßigen Überprüfungen auf Beschädigungen solcher im Einsatz befindlicher Radome, ist es von wesentlichem Interesse diese bereits während des Herstellungsprozesses zu überprüfen, um die strukturelle Integrität sicherzustellen und eine optimale Funktionalität für relevante Radar und Kommunikationssysteme zu gewährleisten. Gegenwärtig sind Klopftests die einzigen etablierten Prüfmethode zur Inspektion von Radarkuppeln. Hingegen erlaubt die bildgebende Terahertz-Prüfung eine kontaktfreie visuelle Untersuchung der inneren Struktur der Radarkuppel bei jedem Herstellungsschritt oder auch im Feldeinsatz. Weiterhin können bildverarbeitende Methoden zu automatischen Erkennung von Defekten oder anderen Merkmalen eingesetzt werden. Im Rahmen dieses Beitrags berichten wir über die Entwicklung eines industriellen 3D Terahertz-Bildgebungssystems für die Radom-Inspektion.

Anwendung von Industrie 4.0 in der ZfP

J. Büchler¹, R. Ratering¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

Die zunehmende Automatisierung und Digitalisierung in der ZfP bilden wesentliche Elemente für Industrie 4.0, das aus der Vernetzung von Sensoren, Geräten, Maschinen und Menschen besteht. Dazu werden durch Sensoren und Messgeräte große Datenmengen erfasst, bearbeitet, analysiert und Ergebnisse wieder zum Messsystem zurückgeführt um die Prüfung zu optimieren. Für den Anwender ergeben sich dadurch u. a. folgende Vorteile:

- Nachvollziehbarkeit der Messungen
- Verbesserte Prüfaussage
- Automatisierung der Prüfung
- Optimierung der Produktionsprozesse
- Vorausschauende Instandhaltung der Prüfanlagen

Eine wesentliche Voraussetzung für die Speicherung von großen Datenmengen und der Vernetzung von Komponenten ist eine industrielle Internet Plattform, die mit Predix als Cloud basierte Lösung von GE eingeführt wurde. Diese wird am Beispiel der vorausschauenden Korrosionsüberwachung an Rohren vorgestellt.

Die Automatisierung der Prüfung erfordert eine robotergesteuerte Führung der Sensorik mit der anschließenden automatischen Auswertung der Messdaten. Zur Entwicklung und Optimierung der erforderlichen Auswertelgorithmen sind große Datenmengen zur Analyse notwendig.

Um die Ausfallzeiten bei automatisierten Prüfanlagen, die in der Produktionslinie eingebunden sind zu minimieren, ist eine vorausschauende Wartung unbedingt erforderlich. Dazu kann über die erforderlichen Anlagenschnittstellen der Prüfsysteme eine Fernüberwachung der Anlagenparameter durchgeführt werden, die durch entsprechende Sensorik erfasst werden.

Digitalisierung, Verarbeitung und Analyse kultureller und industrieller Objekte: Wertschöpfung aus großen Datenmengen

S. Kasperl¹, R. Hanke¹, S. Oeckl¹, P. Schmitt¹, N. Uhlmann¹, D. Heinz², G. Herl²,
J. Hiller², A. Kämmler², T. Miller², A.M. Stock³, T. Sauer³

¹ Fraunhofer, EZRT, Fürth; ² Fraunhofer Anwendungszentrum CT in der Messtechnik, Deggendorf; ³ FORWISS, Universität Passau

Im Zuge der Digitalisierung dreidimensionaler Objekte in großer Genauigkeit fallen Daten in bisher ungekannten Dimensionen an, die gespeichert, verarbeitet und in Information umgewandelt werden müssen.

Bei der Herausarbeitung von Anforderungen an zukünftige Softwaresysteme zur Verarbeitung dieser sehr großen Daten und Datenmengen und der anschließenden Informationsinterpretation (Bewertung) bei hoher geforderter Datenverarbeitungsgeschwindigkeit und möglichst geringen Benutzerinteraktion, stehen Unternehmen und Forschungsgruppen vor der entscheidenden Frage: Welche relevanten Informationen lassen sich wie aus Bilddaten extrahieren, so dass diese Informationen einen signifikanten Mehrwert für Anwender im konkreten Fall darstellen? Die Frage zielt auf vermutete Werte ab, die in Daten gewissermaßen schlummern. Eine Frage, die auch im kulturhistorischen Kontext gestellt werden kann, allerdings nicht bezogen auf einen unternehmerischen, sondern auf einen kulturellen Mehrwert. Hier setzt das Fraunhofer Big Picture Projekt an, das einen signifikanten Beitrag zu dem aufgezeigten Themenkomplex leisten möchte und hierfür drei Use Cases untersucht:

- Sensorik und Bildverarbeitung für hochaufgelöste Messtechnik mittels Inline-CT an großformatigen, sicherheitsrelevanten Gussbauteilen
- Segmentierung von Volumendatensätzen mit beschränkter Bildqualität
- Erstellung virtueller naturgetreuer Repliken von Kulturgütern

Der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens betrifft demnach nicht die Datengenerierung, sondern die Entwicklung neuer Verfahren der Datenverarbeitung und Informationsgewinnung in Zusammenarbeit mit Industriepartnern und Experten aus der Kulturerbe-Forschung. In dem Beitrag werden die drei Use Cases und ihre Herausforderungen vorgestellt und erste Ergebnisse präsentiert.

Wie digital muss geprüfte Sicherheit sein? Erfahrungsbericht aus der Einführung einer digitalen Führungskultur

H.W. Berg¹, H.M. Berg¹

¹ BMB, Heilbronn

Um die Flexibilität von mittelständischen Unternehmen in Zukunft zu erhalten, ist die zielgerichtete Einbindung von digitalen Systemen in die Arbeit von Teams und Führungskräften erforderlich. Hierzu werden im ersten Schritt alle Prozesse im Unternehmen ganzheitlich analysiert, um jeglichen Medienbruch als auch Redundanz von Eingaben zu verhindern. Daran anschließend werden mit den Abteilungsleitern aller Ressorts die idealen Abläufe sowie Schnittstellen zwischen Abteilungen definiert. An dieser Stelle werden menschliche Denkstrukturen als Basis für den Zielprozessablauf herangezogen, so dass eine hohe Ergonomie des Systems in eine große Mitarbeiterakzeptanz mündet.

Besonders in der Einführungsphase wird den Teamschulungen eine herausgestellte Rolle zugeordnet, um gezielte Rückmeldungen zur Testversion zu erhalten. Die Mitarbeiter mit Leitungsaufgaben erleben die Transformation als Mammutaufgabe, da trotz aller digitalen Steuerungsmöglichkeiten ein besonderes Augenmerk auf die persönliche Vertrauensbildung gelegt werden muss.

Konkretisiert auf das Szenario einer Prüfbauteilabstimmung ergeben sich eine Vielzahl von Fehlermöglichkeiten in der Wechselwirkung zwischen Ansprechpartnern des Kunden und den Mitarbeitern im eigenen Team. Besonders an dieser Stelle sollen Erfahrungen sowie Möglichkeiten aufgezeigt werden, so dass keine falschen Prüfanweisungen überhaupt erst entstehen können. Damit einhergehend ist auch die kritische Auseinandersetzung zwischen dem Grad der Standardisierung und der kreativen als auch flexiblen Projektmanagement Struktur erforderlich.

Erste Schritte zu einer Augmented-Reality-Visualisierung des inneren Aufbaus von Betonbauteilen

M. Schickert¹, C. Koch², F. Bonitz¹

¹MFPA Weimar; ²Bauhaus-Universität Weimar

Der Überblick über die Ergebnisse dreidimensionaler zerstörungsfreier Abbildungsverfahren kann bei großen, komplexen Objekten des Bauwesens oder der Luft- und Raumfahrt-technik schwierig sein. Um direkt am Bauteil die Zuordnung der Anzeigen untereinander, zur äußeren Geometrie des Bauteils und zu inneren Objekten zu erleichtern, kann eine Augmented-Reality-Visualisierung eingesetzt werden. Dabei wird das visuelle Bild des Bauteils mit virtuell erzeugten Bildern der inneren Objekte und der Abbildungsverfahren überlagert. Im Beitrag wird die Darstellung durch Augmented Reality (AR) am Beispiel eines Betontestkörpers mit inneren Objekten vorgestellt. Vom Bauteilinneren wurden mit dem Ultraschall und dem Radarverfahren dreidimensionale CSAFT- bzw. SAFT-Abbildungen (Synthetic Aperture Focusing Technique) erzeugt. In einer AR-Anwendung wird das Kamerabild eines Tablets, mit dem das Bauteil betrachtet wird, mit den Abbildungsergebnissen (Ist-Daten) und der 3D-Geometrie der Einbauteile (Soll-Daten) ortsrichtig überlagert. Bei Bewegung oder Drehung des Tablets bleibt der geometrische Zusammenhang zwischen der äußeren und der inneren Ansicht gewahrt. Das Tablet eröffnet so quasi ein Sichtfenster ins Innere des Bauteils.

Der Ablauf zur Aufbereitung und Interpretation der Bilddaten wird erläutert, und die Anwendungsmöglichkeiten und Voraussetzungen einer Augmented-Reality-Visualisierung werden aufgeführt und diskutiert. Der Beitrag möchte so eine Perspektive auf mögliche weitere Anwendungen z. B. bei der Inspektion und Wartung von Betonbrücken oder Flugzeugen eröffnen.

Charakterisierung von Impactschäden während und nach der Belastung mit thermografischen Verfahren und mit Ultraschall

R. Krankenhagen¹, C. Maierhofer¹, M. Röllig¹, T. Heckel¹, D. Brackrock¹, M. Gaal¹

¹ BAM, Berlin

Impacts in Faserverbundwerkstoffen können zu unterschiedlichen Schädigungen führen. Es entstehen Risse und Ablösungen in der Matrix, Faser-Matrix-Ablösungen und Faserrisse. Der Umfang der Schädigung ist abhängig von der Energie des Impacts, von der Zusammensetzung und dem Aufbau der Faserverbundwerkstoffe und von der Geometrie und hier im Wesentlichen von der Dicke des Bauteils. Und je nach Umfang der Schädigung ist diese von der Oberfläche aus sichtbar und hat einen Einfluss auf das Langzeitverhalten des Bauteils. Für sicherheitsrelevante Bauteile müssen daher insbesondere von der Oberfläche aus nicht sichtbare Schädigungen mit Hilfe von zerstörungsfreien Prüfverfahren detektiert und zumindest hinsichtlich ihrer lateralen Ausdehnung charakterisiert werden. Der letzte Aspekt ist auch für sichtbare Schädigungen wichtig, da die Sichtprüfung von der Oberfläche aus keine Aussagen über die laterale Ausdehnung des Schadens im Inneren zulässt. Sowohl die aktive Thermografie als auch Ultraschall sind für die Ortung und Charakterisierung von Impactschäden nach der Schädigung sehr gut geeignet. In Abhängigkeit von den jeweiligen Anregungstechniken können mit beiden Verfahren unterschiedliche Eindringtiefen und Ortsauflösungen erreicht und Ergebnisse wie die laterale Schadensausdehnung tiefenaufgelöst dargestellt werden. Thermografische Verfahren ermöglichen darüber hinaus auch schon eine Untersuchung der thermischen Auswirkungen eines Impacts auf das Bauteil während der Schädigung (passive Thermografie). Hier können unter bestimmten Voraussetzungen auch diejenigen durch den Impact beeinflussten Bereiche des Bauteils erkannt werden, an denen nach dem Impact keine Schädigungen mittels zerstörungsfreier Prüfung nachgewiesen werden können.

Im Rahmen des EMRP-Projektes VITCEA wurden verschiedene Faserverbundwerkstoffe mit Glasfasern, Kohlenstofffasern und mit verschiedenen Matrixsystemen systematisch mit Impacts (low velocity) mit variierenden Energien geschädigt und während und nach der Schädigung mit den beschriebenen Verfahren untersucht. Im Beitrag werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Anregungstechniken der aktiven Thermografie und des Ultraschalls beschrieben und mit den in-situ Messergebnissen der passiven Thermografie verglichen.

Untersuchung des Einflusses von Artefakten auf das Prüfergebnis des robotergestützten Wirbelstromverfahrens an CFK-Bauteilen

S. Joas¹, J. Rittmann¹, H. Vu¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Leichtbaumaterialien wie Faserkunststoffverbunde (FKV) gewinnen zunehmend an Bedeutung und werden in zahlreichen Industriebereichen, wie beispielsweise auch zunehmend in der Automobilindustrie, eingesetzt. Dabei sind die hohen Anforderungen an die langlebigen Strukturen und Komponenten aus FKV stets mit immensen Herstellungskosten verbunden. Eine weit verbreitete, berührungslose und vergleichsweise kostengünstige Prüftechnik für elektrisch leitfähige Werkstoffe wie auch kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) ist die Wirbelstromprüfung. Vor allem bei sicherheitsrelevanten Bauteilen in der Automobilindustrie ist eine derartige 100%-Prüfung der Qualität unerlässlich. Bei der Prüfung realer Bauteile treten jedoch nicht zu verhindernde Artefakte, wie beispielsweise Kanten-, Abhebe- und Verkippungseffekte auf, was die Auswertung der Messdaten erschwert. Darüber hinaus kommt es bei der automatisierten Wirbelstromprüfung in Abhängigkeit der Eigenschaften des Industrieroboters, z. B. hinsichtlich Positions- und Bahnwiederholgenauigkeiten von bis zu einigen hundert Mikrometern, zu robotergenerierten Artefakten, welche insbesondere zu einem stark ausgeprägten lift-off-Effekt führen. Um die Zuverlässigkeit der Prüfaussage zu verbessern und auch eine Prüfung komplexer Bauteilgeometrien zu ermöglichen, ist eine Untersuchung des Einflusses der auftretenden Artefakte auf das Prüfergebnis erforderlich. Hierfür werden Kanten-, Abhebe- und Verkippungseffekt unter Verwendung von CFK-Prüfkörpern mit thermoplastischer Matrix systematisch charakterisiert. Durch die Kombination des Industrieroboters IRB 120 (ABB Ltd.) mit dem Wirbelstromprüfgerät Elotest B320 und der Entwicklung von geeigneten Auswertetools auf Basis von LabView® und Matlab® wird die hinsichtlich Durchführung automatisierte Wirbelstromprüfung auch von komplexeren CFK-Prüfkörpern ermöglicht. Das Potenzial des Verfahrens wird zuletzt vergleichend einer manuellen Prüfung gegenübergestellt.

Sandwich-Schalenstrukturen in situ charakterisiert mit Thermographie und Felddehnungsmessungen

V. Trappe¹, D. Nielow¹, S. Hickmann¹, A. Kupsch¹, M. Gaal¹, B. Redmer¹,
R. Krankenhagen¹

¹ BAM, Berlin

Rotorblätter von Windkraftanlagen werden aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) hergestellt. Mit Ausnahme der Flügelwurzel und der innen liegenden Tragflügelholmgerüste ist der größte Teil der Tragflügelstruktur, die aerodynamische Blattschale, in einer Sandwich-Schalenbauweise gefertigt. Die typischen Größen von Rotorblättern liegen bei über 60 m Länge, bei einer Blatattiefe von bis zu 6 m. Die typischen Rollenbreiten der technischen Textilien, die als Faserverstärkung eingebracht werden, betragen bis zu maximal 2,5 m. Die Schaumkerne werden als Platten mit typischen Abmessungen von 1 m x 2 m produziert. Infolgedessen sind Stoßstellen in den Verstärkungslagen und in den Schaumplatten unvermeidlich. Je nach Bauausführung dieser Stoßstellen ergeben sich fertigungsbedingte Imperfektionen, die schon nach wenigen Jahren Betrieb zu großen Rissen in der Blattschale und somit zum Anlagenstillstand führen können.

An der BAM wurde ein Schalenprüfstand entwickelt, mit dem typische Sandwichschalenstrukturen unter simulierter Betriebsbeanspruchung belastet werden können. Im mechanischen Ermüdungsversuch wurden in situ die Entstehung von Schäden in Schalenprüfkörpern mit Test-Imperfektionen mittels der passiven Thermographie und Felddehnungsmessungen verfolgt. Damit konnten der Zeitpunkt, der Schadensursprung und der Schadensfortschritt zerstörungsfrei bestimmt werden. Zudem wurden vergleichend Schalenprüfkörper mit Luftultraschall und der Röntgen-Laminographie mit zwei verschiedenen Rekonstruktions-Algorithmen untersucht. Im Rahmen des Vortrages werden die Schädigungsmechanismen den Anzeigen der verschiedenen ZfP-Verfahren gegenübergestellt und Empfehlungen für die Praxis abgeleitet.

Schallemissionsmessungen während der Durchführung von Zugversuchen an GFK-Proben

B. Weihnacht¹, E. Schulze¹, A. Pietzsch¹, L. Schubert¹, A. Vandenbrande², B. Cerbe², K.-W. Borchers³

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² cp.max Rotortechnik, Dresden; ³ IMA Dresden

Im Rahmen der wachsenden Bedeutung alternativer Energieerzeugung stellen Rotorblätter Bauteile von besonderer Relevanz an Windenergieanlagen dar. Hier ist im bundesdeutschen Durchschnitt alle 4 Jahre mit einem Strukturversagen zu rechnen. Am IKTS wurde ein Messsystem entwickelt, das mit Hilfe von speziellen piezoelektrischen Sensoren die durch Belastungen bzw. Schäden in der Struktur hervorgerufenen Schallemissionssignale aufzeichnen kann. Diese Ultraschallereignisse werden über die Zeit gesammelt, eine Häufigkeitsverteilung ermittelt und hieraus ein Schadensfortschritt abgeleitet. Aufgrund der Blitzschutzproblematik in den Rotorblättern geschieht die Energie- und Datenübertragung zwischen Sensoren und Basisstation an der Blattwurzel über eine optische Verkabelung.

Die Interpretation der so gewonnenen Daten stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar, da die Schallemissionsereignisse den Schadensmechanismen zugeordnet werden sollen. Dafür sind grundlegende Untersuchungen zu Schallemissionsparametern wie Frequenzgehalt, Signalenergie und Signallänge notwendig, die im Rahmen eines von der SAB geförderten Forschungsprojektes QuantSHM an GFK-Proben durchgeführt wurden. Die relevanten Strukturkomponenten repräsentierenden Proben, welche mit definierten Fehlern versehen waren, wurden in einer Zugmaschine bis zum Versagen belastet und während Zug- und 4-Punkt-Biegebelastung die Schallemissionsereignisse detektiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Verfahren sowohl eine Ortung des Strukturversagens als auch die Zuordnung von Schadensmechanismen möglich ist.

Nutzung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur mikrostrukturbasierten Restlebensdauerbewertung alternder metallischer Werkstoffe und Komponenten in der Energietechnik

R. de Acosta¹, P. Starke¹, C. Boller¹, M. Jamrozy², M. Klein², M. Knyazeva³, F. Walther², K. Heckmann³, J. Sievers³, T. Schopf⁴, X. Schuler⁴

¹ Universität des Saarlandes, Saarbrücken; ² TU Dortmund; ³ GRS, Köln;

⁴ MPA Universität Stuttgart

Bei einer mit Heißdampf oder unterkühltem Wasser gefüllten, druckführenden Rohrleitung muss nach einer bestimmten Einsatzzeit davon ausgegangen werden, dass sich die beanspruchungsspezifischen lokalen Werkstoffeigenschaften kontinuierlich verändern (Alterung), was üblicherweise bei der Dimensionierung pauschal über Sicherheitsfaktoren abgedeckt wird. Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsvorhabens MibaLeb (Mikrostrukturbasierte Ermittlung der maximalen Einsatzdauer für korrosionsermüdungsbeanspruchte Werkstoffe und Komponenten der Kerntechnik) ist die Entwicklung einer Verfahrensweise zur Bewertung der verbleibenden Einsatzdauer von im Betrieb gealterten metallischen Komponenten in Kernkraftwerken. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem metastabilen austenitischen Stahl X6CrNiNb18-9 (AISI 347) unter Siedewasserreaktorbedingungen.

Es wird an totaldehnungskontrolliert durchgeführten Ermüdungsversuchen gezeigt, dass thermometrisch wie auch resistometrisch, elektromagnetisch und elektrochemisch gemessene Parameter mindestens ebenso gute Ergebnisse wie eine traditionelle Dehnungsmessung liefern und darüber hinaus zusätzliche wertvolle Informationen aus dem Mikrostrukturverhalten der Werkstoffe generieren können, wobei die o.g. Betriebsbedingungen berücksichtigt werden. Um dies umzusetzen, wird das Kurzzeitverfahren StrainLife entwickelt und in das Simulationsprogramm PROST integriert. Hierdurch werden auf der Basis nur weniger Ermüdungsversuche die lokalen Ermüdungseigenschaften und damit die beanspruchungsspezifischen lokalen Streuungen der Werkstoffmikrostruktur im Vergleich zu traditionellen Verfahren um etwa eine Größenordnung schneller abgebildet.

Das Verbundprojekt wird zwischen dem Fachgebiet Werkstoffprüftechnik der Technischen Universität Dortmund, dem Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung der Universität des Saarlandes, der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit und der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart durchgeführt.

Danksagung

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundforschungsvorhabens mit den Förderkennzeichnungen 1501528A, 1501528B, 1501528C und RS1545 durchgeführt.

Prüfung von ferromagnetischen Tankbodenplatten in Randbereichen und unter Einbauten mit einem manuell geführten Handscanner

M. Janßen¹

¹ Tuboscope Vetco, Celle

Im Zuge der ständigen Weiterentwicklung der seit Jahrzehnten bestehenden und von Tuboscope betriebenen FIT-Gerätefamilie (FIT steht als Abkürzung für Floor Inspection Tool) wurde ein manuell zu führender Handscanner entwickelt, der die zuverlässige Inspektion von Randbereichen in Tanklagerstätten ermöglicht. Aufgrund des besonderen Designs und der damit verbundenen geringen Geräteabmessungen können Randbereiche selbst in kleinsten Lagertanks befahren werden – kleine Radien stellen kein Hindernis dar. Und auch die Höhe des neuen Handscanners konnte durch bestimmte konstruktive Merkmale so gering gehalten werden, dass schwer zugängliche Bereiche unter Einbauten wie Heizregistern und Verrohrungen zugänglich sind und gemessen werden können. Bestehende und zertifizierte Technologien sowie Verfahren wurden konsequent ausgenutzt und weiterentwickelt, um sämtliche relevanten Korrosionsformen und Materialfehler zu detektieren und darüber hinaus ober- und unterseitige Störungen sicher zu unterscheiden. Das Gerät nutzt das magnetische Streuflussverfahren, um Störungen in den Tankbodenplatten verlässlich festzustellen. Zusätzlich wurde eine Wirbelstromapplikation integriert, um die Unterscheidung zwischen Ober- und Unterseitendefekten zu ermöglichen.

Der Vortrag stellt die Neuentwicklung mit seinen Besonderheiten und Details vor. Es wird Einblick in den Aufbau der Sensorik, der Instrumentation und der Messsignalverarbeitung gegeben. In der gebotenen Kürze wird auf die erforderliche Funktionsprüfung vor einem Einsatz und die notwendige Kalibrierung des Geräts eingegangen. Die dafür von Tuboscope entwickelten Testplatten werden vorgestellt. Darüber hinaus wird – als interessante Ergänzung – das Auflösungsvermögen des Geräts für Fehler aufgezeigt, die unmittelbar neben der Außenkante des Scanners liegen und sich nicht direkt im magnetischen Kreis der Streuflussapplikation befinden. Durch eine besonders angeordnete und zusätzliche Sensoranordnung ist es mit dem neu entwickelten Gerät möglich, auch Rand- bzw. Seiteneffekte des Streuflussverfahrens effektiv auszunutzen. Die sinnvolle Nutzung der zusätzlichen Sensoren, die Darstellung der Zusatzinformation und ihre Auswertung werden ebenfalls im Vortrag berührt.

Entwicklung einer Bainit-Sensortechnik zur Charakterisierung gradierter Gefügeausbildungen in der Bauteil-Rand- und Kernzone

S. Barton¹, O. Bruchwald¹, W. Frackowiak¹, B. Bongartz¹, W. Reimche¹, D. Zaremba¹

¹ Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Die Ressourcenverknappung und steigende Bedeutung des Klimaschutzes erfordern sowohl den zunehmenden Einsatz von Hochleistungsbauteilen in Leichtbauweise mit beanspruchungsgerecht angepassten Eigenschaften als auch deren ressourcenschonende und energieeffiziente Fertigung. Während der Einsatz neuer Stahlwerkstoffe die Grundlage zur Verbesserung der Bauteileigenschaften und damit zur Materialeinsparung und Reduzierung des Bauteilgewichtes bildet, wird das Potential dieser Werkstoffe erst durch individuell angepasste Abkühl- und Wärmebehandlungsprozesse voll ausgeschöpft.

Am Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover wurde zur Überwachung der Gefügeausbildung in verschiedenen Tiefenlagen ein auf dem Wirbelstromverfahren basierendes Prüfverfahren entwickelt. Dieses ermöglicht den Umwandlungsbeginn sowie das Umwandlungsende ferromagnetischer Phasen, wie Ferrit, Bainit und Martensit, bei der Bauteilabkühlung im Luftstrom sowie im Wasser-Luft-Spray zu erfassen. Auch eine Unterscheidung sowie eine Quantifizierung der sich ausbildenden Gefügephasen ist durch die Analyse der Messsignale möglich. Durch die in-situ Datenerfassung ist diese Prüftechnik neben einer integrierten Qualitätssicherung auch zu einer Regelung des Abkühlvorgangs geeignet. So können Bauteilspezifisch optimale Abkühlraten identifiziert und auch während des Abkühlvorgangs die Abkühlraten an den momentanen Bauteilzustand angepasst werden.

Über eine mehrfrequente Prüfung in Verbindung mit angepasster Sensortechnik wird die Erfassung der Gefügeausbildung in unterschiedlichen Tiefenlagen, wie im Bauteilrand und -kern sichergestellt. Zur Auswahl optimaler Prüfparameter wie auch zur Entwicklung geeigneter Sensoren werden die Untersuchungen durch entsprechende Simulationsberechnungen begleitet.

Prüfung von ferromagnetischen Rohren mit einem neuartigen Wirbelstromarraysensor

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

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

Die Prüfung von Rohren und Rohrleitungen ist seit jeher ein großes Einsatzfeld für die Wirbelstromprüfung, in dem sie mit schnellen, reproduzierbaren und aussagekräftigen Prüfergebnissen eine maßgebliche Rolle spielt. Nur im Fall von ferromagnetischen Werkstoffen wird der Einsatz der Wirbelstromprüfung vielfach gescheut, weil die hohe Permeabilität der Ferromagneten die sonst so eindeutigen Wirbelstromsignale bis zur Unkenntlichkeit verzerren. In den statischen Durchlaufprüfanlagen beim Hersteller können Rohre mit Hilfe von großen umfassenden Jochmagneten fast bis zur magnetischen Sättigung aufmagnetisiert und so die störenden Permeabilitätseinflüsse unterdrückt werden.

Bei der Prüfung von eingebauten Rohren können solche Magnetisierungseinheiten nicht eingesetzt werden. Daher werden in den dort eingesetzten Innendurchlaufsensoren kleine Magnete für die Aufmagnetisierung verwendet. Aufgrund der geringeren Größe der Magnete ist hier nur eine Teilmagnetisierung möglich. Dadurch sind die Wirbelstromsignale bei weitem nicht so eindeutig wie bei den großen Magnetisierungsgeräten und nur wenige Firmen können hinreichend erfahrenes Prüfpersonal aufbieten, um die anspruchsvollen Wirbelstromsignalbilder erfolgreich zu interpretieren.

Nun ist mit der Entwicklung eines Wirbelstromsensors in Arraybauweise mit integrierter Magnetisierungseinheit ein großer Schritt gelungen nicht nur zu schnelleren, sondern gleichzeitig zu weitaus detailreicheren Wirbelstromsignalaufnahmen in ferromagnetischen Rohren. Erste Untersuchungen zeigten, dass der Sensor mit 20 Millimetern Durchmesser in der Lage ist, sowohl über den Rohrumfang verteilte als auch asymmetrische Unregelmäßigkeiten ebenso exakt und dabei in Umfangsrichtung um ein Vielfaches detaillierter zu detektieren wie die bisher verwendeten integral prüfenden Innendurchlaufsensoren.

In diesem Beitrag sollen aufbauend auf den genannten Betrachtungen Vergleiche zwischen integralen und Array-Innendurchlaufsensoren mit Magnetisierung vorgestellt werden und soweit möglich erste Ergebnisse aus Prüfungen im industriellen Umfeld präsentiert werden. Basierend auf diesen Ausführungen soll auf Erweiterungen und Optimierungen des bisherigen Prüfkonzepts eingegangen und ihre Möglichkeiten analysiert werden.

Zulässig oder unzulässig – die Probleme des Prüfers bei der Entscheidungsfindung

T. Weinert¹, S. Keitel¹

¹ SLV Halle

Im Rahmen der Bewertung der Ergebnisse zerstörungsfreier Prüfungen greift der Prüfer oft auf nationale, europäische oder internationale Regelwerke und Normen zurück und trifft dann seine Entscheidung, „zulässig“ oder „unzulässig“.

Es gibt aber immer wieder Anwendungsfälle, bei denen für den Prüfer die Entscheidungsfindung nicht ganz eindeutig ist. Dies ist oftmals darin begründet, dass eben dieser Anwendungsfall durch das Regelwerk nicht abgedeckt ist, wobei zu berücksichtigen ist, dass es die ideale Norm niemals geben wird. Problematischer allerdings ist der Aspekt, dass oftmals die Zulässigkeitskriterien in den Regelwerken nicht klar formuliert sind, bzw. es zwischen den einzelnen Regelwerken Widersprüche gibt.

Anhand ausgewählter Beispiele sollen unklare Formulierungen und Widersprüche in den Regelwerken aufgezeigt und zur Diskussion gestellt werden.

Zerstörungsfreie Prüfung von Schweiß- und Schraubenverbindungen im Anwendungsbereich der DIN EN 1090 aus dem Blickwinkel der Bemessung und Konstruktion

S. Wagner¹, S. Keitel¹

¹ SLV Halle

Die erforderliche Schweißnahtqualität sowie der Umfang der ergänzenden zerstörungsfreien Prüfung muss in Abhängigkeit der erforderlichen Ausführungsklasse für Stahl- bzw. Aluminiumkonstruktionen nach DIN EN 1090 Teil 2 bzw. Teil 3 bereits zu Beginn der Planung festgelegt werden. Dabei spielen Faktoren wie Schadensfolge, Beanspruchung und Werkstoffe, aber auch Schweißnahtart oder Anziehverfahren, eine nicht unerhebliche Rolle für den Prüfaufwand. So sind die Ersteller von Bemessungs- und Konstruktionsunterlagen u. a. mitverantwortlich für ein prüf- und korrosionsschutzgerechtes Konstruieren, Fertigen sowie Montieren von Schweiß- und Schraubenverbindungen.

Die richtige Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Schweißverbindungen wird im Regelwerk ausführlich beschrieben. Die Bewertung von Lichtbogenschweißverbindungen in der Sichtprüfung erfolgt bei Stahl nach DIN EN ISO 5817 und bei Aluminium und seinen Legierungen nach DIN EN ISO 10042. Die Bewertungsmaßstäbe für ergänzende ZfP-Verfahren können daraufhin abgeleitet werden. Auch die erforderliche Qualifizierung und mögliche Zertifizierung von Prüfpersonal ist nach DIN EN ISO 9712 beschrieben.

Ein umfangreiches Regelwerk wie in der Schweißtechnik sind für die Prozesse bei mechanischen Verbindungen noch nicht gegeben und führen im bauaufsichtlichen Bereich immer wieder zu Fragen und Schwierigkeiten bei der Anwendung.

Im Vortrag soll eine vergleichende Betrachtung durchgeführt werden, auf Probleme hingewiesen und mögliche Lösungsansätze gegeben werden. Dabei wird verstärkt auf die notwendigen Angaben bei Prüfplänen für das prüftechnische Personal eingegangen.

**ZfP von Schweißnähten vor dem Spiegel der Zeit:
Die Regelwerke sind weitgehend erneuert – Ist die Prüfung es auch?
Was bedeutet das für den Anwender? Ein Statusbericht**

B. Huber¹

¹VECTOR, München

Sowohl die produktbezogenen Anwendungsnormen, z. B. für Stahlbau, Rohrleitungs- und Behälterbau, als auch die direkten ZfP-Normen wurden in der letzten Dekade weitgehend erneuert, ersetzt oder einfach nur unverändert mit einem neuen Namen versehen.

Diese Entwicklung stellt den ZfP-Anwender nun täglich vor Problemstellungen wie diese:

- Wie beeinflussen Bewertungsgruppen von Schweißnähten die Auswahl und Bewertung von ZfP-Techniken?
- Was hat sich durch die Umstellung von EN- nach EN ISO Normen geändert, was ist geblieben?
- Inwiefern passen die normative Entwicklung in der Schweißtechnik — dargestellt in Form von Bewertungsgruppen — und die davon abgeleitete Umsetzung für zerstörungsfreie Prüfungen noch zusammen?
- Kann eine zerstörungsfreie Prüfung, die nach „altem Regelwerk“ durchgeführt und bewertet wurde, nach „neuem Regelwerk“ anerkannt werden? Wie sieht das bei den unterschiedlichen Prüfverfahren aus?

Fragestellungen wie diese erfordern die ständige Aufmerksamkeit einer Prüfaufsicht dahingehend, inwieweit die bestehende Normenlandschaft zur unangreifbaren Abwicklung von Prüfaufträgen ausreicht oder ob zusätzliche Vereinbarungen, z. B. in Form von Prüfanweisungen, erforderlich sind.

Dieser Vortrag zeigt die wesentlichen Änderungen.

Schleifbrandprüfung – ein neues ZfP Verfahren? Brauchen wir dazu qualifiziertes Fachpersonal?

M. Seidel¹, A. Zösch¹, K. Härtel¹, G. Morgenstern²

¹ imq, Crimmitschau; ² DGZfP Ausbildung und Training, Berlin

Hochbeanspruchte Bauteile, die im Maschinen-, im Fahrzeugbau und in der Luftfahrt eingesetzt werden, müssen frei von durch Wärmeeintrag beim Schleifen hervorgerufenen Schädigungen, dem sogenannten Schleifbrand sein. In weniger hoch beanspruchten Bauteilen darf der Schleifbrand ein bestimmtes, zwischen Hersteller und Abnehmer vereinbartes Level nicht überschreiten.

In der industriellen Praxis werden als Prüfverfahren das Nitalätz-Verfahren, das Barkhausen-rausch-Verfahren (BHR) und die Wirbelstromprüfung (ET) angewandt. Damit die Prüfungen zuverlässig durchgeführt werden können, ist es erforderlich, dass die Prüfer über ausreichende Kenntnisse und Fertigkeiten bei der Anwendung dieser Prüfverfahren verfügen. Dies gilt ganz besonders für das mehrstufige Nital-Ätzverfahren.

Imq Ingenieurbetrieb hatte deshalb bereits 2015 auf Anforderung eines türkischen Unternehmens einen Lehrgang „Schleifbrandprüfung mittels Nitalätzen nach ISO 14104 und AMS 2649“ entwickelt. Seitdem haben mehr als 70 Teilnehmer aus mehreren europäischen Ländern erfolgreich diesen 2-tägigen Lehrgang absolviert.

Angeregt durch verschiedene Anfragen, wurde in Kooperation zwischen der DGZfP Ausbildung und Training GmbH und der imq Ingenieurbetrieb GmbH ein neuer Kursus zur Ausbildung von Prüfwerkern für die Schleifbrandprüfung entwickelt. Der Kursus basiert auf dem bewährten Teil zum Nitalätzen und wurde um das Wirbelstromverfahren, das BHR-Verfahren und die Oberflächenrissprüfung mittels Eindringprüfung und Magnetpulverprüfung erweitert. Vorgestellt werden die Kursusinhalte, die praktischen Übungen und die Elemente der Abschlussprüfung in Theorie und Praxis.

Untersuchungen zum Nachweis von Dross an Großgusskomponenten mittels mechanisierten Ultraschall- und elektromagnetischen Prüfmethoden

R. Tschuncky¹, F. Weber¹, C. Bleicher²

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken; ² Fraunhofer LBF, Darmstadt

Bei der Herstellung von Großkomponenten aus Gusseisen mit Kugelgraphit können im Bereich der Gießoberseite Einschlüsse (sogenannter Dross) entstehen, welche die Betriebsfestigkeit der Komponenten negativ beeinflussen können. Hierbei handelt es sich um nicht-metallische Einschlüsse (oxidische, sulfidische und silikatische Verunreinigungen), die die Tendenz haben, sich an oder unmittelbar unter der Gießoberseite auszubilden. Durch mechanische Nachbearbeitung muss diese unerwünschte Schicht entfernt werden, oder das Bauteil wird zu Ausschuss erklärt. Die zuverlässige Kenntnis der Verteilung und Schichtdicke des Drosses würde helfen den Aufwand für die Nachbearbeitung und die Menge an Ausschuss zu minimieren. Darüber hinaus muss nach der Bearbeitung überprüft werden, ob die bearbeitete Oberfläche komplett drossfrei ist.

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens werden zerstörungsfreie Prüfmethoden weiterentwickelt und getestet, um Dross zu detektieren, abzubilden und zu charakterisieren. Die mechanisierte Ultraschallprüfung wird in diesem Vorhaben optimiert und auch von der Gießoberseite aus appliziert, sodass eine Abbildung der Drossverteilung auch bei einer Messung von der Dross-Seite aus möglich ist. Bislang war die Ultraschallmethode für diese Aufgabe nur durch meist händische und punktuelle Prüfung von der Dross-Gegenseite aus einsetzbar. Weiterhin wird untersucht, ob mit Hilfe der mechanisierten magnetischen Streuflusstechnik und mittels 3MA (Mikromagnetische Multiparameter-Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse) eine Detektion von Dross im oberflächennahen Bereich ausgehend von der Gießoberseite möglich ist.

An mehreren Testquadern mit unterschiedlicher Drossausbildung wurden mechanisierte Messungen mit allen erwähnten zerstörungsfreien Techniken der Materialcharakterisierung durchgeführt, daraus resultierende Messdaten ausgewertet und bezüglich des Dross-Nachweises analysiert.

Mikromagnetische Detektion von Hardspots an Grobblechen

S. Youssef¹, M. Amiri¹, A. Youssef¹, S. Pushkarev¹, D. Molenda², H. Ballmann³

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken; ² ROSEN Technology, Lingen; ³ ROSEN Germany, Stutensee

Um den hohen Qualitätsansprüchen von Stahlerzeugnissen gerecht zu werden, ist bereits eine hohe Qualität des Ausgangsmaterials erforderlich. Die Homogenität der mechanisch-technologischen Eigenschaften, wie z. B. die Härte bei Grobblechen, stellt ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar. Beispielsweise dürfen Pipelinestähle für den Saugergaseinsatz eine Härte von 250 HV10 nicht überschreiten. Für diese Aufgabenstellung wurde das am Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP entwickelte 3MA-X8 Prüfsystem (3MA = Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse) zur Detektion von lokalen Härteinhomogenitäten (sogenannte Hardspots) weiterentwickelt und für den Praxiseinsatz optimiert. Dieses System kombiniert drei unabhängige Prüfverfahren mit unterschiedlicher Eindringtiefe und Sensitivität, um im Hinblick auf Störeinflüsse (z. B. Restmagnetfelder, Zunder) im Material eine stabile und zuverlässige Bewertung zu ermöglichen. Aus diesen Prüfverfahren werden charakteristische Merkmale extrahiert, die mit Hilfe von maschinellen Lernalgorithmen und einer mobilen Härteprüfung als Referenzmethode eine Auflösung von Härteunterschieden von mindestens +/- 30 HV10 bei einem minimalen Durchmesser von 10 mm detektieren. Im Rahmen einer von der Firma ROSEN beauftragten und begleiteten Qualifizierungsstudie wurden praxisrelevante Untersuchungen durchgeführt. Ein wesentlicher Punkt dieser Studie betraf die Untersuchung der im Walzwerk vorhandenen Einflussfaktoren und der damit verbundenen Stabilität des Systems um Hardspots zuverlässig unter Praxisbedingungen zu detektieren.

Bearbeitungszustände sind zerstörungsfrei mit der Röntgendiffraktometrie analysierbar

L. Spieß¹, T. Stürzel², D. Rosenberg¹, A. Kais³, S. Schiermeyer³, G. Teichert³

¹ TU Ilmenau; ² Daimler, Ulm; ³ MFPA Weimar, Ilmenau

Die zerstörungsfreie Materialprüfung wird sehr häufig auf gängige Verfahren wie Radiographie, Ultraschall, Thermografie und Wirbelstromverfahren eingeschränkt.

Bei der Herstellung von Bauteilen mit immer höherer Komplexität in Verbindung mit angepassten Werkstoffen und erhöhten Sicherheitsanforderungen kommt der zerstörungsfreien Materialcharakterisierung zur Bestimmung von Einflüssen des Bearbeitungszustandes auf die Materialkenngrößen eine immer größere Bedeutung zu. Die Beziehung „Struktur-Gefüge-Eigenschaften“ gilt auch hier.

Zerstörungsfreie Materialcharakterisierungsverfahren unter Einsatz von Röntgenstrahlen sind neben der Radiographie/Computertomographie (CT) incl. der stark zunehmenden Mikro-CT zur Beurteilung der Homogenität von Ausscheidungen im Material (z. B. Pb in Messing oder Stahl) die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) zur Bestimmung von Zusammensetzung und Schichtdicken sowie die Röntgendiffraktometrie (XRD).

Mit der Röntgendiffraktometrie und einer komplexen Messstrategie und -auswertung können eindeutig Unterschiede an der Schnittoberfläche nach dem Schneiden von Stählen mittels Wasserstrahlschneiden, Laserschneiden oder Drahterodieren zerstörungsfrei nachgewiesen werden.

Ebenso lassen sich mittels Röntgendiffraktometrie unterschiedliche Oberflächeneigenschaften an Al-Gussproben nach dem Gießen, nach dem Schneiden, nach dem Schleifen und nach dem Poliervorgang nachweisen.

Damit lassen sich die qualitativen und quantitativen Phasenanalysen zur Überwachung des Fertigungsprozesses und die Einflüsse auf das spätere Bauteil zur Materialcharakterisierung einsetzen.

Im Vortrag werden die Leistungsfähigkeit, die Grenzen und die Anwendbarkeit der Röntgendiffraktometrie zur zerstörungsfreien Materialcharakterisierung nach unterschiedlichen Bearbeitungszuständen beschrieben.

Untersuchung der Stabilität zweier Ansätze zur Berechnung von Eigenspannungsprofilen durch Inversion von Rayleigh-Wellen-Dispersionsdaten

P. Mora¹, M. Spies¹, H. Rieder¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

In verschiedenen Industriebereichen werden die Oberflächen hochbelasteter Materialien und Bauteile speziell behandelt, um ihre Widerstandsfähigkeit hinsichtlich Verschleiß, Korrosion und Belastungen zu erhöhen. Durch Kugelstrahlen, Laser-Behandlung oder andere Methoden werden absichtlich Eigenspannungen induziert. Um diese in oberflächennahen Bereichen zu charakterisieren, können Rayleigh-Wellen genutzt werden.

In diesem Beitrag untersuchen wir die Robustheit zweier Inversionsmethoden zur Rekonstruktion der vorliegenden Spannungsprofile aus Rayleigh-Wellen-Dispersionsdaten unter der Annahme verschiedener Materialkonstanten. Die Studie basiert auf synthetischen Daten mit limitierter Bandbreite in Verbindung mit Oberflächenprofilen, die repräsentativ für das Kugelstrahlen sind. Eine Formulierung basiert auf einer Taylor-Entwicklung, während die zweite auf einer stückweise linearen Expansion basiert, die mittels Singular Value Decomposition regularisiert wird.

Wir zeigen, dass die Qualität der Taylor-basierten Methode sehr stark von den Materialkonstanten abhängt, während die zweite Methode erfolgreich zur Inversion des Spannungsprofils herangezogen werden kann, da die Materialkonstanten nur einen geringen Einfluss auf diese haben.

Wir berichten über die Simulation der Wellenausbreitung mittels Störungstheorie zur Berechnung der Rayleigh-Wellen-Dispersionsdaten in Abhängigkeit des Spannungsprofils, stellen die beiden inversen Ansätze vor und präsentieren die Resultate unserer Auswertung. Abschließend diskutieren wir die beiden Ansätze mit Blick auf deren praktische Anwendbarkeit und hinsichtlich geplanter weiterer Arbeiten.

Thermografische Untersuchungen beim Laserstrahlschweißen mit Faserlaser hoher Brillanz

S. Ulrich¹, A. Klisch², S. Jahn¹, S. Keitel²

¹ ifw, Jena; ² SLV Halle

Die stetige Weiterentwicklung von Scheiben- und Faserlasern ermöglicht sehr hohe Intensitäten. Diese entstehen durch Fokusdurchmesser von wenigen μm und hohe Laserleistungen bis in den kW-Bereich. Die kleinen Fokusdurchmesser sowie die geringen Divergenzwinkel führen zur Erhöhung des Aspektverhältnisses der Naht beim Laserstrahlschweißen. Daraus resultiert eine schlankere Nahtgeometrie sowie eine minimale thermische Belastung des Bauteils, so dass sich dünnwandige Strukturen ($d \leq 1 \text{ mm}$) verzugsarm verbinden lassen. Als Mittel zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) bietet sich die passive Thermografie an. Dabei wird während des Fügeprozesses die Eigenwärme des Prüfobjekts detektiert. Treten während des Prozesses Unregelmäßigkeiten auf, lassen sich diese aufgrund von Temperaturunterschieden an der Oberfläche detektieren.

Werden Laserstrahlquellen mit höchster Fokussierbarkeit ($d \leq 50 \mu\text{m}$) und Brillanz eingesetzt, ist die resultierende Wärmeeinflusszone minimal, was zu Problemen bei der Online-Detektion führt. Eine Lösung stellt die Mikrothermografie dar, welche mit Hilfe eines Mikroskopobjektivs hochauflösende Detailaufnahmen ermöglicht. Dies bedeutet, dass kleinste Nahtfehler detektiert werden können. Jedoch sind die Anschaffungskosten für ein solches System sehr hoch. Darüber hinaus ist der Arbeitsabstand zwischen Prüfbereich und optischem System gering, was die Anfälligkeit für Verschmutzungen und Beschädigungen durch Abprodukte des Prozesses erhöht.

Gegenstand dieser Arbeit ist das Schweißen dünnwandiger Duplexstrukturen mit einem Faserlaser höchster Fokussierbarkeit. Duplexstahl zeichnet sich durch eine hohe mechanische Stabilität bei gleichzeitig hoher Korrosionsbeständigkeit aus. Eine unsachgemäße Prozessführung führt bereits bei kleinsten Unregelmäßigkeiten zu einer Beeinträchtigung der Korrosionsbeständigkeit. Zur Nahtfehlerdetektion wird eine industrietaugliche MWIR-Focal-Plane-Array-Kamera (Teleobjektiv) verwendet. Aufgrund des hohen Arbeitsabstands eignet sich dieses System auch für Schweißanwendungen. Jedoch ergeben sich hinsichtlich der Detektion von kleinen Nahtunregelmäßigkeiten Grenzen. Für die Verifizierung werden die röntgenographische Prüfung sowie ergänzend Korrosionsversuche entsprechend der Norm ASTM G48 eingesetzt.

Photothermische Schichtdickenmessung an Betonbeschichtungen – unter Laborbedingungen und auf der Baustelle

R. Krankenhagen¹, S.J. Altenburg¹, H. Eisenkrein²

¹ BAM, Berlin; ² IBOS, Bochum

Bei der Realisierung von Oberflächen-Schutz-System (OSS) auf Betonflächen ist die tatsächlich erreichte Dicke der Beschichtung ein wesentlicher Parameter, der über die Funktionalität und Langzeitstabilität der aufgetragenen Schicht entscheidet. Gemäß dem gegenwärtigen Stand der Technik gibt es zur Schichtdickenmessung nur zerstörende und teilweise zerstörungsarme Messmethoden. Standard ist die Entnahme einer bestimmten Anzahl von Bohrkernen und Vermessung der Schichtdicke im Schnittbild unter Laborbedingungen.

Die Firma IBOS und die BAM haben in den letzten Jahren gemeinsam einen funktionstüchtigen Prototyp für ein Messgerät zur zerstörungsfreien Schichtdickenmessung für Fußböden entwickelt. Hierin wird die Abkühlkurve eines vorher erwärmten Bereichs berührungslos mit einer Infrarot-Kamera erfasst. Basierend auf einem physikalischen Modell für den Erwärmungs- und Abkühlungsprozess lässt sich die Schichtdicke direkt vor Ort bestimmen, wenn die thermischen Parameter der verwendeten Materialien bekannt sind. Während das Verfahren sehr gut für einlagige Schichten funktioniert, ist für mehrlagige OSS noch eine Reihe von Fragen offen.

Im Beitrag wird die Umsetzung der Messmethode zunächst unter Laborbedingungen und dann direkt auf der Baustelle gezeigt, entsprechende Unterschiede werden erläutert und diskutiert. Der möglichst genauen Bestimmung der thermischen Diffusivität der verwendeten Materialien kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Wenn diese Daten nicht direkt vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden können, müssen vor Ort geeignete Materialproben hergestellt werden, welche dann eine spätere Analyse im Labor unterstützen.

Möglichkeiten thermografischer Verfahren zum Nachweis von Oberflächeninhomogenitäten an Schweißverbindungen

M. Mund¹, D. Blass¹, K. Dilger¹

¹ TU Braunschweig

Thermografische Verfahren haben sich in zahlreichen Anwendungsbereichen etabliert und werden industriell eingesetzt. Um das Potenzial der thermografischen Verfahren vollständig ausschöpfen zu können, ist es jedoch notwendig, dem Anwender die Möglichkeiten (und Grenzen) der unterschiedlichen Thermografiertechniken aufzuzeigen und somit die Akzeptanz der Verfahren weiter zu steigern. Ein Anwendungsbereich, der in dieser Hinsicht besonders interessant ist, ist die Schweißtechnik.

Im Schweißprozess kann es zu einer Vielzahl von Unregelmäßigkeiten kommen, die die Qualität der Schweißverbindungen beeinträchtigen. Um eine hohe Qualität von Schweißverbindungen zu gewährleisten, wird die zerstörungsfreie Prüfung zur Eingruppierung der Schweißergebnisse genutzt. So werden in der ISO 17635 als zentraler Qualitätsnorm zerstörungsfreie Prüfverfahren genannt, die zum Nachweis von zugänglichen Oberflächeninhomogenitäten allgemein anerkannt sind. Thermografische Verfahren werden in dieser Norm allerdings nicht erwähnt, obwohl in zahlreichen Arbeiten nachgewiesen werden konnte, dass die thermografische Verfahren, in Abhängigkeit der verwendeten Anregungsquelle, durchaus zum Nachweis von Oberflächeninhomogenitäten geeignet sind.

Nur durch eine genaue Kenntnis der Verfahrensgrenzen und der Möglichkeiten lässt sich die Akzeptanz thermografischer Verfahren zur Prüfung von Schweißnähten steigern. Im Rahmen der Arbeit werden daher die Möglichkeiten von drei unterschiedlichen Verfahrensvarianten (Induktions-Puls-Phasen-Thermografie, ultraschallangeregte Lockin-Thermografie, laserangeregte Thermografie) zum Nachweis von Oberflächeninhomogenitäten in Schweißverbindungen betrachtet. Zum einen wurden dazu Literaturquellen betrachtet, zum anderen wurden experimentelle Untersuchungen an Proben mit typischen Schweißfehlern durchgeführt. Anhand der Prüfergebnisse wird die Eignung der Verfahren zum Nachweis dieser Oberflächeninhomogenitäten sowie deren Vor- und Nachteile diskutiert.

Dabei kann gezeigt werden, dass alle Verfahren prinzipiell geeignet sind Oberflächeninhomogenitäten nachzuweisen, wobei die Prüfbedingungen an die Prüfaufgabe angepasst werden müssen. Erheblichen Bedarf gibt es hingegen bei der Bestimmung der Verfahrensgrenzen.

Vollautomatische Thermografie ersetzt Magnetpulverprüfung an gehärteten Werkstücken

J. Frey¹, C. Šrajbr¹

¹ edevis, Stuttgart

Härterisse in Zahnrädern und Zahnstangen stellen für die zerstörungsfreie Prüfung seit je her eine Herausforderung dar. Die Produkte werden in großer Stückzahl für die Automobilindustrie hergestellt und müssen dabei strengste Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen. Eine Wirbelstromprüfung – bei gehärteten Wellen üblich – wird durch die komplexe Geometrie verhindert. Bis heute ist die manuelle oder teilautomatisierte Magnetpulverprüfung das Verfahren der Wahl. Bisweilen ist auch die stichprobenhafte, zerstörende Prüfung noch anzutreffen.

Erstmals ist es nun gelungen, die Magnetpulverprüfung in der Serienfertigung durch eine vollautomatisierte, aktive Thermografieprüfung zu ersetzen. Der Vortrag bietet einen Überblick über das neu entwickelte Verfahren und den Weg zur alltagstauglichen Anlage.

Im ersten Teil wird die Physik von Härterissen im Wirbelstromfeld kurz erläutert und deren Signaturen im Phasenbild aufgezeigt. Daneben werden die Auswirkungen von Zunder und Schmutz diskutiert und mit den Risssignaturen verglichen.

Anschließend wird ein Softwaremodul vorgestellt, welches Härterisse, Zunder und Schmutz erkennt und unterscheidet. Wesentliche Neuheit ist die Detektion verschiedener Riss- und Störsignaturen mit nur zwei Parametern, was durch den Einsatz intelligenter Algorithmen und die konsequente Einbindung von Vorwissen über Struktur und Verhalten von Härterissen ermöglicht wird. Der Rissdetektor setzt neue Maßstäbe in Vielseitigkeit und Benutzerfreundlichkeit und bricht mit dem alten Problem aller bildverarbeitenden Verfahren, häufig in langwierige Abhandlungen von Spezialfällen auszuarten. Die Anwendbarkeit des Detektors an unterschiedlichen Werkstücken ohne Anpassungen wird vorgeführt.

Der dritte Teil des Vortrags behandelt den Umgang mit unvermeidlichen Störeinflüssen, darunter Späne und loser Schmutz auf Werkstücken und Optik sowie Erschütterungen durch Roboter. Trotz äußerster Empfindlichkeit des Verfahrens ist durch geeignete Maßnahmen eine hohe Resistenz gegenüber diesen Störeinflüssen unter Einhaltung der Taktzeit möglich.

Vereinfachte Anwendung dynamischer Tiefenfokussierung zur Ultraschallprüfung von Luftfahrtwerkstoffen

S. Standop¹, S. Falter¹, D. Koers¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

Stark beanspruchte Komponenten, insbesondere im Luftfahrtsektor, stellen besondere Anforderungen an die Ultraschallprüfung. Die Detektion kleinster Ungängen erfolgt üblicherweise im Rahmen einer vollständigen Volumenprüfung unter Verwendung hoher Frequenzen und starker Fokussierung. Während dieser Ansatz für feinkörnige Materialien leicht umsetzbar ist, können bei anderen Materialien – wie etwa Titan-Legierungen oder Duplexstählen – aufgrund ihrer besonderen Struktur Probleme auftreten. Zeitgleich finden diese mehr und mehr Verwendung in der Industrie.

Um die Prüfbarkeit zu gewährleisten wurden in den vergangenen Jahren diverse aufwändige Verfahren bemüht, darunter etwa speziell berechnete Ultraschallwandler – so genannte Fermat-Prüfköpfe. Typischerweise muss das Bauteil dabei jedoch in mehreren Schritten abgescannt werden um eine vollständige Abdeckung zu erreichen, wodurch die Produktivität deutlich sinkt. Einen zeiteffizienteren Ansatz verfolgt GE mit der Verwendung eines 2D-Matrix-Prüfkopfes sowie eines speziellen Algorithmus, der eine Vier-Zonen-Fokussierung des Senders mit kontinuierlicher Fokussierung des Empfängers kombiniert, und so ein größeres Prüfvolumen in nur einem Scan abdeckt. Die Größe und Form des Prüfkopfes stellt jedoch Anforderungen an die Geometrie des zu prüfenden Bauteils.

In dieser Arbeit präsentieren wir einen alternativen Ansatz, der ebenfalls auf der Verwendung eines 2D-Matrix-Prüfkopfes basiert, zudem aber die Möglichkeiten der im industriellen Umfeld erfolgreich etablierten Ultraschall-Elektronik USIP_{xx} zunutze macht. So lässt sich u.a. die Zonen-Fokussierung des Senders auf unterschiedliche Tiefen und Richtungen flexibel ändern. Die Auswertung wird dabei auf eine simple Parametrisierung der Empfänger reduziert und ermöglicht mit einem hohem Grad an Parallelität eine hohe Produktivität – ohne die sonst üblichen, aufwändigen Multi-Prüfkopf-Anordnungen oder technisch anspruchsvolle Auswertelgorithmen.

Entwicklung einer Hochfrequenz-Induktionsthermografie und -Wirbelstromtechnik zur Fehlerprüfung und Charakterisierung der Schichtsysteme von Triebwerksbeschaufelung im Schaufelkanal

W. Frackowiak¹, S. Barton¹, O. Bruchwald¹, W. Reimche¹, D. Zaremba¹

¹ Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Die hohen Anforderungen an die Leistung und Zuverlässigkeit moderner Triebwerke erfordern die Integrität hochbeanspruchter Triebwerksbauteile, wie der Turbinen-, Verdichter- und Fanbeschaufelung. Insbesondere die Turbinenbeschaufelung der ersten Stufe nach der Brennkammer ist im Betrieb thermisch, mechanisch und chemisch hoch belastet. Dies führt dazu, dass sich Materialeigenschaften mit zunehmender Betriebsdauer verändern. Im Rahmen von Inspektionen und Regenerationsmaßnahmen muss somit eine Zustandsbewertung dieser Bauteile nicht nur in Form einer Prüfung der zerlegten Einzelkomponenten, sondern auch in Form der beschaufelten Laufräder erfolgen. Die Erweiterung der Prüftechniken von der Einzelschaufel auf beschaufelte Laufräder oder Blistk erfordert neue, innovative Ansätze in der Prüf-, Handhabungstechnik. Die verfolgten Lösungsansätze sind die Hochfrequenz-Wirbelstromtechnik mit Prüffrequenzen bis 100 MHz sowie Induktionsthermografie mit gepulster hochfrequenter Anregung bis 3 MHz. Durch die hohen Anregungsfrequenzen werden die Wirbelströme auf die oberflächennahen Bereiche begrenzt und so Standardeindringtiefen von < 50 µm realisiert. Damit wird eine differenzierte Betrachtung von Schicht- und Grundwerkstoff ermöglicht. Die Realisierung einer zerstörungsfreien Schaufelprüfung im beschaufelten Rad und der Blistk über den Schaufelkanal erfordert aufgrund der begrenzten Zugänglichkeit eine Miniaturisierung der HF-Wirbelstromtechnik. Durch diese Entwicklung können hochbelastete Punkte auf der Schaufeloberfläche hinsichtlich des Zustandes der Schutzschichten im Schaufelkanal geprüft und bewertet werden. Bei der bildgebenden Prüfung mit der gepulst induktiv angeregten Thermografie wird über ein geometrisch angepassten HF-Induktor eine aktive Schaufelanregung im Schaufelkanal erreicht und das Temperaturfeld der Schaufel mit einem Spiegel umgelenkt und mit der Thermografiekamera erfasst. Mit der Entwicklung dieser Technologien ergeben sich neue Möglichkeiten zur Prüfung der Triebwerksbauteile mit schlechter Zugänglichkeit hinsichtlich der Zustandserfassung der Beschichtungen, der Schichtcharakterisierung und Schichtdickenbestimmung, sowie des empfindlichen Nachweises lokaler Schädigungen und Defekte.

Prüfung von dicken CFK Bauteilen mit der Total Focussing Methode

Y. Bernhardt¹, J. Rittmann¹, W. Essig¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Speziell im Luftfahrtbereich werden kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) wegen ihrer hohen spezifischen Steifigkeit und Festigkeit zunehmend in tragenden Bauteilen eingesetzt. Vor allem, wenn faserverstärkte Kunststoffe lastpfadgerecht eingesetzt werden, also die Fasern stets in Zugrichtung belastet werden, kann das ganze Potential dieser Werkstoffe ausgeschöpft werden. Bei reiner Zugbelastung lässt sich dies am besten über unidirektionale (UD) Fasern parallel zur Belastungsrichtung erreichen. Für den tragenden Einsatz entstehen somit auch Strukturen deren Dicke weit über zehn Millimeter betragen. Mit der Materialdicke steigt auch aufgrund der Heterogenität und Anisotropie des Werkstoffs die Schwierigkeit, diese Bauteile zerstörungsfrei auf fertigungsbedingte Fehler hin zu untersuchen. In der vorliegenden Arbeit wird die zerstörungsfreie Prüfbarkeit von UD-CFK Laminaten mit Dicken von über 20 mm mittels Phased-Array Ultraschall untersucht.

In der vorliegenden Arbeit wird die zerstörungsfreie Prüfbarkeit eines UD-CFK Laminats mit einer Dicke von 20 mm mittels Phased-Array Ultraschall untersucht. Diverse künstliche Defekte, wie zum Beispiel Querbohrungen und Flachbodenbohrungen, werden in das Laminat in unterschiedlichen Tiefen eingebracht. Die Leistungsfähigkeit der Phased-Array Ultraschallprüfung kann in diesem Fall schnell durch den Einsatz eines E-Scans nachgewiesen werden, allerdings bedarf die Fehlerdarstellung noch einer Optimierung.

Durch den Einsatz von UD-Lagen können die longitudinalen Schallgeschwindigkeiten in der Ebene senkrecht zur Faserrichtung als homogen angesehen werden. Dies ermöglicht den Einsatz der Total Focussing Methode, allerdings nur für Linienprüfköpfe, deren größere Dimension der Apertur senkrecht zur Faserrichtung orientiert ist. Die Vorgabe eines bestimmten Berechnungsfensters liefert somit eine Fehlerdarstellung in Echtzeit. Das Abscannen entlang der Faserrichtung ermöglicht zudem die Darstellung eines C- sowie D-Scans, sodass mit standardisierten Auswertalgorithmen die Fehlerpositionen und Fehlerdimensionen exakt bestimmt werden können.

Bildgebende Schweißpunktprüfung durch Phased Array Technologie – neue Features und Korrelation mit der zerstörenden Prüfung

G. Vogt¹, J. Mußmann¹, B. Vogt¹, W.K. Stiller²

¹VOGT Ultrasonics, Burgwedel; ²Hochschule Hannover

Dieser Vortrag behandelt die Eignung der bildgebenden Phased Array Ultraschall Technologie (PAUT) für die zerstörungsfreie Prüfung von widerstandgeschweißten Punkten. In dieser Studie werden 2- und 3-Blechverbindungen mit einer Einzelblechstärke von 0,7 mm bis zu 3 mm mit PAUT sowie der zerstörenden Hammer und Meißel Probe mit einer anschließenden metallographischen Untersuchung geprüft. Die Prüfergebnisse der unterschiedlichen Methoden werden korreliert und auf Abweichungen hin untersucht.

Analysiert wird insbesondere die Messgenauigkeit des Linsendurchmessers. Zusätzlich wird die Präzision der Schallschwächung durch Gefügeumwandlung bei hochfestem Stahl sowie der Restwanddicke im verschweißten Bereich von Aluminium untersucht. Die Phased Array Prüfung der Schweißpunkte wird mit dem PHASISONE Prüfgerät durchgeführt. Mit 121 Ultraschall-Elementen in einer 11 x 11 Matrix wird eine physikalische Auflösung genauer als 0,35 mm für die Prüfung des Schweißlinsendurchmessers erzielt. Bei jeder Prüfung werden mehr als 700 Messpunkte pro Schweißpunkt als elektronisches Scanbild aufgenommen. Zur Ankopplung der Prüfköpfe an das Prüfobjekt wird die Wasservorlaufstrecke mit bewährter Bublertechnik oder ein Vorlauf mit festem Rexolite Keil genutzt. Wie bei der konventionellen Schweißpunktprüfung in der Produktion mit nur einem Ultraschall-element, können pro Schicht ca. 500 – 800 Schweißpunkte überprüft werden. Die Software unterstützt den Prüfer mit voreingestellten Prüfplänen für hinterlegte Bauteile oder mit dem Modus „Freie Prüfung“, in dem er losgelöst von festgelegten Prüfplänen schnell unterschiedlichste Schweißpunkte untersuchen kann.

Oftmals werden zur Vorbereitung eines Prüfplans alle Punkte einer Probe in optimierter Reihenfolge einmal manuell geprüft. Hierfür bietet der Modus „freie Prüfung“ die Möglichkeit, alle Daten, Abfolgen und Ergebnisse zu speichern und in einen neuen Prüfplan zu überführen. Anhand der gewonnenen Daten lässt sich am PC mit Hilfe der PHASIS.manager Software ein Prüfplan für eine spätere Serienprüfung erstellen. Dieser finale Prüfplan wird anschließend mit den relevanten Prüfsystemen synchronisiert und kann nun durch Nutzer mit deutlich weniger Ultraschall-Knowhow sicher ausgeführt werden.

Integrierte Strukturüberwachung für kohlefaserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe im Automobil

K. Tschöke¹, T. Gaul¹, T. Klesse¹, U. Lieske¹, F. von Dungern², J. Guerrero-Santafe², H. Wessel-Segebade³

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² INVENT, Braunschweig; ³ Königs Wusterhausen

Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Automobil ist hochattraktiv. Fragen der Betriebssicherheit sind jedoch weiterhin ungeklärt. Faserverbundwerkstoffe weisen ein anderes Schadensverhalten als bisher eingesetzte, metallische Werkstoffe auf. Durch Stoßbelastung können Defekte wie Delaminationen oder Matrixbrüche entstehen, die durch eine visuelle Inspektion nicht erkennbar sind. Im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts CarbonSafe (Förderkennzeichen 16ES0333) wurde eine integrierte Lösung entwickelt, die die strukturelle Integrität von CFK-Bauteilen überprüfen kann.

Es handelt sich dabei um ein aktives SHM-Verfahren zur werkstattseitigen Überwachung von sicherheitsrelevanten Bauteilen aus Verbundwerkstoffen im Automobil. Die piezoelektrischen Wandler, deren Eignung für den vorgesehenen Einsatzzweck untersucht und bestätigt wurde, und die Leiterbahnen sind dabei in das Bauteil integriert. Die Funktionsfähigkeit des verwendeten SHM-Verfahrens wurde sowohl simulationsgestützt als auch durch Laborversuche nachgewiesen. Die Bewertung der Struktur erfolgt über ein extern angeschlossenes Diagnosegerät. Die Kommunikation zwischen Diagnosegerät und Sensorik erfolgt über ein Bussystem, wodurch das SHM-System im gesamten Fahrzeug mit einem Gerät gesteuert werden kann. Die Auswertung kann dem Benutzer über eine PC-Software oder eine spezielle App auf einem Tablet visualisiert dargestellt werden. Die Erprobung des Systems wurde durch Testfahrten an speziell ausgerüsteten Fahrzeugen ergänzt.

Parallel dazu wurden Schulungsunterlagen erarbeitet und den Teilnehmern eines Abschlussseminars als Handout mitgegeben. Die Schulungsunterlagen führen in die Ultraschallprüfung mit geführten Wellen ein und beschreiben das entwickelte System. Sie befördern den Transfer in die industrielle Anwendung, auch in andere Industriesektoren.

Neuartiges Prüfsystem zur robotergestützten, schnellen, lokalen Röntgen-Computertomographie großer Baugruppen

M. Krumm¹, C. Sauerwein¹, V. Hämmerle¹

¹ RayScan Technologies, Meersburg

Moderner Automobil- und Karosseriebau zeichnet sich u. a. durch eine Kombination aus einer Vielzahl verwendeter Materialien und verschiedenster Verbindungstechniken aus. Eine Rohkarosse aktueller Bauart weist 5000 – 6000 Verbindungsstellen auf, die zumindest prozessbegleitend vollständig geprüft und bewertet werden müssen. Für die zerstörungsfreie Prüfung der Verbindungselemente ist die Computertomographie (CT) sehr gut geeignet – allerdings nur sofern die Proben letztlich doch zerstörend präpariert und in klassischen CT-Systemen gemessen werden oder das verwendete CT-System dazu geeignet ist, eine gesamte Karosserie im Messfeld aufzunehmen. Beide Varianten sind aufwendig hinsichtlich Rüst- und Prüfzeit sowie Prüfkosten und sind zumindest bei der zerstörenden Prüfung zusätzlich mit Wertschöpfungsverlusten verbunden. Ein Prüfsystem, welches durch eine flexible Positionierung eine schnelle zerstörungsfreie Prüfung ermöglicht, ist nicht nur für die Qualitäts- und Prozesskontrolle in der Automobilproduktion von Vorteil, sondern auch für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt oder in der Energiewirtschaft.

Aus diesem Grund wurde ein komplett neues Prüfsystem entwickelt, dessen wichtigste Design-Anforderung die Möglichkeit zur Durchführung einer lokalen Tomographie an beliebigen Positionen in einer offenen Rahmenstruktur war. Das entwickelte Manipulatorsystem zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Röntgenquelle und Messobjekt setzt dabei auf eine „U“ förmige Messeinheit, die mit einem rotierenden Arm ausgestattet ist. Während der Messung werden kontinuierlich digitale Röntgenprojektionsbilder gemessen und innerhalb von Minuten zu einem 3D-Datensatz rekonstruiert. Zum Zweck der Automatisierung wird die Messeinheit an einem Industrieroboter befestigt und erlaubt so die Erstellung vollautomatischer Messabläufe.

Die mit dem neuartigen CT-System erzeugten Ergebnisse zeigen, dass die zerstörungsfreie Prüfung von verschiedenen Arten von Verbindungselementen an allen untersuchten Positionen einer Fahrzeugkarosserie sehr gut möglich ist. Neben vielfältigen Beispielen aus dem Karosseriebau werden in diesem Beitrag auch Ergebnisse aus Anwendungen in anderen Branchen vorgestellt.

Interferometrisches Röntgenbildgebungssystem für die Durchstrahlungsprüfung

D. Sand¹, M. Gallersdörfer¹, V. Ludwig¹, S. Käßler¹, G. Pelzer¹, J. Rieger¹, T. Michel¹, G. Anton¹

¹ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Durch Anwendung der interferometrischen Röntgenbildgebung sind neben dem herkömmlichen Schwächungsbild auch die Ablenkung und Streuung der Röntgenstrahlung darstellbar. Diese drei Informationen werden durch das Verfahren zeitgleich und mit identischer örtlicher Auflösung gemessen. Dadurch können die verschiedenen Eigenschaften ortsauflöst dargestellt und analysiert werden, ohne dass eine Registrierung der Bilder aufeinander notwendig ist.

Im Phasenkontrastbild (Ablenkung) verursachen Objektkanten einen deutlich besseren Kontrast als in der herkömmlichen Röntgenbildgebung. Das Dunkelfeldbild (Streuung) hingegen ist sensitiv auf sehr kleine Objektstrukturen, die deutlich unterhalb der typischen Pixelgröße eines Röntgendetektors ($100\mu\text{m}$) liegen. Dies trifft beispielsweise auf Fasern, Mikrorisse und Luftporen zu, die oftmals mit herkömmlichen Röntgensystemen nicht aufgelöst werden können, da sie nur wenige Mikrometer groß sind. Dadurch stellt insbesondere das Dunkelfeldbild eine zusätzliche Materialinformation dar, die in der Durchstrahlungsprüfung und Materialanalyse von Vorteil sein kann.

In diesem Beitrag stellen wir ein interferometrisches Röntgenbildgebungssystem vor, welches im Bereich zwischen 60kV und 125kV betrieben wird und somit für eine Vielzahl von Materialien verwendet werden kann. Durch Einsatz eines verfahrens Objektträgers kann ein Bereich von $25\text{cm} \times 160\text{cm}$ innerhalb von 24 Sekunden durchleuchtet werden bei einer Auflösung in der Objektebene von $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$. Die Skalierung des Systems auf einen größeren Messbereich ist technisch realisierbar.

Essentielle Parameter zur numerischen Abschätzung der Sichtbarkeit von Bildgüteprüfkörpern in der digitalen Radiographie

U. Ewert¹, U. Zscherpel¹, F. Zhang², N.X. Long³, N. Phong³

¹ BAM, Berlin; ² Dresden International University; ³ VINATOM, Hanoi, Vietnam

Die Voraussetzungen für die Vorhersage der Sichtbarkeit von Bildgüteprüfkörpern (BPK) wurden seit Beginn der kommerziellen Anwendung der technischen Radiographie diskutiert und in diversen nationalen und internationalen Standards festgeschrieben. Diese Fragen werden nach Einführung der digitalen Radiographie und der CT wieder neu diskutiert. Draht BPKs wurden in Deutschland seit 1935 (DIN 1915: 1935) und später in den meisten europäischen Ländern benutzt. In den USA und Frankreich wurden vorzugsweise BPKs mit Löchern verwendet (ASTM E 1025 seit 1984 oder E 1742 seit 1992 bzw. die Vorgängernorm MIL STD-543 seit 1962). Jetzt werden auch die Umrechnungsnormen zur Erkennbarkeit von Draht zu Loch-BPKs in Frage gestellt. ISO 19232-3, der französische RCCM-Kode einerseits und ASTM E 747 und ASME BPVC Section V Tab. T-276 andererseits unterscheiden sich erheblich bei den Anforderungen im Bereich hoher Wandstärken (Hochenergi radiographie). Untersuchungen dazu werden vorgestellt. Mit Einführung der digitalen Detektoren ändern sich auch die Rauschspektren. Durch die Herstellung werden insbesondere bei Speicherfolien „Rauschmuster“ eingepreßt, die bei hohen Belichtungs Dosen sichtbar werden. Diese veränderten Rauschspektren ergeben auch veränderte Erkennungsparameter für menschliche Bildauswerter. Hierzu wurden an ausgewählten Detektoren MTFs (presampled) und normierte Rauschspektren gemessen. Erweiterte Erkennbarkeits-Formeln zur Vorhersage der Sichtbarkeit von BPKs für Bildauswerter und erste Ergebnisse werden vorgestellt.

Charakterisierung von Photonenzählenden Röntgen-Pixeldetektoren im Hinblick auf bildgebende Verfahren

D. Murer¹, T. Donath¹, M. Habl¹

¹ DECTRIS, Baden-Dättwil, Schweiz

Photonenzählende Röntgen-Pixeldetektoren haben im letzten Jahrzehnt die Protein-Kristallographie revolutioniert und finden vermehrt auch Anwendung in direkt bildgebenden Verfahren in Medizin und Industrie. Bei zählenden Hybriddetektoren oder HPC (Hybrid Photon Counting) Detektoren befindet sich in jedem Pixel ein CMOS Schaltkreis, der mittels eines Mikro-Bumpbonds mit einem Halbleiter-Sensor verbunden ist. Der Schaltkreis zählt alle Röntgenphotonen, die im Sensor ein über einer konfigurierbaren Schwelle liegendes Signal produzieren. Die neueste Generation von zählenden Detektoren von DECTRIS arbeitet mit bis zu 4 Schwellen pro Pixel, wodurch auch spektrale Informationen aufgenommen werden können. Diese Arbeit präsentiert die Charakterisierung der für die Bildgebung massgeblichen Eigenschaften der Detektoren. Spezifisch werden die Kontrastauflösung, die spektralen Eigenschaften und das räumliche Auflösungsvermögen gezeigt. Es wird den Einfluss der Strahlaufhärtung (Beam-Hardening) sowie der Schwelle auf diese Eigenschaften diskutiert. Schliesslich werden konkrete Anwendungen des spektralen Auflösungsvermögens in der Computertomographie diskutiert.

3D Modellierung der elektro-mechanischen Wellenausbreitung in einem piezoelektrischen Ultraschallwandler aus 1-3 Composite: Simulation und experimentelle Validierung

S. Kolkooari¹, R.H. Koch¹

¹ ROSEN Technology and Research Center, Alzenau

Die quantitative und multi-physikalische Simulation spielt für die Auslegung von Ultraschallwandlern zur Erzielung optimaler Funktionalität bei gleichzeitiger Reduzierung des experimentellen Aufwandes in der Entwicklungsphase und bei der Optimierung der Fertigungsprozesse eine immer bedeutendere Rolle. In diesem Beitrag berichten wir über eine effiziente 3D-Finite-Elemente-Modellierung der elektromechanischen Wellenausbreitung in piezoelektrischen, auf 1-3 Composite basierenden Ultraschallwandlern unter Verwendung der Simulationssoftware PZFlex (Piezoelectric Fast, large and explicit). Zuerst wird das FEA-Modell des Ultraschallwandlers mit den Komponenten Composite-Schwinger, Anpassschichten, Dämpfungsmaterial und der elektrischen Beschaltung mit einem Koaxialkabel bei Verwendung verschiedenen Kopplungsmedien (Luft, Wasser) vorgestellt. Insbesondere wird die Dice-and-Fill Technik, als am häufigsten eingesetztes Fertigungsverfahren zur Herstellung der Composite-Schwinger, berücksichtigt. Die simulierte Frequenzabhängigkeit der elektrischen Impedanz eines piezoelektrischen 1-3 Keramik-Epoxydharz-Composite wird im Bereich von 1 kHz bis 20 MHz mit den experimentellen Ergebnissen zur Charakterisierung der unbekanntenen dielektrischen, elastischen und piezoelektrischen Eigenschaften des Keramikmaterials (PZT-5H) verglichen. Die akustischen Eigenschaften eines Multi-Phasen Dämpfungsmaterials werden analytisch und experimentell untersucht, um die Volumenfraction eines Schwermetall-Pulvers in Epoxydharz zu optimieren. Die optimierten Materialeigenschaften der Piezokeramik, des Dämpfungskörpers und der Anpassschicht werden in der Simulation mit hoher Genauigkeit berücksichtigt, um das numerische Rauschen zu minimieren. Zusätzlich werden die Einflüsse der Anpassschichtdicke und des PZT-Volumenanteils auf die Signalamplitude, Mittenfrequenz und Bandbreite analysiert. Die simulierten Ultraschallwandler Pulse-Echo Signale im Zeit- und Frequenzbereich werden mit den gemessenen experimentellen Daten verglichen und es wird eine gute quantitative Übereinstimmung zwischen dem Experiment und der Simulation erzielt. Anschließend werden die wesentlichen ZfP-Anwendungen der entwickelten Ultraschallwandler in der Öl- und Gasindustrie diskutiert.

Entwicklung angepasster Simulationsmodelle für Methoden der Zustandsüberwachung basierend auf geführten Wellen

K. Tschöke¹, T. Gaul¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden

Verfahren der Zustandsüberwachung durchdringen fortlaufend immer weitere Anwendungsfelder wie die Luftfahrt, den Automobilbau, die chemische Industrie, erneuerbare Energien oder das Bauwesen. Für viele Einsatzszenarien eignen sich insbesondere Methoden, die auf der Nutzung geführter Wellen, als Spezialform des Ultraschalls, basieren.

Gekrümmte Bauteile und Strukturen oder heterogene und anisotrope Materialien, sowie das dispersive Verhalten geführter Wellen im Allgemeinen, erschweren die Auslegung und Konzeptionierung der Überwachungssysteme. In der Regel lässt sich der enorme Aufwand bei der Entwicklung und Anpassung nicht vollständig durch Laborversuche abdecken. Der Einsatz Modell-gestützter Methoden ist eine anerkannte Alternative zu Laborversuchen, bedarf allerdings geeigneter und angepasster Simulationsmodelle und -programme.

Klassische Modellierungs- und Diskretisierungsverfahren, wie Finite Differenzen, Finite Volumen oder Finite Elemente Methoden, wurden und werden kontinuierlich an die Anforderungen der o. g. Anwendungsfelder angepasst. Insbesondere FEM-Modellierungen können eine hohe Güte bei der Approximation der Wellenfelder liefern, weisen jedoch auch einen enorm hohen Rechen- und Zeitaufwand auf. Angepasste Finite Differenzen Methoden, wie das FDTD-Verfahren, oder Finite Volumen Methoden, wie EFIT, können diesem Nachteil begegnen und werden seit vielen Jahren erfolgreich für die Zerstörungsfreie Prüfung und die Zustandsüberwachung eingesetzt.

Auch diese Verfahren weisen jedoch Approximierungsfehler, insbesondere bei der Modellierung gekrümmter Strukturen, auf, die u. a. in der Literatur als „Staircase-Approximation“ bekannt sind. Weiterhin zeigen diese Methoden Nachteile bei der Modellierung mehrschichtiger Lamine, wie sie bei Faserverbundwerkstoffen auftreten, da dünnlagige Materialaufbauten eine sehr feine Diskretisierung erzwingen.

Diesen Aspekten widmet sich der vorliegende Beitrag und zeigt Ansätze, Simulationsmodelle gezielt an Anforderungen von Methoden der Zustandsüberwachung basierend auf geführten Wellen anzupassen.

Grenzen und Herausforderungen bei der Simulation geführter Wellen in Faserverbundstrukturen

A. Ernst¹, R. Sridaran Venkat¹, C. Boller¹

¹ Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Seit mindestens drei Jahrzehnten wird das Thema der geführten Wellen intensiv verfolgt. Dies gilt insbesondere im Zusammenhang mit Fragestellungen aus der Zustandsüberwachung (Structural Health Monitoring (SHM)), bei der Schädigungszustände inert durch integrierte, meist piezoelektrische Wandler ermittelt werden sollen. Für quasi isotrope Werkstoffe wie Metalle ist das einfacher möglich als für anisotrope Faserverbundwerkstoffe. Allerdings haben Faserverbundwerkstoffe den Reiz, dass z. B. die piezoelektrischen Wandler auch in die Werkstoffe integriert werden können. Zudem ist das Verhalten von Schadensmechanismen in Faserverbundwerkstoffen im Vergleich zu metallischen Werkstoffen noch deutlich schlechter bekannt. Aus diesem Grund ist eine schadenstolerante Auslegung von Faserverbundstrukturen bis heute noch nicht möglich. Gäbe es ein SHM-System, das eine solche Schadenstoleranz überwachen und somit gewähren könnte, dann ließen sich damit vermutlich weitere Leichtbaupotenziale in Faserverbundstrukturen heben. Um dies zu tun bedarf es leistungsfähiger Simulationswerkzeuge, denn es muss ermittelt werden, mit welchem Sensornetzwerk ein tolerierbarer Schaden zuverlässig erkannt werden kann. Diese Optimierungsaufgabe ist wirtschaftlich nicht experimentell lösbar, sondern kann nur experimentell verifiziert werden. In der Literatur werden von verschiedenen Forschergruppen entwickelte Simulationswerkzeuge zur Ermittlung von Schädigungen in Faserverbundwerkstoffen vorgestellt. Interessanterweise enden aber alle Beispiele bei einfachen Plattenstrukturen, obwohl die realen Anwendungen am Ende viel komplizierter sind. In dem vorgeschlagenen Beitrag werden die verschiedenen Verfahrensweisen relevanter Simulationswerkzeuge dargestellt und an einem konkreten Beispiel die Grenzen der Simulation beschrieben. Abschließend wird erläutert, was gemacht werden müsste, um die Simulation soweit zu beschleunigen, dass reale komplexe Faserverbundstrukturen, wie sie z. B. in der Luftfahrt vorkommen, simuliert werden können. Damit ließen sich zuverlässige SHM-Systeme nachweisen, die dann realisiert und in der Zukunft effizient eingesetzt werden könnten.

Effiziente Modellierung von geführten Wellen mit der Scaled Boundary Finite Elemente Methode und deren Anwendung für Composite-Druckbehälter

Y. Lugovtsova¹, J. Bulling¹, F. Krome¹, J. Prager¹

¹BAM, Berlin

Die Scaled Boundary Finite Elemente Methode (SBFEM) ist eine semi-analytische Methode, die speziell für Modellierung von geführten Wellen weiterentwickelt und optimiert wurde. Da nur den Rand der Rechendomäne diskretisiert wird, hat die SBFEM einen geringen Rechenaufwand. In diesem Beitrag wird die SBFEM benutzt, um die Ausbreitung geführter Wellen in einer Metall-Faserverbundwerkstoffstruktur zu analysieren. Mittels der SBFEM ist es möglich, verschiedene Fehlertypen, z.B. Ermüdungsrisse, Poren, Delaminationen, Korrosion, in das numerische Modell zu integrieren und damit Defekt-Mode Wechselwirkung zu analysieren. Die Ergebnisse wurden für die Entwicklung einer Methode zur Zustandsüberwachung von Composite-Druckbehältern verwendet.

Einfluss unterschiedlicher Schadensparameter auf die lokale Defektresonanz

M. Rahammer¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Die Lokale Defektresonanz (LDR) ist ein mechanisch-physikalischer Effekt, der auch für die zerstörungsfreie Materialprüfung genutzt werden kann. Im Fall typischer Materialschäden, wie Risse, Delaminationen oder Porennester, sinkt am Ort des Defektes die lokale Steifigkeit des Bauteils. Die sonst mittels akustischer Quellen angeregten Grundschrwingungen des Bauteils werden im Fall von Materialschäden von höherfrequenten Schwingungsmoden überlagert, die allerdings nur am Ort des Defektes resonant schwingen. Zur Visualisierung dieser resonanten Schwingung können Laservibrometer, oder im Fall von kunststoffbasierten Werkstoffen auch Thermografie- oder Shearografiesysteme kostengünstiger eingesetzt werden. Da der Einfluss diverser Defektparameter wie Größe, Position und Orientierung auf die Resonanzen bislang nur bruchstückhaft geklärt ist, wurden mittels der Finiten-Elemente-Methode Flachbodenbohrungen mit sowohl unterschiedlichen Ligamenten als auch Radien simuliert und die entsprechenden LDR-Frequenzen bestimmt. Ein Vergleich mit experimentellen Werten zeigte eine sehr gute Übereinstimmung und es ergaben sich hierbei Frequenzen von 1-100 kHz. Des Weiteren konnte die bisherige geschlossene Lösung für kreisrunde Defekte mittels einer analytischen Herleitung auch auf realitätsnahe elliptische Formen – wie sie auch bei typischen Impactereignissen in Kompositwerkstoffen auftreten – ausgeweitet werden. Es wurden anfangs isotrope Werkstoffe betrachtet und die Erkenntnisse anschließend auf die stark heterogenen Faserkunststoffverbunde übertragen.

Automatisierte zerstörungsfreie Prüfung des Füllgrades von Falzverklebungen mittels Phased Array Ultraschall

M. Klausing¹, S. Cusenza², H. Heuer³

¹ TU Dresden; ² Volkswagen, Wolfsburg; ³ Fraunhofer IKTS, Dresden

Der Fügeprozess des Falzklebens wird im Automobilbau aufgrund der nicht sichtbaren Fügestellen für Anbauteile, wie bspw. Türen, Hauben oder Klappen eingesetzt. Mittels dieses Fügeverfahrens wird das strukturgebende Innenblech mit dem kundensichtbaren Außenblech gefügt. Die Fügeebene wird sowohl aus Stabilitätsgründen als auch zum Schutz vor dem Eindringen von Feuchtigkeit mit Klebstoff gefüllt. Um die Anforderungen an Klebstoffmenge sowie Klebstoffverteilung sicherzustellen, müssen diese Fügeverbindungen fortwährend geprüft werden. Diese Überwachung erfolgt aktuell durch eine zerstörende manuelle Prüfung. Dies bedingt einen hohen Personalaufwand, Schrottkosten und einen langen Prozessregelkreis.

Um die Klebstoffverteilung innerhalb der Falz effizient zu überwachen, wird in einem hohen Maße die Entwicklung einer zerstörungsfreien und inlinefähigen Prüftechnik angestrebt. Als aussichtsreichste Prüfmethode hierfür gilt die Phased Array Ultraschalltechnik. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme in Dresden wird ein Verfahren entwickelt, welches automatisiert alle Falzbereiche im unausgehärteten Klebstoffzustand innerhalb der Linie prüft. Durch die möglichst frühe Prüfung innerhalb der Prozesskette soll ein kurzer Regelkreis ermöglicht werden.

In Laboruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit den Standardultraschallparametern die benötigte Auflösung und Messstabilität nicht erreicht wird. Mittels FEM Simulationen konnten aus den Amplitudenbildern neue Kriterien abgeleitet werden, mit denen insbesondere die Detektionsrate von Mäanderstrukturen verbessert wird. Nach der Implementierung der Bewertungsmethode in die Ultraschallsoftware und dem Aufbau eines Multi Phased Array Prüfsystems ist das Verfahren sowie der Auswertalgorithmus zunächst im Labor hinsichtlich der Detektionsrate getestet und bewertet worden. Im anschließenden Prototypentest innerhalb der Linie ist das Prüfverfahren unter Serienbedingungen qualifiziert worden. Ziel ist der Nachweis, dass die Prüfmethode die notwendige Robustheit gegenüber dem Produktionsumfeld des automobilen Karosserierohbaus aufweist.

Im Vortrag werden die Prüfmethode mit dem Auswertalgorithmus, der Validierungsprozess und einige Ergebnisse aus dem Serieneinsatz vorgestellt.

Evaluation of bonding quality in CFRP composite laminates by measurements of local vibration nonlinearity

I. Solodov¹, D. Segur², M. Kreutzbruck¹

¹ Universität Stuttgart; ² CEA LIST, Toulouse, Frankreich

A new approach to monitoring quality of adhesive bonding in carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) is developed by using a local nonlinear response of the laminate. It is shown that a degraded (contaminated) boundary layer of the adhesive contributes to an overall nonlinear response of the laminate that enables to evaluate and quantify bonding quality affected by various types and levels of single contaminations. In the context of aviation applications, two typical stages for which the adhesive properties of a bonding joint could be degraded during the life of a structural CFRP component were considered: the production process and the maintenance/repair scenario. The measurements were carried out for a large set of composite specimens with different bonding conditions and types of contaminants. All kinds of single contaminations studied result in enhancement of the nonlinear response of the CFRP laminate which is an indication of deterioration of bonding quality. The effect of multiple contaminations confirms a cumulative decline of adhesion caused by increase of the contents of single contamination components.

Shearography ein ZfP Verfahren in neuem Licht

C. König¹, T. Siebert¹

¹ Dantec Dynamics, Ulm

Fristete Shearography in der Vergangenheit noch ein Dasein als Nischentechnologie, so führen Technologie-Innovation sowie vermehrter Einsatz von Verbundwerkstoffen zu neuen Anwendungen dieser interessanten Prüftechnik.

Steigende Energiekosten und Umweltauflagen treiben den Einsatz von Materialien und Konstruktionen voran, welche Vorteile durch Gewichtsreduzierung bei gleichen oder besseren Materialeigenschaften zeigen. Fanden Composite Werkstoffe in der Vergangenheit eher in der Luftfahrt Verwendung, so sind sie heute schon in unterschiedlichsten industriellen Anwendungen im Einsatz. Beispielhaft zeigt sich dieser Trend an einer prognostizierten Verdreifachung des Einsatzes von Composite Materialien in der Automobilindustrie. Ein Trend der sich in anderen Industriezweigen wie zum Beispiel der Windenergieerzeugung fortsetzt. Fallende Rohstoffpreise bei den Materialien und Fasern verursacht durch Skalierungsvorteile in Abnahme und Produktionskapazitäten befeuern diesen Trend. Hier stellen sich neue Herausforderungen an Prüftechnik, Personal und Ausbildung in Materialprüfung und Design sowie der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.

Die klassischen Prüfverfahren decken in diesem Zusammenhang weiterhin einen großen Teil der notwendigen Prüfaufgaben ab und stellen sich auf die neuen Anforderungen ein. Etliche Aufgaben und Fehlerbilder wie zum Beispiel fehlerhafte Klebeverbindungen oder Falten in den Faserlagen lassen sich jedoch nicht, oder nur mit erheblichem Aufwand mit den klassischen Methoden prüfen.

Hier entfalten sich die Vorteile der Shearography. Eine heute ausgereifte Technologie, die besonders von den rasanten Leistungssteigerungen in Kamera und Rechner-technik, sowie der allgemeinen Miniaturisierung profitiert. So können portable Systeme, einfach bedient, reproduzierbare, sichere Fehleranzeigen in kurzer Zeit liefern. Die bildgebende Darstellung, sowie einfache Prüfabläufe erzielen aussagefähige Resultate, wo andere Technologien an ihre Grenzen stoßen.

In diesem PowerPoint Vortrag werden die neuesten Shearography-Technologie und Produktentwicklungen im ZfP- und Anwendungskontext vorgestellt.

Neben den Möglichkeiten und Anwendungsfeldern werden auch die Grenzbereiche der Shearography aufgezeigt.

Zerstörungsfreie Prüfung von geklebten Strukturbauteilen mittels thermisch und dynamisch angeregter Shearografie

I. Kryukov¹, S. Böhm¹

¹ Universität Kassel

Das strukturelle Kleben gewinnt in der industriellen Anwendung eine immer größere Bedeutung. Vor dem Hintergrund der optimalen Werkstoffauswahl zur Realisierung von Gewichtseinsparungen bietet die Klebtechnik die Möglichkeit, unterschiedlichste Materialien ohne thermische Gefügebeeinflussung zu fügen. Aufgrund des sensiblen Fügeprozesses und der damit verbundenen hohen Anfälligkeit müssen insbesondere bei sicherheitsrelevanten Klebungen Fehler weitestgehend ausgeschlossen werden. Zum Verhindern des Versagens von Klebeverbindungen definiert die 2016 in Kraft getretene DIN 2304 vier Sicherheitsklassen von Klebeverbindungen und benennt Anforderungen an die Überwachung von Mess- und Prüfmittel. Zum Nachweis einer fehlerfreien Klebung bietet sich die zerstörungsfreie Prüfung an. Die etablierten Verfahren Ultraschall- und Durchstrahlungsprüfung sind, bedingt durch die vergleichsweise hohe Prüfdauer, nur für wenige Anwendungen in der Serienfertigung einsetzbar. Hieraus resultiert, dass im Produktionsalltag aufgrund der fehlenden Alternativen heutzutage immer noch häufig zerstörend geprüft werden muss.

Die Shearografie ist ein optisches zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem schnell größere Klebflächen hinsichtlich Inhomogenitäten und Fehlstellen geprüft werden können. Aufgrund von einer von außen aufgebracht Belastung wird dabei der Verformungsgradient der Oberfläche des Prüfobjekts ausgewertet. Aus einer lokalen Abweichung des Verformungsgradienten kann auf innenliegende Fehler in der Klebung geschlossen werden. Die typischerweise verwendeten Belastungsarten lassen sich in thermische oder mechanische Anregungsarten unterteilen.

In diesem Beitrag wird die Detektionsfähigkeit der Shearografie an geklebten Strukturbauteilen vorgestellt. Als Prüfobjekte dienen speziell zu diesem Zweck geklebte Hutprofile verschiedener Werkstoffe (Aluminium, Tiefziehstahl), die hinsichtlich Fehlstellen in der Klebeverbindung untersucht werden. Als Klebstoff für die artgleichen und artungleichen Strukturklebungen wird ein 2K-Polyurethan-Klebstoff eingesetzt. Zur Erzeugung der Belastungen werden thermische und dynamische Anregungsarten eingesetzt. Betrachtete Fehler sind dabei unter anderem fehlender Klebstoff, Poren im Klebstoff, Delaminationen sowie Kissing Bonds.

Schnelle Prüfung von CFK-Tragflächen Vorderkanten mit Phased Array Ultraschall

Y. Bernhardt¹, W. Essig¹, M. Kreutzbruck¹

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 Ultraschall eine tragende Rolle zu.

Eine Herausforderung, die sich die Ultraschallprüfung allerdings immer öfter stellen muss, ist die Prüfung von gekrümmten Flächen. Große Krümmungsradien können noch durch Ausnutzung der Oberflächenspannung eines wasserbasierten Koppelmittels überbrückt werden, während kleine Krümmungsradien speziell geformte Vorlaufstrecken benötigen. Diese Lösung ist im Bereich der Einkanaltechnik Stand der Technik und wird bereits eingesetzt. Bei Verwendung von Linien- oder Matrixprüfköpfen ergeben sich hieraus neue Herausforderungen, die in anisotropen Werkstoffen nicht mittels der Total Focussing Methode (TFM) gelöst werden können.

In dieser Arbeit wird hierzu ein Verfahren entwickelt, um die Verklebung der Vorderkante des Höhenleitwerks des Elektro-Rekordflugzeugs egenius aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) zu prüfen. Hierzu wird, ähnlich der Einkanaltechnik, eine spezielle Vorlaufstrecke hergestellt, die die negative Kontur der Vorderkante abbildet. Besonderheit dieser Vorlaufstrecke ist hierbei, dass es mehrere Positionierungsmöglichkeiten für einen Linienprüfkopf gibt, somit können alle Bereiche der Vorderkante mit einem Vorlauf geprüft werden. Winkelschwenks von diversen Sequenzen liefern anschließend denjenigen Winkel, unter dem der Ultraschall senkrecht auf das zu untersuchende Bauteil trifft. Eine Interpolation der Winkel liefert somit für jede Sequenzierung eines E-Scans einen optimal senkrechten Einschallwinkel. Anschließend wurden die für die optimalen Schwenkwinkel jeweiligen Verzögerungszeiten berechnet. Abschließende Messungen zeigen, dass ein in intakten Bereichen durchgehend konstantes Rückwandecko entlang der Krümmung zu sehen ist und belegen den wirkungsvollen Einsatz dieser Methode.

μ CT begleitete in-situ Druckversuche an spongiösem Knochen – Vergleich(ende Bestimmung) des experimentellen und simulierten Verschiebungsfeldes mit der simulierten internen Spannung

B. Illerhaus¹, E. Kunisch², R. Kinne²

¹ BAM, Berlin; ² Universitätsklinikum Jena, Eisenberg

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich ältere Schafe gut als Modell für die minimalinvasive Behandlung von Osteoporose eignen. Um einen Behandlungseffekt nachzuweisen, wird dabei unter anderem die Belastungsfähigkeit des Knochens durch Druckversuche an kleinen Zylindern aus den behandelten und unbehandelten Knochen bestimmt. Diese hatten hier einen Durchmesser von 10 mm und eine Höhe von 13 mm. Für den in-situ Druckversuch wurde eine Deben CT5000 verwendet. In einer Serie von Druckerhöhungen wurden die Proben jeweils tomographiert. Dabei ergab sich zunächst, dass mit der μ CT innerhalb der Knochen im oberen und unteren Bereich schon Brüche nachgewiesen werden können, obwohl die gemessene Kraftaufnahmekurve keine Unstetigkeit zeigt. Deswegen wurden die starren Probenaufnehmer der Deben Anordnung durch bewegliche Aufnehmer ergänzt, die eine leichte Verkippung der belasteten Oberflächen ausgleichen können. Ein Vergleich der gemessenen und der aus den μ CT-Daten berechneten Verschiebungsfelder ergab trotz der komplexen Struktur der Knochen gute Übereinstimmungen. Diese Verschiebungen wurden dann mit den aus den μ CT Daten simulierten mechanischen Druckversuchen, Von-Mise-Spannungen und daraus berechneten Verschiebungen verglichen. (VGStudioMax Simulation).

Korrektur von Artefakten in CT-Daten (Streustrahlen und Multimaterialien)

I. Bauscher¹, M. Firsching¹, V. Jelito¹, T. Stocker¹

¹ Fraunhofer EZRT, Fürth

Das EZRT entwickelt innovative Softwaremodule für industrielle Anwendungen mit Computertomographie (CT). Diese intelligenten Algorithmen unterstützen Systemhersteller und -anwender dabei, die Ergebnisse dreidimensionaler Bildverarbeitung deutlich zu verbessern und machen hochgenaues dimensionelles Messen möglich.

Oft sind Streustrahlen die Ursache schlechter Bildqualität. Das firefly [descatter]-Modul korrigiert den Streuanteil des Prüfkörpers und die detektorinterne Streustrahlung in den aufgenommenen Röntgenprojektionen – mit nur einer zusätzlichen Kalibrierungsmessung. Mit dieser Kalibrierungsmessung können bei festgehaltenen Röntgenparametern Messreihen baugleicher und ähnlicher Prüfobjekte korrigiert werden. Die Orientierung der Bauteile im Strahlengang kann dabei variiert werden.

Bauteile, in denen unterschiedliche Materialien kombiniert werden, werden immer beliebter. Der Materialmix ist für die Prüfung aber nicht ganz unproblematisch: Oftmals zeichnen sich erhebliche Artefakte in der Nähe stark absorbierender Bereiche ab. Das Modul firefly [multimat] kompensiert diesen Umstand, indem es zwei Aufnahmen desselben Objekts mit unterschiedlichen Energien zur Korrektur nutzt. Dies führt zu schärferen Trennlinien zwischen den Materialien, zu stark reduzierten Aufhärungsartefakten und somit zu einer deutlich erhöhten Bildqualität.

Qualitätsverbesserungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette durch die Flexibilität der 3D Röntgenbildgebung

P. Schmidt¹, L. Hunter², C. Funk¹

¹ Carl Zeiss Industrielle Messtechnik, Oberkochen; ² Carl Zeiss X-Ray, Pleasanton, USA

Entscheidend für die Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte sind Optimierungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Dabei unterscheiden sich die Herausforderungen bei der Qualitätsoptimierung an unterschiedlichen Stellen in der Wertschöpfungskette deutlich. Am Beispiel der Teileherstellung in der Kunststoffindustrie wird gezeigt, dass neueste 3D Röntgenbildgebung jedoch an vielen verschiedenen Stellen einen wesentlichen Wertbeitrag zur Qualitätsverbesserung leisten kann. Das Basiskonzept der Computertomographie lässt sich dabei optimal für die jeweilige Aufgabe anpassen.

Zu Beginn der Produktentwicklung ist ein tiefgehendes Verständnis der verwendeten Materialien notwendig. Durch den Einsatz hochauflösender Röntgenmikroskopie können z. B. einzelne Fasern von Verbundwerkstoffen aufgelöst oder Mikrostrukturen von Polymer-schäumen im Sub-Mikrometer-Bereich sichtbar gemacht und so Schwachstellen im Material besser charakterisiert werden.

Ein weiterer Schritt in der Produktentstehung besteht in der Findung der optimalen Form für die Herstellung der Teile. Durch die Verwendung von hochgenauen Computertomographen zusammen mit dem Einsatz neuester Software kann dabei die Zeit von der ersten bis zur finalen Form signifikant reduziert werden. Bei der Produktion muss schließlich durch ausreichende Stichprobenprüfung sichergestellt werden, dass die Qualität der produzierten Teile konstant hoch bleibt. Dazu werden sehr schnelle und hochautomatisierte CT-Verfahren verwendet, die automatisch definierte Prüfmerkmale auswerten. Eine softwaretechnische Einbindung ermöglicht, dass Prüfergebnisse für sicherheitsrelevante Bauteile nachvollziehbar dokumentiert und archiviert werden.

Dabei werden die grundlegenden Vorteile der 3D Röntgenbildgebung an den verschiedenen Stellen in der Wertschöpfungskette genutzt. Dazu zählen unter anderem ein zerstörungsfreies, vollständiges 3D Bild der Probe, das sichtbar und messbar machen innerer Strukturen, die Lagebestimmung von Fehlern und die Erkundung derer Ursachen im Materialgefüge. Diese Eigenschaften bleiben bei den verschiedenen Formen der Basistechnologie – hochauflösende Röntgenmikroskopie, hochgenaue Computertomographie und vollintegrierte, schnelle CT-Lösung – erhalten.

Metrologische Computertomografie zur seriennahen Anwendung an großformatigen Batteriezellen zur Qualitäts- und Funktionsbewertung

J. Niedermeier¹, A. Kopp¹, J. Schmidt², P. Schmidt², T. Bernthaler¹, G. Schneider¹

¹ Hochschule Aalen; ² Carl Zeiss Industrielle Messtechnik, Oberkochen

Bei Elektrofahrzeugen steckt ein erheblicher Teil der Wertschöpfung in den darin verbauten Energiespeichern – den Lithium-Ionen-Batterien (LiB). Zusätzlich kommen LiB vermehrt als stationäre Speichersysteme zum Einsatz. Deren Qualitätskontrolle ist unabdingbar für den sicheren Betrieb sowie die Reduzierung der Herstellungskosten. Eine Möglichkeit der zerstörungsfreien Qualitätssicherung, speziell von gefertigten LiB, ist die Röntgencomputertomografie (CT). Die CT bietet potentiell die Möglichkeit, Prüfungen der jeweiligen Montagezustände der Zellfertigung vorzunehmen. In dieser Arbeit wurde geprüft, in wie weit sich die CT zur Detektion von Defekten (z.B. geometrische Abweichungen, Teleskopierung) zur Ausschussreduzierung und zur fertigungsnahen Qualitätsbewertung großformatiger LiB anwenden lässt. Hierfür werden sicherheitsrelevante Prüfmerkmale der LiB untersucht, durch diverse Tomografien dargestellt und analysiert. Sicherheitsrelevante Prüfmerkmale sind beispielsweise der Verlauf der Elektrodenstapel bzw. -wickel, deren Abstände hin zu Gehäusewandungen und Ableiterblechen der Elektrodenkontaktierungen und Poren in den Schweißnähten. Die Herausforderung hierbei ist der Kompromiss aus möglichst artefakt- und rauscharmen dreidimensionalen Darstellungen der aus verschiedenen Materialien und damit einhergehenden unterschiedlichen Schwächungskoeffizienten bestehenden Komponenten bei möglichst geringen Scanzeiten. Die relativ großen Prüfvolumina großformatiger LiB erfordern hochaufgelöste Komplettscans mit hohen Messzeiten. Es sollen aber auch Ansätze zur Messzeitreduzierung und deren Auswirkungen auf die Messgenauigkeit evaluiert werden. Bei lokalen Tomografien können die Anoden- und Kathodenfolien im rekonstruierten 3D-Modell voneinander unterschieden und sogar die elektrisch isolierenden Separatormembranen dargestellt werden. Die gewonnenen CT-Volumendaten der großformatigen LiB lassen sich mit CAD-Modelldaten abgleichen, alternativ gibt es auch die Möglichkeit CT-Volumendatensätze direkt miteinander abzugleichen.

Bestimmung der Faserorientierung langglasfaserverstärkter Thermoplaste mittels bildoptischer Analyse und Computertomografie

E. Willems¹, A. Beerlink², J.-F. Metayer², M. Kreuzbruck¹, C. Bonten¹

¹ Universität Stuttgart ; ² YXLON International, Hamburg

Faserverstärkte Thermoplaste gewinnen unter dem Einfluss sozialpolitischer Themen wie der Energieeinsparung, der Ressourcenschonung und unter dem Aspekt des Recyclings zunehmend an Bedeutung. Die erzielbare Steigerung der mechanischen Eigenschaften ist dabei vor allem von der vorliegenden Faserorientierung, Faserkonzentration und Faserlänge im Bauteil abhängig.

Thermoplaste mit diskontinuierlicher Faserverstärkung werden typischerweise im großserientauglichen Spritzgießprozess hergestellt. Dabei bildet sich eine lokal stark variierende Faserorientierung aus, die durch den Werkstoff, die Bauteilgeometrie und die Prozesseinstellungen beeinflusst wird. Zur Charakterisierung von Werkstoff- und Bauteileigenschaften spielt dementsprechend die Analyse der Faserorientierung eine entscheidende Rolle. Konventionelle Methoden beschränken sich dabei auf die bildoptische Analyse von zweidimensionalen Schlifffildern. Aktuelle Methoden stützen sich hingegen auf die Auswertung von dreidimensionalen Rekonstruktionen mittels Computertomografie.

Ein Vergleich zeigt, dass die Computertomografie durch automatisierte Algorithmen verlässliche Ergebnisse zur Faserorientierung liefern kann. Im Abgleich zur experimentellen Bestimmung des vorliegenden Faservolumenanteils zeigen die errechneten Ergebnisse auf Basis der Computertomografie sogar geringere Abweichungen als die konventionelle bildoptische Methode.

Optimierung vollständiger Trajektorien der Computertomographie unter Einhaltung einer gegebenen maximalen Längenmessabweichung

P. Klein¹, F. Herold¹, A. Kopylow¹

¹YXLON International, Hamburg

Bei der zerstörungsfreien Prüfung mittels Computertomographie werden Bilddaten aus verschiedenen Perspektiven erzeugt, sodass eine Rekonstruktion des betrachteten Volumens und der darin enthaltenen Strukturen ermöglicht wird. Die Änderung der Perspektive wird dabei durch eine relative Bewegung zwischen dem betrachteten Volumen sowie dem bildgebenden System aus Röntgenröhre und -detektor erzeugt. Der Verlauf der relativen Bewegung des Brennflecks zum Objekt über den gesamten Prüfvorgang wird dabei als Trajektorie bezeichnet. Trajektorien, welche nach dem von Tuy-Smith formulierten Kriterium als „vollständig“ betrachtet werden können, ermöglichen dabei eine mathematisch ebenso vollständige Rekonstruktion des Volumens. Zwar existieren gängige Richtwerte für die Anzahl der Projektionen entlang einer Trajektorie, jedoch zielen diese in der Regel auf eine Rekonstruktion des gesamten Volumens ab.

In dieser Studie untersuchen wir, welchen Einfluss die Anzahl und die Auswahl der Projektionen entlang einer vollständigen Trajektorie auf eine Prüfung haben, deren Ziel nicht in der Rekonstruktion des Volumens, sondern in der Erfüllung einer spezifischen Messaufgabe liegt. Dazu untersuchen wir unterschiedliche, vollständige Trajektorien dahingehend, inwieweit eine Reduzierung der Projektionszahl durchgeführt werden kann, ohne dabei eine vorgegebene maximale Längenmessabweichung zu überschreiten. Die Strategie zur Reduzierung der Projektionszahl wird dabei sowohl durch Simulationsdaten als auch mittels realer Messungen verifiziert. Eine zusätzliche Randbedingung ergibt sich durch die Verwendung eines Industrie-Roboters zur Objektmanipulation, wodurch sich einerseits ein größeres Spektrum an vollständigen Trajektorien realisieren lässt, aber andererseits der Roboter selbst nicht in den Strahlengang ragen darf. Abschließend werden die erreichten Verbesserungen bezüglich Geschwindigkeit und Messfehler beziehungsweise Bildqualität diskutiert.

Berechnung von Laufzeit- und Amplitudenverteilung durch simultane Lösung der Eikonal- und Transportgleichung mittels einer adaptierten Fast-Marching-Methode

R. Neubeck^{1,2}, S. Buske¹, L. Schubert²

¹ TU Bergakademie Freiberg; ² Fraunhofer IKTS, Dresden

Ein effizientes und stabiles Verfahren zur Berechnung von Laufzeit- und Amplitudenverteilung von Ultraschallwellen für komplexe dreidimensionale Strukturen mit räumlich variierenden Materialparametern ist ein in vielen Bereichen der zerstörungsfreien Prüfung mittels elastischer Wellen häufig anzutreffendes Problem. Besonders im Bereich der permanenten Zustandsüberwachung mit geführten Wellen oder durch Schallemissionsverfahren sind die Einflüsse von Geometrie sowie Materialparameter maßgebliche Einflussfaktoren auf alle Phasen der Überwachung. Von der Planung des Sensornetzwerkes, über die Messungen und die Auswertung können alle Phasen von der Kenntnis der Laufzeit- und Amplitudenverteilung profitieren bzw. sind einige Auswerteverfahren erst damit anwendbar.

Im vorliegenden Beitrag wird die Anpassung der Fast-Marching-Methode vorgestellt, sodass neben der klassischen Berechnung der Laufzeiten eine simultane Berechnung der Amplitudenverteilung möglich ist. Dazu wird neben der Eikonal- gleichzeitig die Transportgleichung mittels Finiten-Differenzen-Schema mit zusätzlicher Upwind-Forderung gelöst. Beide Gleichungen sind ein Resultat der Hochfrequenzapproximation der Wellengleichung und stellen eine Eulersche Betrachtungsweise des Problems dar. Dadurch werden Lösungen an vorher definierten Beobachtungspunkten berechnet. In der Praxis hat dies Vorteile gegenüber klassischen Verfahren wie Raytracing, welche eine Langrangsche Betrachtungsweise darstellen, da z. B. zusätzliche Interpolationen entfallen.

Das Verfahren wird anhand einiger Beispiele aus der Zustandsüberwachung mit geführten Wellen und ihrer Anwendung erläutert. Außerdem wird dargelegt, wann das Verfahren die optimale Komplexität der Fast-Marching-Methode von $\mathcal{O}(n \log(n))$ beibehält.

Effiziente CT-Rekonstruktion eines Voxel-Volumens mit inhomogener räumlicher Auflösung mithilfe eines Octrees

B. Betz¹, S. Kieß¹, M. Krumm², G. Knupe², T. Eshete², S. Simon¹

¹ Universität Stuttgart; ² RayScan Technologies, Meersburg

Durch die in den letzten Jahrzehnten stetig verbesserte Auflösung von Flachbild-Detektoren hat sich die Größe der computertomographischen Volumendatensätze drastisch erhöht. Normalerweise wird der gesamte Messbereich mit der gleichen Auflösung rekonstruiert und gespeichert. Je nach Prüfteilgeometrie und Prüfaufgabe ist jedoch nur ein Bruchteil des Messbereichs tatsächlich interessant für eine anschließende Datenanalyse. Eine Möglichkeit, den Speicherbedarf zu senken, ist die Beschreibung der Volumendaten mit unterschiedlichen Auflösungen bzw. Voxelgrößen für die verschiedenen Teile des Messbereichs. Dabei werden alle relevanten Bereiche mit maximaler Auflösung rekonstruiert und gespeichert, während die Auflösung bei nicht-relevanten Teilen des Volumens begrenzt wird. Eine effiziente Datenstruktur, die diese Anforderungen erfüllt, ist der Octree. Er bietet die Möglichkeit, unterschiedlich große Voxel zu definieren und damit die Auflösung eines Voxel-Volumens beliebig anzupassen. Beim Octree wird das Volumen rekursiv in acht gleichgeformte Teilvolumen aufgeteilt, bis die gewünschte Auflösung in allen relevanten Bereichen des Volumens erreicht wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde, durch den Einsatz von inhomogenen Voxel-Volumen, zusätzlich zum reduzierten Speicherverbrauch, die Rekonstruktionszeit durch die verringerte Anzahl an Voxel reduziert. Um die 3D-Rekonstruktion zusätzlich zu beschleunigen, wurde die gefilterte Rückprojektion zusätzlich parallelisiert um die Rechenleistung von aktuellen Grafikkarten auszunutzen. Dazu wurden u. a. Methoden entwickelt, um beliebig große Datensätze sequentiell auf einer Grafikkarte oder parallel auf mehreren Grafikkarten rekonstruieren zu können.

In diesem Beitrag werden die vorgeschlagenen Verfahren erläutert, mit entsprechenden Kennzahlen bewertet und mit herkömmlichen Rekonstruktionsverfahren verglichen.

Advanced Ultrasonic Imaging for Concrete: Alternative Imaging Conditions for Reverse Time Migration

I. Coelho Lima¹, M. Grohmann¹, E. Niederleithinger¹

¹ BAM, Berlin

Ultrasound echo is a widely used NDT technique for determining the internal geometry of structures. Reverse-time migration (RTM) has been recently introduced to NDT applications, as an imaging method for ultrasound data, to overcome some of the limitations (e.g. imaging steeply dipping reflector) experienced by the Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT), the most commonly used imaging algorithm for these measurements. The standard implementation of RTM also experiences some drawbacks caused by its imaging condition, which is based on the zero-lag of the cross-correlation between source and receiver wavefields and generates high-amplitude low-frequency artifacts. Three alternative imaging conditions, developed for seismic data applications, were tested for their ability to provide better images than the standard cross-correlation: illumination compensation, deconvolution and wavefield decomposition. A polyamide specimen was chosen for the simulation of a synthetic experiment and for real data acquisition. The migrations of both synthetic and real data were performed with the software Madagascar. The illumination imaging condition was able to reduce the low-frequency noise and had a good performance in terms of computing time. The deconvolution improved the resolution in the synthetic tests but did not show such benefit for the real experiments. Finally, as for the wavefield decomposition, although it presented some advantages in terms of attenuating the low-frequency noise and some unwanted reflections, it was not able to image the internal structure of the polyamide as well as the cross-correlation did. Suggestions on how to improve the cost-effectiveness of the implementation of the deconvolution and wavefield decomposition were presented, as well as possible investigations that could be carried out in the future, to obtain better results with those two imaging conditions.

Aktuelle Trends und Herausforderungen der Zuverlässigkeitsbewertung der ZfP

D. Kanzler¹

¹ Applied Validation of NDT, Berlin

Zwei wesentliche Trends können im Moment im Feld der Zuverlässigkeitsbewertung beobachtet werden. Einerseits die Erweiterungen auf weitere Bereiche, nicht nur bezogen auf Industriebereiche, sondern auch geographisch gesehen. Das asiatische und südamerikanische Interesse an dem Thema „Zuverlässigkeit“ führt wiederum deutsche und europäische Firmen zum Zugzwang, um auch weiterhin qualitätstechnisch seine Vorreiterstellung zu behalten. Zuverlässigkeitswerkzeuge mit leichter Handhabung und einfacherem Verständnis müssen daher entwickelt werden.

Gleichzeitig fordern die modernen Prüfverfahren (z. B. Zustandsüberwachung) und Produktzuverlässigkeitsansätze (z. B. der digitale Zwilling), dass die Bewertungen von Prüfverfahren eine stärkere Rolle in der Zukunft einnehmen. Hiermit ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass auch weiter die Komplexität der fortgeschrittenen Bewertung zu nimmt.

In dem Vortrag sollen die aktuellen Trends an einigen Beispielen aufgezeigt werden und einige Lösungsmöglichkeiten gezeigt werden. Einige der Ansichten hinsichtlich der Trends ist eine zusammenfassende persönliche Einschätzung des siebten „European American Workshops on Reliability“ in NDE.

Einfluss der Fehlercharakteristik auf die Reproduzierbarkeit von Prüfanlagen

T. Würschig¹, C. Breidenbach¹, B. Hömske¹, R. Pfortje¹, S. Falter¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

Die Reproduzierbarkeit der Prüfung ist eine der wesentlichen Kenngrößen, welche die Leistungsfähigkeit einer automatisierten Prüfanlage beschreiben. Diese Kenngröße wird im Allgemeinen im Rahmen des Abnahmeprozesses bestimmt. Das geschieht üblicherweise durch einen statistischen Abnahmetest, bei welchem ein Teststück mit künstlich eingebrachten Referenzfehlern mehrfach mit der zuvor justierten Prüfanlage geprüft wird. Bei jedem Prüflauf kommen dann die Referenzfehler zur Anzeige und im Anschluss an die Prüfung wird die relevante Messgröße der Anzeige ermittelt, beispielsweise die Amplitude oder die Laufzeit des Ultraschallsignals. Mittels statistischer Auswertung werden im Anschluss üblicherweise der Mittelwert sowie die absolute und die statistische Abweichung ermittelt. Der Einfachheit halber wird üblicherweise das zur Justage der Prüfanlage verwendete Referenzrohr auch zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit eingesetzt.

Dabei kommt es zu charakteristischen Abweichungen, die, wenn es sich um einen rein statistischen Prozess handeln würde, im Wesentlichen einer gaußschen Verteilung um den Mittelpunkt folgen müssten. Reale Messungen zeigen aber häufig deutlich Abweichungen vom gaußschen Verhalten. Verantwortlich dafür sind verschiedene Faktoren. Einer der zentralen Ursachen liegt in Fertigungsgüte der Referenzfehler und Ihrer Inhomogenität begründet. Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen und Messverfahren vorgestellt, anhand derer einerseits die Fehlerhomogenitäten mithilfe einer automatisierten Prüfanlage vermessen werden. Die so erzielten Ergebnisse werden mit den Ergebnissen der statistischen Reproduzierbarkeitsprüfung verglichen und ein Zusammenhang aufgezeigt, welcher Vorhersagen aus der Fehlerhomogenität auf die maximal erzielbare Reproduzierbarkeit erlaubt.

Anforderungen und Lösungsmöglichkeiten zur Qualitätssicherung von bildgebenden Ultraschallprüfanlagen

W. Hillger¹, A. Szewieczek¹, L. Bühling¹, D. Ilse¹

¹ Ingenieurbüro Dr. Hillger, Braunschweig

Die Funktionsfähigkeit von bildgebenden Ultraschallprüfsystemen muss jährlich nachgewiesen werden. Basierend auf der DIN EN 12668 muss eine Prüfungs- und Kalibriervorschrift erstellt werden, die jedoch für die spezielle Anlage und Prüfaufgabe von Hersteller und Betreiber gemeinsam angepasst werden muss. Wichtig ist ein repräsentativer Referenzkörper mit dokumentierten Imperfektionen, der in vordefinierten Intervallen vom Anlagenbetreiber gescannt wird. Die Imperfektionen des Referenzkörpers müssen den Bereich der geforderten Auflösung verifizieren können.

Darüber hinaus muss der Hersteller die Einhaltung der Spezifikation anhand der Kalibrier Vorschrift nachweisen. Über die DIN EN 12668 hinausgehende Anforderungen existieren, wenn spezielle Module bzw. Arrays verwendet werden, wie z. B. Prüfköpfe mit integriertem Verstärker oder neuartige Prüfverfahren eingesetzt werden, wie die Ankopplung über Luft. Hierfür werden im Rahmen des Vortrages verschiedene Lösungen vorgestellt.

Resonante Frequenzsweep Thermografie für Flachbodenbohrungen und Impactschäden

M. Rahammer¹, M. Kreuzbruck¹

¹ Universität Stuttgart

Die Resonante Frequenzsweep Thermografie (RFST) basiert auf dem Prinzip der lokalen Defektresonanz (LDR) in Verbindung mit der bekannten ultraschall-angeregten Thermografie. Lokale Defektresonanzen treten immer dort auf, wo ein Bauteil lokal aufgrund eines Defektes geschwächt wird. Dieser Bereich besitzt dann eigene, sehr viel höhere Resonanzfrequenzen und kann mit diesen sehr effizient angeregt werden. Dies führt zu einer energieeffizienten Ultraschallthermografie mit einfachen Anregungsquellen. Da jedoch Defektresonanzfrequenzen üblicherweise unbekannt sind, muss breitbandig angeregt werden. Während eines langsamen Frequenzsweeps im unteren und mittleren Kilohertzbereich, werden Defekte sobald ihre Resonanzfrequenz erreicht wird angeregt und die thermische Antwort aufgrund von Rissuferreibung oder viskoelastischer Erwärmung an der Oberfläche von einer Thermografiekamera detektiert. Trotz der sehr niedrigen integralen Wärme können mithilfe einer Fourier-Filterung Defekte mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis detektiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Prototyp für den praktischen Einsatz der RFST für Impactschäden in CFK angewendet. Aufgrund der großen Anzahl an Prüfkörpern konnte eine Probability of Detection (PoD) Analyse durchgeführt und das Verfahren RFST somit validiert werden.

Kundenspezifische Ultraschallwandler auf Basis von 1-3-Piezokompositen

K. Hohlfeld¹, P. Neumeister², H. Neubert², S. Gebhardt²

¹ TU Dresden; ² Fraunhofer IKTS, Dresden

Piezoel. US-Wandler auf Basis von Piezokeramik-Polymer-Verbundwerkstoffen finden in Sonaren, in Systemen zur Bauteilüberwachung und zerstörungsfreien Werkstoffprüfung sowie in der Medizintechnik Einsatz. Gewöhnlich werden US-Wandler als 1-3-Piezokomposite ausgelegt, bei denen die Piezokeramik stäbchenförmig in einer und die Matrix in drei Raumrichtungen ausgeprägt ist. Damit erreichen sie gegenüber Vollkeramik überlegene Eigenschaften hinsichtlich mechan. Stabilität, elektromechan. Kopplung und akust. Impedanz. Die Verwendung von piezokeram. Fasern und Perlen als Basiskomponenten ermöglicht dabei auf den Anwendungsfall zugeschnittene US-Wandler mit hoher Frequenzbreite. Am Fraunhofer IKTS steht eine leistungsfähige Spinn-technologie zur Herstellung dichter piezokeram. Fasern ($d = 100\text{-}800\ \mu\text{m}$) sowie Perlen ($d = 0,8\text{-}1,6\ \text{mm}$) zur Verfügung. Zum Aufbau piezoel. Komposite werden diese in Polymermatrizes eingebettet. Je nach Applikationsfall lassen sich über gezielte Auswahl und Anordnung der Komponenten, 3D-Bearbeitung der Komposite sowie strukturierte Abscheidung von Elektroden die Wandlereigenschaften einstellen.

Faserbasierte 1-3-Piezokomposite mit Arbeitsfrequenzen von $40\ \text{kHz} \leq f \leq 8\ \text{MHz}$ werden durch die Infiltration von Faserbündeln mit Polymer realisiert. Aufgrund der quasi uneingeschränkten Faserlänge bzw. Wandlerdicke kann die Resonanzfrequenz der Dickenschwingung in einem breiten Spektrum angeboten werden. Durch eine regellose Anordnung der Fasern im Komposit werden unerwünschte Quermoden vermieden.

Für den Einsatz in einem 3D Ultraschall-Computertomografie-System wird eine Vielzahl (ca. 2000 Stück) von US-Wandlern mit einem Durchmesser $d = 460\ \mu\text{m}$ und 2 MHz Betriebsfrequenz in einer spezifischen Anordnung benötigt. Dies gelingt durch die gezielte Platzierung und individuelle Ansteuerung von Einzelfasern in 1-3-Piezokomposit-Wandlern.

Zur Umsetzung eines fokussierenden US-Wandlers werden piezokeramische Perlen halbkugelförmig angeordnet und vergossen. Nach Abschleifen der Kompositoberfläche und Metallisierung liegt ein Halbschalen-Wandler mit zentrisch angeordneten Piezoelementen vor, der eine natürliche Fokussierung zulässt.

Ergebnisse zu dielektr., elektromechan. und akust. Eigenschaften der US-Wandler werden detailliert dargestellt und diskutiert.

Elektromagnetische Ultraschallmessungen zur Untersuchung der Anelastizität im Zugversuch an C45 Stahl

I. Veile¹, H.-H. König¹, K. Szielasko¹, F. Weber¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

In kristallinen Feststoffen tritt bei magnetischen, elektrischen und mechanischen Vorgängen anelastisches Materialverhalten auf. Als solches werden Prozesse bezeichnet, bei denen eine Änderung einer äußeren magnetischen, elektrischen oder mechanischen Kraft zu einer retardierten Einstellung einer magnetischen, elektrischen oder mechanischen Gleichgewichtslage führt.

Die zerstörungsfreie Charakterisierung dieser Prozesse stellt höchste Anforderungen an Messgenauigkeit und Auflösungsvermögen eines Verfahrens. Vor diesem Hintergrund wurde untersucht, ob elektromagnetisch angeregte Ultraschall- (EMUS-) Messungen prinzipiell geeignet sind, um anelastisches Materialverhalten im Zugversuch an C45 Stahl zu charakterisieren. Die Messungen wurden in Transmission mit Rayleighwellen der Frequenz 1 MHz durchgeführt.

Zunächst wurden Einflussgrößen, die sich zum Teil mit den Anelastizitätsphänomenen überlagern, identifiziert und Möglichkeiten systematisch untersucht, deren Auswirkungen auf die Messungen zu minimieren. Anschließend wurden Zugversuche zur qualitativen Bestimmung des anelastischen Verhaltens durchgeführt. Die erkannten Änderungen der Ultraschall-Laufzeit wurden auf den Snoek-Effekt und den magneto-elastischen (Villari-) Effekt zurückgeführt. Diese Effekte bieten das Potential, künftig als Basis einer neuartigen zerstörungsfreien Messtechnik eingesetzt zu werden.

Ultraschallprüfung von Bauteilen mit gekrümmten Oberflächen: Geometrieanpassung, Echohöhenbewertung, Kalibrierung, Anwendungsgrenzen

R. Meier¹

¹ IPRM, Erlangen

In sehr vielen Fällen sind Bauteile mit gekrümmten Oberflächen, wie Wellen, Rohre oder Behälter mit Ultraschall mechanisiert oder manuell zu prüfen. Die dabei auftretenden Effekte, wie Wegkippen des Prüfkopfes, Fokussierung/Defokussierung und Auswirkung des Koppelpaltes auf die Signalamplitude werden erläutert. In den einschlägigen Prüfregelwerken werden Aussagen getroffen, ab wann die Geometrie der Prüfkopfsohle an die Oberflächenkontur anzupassen ist, z.B. dann, wenn der Bauteildurchmesser kleiner als 10 mal der Prüfkopflänge (gemessen in Krümmungsrichtung) ist. Die verschiedenen Anpasskriterien und ihre Herkunft werden erörtert. Aber alle geläufigen Anpassungskriterien haben keinerlei Bezug zur verwendeten Prüftechnik! Es wird gezeigt, dass die Kriterien hinreichend sind, solange sich die Prüffrequenz im Bereich bis etwa 2 MHz bewegt. Desweiteren wird abgeleitet, bis zu welchen Grenzen eine AVG-Bewertung mit Justierung am ebenen Kalibrierkörper zulässig ist und inwieweit eine Justierung am Bauteil oder am gekrümmten Testkörper den Anwendungsbereich erweitert. Häufig wird in Regelwerken genannt, dass die Prüfkopfsohle bei konkav gekrümmten Oberflächen grundsätzlich anzupassen ist und dass eine AVG-Bewertung bei angepasster Prüfkopfsohle nicht zulässig ist. Auch diese Anwendungsfälle werden differenziert betrachtet, die Anwendungsgrenzen werden nach prüftechnischen Gesichtspunkten erläutert und es werden Wege aufgezeigt, die Anwendungsbereiche zu erweitern.

Durchgedreht und Lückenhaft – Die Inline Prüfung von Aluminiumgussbolzen

M. Kiel¹, R. Steinhausen¹, C. Pientschke¹, T. Sperling², C. Lösche²

¹ Forschungszentrum Ultraschall, Halle (Saale); ² Hydro Aluminium Gießerei Rackwitz

Aluminium steht weltweit in einer großen Anzahl von unterschiedlichen Legierungen mit jeweils abgestimmten physikalischen Eigenschaften aber auch verschiedensten Fertigungsformen zur Verfügung. In unserem Beitrag diskutieren wir die Prüfung von Strangpressbolzen mit einem Durchmesser von bis zu 382 mm, die in Gießverfahren bis zu einer Länge von 8 m gefertigt werden. Im Rahmen der Qualitätssicherung unterliegen diese einer 100% Prüfung auf Einschlüsse, Risse und Fehlstellen. Die Prüfung erfolgt mittels mehrkanaligem, wasserangekoppeltem Ultraschall. Dabei wird ein Prüfwagen mit 6 Prüfköpfen unter dem rotierenden Bolzen bewegt, um diesen radial zu untersuchen. Diese scheinbar einfache Prüfaufgabe wurde zunächst rein akademisch auf die Erfüllung der Norm hin untersucht. Ziel war es, die Überdeckung der jeweiligen Prüfbahnen nachzuweisen, was zu sehr überraschenden und eindrucksvollen Ergebnissen führte. So ist die Konzeptionierung der Prüfkopfanzahl im Grunde relativ einfach, wenn man weiß worauf es ankommt. Die einzige Aufgabe besteht im Grunde darin, die Prüfbahnen zu überlappen. Jedoch kommen bedingt durch die Ausdehnung der Ultraschallköpfe nicht alle Designs in Frage. Außerdem soll der Wagen eine möglichst kleine axiale Ausdehnung besitzen. Mit diesen Randbedingungen wurde zunächst eine optimale Anordnung ermittelt. Bei der Verifizierung der Prüfbahnüberlappung wurde ein einfaches Modell entwickelt, welches die Qualität der Prüfung quantifiziert. Hierbei stellt sich heraus, dass kleinste Änderungen in den Messbedingungen, wie Rotations- oder Prüfwagengeschwindigkeit fatale Auswirkungen auf das Prüfergebnis haben. Das geht sogar so weit, dass bis zu 50% des Bolzens ungeprüft bleiben. Unser Modell erlaubt es die Einflüsse der einzelnen Messparameter zu untersuchen und innerhalb des Parameterraums die Regionen zu identifizieren, bei denen der Schwankungseinfluss minimal ist. Dies erlaubt eine tatsächliche 100% Prüfung mit großer Robustheit gegenüber systematischen Störungen.

POSTER

Anwendung von geführten Wellen zur Lokalisierung und Quantifizierung von Defekten in Ermüdungsversuchen

T. Gaul¹, B. Weihnacht¹, R. Neubeck², L. Schubert¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² TU Bergakademie Freiberg

Die Anwendung geführter Ultraschallwellen bietet besonders für den Einsatz an großen Strukturen, wie Behältern und Rohrleitungen, viel Potential. Verteilte Sensornetzwerke erlauben die Überwachung von ausgedehnten Bereichen auf Korrosions- oder Rissbildung. Dabei kann, in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Wandler, der Ort der Schädigung bereits hinreichend genau bestimmt werden. Eine Abschätzung der Länge bzw. der Tiefe ist, gegenüber dem klassischen Ultraschall, jedoch kaum möglich. Bekannte Konzepte wie das AVG-Diagramm können für geführte Wellen nicht angewendet werden.

Zur Adressierung dieser Problemstellung wurden in Ermüdungsversuchen realistische makroskopische Rissbilder erzeugt. In einem Versuchsstand für Transmissions- und Reflexionsmessungen werden geschweißte Stahlrohre durch Vier-Punkt-Biegeversuchen periodisch belastet. Die einsetzende Materialermüdung führt zu Rissen im Bereich der Schweißnaht, die kontinuierlich wachsen. Diese Risse werden mit Verfahren der klassischen zerstörungsfreien Prüfung quantifiziert. Mit auf der Struktur verteilten Sensorringen erfolgt darüber hinaus 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, sog. Migrationsalgorithmen, 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. Eine Verarbeitung der aus den Biegeversuchen gewonnenen Signale liefert die Rekonstruktion der entstandenen Risse in einem synthetischen Bild. Abschließend erfolgt ein Abgleich der rekonstruierten Ergebnisse mit denen des klassischen Ultraschalls.

Vergleich und Anpassung von 3D-SAFT-Implementierungen im Zeit- und Frequenzbereich für die schnelle Grobblechprüfung

E. Krieg^{1,2}, J. Kirchof^{1,2}, F. Römer¹, A. Ihlow², G. del Galdo^{2,3}, A. Osman^{1,4}

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken; ² TU Ilmenau; ³ Fraunhofer IIS, Ilmenau; ⁴ htw saar, Saarbrücken

Die Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) ist ein Rekonstruktionsverfahren für Ultraschall, das es erlaubt, mehrere einzelne Prüfschüsse durch Superposition zu fokussieren. In dieser Arbeit wird SAFT zur Grobblechprüfung eingesetzt. Das Ziel ist es, Bleche mit hoher Geschwindigkeit, quasi in Echtzeit, auf Fehler wie Einschlüsse und Risse untersuchen zu können. Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an die SAFT-Rekonstruktion, die auf Grund des hohen Rechenaufwandes für gewöhnlich getrennt von der Messung im Post-Processing durchgeführt wird. Es ist demzufolge zwingend notwendig, die SAFT-Verarbeitung auf den speziellen Anwendungsfall anzupassen und hinsichtlich Abbildungsqualität vs. Rekonstruktionsgeschwindigkeit zu optimieren.

In der Arbeit werden verschiedene SAFT-Algorithmen im Zeit und Frequenzbereich für planare Objekte untersucht und angepasst. Dabei liegt der Augenmerk auf dem Rechenaufwand, der unter der Voraussetzung einer ausreichenden Abbildungsqualität benötigt wird. Im Frequenzbereich werden die Phase-Migration sowie Stolt-Migration mit verschiedenen Interpolationsstrategien untersucht. Im Zeitbereich entwickeln und vergleichen wir verschiedene Heuristiken für Delay-and-Sum SAFT.

Im Ergebnis werden die Algorithmen anhand von Messdaten aus der Grobblechprüfung bezüglich Rechenzeiten, erreichter Abbildungsqualität sowie Arbeitsspeicherverbrauch verglichen. Es wird gezeigt, dass es durch ein Anpassen der Algorithmen möglich ist, die Rechenzeit bei beinahe unveränderter Abbildungsleistung signifikant zu verringern. Es werden theoretische Schranken für Rechenzeit und Arbeitsspeicherverbrauch der Algorithmen angegeben und anhand von Messdaten validiert.

Verbesserung der Prüfaussagen bei dem Einsatz des Rekonstruktionsverfahrens SAFT durch Anwendung von Signalverarbeitungsmethoden

H. Rieder¹, M. Spies¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Eine der wichtigsten Aufgaben der zerstörungsfreien Prüfung und Bewertung ist die Erkennung und Charakterisierung von Fehlern in Materialien und Bauteilen. Für die Ultraschallprüfung stehen eine Vielzahl von Techniken zur Verfügung, wie zum Beispiel Einzelsonden-, Tandem- oder Pitch-and-Catch- sowie Phased-Array-Techniken. Eine zuverlässige Defekterkennung erfordert ein definiertes und reproduzierbares, d. h. mechanisiertes Abtasten der Ultraschallsignale entlang der Oberfläche der Komponenten. Aus den aufgezeichneten Ultraschall-HF-Daten können Informationen über Amplitude und Laufzeit extrahiert und für die Beurteilung eines Defekts auf Basis von diversen Rekonstruktionsmethoden ausgewertet werden. Eine solche Auswertung kann jedoch bei komplexen Defektgeometrien und/oder ungünstigen Materialeigenschaften, wie z. B. Schallschwächung oder Dispersion, zu unzureichenden quantitativen Ergebnissen führen. Die Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) wurde nicht nur für solche komplexen Anwendungen erfolgreich eingesetzt, um die Leistungsfähigkeit von Ultraschallprüfungen zu verbessern.

Wir haben auf der DGZfP-Jahrestagung 2017 eine iterative Fehlerrekonstruktion für die verbesserte Bildgebung bei randomisierter Ultraschall-Datenaufnahme vorgestellt. Diese Arbeiten zielten auf eine Modifikation des Ablaufs der Signalaufzeichnung ab.

In diesem Beitrag möchten wir diskutieren, mit welchen Methoden der Signalverarbeitung die detektierten Ultraschallsignale in-situ bearbeitet werden können, um die Qualität der HF-Signale für die Rekonstruktion zu verbessern. Für verschiedene komplexe Anwendungsbereiche zeigen wir Ergebnisse auf und diskutieren auch die Auswirkungen der Methoden in Bezug auf die notwendige Rechenleistung der Prüfsysteme. Abschließend diskutieren wir die Verfahrensansätze mit Blick auf deren praktische Anwendbarkeit und hinsichtlich geplanter weiterer Arbeiten.

Simulation der Schallausbreitung in Eisenbahnschienen mit FEM und SAM

Y. Wack¹, T. Heckel¹, R. Boehm¹, D. Brackrock¹

¹ BAM, Berlin

Die Simulation von Ultraschallausbreitung ist ein wesentliches Hilfsmittel zur Optimierung von Prüfanordnungen und wird zunehmend in der Prüfvorbereitung eingesetzt. Eisenbahnschienen sind Bauteile mit komplexer Geometrie und im eingebauten Zustand eingeschränkter Zugänglichkeit. Bei der Prüfung im Feld entstehen aus der Schienengeometrie komplexe Echosignale mit Formanzeigen, die schwer zu interpretieren sind.

Für das bessere Verständnis der Schallausbreitung in der Eisenbahnschiene wird diese in einem ersten Schritt mit Hilfe verschiedener Ansätze modelliert. Hierbei werden Finite Elemente Methoden und semi-analytischen Modelle verwendet. In einem zweiten Schritt werden die Ergebnisse der Simulationsmodelle einander gegenübergestellt und mit Messungen an realen Schienen verglichen.

Ziel dieser Untersuchungen ist die Validierung von Simulationsverfahren mit Hilfe von Messdatensätzen und Überprüfung der Anwendbarkeit bei der Bewertung von Ergebnissen der Schienenprüfung.

Charakterisierung von Polymerschäumen mittels zeitaufgelöster Terahertz-Spektroskopie

M. Werner¹, C. Kolb¹, P. Pfeffer¹, G. Schober¹

¹ SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Das SKZ untersucht die Inlinefähigkeit der Terahertz (THz)-Technologie bei der Bestimmung wichtiger Materialparameter bei der Polymerschäumextrusion, wie Rohdichte und Zellgrößenverteilung. Auch spielt die Kenntnis der genauen Dicken extrudierter Dämmplatten oder Schaumfolien bei der Herstellung eine wichtige Rolle. Diese Kenngrößen werden meist visuell und offline mittels optischer Mikroskopie oder Computertomografie (CT) bestimmt. Die THz-Technologie wurde bereits erfolgreich zur Bestimmung der Materialeigenschaften von Kunststoffen, wie beispielsweise des Füllstoff- oder Feuchtegehaltes eingesetzt. Auch konnten die Schichtdicken von Einzel- und Mehrschichtsystem bis in den μm -Bereich ermittelt werden. Vorteil dieser relativ jungen Technologie liegen z. B. in einer zerstörungsfreien und berührungsfreien Arbeitsweise, welche im Vergleich zu Röntgenstrahlung nicht ionisierend und gesundheitsgefährdend sind. Im Gegensatz zur Ultraschalltechnologie stellen für THz-Wellen auch beispielsweise dicke Schaumschichten kein Hindernis dar.

Im Rahmen eines laufenden Forschungsprojektes werden extrudierte Polymerschäume verschiedener Hersteller mittels eines selbst entwickelten Demonstrator, welcher eine Extrusion simuliert, inline untersucht. Die THz-Messdaten werden in Echtzeit ausgewertet und parallel zur Messung angezeigt. Damit können bereits Inline-Berechnungen der Rohdichte sowie der Schichtdicke des extrudierten Schaumes gezeigt werden. Außerdem zeigen die Ergebnisse der inline Bestimmung der Zellgrößenverteilung vielversprechende Ergebnisse auf. Als Referenzmethode wurde ein CT-System eingesetzt, dessen Ergebnisse mit denen der THz-Untersuchungen übereinstimmen.

Im untersuchten THz-Frequenzbereich treten charakteristische Absorptionslinien der Wassermoleküle in der Luft auf, welche das Messsignal und damit die Bestimmung der Materialparameter der extrudierten Schäume erschweren. Es wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher die Absorptionslinien simuliert und in einem zweiten Schritt aus den Messdaten herausrechnet.

Anhand verschiedener extrudierter Polymerschäumproben wird exemplarisch die THz-Technologie zur Ermittlung der Rohdichte, der Schichtdicke sowie der Zellgrößenverteilung aufgezeigt.

Innovativer Anlagenbau im Bereich der NDT

P. Stöß¹, N. Riess¹

¹ Helling, Heidgraben

Häufig übersteigt der Zeitaufwand zur Vorbereitung einer normgerechten zerstörungsfreien Prüfung die eigentliche reine Prüfzeit.

Zur Optimierung dieser Rüstzeiten wurden von der Fa. Helling gemeinsam mit verschiedenen ZfP-Anwendern diverse Konstruktionen entwickelt, gebaut und „vor Ort“ getestet. Durch den Einsatz dieser Bauteile konnten die Rüstzeiten und somit die Kosten deutlich reduziert werden.

Im Vortrag werden einige dieser Optimierungskonstruktionen vorgestellt.

EM HYDRA – Mikrowellen-Messverfahren zur Erfassung von Hydratationsprozessen in Beton

A. Göller¹, B. Jungstand¹, A. Dollase², U. Möller²

¹ hf sensor, Leipzig; ² HTWK Leipzig

Für diverse Bauaufgaben ist die Kenntnis über die Entwicklung der Druckfestigkeit des Betons von enormer Bedeutung. Eine bewährte Methode besteht darin, separate Probekörper bei der Herstellung des Bauwerks mit anzufertigen, welche mittels genormten Druckprüfverfahren auf ihre Festigkeit untersucht werden. Diese Vorgehensweise ist zeitaufwändig, und die im Labor ermittelten Druckfestigkeitsergebnisse sind gegenüber der realen Festigkeitsentwicklung bei äußeren Witterungsbedingungen nur bedingt anwendbar. Daher steigt die Nachfrage nach zerstörungsfreien Prüfmethode, welche eine zuverlässige in-situ Festigkeitsermittlung ermöglichen.

Die Mikrowellenfeuchtemessung hat sich zu einem anerkannten Verfahren in Bauwesen und Industrie etabliert. Diese Technik wurde zur Überwachung des Hydratationsprozesses von Beton weiterentwickelt.

Im Gegensatz zur Feuchtemessung in inerten Baustoffen ist der Prozess der Wassereinlagerung bei Beton sehr kompliziert. Physikalische und chemische Eigenschaften sowie Kristallisationsprozesse spielen bei der Strukturentwicklung eine Rolle, verschiedene Bindungsformen des Wassers liegen parallel vor und verändern sich zeitabhängig. Mit den kommerziell verfügbaren einparametrischen elektrischen Feuchtemessverfahren, dazu gehören auch die Mikrowellenverfahren, ist es nicht möglich, diese Vorgänge zu erfassen.

Durch zeitparallele Auswertung mehrerer Mikrowellenparameter/-spektren ist der Verlauf von Hydratations- und Abbindeprozessen abbildbar. Im Beitrag wird ein mikrowellenspektroskopisches Verfahren zur kontinuierlichen Erfassung des Hydratationsfortschrittes von Beton vorgestellt, mit dem die Druckfestigkeitsentwicklung zerstörungsfrei abbildbar ist. Ein darauf aufbauendes Mikrowellen-Messsystem wird so gestaltet, dass es direkt in die Schalung integriert werden und Aussagen zu deren erforderlicher Standzeit liefern kann.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass sich der Hydratationsverlauf mit Hilfe spektroskopischer Mikrowellenverfahren darstellen lässt. Für die Auswertung der Mikrowellendaten werden Referenzdruckfestigkeiten genutzt. Mit deren Hilfe kann für unterschiedliche Wasseranteile des Betons ein Kalibriermodell erstellt werden, das eine Aussage über die Festigkeitsentwicklung anhand der Mikrowellendaten ermöglicht.

Direkt anzeigendes Dickenmessgerät für dielektrische Wände, basierend auf Mikrowellen

J.H. Hinken¹, C. Ziep¹, H. Schreiber¹

¹ FI Test- und Messtechnik, Magdeburg

Wanddickenmessungen werden normalerweise mit Ultraschall durchgeführt. In bestimmten Fällen jedoch kann es Grenzen dieser Technik dadurch geben, dass ein Koppelmedium erforderlich ist, die Schallgeschwindigkeit temperaturabhängig ist, eine hohe Schalldämpfung vorliegt oder eine separate Datenauswertung nötig ist. Wenn die Wand aus dielektrischem, d. h. elektrisch isolierendem Material besteht, kann ein mikrowellenbasiertes Messgerät vorteilhaft sein.

Dabei wird die Sonde, d. h. die Mikrowellenantenne auf die Wand, z. B. Rohraußenwand, aufgesetzt, und bei fester Frequenz wird der Reflexionsfaktor nach Real- und Imaginärteil gemessen. In der komplexen Ebene stellt sich dieser Reflexionsfaktor für zunehmende Wanddicke in erster Linie im Uhrzeigersinn rotierend dar, mit 360 Grad Zuwachs pro halber Materialwellenlänge. Die erwartete Mehrdeutigkeit bei mehr als einer Umdrehung tritt praktisch nicht auf. Grund ist die zunehmende Dämpfung, u. a. aufgrund von Strahlaufweitung. So ergibt sich eine Spirale statt eines mehrfach durchlaufenen Kreises.

Im Beitrag werden als Beispiel u. a. Wanddickenmessungen an TPC-Rohren aus der Automobilindustrie gezeigt. Dieses beinhaltet auch die Erzeugung der Kalibrierspirale aus nur wenigen Kalibrierpunkten. Weiterhin wird die handliche Anordnung eines solchen direkt anzeigenden Messinstruments gezeigt. Es ist preisgünstig, weil Mikrowellentechnik inzwischen auch in Konsumerprodukten mit großen Stückzahlen enthalten ist.

Analyse des Hochtemperaturverhaltens ausgewählter Gesteinskörnungen und Fasern im Zementstein mittels Mikro-Röntgen-Computertomographie (μ XCT)

F. Fuchs¹, A. König¹, F. Dehn²

¹ Universität Leipzig; ² Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Die Mikro-Röntgen-Computertomographie (μ -XCT) eignet sich im Bereich der zementgebundenen Werkstoffe zur ortsaufgelösten Analyse von einzelnen, sich hinsichtlich ihrer Dichte vom restlichen Gefüge unterscheidenden Bestandteilen wie z.B. Poren, Fasern und Risse. Die zerstörungsfreie Wirkungsweise ermöglicht darüber hinaus Mehrfachmessungen identischer, sich verändernder Proben. In diesem Beitrag wurde die μ -XCT zur Erforschung von hochtemperatur-induzierten Prozessen spezifischer Bestandteile, wie Gesteinskörnungen und Fasern im Zementstein eingesetzt.

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden nach Erfassung der relevanten Temperaturbereiche durch die Differenzthermoanalyse einzelne Quarz-/Calcit-Körnungen und verschiedene Polypropylenfasern (PP-Fasern) in einer Zementsteinmatrix präpariert, auf relevante Zwischenstufen erwärmt und jeweils mittels μ -XCT analysiert. Mithilfe der zerstörungsfreien Prüfung gelang es, den Beginn und Verlauf verschiedener Schadensmechanismen der Gesteinskörnung, sowie Verhalten der Fasern unter Brandbeanspruchung zu visualisieren und sowohl qualitativ, als auch quantitativ zu analysieren. Durch den Einsatz weiterer bildgebender Verfahren wie z. B. Auflichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie konnten die μ -XCT-Ergebnisse validiert werden.

Zerstörungsfreie Materialprüfung mithilfe der gitterbasierten Phasenkontrast-Röntgenbildgebung

V. Ludwig¹, M. Gallersdörfer¹, S. Käßler¹, G. Pelzer¹, J. Rieger¹, C. Riess¹, T. Michel¹, A. Maier¹, G. Anton¹

¹ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Die gitterbasierte Phasenkontrast-Röntgenbildgebung erweitert die herkömmliche Röntgenbildgebung um zwei weitere Bildinformationen, das differentielle Phasenbild und das Dunkelfeldbild. Während das differentielle Phasenbild sensitiv auf kleinste Ablenkungen der Röntgenstrahlung ist, umfasst das Dunkelfeldbild strukturelle Informationen in Materialien. Ein Dunkelfeld-Signal entsteht durch Streuung an körnigen, porösen oder faserigen Strukturen in der Größenordnung von Mikrometern. Dadurch können z. B. feine Risse oder Luft einschlüsse in Materialien visualisiert werden, die im herkömmlichen Röntgenbild nicht erkennbar sind. Zusätzlich weist das Dunkelfeldbild eine Richtungsabhängigkeit auf, mit der die Orientierung von nicht direkt auflösbaren Faserstrukturen bestimmt werden kann. In diesem Beitrag wird unter Verwendung eines Phasenkontrast-Röntgenscanners das Potential dieser neuartigen Röntgenbildgebungsmethode vorgestellt und evaluiert. Es werden Anwendungsfelder in der zerstörungsfreien Materialprüfung zur Detektion von Rissen, Luft einschlüssen und strukturellen Defekten, z. B. durch Aufschlagschäden, in carbonfaserverstärkten Kunststoffteilen, geschäumten Materialien oder Schweißnähten in Aluminiumteilen präsentiert.

Mobile Durchstrahlungsprüfungen mit Röntgenblitzgeneratoren und digitalen Abbildungssystemen

U. Oberhagemann-Gerardi¹

¹ ELP, Wuppertal

Durchstrahlungsprüfungen (ortsveränderlich) in der ZfP mit folgendem Anforderungsprofil:

- Hohe Mobilität der Röntgenquelle und des Abbildungssystems
- Erzeugung hochwertiger Bilder
- Unempfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen und physikalischen Beanspruchungen
- Hohe Dauerbelastbarkeit
- Hohe Durchdringungstiefen
- Einfaches Handling
- Sicherheit: weitgehend automatisierter Betrieb zur Vermeidung manueller Fehlbedienung
- Geringes Gewicht
- Leitungsfreier Betrieb
- Fernsteuerbar
- Kosteneffizienz (Anschaffungs- und Folgekosten)
- Unempfindlichkeit gegenüber Über- und Unterbelichtungen
- Exakte, dokumentierte, normkonforme Auswertung
- Direkte Verfügbarkeit der Messdaten
- Direkte Erstellung Prüfprotokoll
- Kurze Belichtungszeiten zur Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und zur Dosisreduzierung (§ 2c RöV, ALARA-Prinzip)

Digitale Abbildungssysteme (CR und DR) der neuesten Generation in Verbindung mit gepulsten Röntgenquellen erfüllen das o. g. Profil. Sie werden in der Sicherheit sowie in der Human- und Veterinärmedizin seit Jahren erfolgreich eingesetzt.

Die Kombination Röntgenblitzgenerator (mit Beschleunigungsspannungen von 150 kV, 270 kV und 360 kV) ↔ digitales Abbildungssystem eröffnet ein sehr breites Anwendungsspektrum und ist prädestiniert für ortsveränderliche oder stationäre Durchstrahlungsprüfungen in der zerstörungsfreien Prüfung.

So können z. B. Belichtungszeiten bei Verwendung von digitalen Detektorsystemen um den Faktor 10 (gegenüber analogen Filmmethoden) verkürzt werden und bieten gleichzeitig folgende Vorteile:

- Hohe Bildqualität
- Verbessertes Handling
- Direkte Datenerzeugung und -verarbeitung
- Drastisch reduzierte Kosten

Durchstrahlungsprüfung additiv gefertigter Bauteile am ifw Jena

C. Straube¹

¹ ifw, Jena

Im Werkstoffprüflabor des ifw Jena führt das erfahrene und nach DIN EN ISO 9712 zertifizierte Personal digitale Durchstrahlungsprüfungen an metallischen Bauteilen und Fügeverbindungen mit der institutseigenen Durchstrahlungsanlage XRH222 durch. Diese Anlage zeichnet sich durch eine 225 kV-Röntgenröhre mit einer minimalen Brennfleckgröße von 300 µm und einem 16-bit-Detektor mit einer aktiven Fläche von 250 x 300 mm² und Pixelgröße von 139 µm aus. Aufgrund des hohen Dynamikumfangs des Detektors (65 536 Grauwerte) können Bauteile mit variierenden Wandstärkebereichen in einer einzigen Aufnahme dargestellt werden. Dies ist bspw. bei dreidimensionalen Innenstrukturen von additiv gefertigten Bauteilen von Vorteil. Ein Gesamteindruck qualitätsrelevanter Kriterien des Prüfkörpers (wie Bauteildichte, Geometrietreue und Volumenfehler) wird so schnell gewonnen.

Frei ansteuerbare bewegliche Achsen der Durchstrahlungsanlage ermöglichen eine große Anzahl an Durchstrahlungsrichtungen. Somit ist eine hohe Detektionswahrscheinlichkeit flächiger Fehler (bspw. schlechte Schichtanbindungen) gegeben. Diese sind erst abbildbar, wenn die Einstrahlrichtung parallel zur Ausdehnung der Unregelmäßigkeiten verläuft. Durch die Möglichkeit, das Bauteil um die Z-Achse des Systems rotieren zu lassen, kann eine computertomographische Durchstrahlungsaufnahme (CT) erzeugt werden. Diese liefert ein direktes Abbild des Bauteilvolumens und lässt somit Aussagen über Toleranzabweichungen mittels eines Soll-Ist-Vergleichs mit einem zugrundeliegenden CAD-Modell zu. Weiterhin können aufgrund des sehr hohen Grauwertumfangs feinste Kontrastunterschiede herausgearbeitet werden. Dies ist nötig, um sicherzustellen, dass innere Konturen bzw. Kanäle frei von Pulver sind. Durch die maximale Leistung der Röntgenröhre von 1 800 W können Stahlbauteile mit einer Wandstärke von bis zu 40 mm durchstrahlt werden. Bei geringeren Bauteildichten, wie zum Beispiel Aluminium- oder Titanlegierungen, sind entsprechend größere Wandstärken durchstrahlbar.

Das Werkstoffprüflabor des ifw Jena ist akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005. Es ist sowohl in die Forschungs- und Lehrtätigkeiten des Instituts eingebunden als auch Partner für Industrie-, Handwerks- und Forschungseinrichtungen.

Spektroskopie gepulster Röntgenquellen

B. Brückner², U. Zscherpel¹

¹ Goethe Universität, Frankfurt am Main; ² BAM, Berlin

Spektren von gepulsten Röntgenquellen wie Blitzröhren, Linearbeschleuniger (LINACs) oder Betatrons lassen sich in der Literatur nicht finden. Eine gängige Lehrmeinung ist, dass sich solche Spektren nicht messen lassen. Deshalb wurden in Zusammenarbeit mit der Goethe-Universität Frankfurt und neuester Messtechnik diese Problematik untersucht. Es wurde ein CeBr₃-Szintillator-Kristall mit einem klassischen Photoelektronenvervielfacher (PMT) und einer analogen Übertragungskette verwendet, der über Stunden Integrationszeit nur einen sehr geringen Untergrund detektiert. Als kritischer Punkt stellte sich die geeignete Kollimierung von Quelle und Detektor bei möglichst großem Abstand heraus. Zu diesem Zweck wurde das verwendete 7 MeV-Betatron in einen 3t-Bleibunker betrieben, der ein Austrittsloch von 1 mm für die erzeugte Röntgenstrahlung besaß. Der Detektor wurde mit einem Densimet-Zylinder abgeschirmt. Damit konnte die Bedingung für die Spektroskopie gepulster Quellen erreicht werden: pro Puls darf nur 1 Photon den Detektorkristall erreichen, damit ohne Pile-up seine Energie vermessen werden kann. Trotz schnellster Elektronik war es nicht möglich, mehrere Photonen pro Röntgenpuls (beim Betatron ca. 1 Mikrosekunde) spektral richtig aufzulösen. Die gemessenen Spektren zeigen die erwartete Form, wie sie z.B. mit aRTist simuliert werden können.

Praxisbeispiele zur Ultraschallprüfung (manuell, halbautomatisch, automatisiert)

W.A.K. Deutsch¹, S. Kierspel¹, H. Rast¹

¹ KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau, Wuppertal

In diesem Beitrag werden realisierte Prüfaufgaben beschrieben:

- mobile Prüfung mit digitalen Ultraschall-Prüfgeräten
- manuelle und halbautomatische Phased Array Prüfung von T-Stößen
- halbautomatische Phased Array Prüfung von Bahnwellen (TFM-Verfahren)
- vollautomatische US-Prüfung von Stangen (Stahl und Aluminium, konventionell und mit Phased Array)

Automatisierte Ultraschallprüfung von nahtlosen Stahlrohren mit Matrix-Arrays

T. Würschig¹, C. Breidenbach¹, B. Hömske¹, R. Pfortje¹, F. Kahmann¹, J. Stetson¹, S. Falter¹, R. Peters², H. Holzapfel², S. Nitsche², C. Delhaes², A. Germes², R. Michel³, A. Noel³

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth; ² Vallourec Deutschland, Düsseldorf;

³ Vallourec Research Center France, Aulnoye, Frankreich

Die automatisierte Ultraschallprüfung ist eines von mehreren zerstörungsfreien Prüfverfahren, welches bei der Prüfung warmgewalzter Nahtlosrohre bei Vallourec zum Einsatz kommt. Insbesondere unter rauen Bedingungen bei Produktionsgeschwindigkeit eignen sich Prüfanlagen mit Ultraschallverfahren zur Prüfung auf mögliche Inhomogenitäten. Dem Walzprozess geschuldet werden die meisten Oberflächenunregelmäßigkeiten mit einer Orientierung ins Längsrichtung des Rohres aufgefunden. Nichtsdestotrotz treten auch schräg zur Längsrichtung verlaufende Orientierungen auf, die in vielen Fällen auf bereits im Grundmaterial vorhandene sind. Mithilfe von Phased-Array System unter Anwendung der Paint-Brush Technik ist es möglich, eine lückenlose Prüfung über einen Winkelbereich von + 45° bei voller Produktionsgeschwindigkeit zu gewährleisten.

Unter ungünstigen Umständen besteht allerdings die Möglichkeit, dass über den oben beschriebenen Umfang hinaus Inhomogenitäten auftreten. Bei Anwendung des Stands der Technik würde eine erweiterte Prüfung eine erhöhte Anzahl von Prüfköpfen erfordern, um den gesamten Orientierungskreis (360°) zu schließen.

Die Anwendung von zweidimensionalen Phased-Array Prüfköpfen verfügt über das Potential, diesen Nachteil zu kompensieren, da sie durch Ihre Fähigkeit, Ultraschall in einen Raumwinkel auszusenden auf natürliche Art und Weise für eine Prüfung auf Unregelmäßigkeiten mit beliebiger Orientierung geeignet sind. In dieser Arbeit stellen wir ein vollständig parallelisiertes, automatisiertes Prüfsystem vor, welches auf einem 2D Array Prüfkopf mit mehr als 700 Kanälen beruht und welches in der Lage ist, eine lückenlose Prüfung auf dem gesamten Orientierungskreis auszuführen, ausgeführt als Doppelwagenportal. Zusätzliche Prüfköpfe gestatten eine hochauflösende Wanddickenmessung inkl. Dopplungsprüfung um die gängigen Normen und Standards abzudecken. Um die mit zweidimensionalen Arrays üblicherweise verknüpften, multiplen Prüfzyklen, welche die Prüfgeschwindigkeit stark einschränken zu, überwinden, wird die Paintbrush-Technologie zusammen mit holographischen Schallfeldern eingesetzt und damit die industriell erforderliche Prüfgeschwindigkeit erreicht. Dies wird zusammen mit ersten Resultaten aus dem industriellen Betrieb vorgestellt.

Einsatz von Druckausgleichselementen bei Leuchten und Scheinwerfern und deren Dichtheitsprüfung

J. Lapsien¹

¹ CETA Testsysteme, Hilden

Leuchten und Scheinwerfer, die im Außenbereich eingesetzt werden, sind einer Vielzahl von Umwelteinflüssen ausgesetzt. Durch temperaturbedingte Druckschwankungen als auch beim Abkühlen der im Betrieb erwärmten Leuchte kann sich im Inneren ein Unterdruck einstellen. Sind z. B. die Schweiß- oder Klebenähte, die Dichtungen oder gesteckte Kontakte undicht, so kann Feuchtigkeit und Flüssigkeit in das Innere des Systems gezogen werden. Eindringen von Feuchtigkeit kann zu schweren Störungen an elektronischen Komponenten führen und die Funktion massiv beeinträchtigen. Zudem belastet das zyklische Erwärmen und Abkühlen die Dichtungen. Deshalb werden zur Belüftung häufig Druckausgleichselemente eingesetzt. Diese ermöglichen einen Druckausgleich bei gleichzeitigem Schutz vor Öl, Wasser und Partikeln. Im Rahmen der Qualitätskontrolle kommt der produktionsbegleitenden Dichtheitsprüfung des Gehäuses eine besondere Bedeutung zu. Hierbei wird sehr häufig Druckluft als Prüfmedium eingesetzt. Die Dichtheitsprüfung mit Druckluft ist ein objektives Prüfverfahren, das sich gut automatisieren lässt. Bei der Dichtheitsprüfung muss das Prüfteil über das Druckausgleichselement auf den Prüfdruck gefüllt werden. Neben der Prüfung der Dichtheit des Gehäuses besteht auch der Anspruch Membrandefekte und Montagefehler zuverlässig zu erkennen.

An die Bauteilprüfung werden also zwei grundsätzliche Anforderungen gestellt:

1. Aufgrund des Handlings des Druckausgleichselements und seiner Montage muss überprüft werden, ob es unversehrt ist und fehlerfrei montiert wurde. Teilweise wird das Druckausgleichselement in den Deckel integriert, der später auf das Gehäuse montiert wird. Teilweise wird das Druckausgleichselement in das fertig bestückte Gehäuse eingesetzt.
2. Die Dichtheit des Gehäuses ist zu prüfen, wobei das Bauteil über das Druckausgleichselement befüllt werden muss, das über der Belüftungsöffnung angebracht wurde.

Die spezifischen Besonderheiten der Dichtheitsprüfung von Systemen mit Druckausgleichselementen werden praxisnah behandelt.

Genauere Laufzeitmessungen

P. Holstein¹, A. Bodi¹, J. Pohl², C. Pick³, B. Fischer⁴

¹ SONOTEC, Halle (Saale); ² Hochschule Anhalt, Köthen; ³ MBQ Qualitätssicherung, Hettstedt; ⁴ XARION Laser Acoustics, Wien, Österreich

Laufzeitmessungen bilden die Grundlage für eine Reihe von wichtigen Verfahren für die Anwendung von Ultraschall sowohl in der zerstörungsfreien Prüfung, der Prozessmesstechnik oder auch in der Medizintechnik. Durch Steigerung der Messgenauigkeit ergeben sich neue Möglichkeiten.

Die Bestimmung von Materialeigenschaften, Abmessungen, Spannungszuständen auf der Basis von Ultraschallverfahren erfordert zum Teil eine sehr hohe Auflösung. Unterschiedliche Materialklassen verlangen dabei aufgrund ihrer dispersiven und Dämpfungseigenschaften variable Lösungen mit verschiedenen Frequenzen und angepasster Prüftechnik sowie modifizierter Signalverarbeitung.

Ultraschallmikroskopie an laserpolierten Aluminium-Druckgussproben

L. Neumann¹, B.-J. Kübler¹, S. Schuhmacher¹, I. Wiesler², M. Niederer², K. Altin²,
P. Hoffrogge², P. Czurratis², M. Burzic¹, H. Riegel¹

¹ Hochschule Aalen; ² PVA Tepla Analytical Systems, Westhausen

Die Ultraschallmikroskopie wird bereits seit längerem sehr erfolgreich zur In-Line-Prüfung von Halbleitern eingesetzt. Am Beispiel laserpolierter Aluminium-Druckgussproben sollen in diesem Beitrag Möglichkeiten der US-Mikroskopie zur zerstörungsfreien Materialprüfung gezeigt werden.

Zur Reduzierung der Oberflächenrauheit von Aluminium-Druckgussproben wird als neuer Verfahrensansatz das sogenannte Laserpolieren eingesetzt. Durch Umschmelzen einer dünnen Randschicht (i.d.R. $\leq 100 \mu\text{m}$) erfolgt hierbei ein Materialtransport der Profilkuppen in die Profiltäler. Neben dem Glättungseffekt bilden sich jedoch auch oft unerwünschte Poren, Welligkeiten und Risse in der Oberfläche. Ursache der Porositätsbildung beim Polierprozess sind u. a. bereits vor dem Polierprozess vorhandene größere Poren im Aluminium-Volumen. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass die Ultraschallmikroskopie eine hochaufgelöste und schnelle Charakterisierung der Oberflächen hinsichtlich Poren, Rissen und Welligkeit ermöglicht.

3-D-Analysertools bei angepasster Frequenzwahl erlauben darüber hinaus die Darstellung von Poren und Fehlern unterhalb der Oberfläche und im Aluminium-Probenvolumen.

Die Ergebnisse der Ultraschallmikroskopie werden mit metallografischen (Lichtmikroskopie am Schliff) und röntgencomputertomografischen verglichen. Die notwendige Auflösung in der Röntgencomputertomografie erfordert eine Probenzerkleinerung. Beide Methoden sind demnach zerstörend.

Demgegenüber ermöglicht die Ultraschallmikroskopie die zerstörungsfreie und schnelle Prüfung von Oberfläche und Volumen beliebiger Bauteilausdehnungen bei Bauteildicken bis ca. 3 mm. Sie bietet sich deshalb als geeignetes Tool für die zukünftige Qualitätskontrolle laserpolierter Bauteile an.

Einsatz der Ultraschallprüfung zur Bewertung von hartgelöteten Fügeverbindungen

R. Zielke¹, N. Sievers², H.-G. Rademacher¹, W. Tillmann²

¹ RIF, Dortmund; ² TU Dortmund

Die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung von gelöteten Hartmetallsystemen stellt eine nicht zu vernachlässigende Herausforderung dar. Durch die Beschaffenheit dieser verschleißresistenten Verbundwerkstoffe werden hohe Prüffrequenzen absorbiert, so dass je nach Bauteildicke die Detektion von kleinen Defekten wie Lunker, Einschlüsse oder Risse innerhalb der Lötnaht erschwert wird. Hinzukommt, dass bereits kleinste Schwankungen in der Lötnahtbreite zu Interferenzen der akustischen Impulse führen können. Diese Interferenzen erschweren ebenfalls eine genaue Prüfung der Fügeverbindungen. Da die Breite der duktilen Lötnaht, besonders bei Hartmetallfügeverbunden in Folge ihrer kompensierenden Wirkung auf die thermisch induzierten Eigenspannungen, einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit der Fügeverbindung hat, ergäbe sich aus der zerstörungsfreien Messung der Lötspaltbreite ein wichtiges Instrument zur Qualitätskontrolle solcher Fügeverbindungen. Im Rahmen des Beitrages werden neben theoretischen Betrachtungen zum Reflexionsverhalten der Ultraschallwellen an der Lötnaht auch Messungen sowie metallografische Analysen der untersuchten Lötnahte vorgestellt.

Untersuchung zum Einsatz der akustischen Resonanzanalyse zur Prüfung von Serienbauteilen

R. Zielke¹, H.-G. Rademacher¹, Y. Lorch², W. Tillmann²

¹ RIF, Dortmund; ² TU Dortmund

Die Qualität, insbesondere von sicherheitsrelevanten Bauteile, sollte zerstörungsfrei geprüft werden. Hierzu haben sich verschiedene Methoden wie die Ultraschall-, Röntgenprüfung oder die elektrische Widerstandsmessung bewährt. Diese Methoden erfordern eine exakte Positionierung des Bauteils zum Sender und Empfänger, sowie gegebenenfalls eine relative Bewegung zwischen Bauteil und Prüfsystem (Abscannen). Die Auswertung kann je nach Prüfsystem und gewünschter Genauigkeit zeitaufwendig sein. Diese Randbedingungen sind jedoch bei der Serienprüfung von Bauteilen mit hohen Stückzahlen um ca. 50000 einschränkend. Daher wäre ein schnelles und integral messendes Prüfsystem vorteilhaft.

Für eine schnelle zerstörungsfreie Prüfung hat sich für einige Anwendungen die akustische Resonanzanalyse, die auch unter „Klangprüfung“ bekannt ist, bewährt. Hierzu wird das Bauteil impulsförmig angeregt und auftretenden Eigenfrequenzen gemessen, welche Informationen über das Bauteil enthalten. Beurteilt wird die dynamische Festigkeit des Bauteils, da eventuell vorhandene Risse, Fehlstellen oder andere Materialgefügeabweichungen eine Veränderung im Resonanzspektrum verursachen.

Im Beitrag wird die akustische Resonanzanalyse am Beispiel der Prüfung von Schrauben vorgestellt, wobei neben den theoretischen Betrachtungen des Resonanzverhalten in Abhängigkeit von Materialfehlern auch Messungen vorgestellt werden. Bei der Entwicklung des Messsystems wurde auf handelsübliche PC-Komponenten zurückgegriffen, um die Entwicklungs- und Investitionskosten gering zu halten.

Überwachung der Klebstoffaushärtung mittels luftgekoppeltem Ultraschall

G. Schober¹, C. Kolb¹, M. Werner¹, P. Pfeffer¹, D. Hoffmann¹, L. Orf¹, E. Kraus¹, M. Mohr²
¹ SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg; ² Julius-Maximilians-Universität, Würzburg

Es existieren nur wenige zerstörungsfreie Prüfverfahren, mit denen Härtingsprozesse von Kleb- und Dichtstoffen überwacht werden können. Oft werden Laborverfahren wie Kernspinresonanztechnik oder Infrarotspektroskopie eingesetzt. Hauptnachteile sind die mangelnde Prozessfähigkeit, die geringe Eindringtiefe und die hohen Systemkosten. Ultraschallverfahren hingegen ermöglichen die Überwachung des Aushärtungsprozesses direkt während der Herstellung mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung und bieten damit gegenüber anderen Messtechnologien entscheidende Vorteile.

Die Anwendbarkeit wurde an verschiedenen Klebstoffen und Dichtungsmassen getestet. Es wurden insbesondere ein- und zweikomponentige Kleb- und Dichtstoffe, die durch Polykondensation und -additionsreaktionen aushärten, sowie verschiedene Thermoplaste und Duroplaste als Trägermaterialien untersucht. Die Schalldämpfung und die Schallgeschwindigkeit liefern materialabhängige Informationen, die direkt mit dem Aushärtegrad korreliert werden können. Auch indirekte Messungen sind durch Monitoring von z. B. Temperaturänderungen während der chemischen Aushärtungsreaktion möglich.

Aufgrund der hohen akustischen Impedanzunterschiede zwischen der Umgebungsluft und den zu untersuchenden Materialien ist die exakte Bestimmung der Schalldämpfung und -geschwindigkeit bei luftgekoppelter Ultraschallprüfung limitiert. Aus diesem Grund wurden Auswerteverfahren zur Bestimmung von Kennwerten umgesetzt - beispielsweise basierend auf der Gruppenlaufzeit und Signalintensität -, die Rückschlüsse auf die absolute Schalldämpfung und Geschwindigkeit erlauben.

Regelsystem zur automatischen Positionsoptimierung eines Wirbelstromsensordsystems bei der Prüfung gekrümmter Bauteile

C. Jungmann¹, D. Koster¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Der aktuelle Stand der Wirbelstromprüfung sieht gewöhnlich einen kontaktbehafteten Messaufbau vor. Dieser ist jedoch nicht immer einsetzbar bzw. optimal. Zum einen können Bauteiloberfläche und der Sensor dadurch Abnutzungen oder/Beschädigungen erfahren, zum anderen besitzt das Bauteil in vielen Fällen eine besondere Geometrie. Problematisch an einer kontaktlosen Messung ist die Tatsache, dass der Abstand des Sensors zur Oberfläche des Prüfobjekts einen bedeutenden Einfluss auf die Prüfaussage hat. So kann durch steigenden Abstand das Signal-Rausch-Verhältnis sinken oder durch Schwanken des Sensors oder der Mechanik (Manipulator, Roboter) kann es zu fehlerhaften Prüfergebnissen kommen. Aktuell ist es bereits möglich, eine kontaktlose, robotergestützte Messung durchzuführen. Jedoch ist die Programmierung dieser Roboter sehr aufwendig und muss für jede Abweichung des Prüflings von der bereits bestehenden Geometrie neu konfiguriert werden. Es gibt auch die Möglichkeit, eine Regelung über optische Verfahren mittels hochauflösenden Kameras zu realisieren, welche jedoch in der Regel sehr teuer sind. Dieser Beitrag berichtet über einen Ansatz den Abstand eines Wirbelstrom-Sensorarrays zur Prüfoberfläche sowohl konstant, als auch verkippungsfrei zu halten. Das wurde unter anderem durch einen Hexapod (sog. Steward Plattform) und Regressionsanalyse realisiert. Der Hexapod ist in der Lage, sich in allen sechs Freiheitsgraden zu bewegen. Mittels Regressionsanalyse werden die von drei weiteren Wirbelstrom-Sensoren gelieferten Daten hinsichtlich ihres Abstandes zu Prüfoberfläche ausgewertet. Dadurch ist es möglich, eine beliebig gekrümmte Oberfläche mit gleichbleibendem Abstand und ohne Verkippen zu prüfen und damit ein stets vergleichbares Prüfergebnis zu erzielen.

Methode zur Projektion komplexer 3D-Wirbelstromprüfdaten auf beliebigen gekrümmten Bauteilen

J. Oswald¹, D. Koster¹, M. Ganster¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Zur einfachen Interpretation von Wirbelstromprüfdaten ist es sinnvoll, sowohl die Amplitude des Signals, als auch dessen Position auf dem Prüfobjekt miteinander in Verbindung zu bringen. Bei großen oder aufwändig geformten Prüfkörpern ist es jedoch oft schwierig deutlich zu machen, an welcher Stelle die entsprechenden Prüfdaten aufgenommen wurden. Zu diesem Zweck wurde im Fraunhofer IZFP eine Methode entwickelt, die Prüfdaten auf einem Modell des Prüfkörpers abzubilden. Neben der Zuweisung der Prüfdaten zum 3D-Modell gehört dazu auch ein Verfahren, welches die geprüfte Fläche des Modells in eine zweidimensionale Form überführt. Ziel ist dabei, die Ortsinformation der Daten auf dem Modell beizubehalten, jedoch eine unkomplizierte Art der Darstellung verwenden zu können. Zur Überführung von der 3D- in die 2D-Darstellung wird das Modell in all seine Teiloberflächen zerlegt und diese Oberflächen aufgefaltet. Im Gegensatz zu vielen gängigen Methoden, die verwendet werden, um Modelle im 2D-Raum abzubilden, bietet dieser Ansatz den Vorteil, dass eine genaue Zuordnung aller Teilsegmente zwischen 3D- und 2D-Modell möglich ist. Des Weiteren bietet sich die Möglichkeit, Prüfdaten mithilfe der beim Auffalten des Modells gewonnenen Informationen möglichst schnell einem Punkt auf dem 2D-Modell zuzuordnen. Dieses Verfahren ermöglicht es beispielsweise, Daten, die in verschiedenen Prüfungen aufgenommen werden, auf dem Modell zusammenzufassen und leicht zu überblicken. In diesem Beitrag stellen wir einige Details dieser Methode vor.

Gezielte Vermessung der Dicke von Gassperrschichten

C. Florin¹

¹ flo-ir, Oberdorf, Schweiz

Ob Folien für Nahrungsmittelschalen, für Kaffeekapseln, für Esswaren oder für hochwertige Kunststofffilme, in jedem Falle sind bei der Herstellung Informationen zur Dicke der einzelnen Schichten im Schichtstapel erwünscht.

Zur Messung der Dicke von einzelnen Schichten in Mehrschichtfolien lassen sich spezielle optische Verfahren einsetzen die auch bei hohen Produktionsgeschwindigkeiten und bei flatternden Folien die Dicke jeder Schicht messen.

Um den Materialeinsatz zu minimieren, aber die Funktionen des Produktes in jedem Falle zu gewährleisten, sind Hersteller gezwungen, die Schichten in den Folien mit immer geringerer Dicke und mit höchster Genauigkeit zu produzieren. Die Dicke von Klarlackschichten, von Gassperrschichten oder von Haftvermittlerschichten sind Qualitätskriterien, die überprüft, nachgewiesen und bei Abweichungen, dokumentiert oder sogar korrigiert werden müssen.

Neue Möglichkeiten in der Videoendoskopie durch bessere Bildauflösung und neues Stereomesskonzept

H. Küchler¹

¹ Olympus Deutschland, Hamburg

Einführung

Technische Neuerungen in der Bildchip Produktion, der Objektivherstellung und bei der Messsoftware bieten neue Möglichkeiten bei der endoskopischen Sichtprüfung in der Industrie. Durch die verbesserte Bildauflösung durch mehr Bildpunkte können Defekte einfacher analysiert werden. Das erhöht die Betriebssicherheit von Motoren, Turbinenantrieben und bei vielen anderen Anwendungen. Die schnelle Vermessung von Anzeigen verkürzt den Arbeitsaufwand bei der Endoskopie.

Neue Eigenschaften des iPlex NX am Beispiel der Turbineninspektion

Die neue Laserbeleuchtung mit automatischer Helligkeitsregelung ermöglicht es dem Sichtinspektor sich schnell in großen Räumen und auch beim Heranfahren an kleine Strukturen zu orientieren. Das HDMI Bild mit 1024x768 Bildpunkten am 8.4 inch Monitor bietet eine gute Darstellung der zu inspizierenden Teile.

Der Inspektor erhält eine interaktive Rückmeldung an der Fernbedienung, wenn ein weiteres Abwinkeln des Distalendes nicht möglich ist.

Ist eine Anzeige gefunden, so kann mittels Spotrange-Funktion der optimale Abstand zur Vermessung schnell gefunden werden. Dabei sind Arbeitsabstände bis 60mm zum Vermessen Möglich. Es sind Längen, Flächen und Tiefen mittels der Stereomessung möglich.

Die Dokumentation kann direkt am Videoskop mittels inHelp Funktion erfolgen.

Ist ein Musterbild von einer Struktur im Videoskop abgespeichert so kann dieses als „Geisterbild“ im Monitor eingeblendet werden. Somit sind wiederkehrende Strukturen leichter zu identifizieren.

Fazit

Die Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Videoskope bietet neue Möglichkeiten bei der Sichtprüfung. Inspektionen sind schnell und einfach durchzuführen. Durch die verbesserte Bildqualität werden neue Maßstäbe bei der Sichtprüfung gesetzt.

Industrie 4.0 in der zerstörungsfreien Prüfung

R. Söhnchen¹

¹ Automation W+R, München

Automated Vision ist aus unserer Sicht die große Chance der Unternehmen in Deutschland. Digitalisierung und Industrie 4.0 sind hierbei unsere Kernthemen. Wir wollen nicht nur die Produktqualität, sondern auch die Prozessqualität unserer Kunden verbessern in der zerstörungsfreien Prüfung. Autision bietet diese Kombination aus automatisierter Qualitätsprüfung und Messtechnik „alles aus einer Hand“. Sichern Sie durch unsere Lösungen Ihrem Unternehmen höchste und stets gleichbleibende Qualität, welche wir in dem Vortrag darstellen.

Intelligentes Lebensdauermanagement durch Verfügbarkeit von ZfP-Daten über den Produktlebenszyklus

S. Bechtel¹, M. Becker², H.-G. Herrmann^{1,2}

¹ Universität des Saarlandes, Saarbrücken; ² Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Zerstörungsfreie Prüfverfahren ermöglichen es, die gewünschte bzw. notwendige Qualität, insbesondere von sicherheitskritischen Komponenten, zu gewährleisten und kommen in unterschiedlichen Bereichen des Produktlebenszyklus zum Einsatz:

In Hinblick auf die aufstrebende Technologie der pulverbettbasierten additiven Fertigung von Metallbauteilen ist es möglich bzw. sogar notwendig, den Herstellungsprozess zerstörungsfrei zu überwachen, um definierte und reproduzierbare Bauteileigenschaften sicherzustellen. Ein Überwachen des Prozesses kann beispielsweise mittels optischer Verfahren erfolgen.

Eigen Spannungszustände, die maßgeblich von der Prozessgeschichte sowie der anschließenden thermischen und mechanischen Belastung in der Weiterverarbeitung abhängen, können mittels der Kombination aus Ultraschallmessung und a-priori Daten aus Konstruktion und Fertigung lokal bestimmt werden.

Zum Monitoring der Bauteileigenschaften bieten sich je nach Anwendungsfall und Material bzw. Materialkombination beispielsweise Ultraschallverfahren und Thermographie an. In Kombination mit einem Lebensdauermodell, welches den Effekt von Defekten beschreibt, kann somit ein gezieltes Lebensdauermanagement betrieben werden.

Eine integrative Betrachtung der bisher in jedem Schritt des Produktlebenszyklus isoliert zur Verfügung stehenden Daten bietet zahlreiche Vorteile. Durch einen umfangreichen Datentransfer zwischen den einzelnen Bereichen können kritische Stellen identifiziert und mit Hinblick auf das Lebensdauermanagement gezielt berücksichtigt werden. Das verwendete Lebensdauermodell sowie die Prüfzyklen und -stellen ließen sich somit an die lokalen Eigenschaften anpassen. Allgemein können erhobene Messdaten, die in dem zugeordneten ZfP-Bereich nicht für eine Prüfaussage genutzt werden, in anderen zerstörungsfreien Prüfungen im Produktlebenszyklus hilfreiche oder sogar essentielle Zusatzinformation darstellen. Zur Erweiterung der Lebensdauervorhersage auf einer datengetriebenen Basis stellt die Informationsweitergabe von Rohdaten entlang des Produktlebenszyklus als ununterbrochene Kette ein zentrales Element der intelligenten ZfP dar. Vor diesem Hintergrund wird ein Konzept für ein intelligentes Lebensdauermanagement am Beispiel von Metall-CFK Hybridstrukturen vorgestellt.

ZfP 4.0 – Komplettes Schallemissionssystem im Sensorgehäuse

H. Kühnicke¹

¹ KERT, Dresden

Das Prüfverfahren Akustische Emission ist von Haus aus eng mit moderner Informations- und Kommunikationstechnik verzahnt. Die neuartigen Sensoren mit integriertem Messsystem erfordern zwingend eine Netzanbindung, die natürlich auch für die Kooperation zwischen Mensch, Maschine, Anlage und Logistik genutzt werden kann.

Zur Zeit existieren zwei Varianten AE-WiFi und AE-PoE. Bei beiden Varianten befindet sich im Sensorgehäuse ein komplettes Schallemissionssystem, das die Messsignale aufbereitet und die gewünschten AE-Parameter berechnet. Bei der Variante AE-WiFi sorgen zwei austauschbare Lithium-Akkumulatoren für die Stromversorgung. Diese erlauben je nach Messregime Betriebszeiten zwischen 6 Stunden und mehreren Tagen. Da die Datenübertragung über ein drahtloses Netzwerk nach IEEE 802.11b/g/n erfolgt, sind keine Kabelverbindungen notwendig. Davon profitieren besonders Anwendungen mit wechselnden Messorten. Im Gegensatz dazu verfügt die Variante AE-PoE über eine Kabelverbindung nach IEE 802.3af, die sowohl dem Datentransfer als auch der Stromversorgung dient. Sie wird bevorzugt für fest installierte Messanordnungen eingesetzt.

Informationstechnisch ist der Sensor ein Web-Server. Die Messergebnisse stehen überall im Netz zur Verfügung und können mit einem beliebigen Browser auf Desktops, Tabletcomputern oder auch Smartphones dargestellt werden. Auch die Einstellung des Messsystems erfolgt über eine Web-Seite. Es handelt sich um eine sogenannte Web-Anwendung. Dieses Konzept ermöglicht den Aufbau besonders preisgünstiger Schallemissionssysteme. Die Netzstruktur sorgt für hohe Flexibilität und ermöglicht komplexe Anwendungen, für die Schlagworte wie „Internet der Dinge“ oder „Industrie 4.0“ stehen.

Mit den angebotenen Starter-Kits können schnell einfache lokale AE-Netze aufgebaut werden. Unter Nutzung der Softwareoption „Auto Setting“, die eine automatische Einstellung des Systems aufgrund des gemessenen Rauschens realisiert, können schon nach wenigen Minuten erste erfolgreiche Schallemissionsmessungen durchgeführt werden.

Systeme ohne Ortung sind Stand der Technik. An der Entwicklung von mehrkanaligen Systemen mit Ortung wird gearbeitet.

Ultraschallprüfung von Schienenprofilen mittels Phased-Array-Technik

P.K. Chinta¹, S. Standop¹, G. Fuchs¹, D. Koers¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

In der automatisierten Ultraschallprüfung von Schienenprofilen werden bis heute üblicherweise konventionelle Prüfkopfsysteme eingesetzt. Die Schalleinkopplung erfolgt dabei entweder im direkten Kontakt oder mittels Squirterdüsen. Dieses Prinzip bedingt jedoch ein geringes Prüfvolumen und ist an wenige spezifische Schienenprofile angepasst. Die Umrüstzeiten sind hoch. Prüfanlagen die einen größeren Testbereich umfassen sind zwangsläufig mechanisch sehr aufwändig, was einen hohen Wartungsaufwand erfordert.

Wir überwinden diese Probleme durch den Einsatz von Phased-Array-Prüfköpfen in Tauchtechnik. Neben einer stabilen Ankopplung bietet die flexible elektronische Ansteuerung die Möglichkeit die Prüfung innerhalb kürzester Zeit an beliebige Schienenprofile anzupassen. Durch gezielte Steuerung und Verformung des Schallfeldes erreichen wir zudem eine höhere Abdeckung des Prüfvolumens und sind in der Lage auch individuelle kundenspezifische Anforderungen zu bedienen.

Schnelle berührungslose Luft-Ultraschallprüfung mit Arraytechnik

W. Hillger¹, A. Szewieczek¹, L. Bühling¹, D. Illse¹

¹ Ingenieurbüro Dr. Hillger, Braunschweig

Die relativ niedrige Schallgeschwindigkeit des Koppelmittels Luft und die Bandbreite der Prüfköpfe begrenzen die Impulsfolgefrequenz und damit die Prüfgeschwindigkeit von einkanaligen Prüfsystemen. Die dadurch entstehenden Taktzeiten genügen teilweise den Anforderungen in der Praxis nicht. Einen Ausweg bieten unsere mehrkanaligen Lösungen in Form von Prüfkopfarrays verbunden mit einer schnellen parallelen Datenaufnahme. Hiermit lassen sich Prüfzeiten von unter 4 Minuten pro Quadratmeter Scanfläche mit einer Auflösung von 1,5 mm erreichen. Sende- und Empfangsarrays sind für die Frequenzen 120 kHz und 200 kHz (z. B. für Sandwich-Bauteile) sowie 300 kHz (z. B. für monolithische Platten) erhältlich. Details und Anwendungsbeispiele werden im Vortrag vorgestellt.

On-Bead Querfehlerprüfung mit Ultraschall für automatisierte Prüfanlagen

C. Erkens¹, J. Ininger¹, S. Falter¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies, Hürth

Die Prüfung auf Querfehler ist ein fester Bestandteil aller gängigen Normen und Spezifikationen zur Fertigungsprüfung der Nähte von UP-geschweißten Rohren. Es ist üblich, diese Art der Prüfung in X- oder K-Konfiguration für Innen- und Außenfehler auszuführen. Die Ergebnisse sind dadurch gekennzeichnet, daß die Empfindlichkeitszonen der Prüfung nahe an der Oberfläche lokalisiert sind, während das Volumen bei großen Wandstärken nur unzureichend erfasst wird.

Modernere Spezifikationen gehen über diesen Ansatz hinaus und erfordern eine sogenannte „on-Bead“ Querfehlerprüfung auf der Schweißnaht, beidseitig in axialer Richtung. Dieses Verfahren erlaubt bereits eine deutlich größere Abdeckung des Nahtvolumens, ist aber dadurch gekennzeichnet, dass einerseits bei variablen Nahtgeometrien und Nahtversatz, wie sie in vielen Fertigungslinien vorkommen, starke Abweichungen auftreten und nur eine vergleichsweise kleine Nahtabdeckung in radialer Richtung erzielt werden kann.

In der Vergangenheit wurden Verfahren vorgeschlagen, welche mittels Phased-Array Prüfköpfen und einer geeigneten Einstellung der virtuellen Prüfköpfe die oben erwähnten Abweichungen und die vergleichsweise geringe Abdeckung verbessern konnten. Praktisch sind diese Verfahren jedoch nur dann in der Produktion einsetzbar, wenn es zwischen den einzelnen Rohren eines Loses im Fertigungsprozess nur unwesentliche Abweichungen in der Nahtstruktur gibt, oder hinreichend viel Zeit zur Ausführung einer Vielzahl von Sektor-scans zur Verfügung steht.

GE hat in der Vergangenheit bereits ein industriell erfolgreich eingesetztes Verfahren präsentiert, welches einen Phased-Array Prüfkopf zur On-Bead Querfehlerprüfung in einem Rollenprüfkopf benutzt.

Mit Phased-Arrays unter Einsatz der Paint-Brush Technik vorstellen können die Defizite der oben erwähnten Verfahren effizient vermieden werden. Um die Kopplung auf Naht und Rohroberfläche möglichst effizient zu gestalten, wurde diese neuartige Prüfeinheit wiederum als Rollenprüfkopf ausgeführt. Durch die Größe des Prüfkopfs wird die Abdeckung breiter Nähte und der Wärmeeinflusszone gewährleistet. Die Paint-Brush Technik erlaubt es, diese Prüfung mit Produktionsgeschwindigkeit auszuführen und dabei auch vom geradlinigen Verlauf abweichende Schalllaufwege zu berücksichtigen.

Materialcharakterisierung und -unterscheidung unter Einsatz induktiv-magnetostriktiver Hybridwandler

K. Szielasko¹, R. Tschuncky¹, J. Veile¹

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Die Arbeitsweise elektromagnetischer Ultraschallwandler (EMUS-Wandler), die kein Koppelmedium benötigen, beruht im Falle ferromagnetischer Untersuchungsobjekte unter anderem auf Magnetostriktion und Villari-Effekt. Diese Effekte sind auch im hörbaren Schallbereich nutzbar, wobei sich die Wandlertechnik erheblich vereinfachen und gleichzeitig für mikromagnetische Analysen nutzen lässt.

Es wurde ein robuster magneto-akustischer Hybridwandler für sowohl dynamische magnetostriktive als auch mikromagnetische Analysen im hörbaren Frequenzbereich entwickelt und in Anwendungen erprobt. Ein für die Reaktorsicherheitsforschung vor dem Hintergrund der Laufzeitverlängerung relevanter Anwendungsfall ist die Bewertung von Materialzuständen durch eine austenitische Plattierung hindurch. Die aufgrund der niedrigen Arbeitsfrequenz erreichte magnetostriktive Anregung des ferromagnetischen Grundmaterials mit energiereichen Sendepulsen ist entscheidend für diese Anwendung.

Der Beitrag erläutert das Funktionsprinzip der neuartigen Wandlertechnik und zeigt Anwendungsfelder auf.

Charakterisierung von Verbundwerkstoffen und Hybridbauteilen mittels Ultraschall und Thermografie

J. Pohl¹

¹ Hochschule Anhalt, Köthen

In der Herstellung und im Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden und Hybridstrukturen mit metallischen Komponenten können funktionsdegradierende Defekte auftreten, die zuverlässig erkannt und charakterisiert werden müssen. Ultraschalltechnologien mit unterschiedlichen Wellenarten (Volumenwellen und Lambwellen) sowie aktive Thermografie sind hierzu potenzielle Werkzeuge. Vorgestellt werden hierzu Beispiele an CFK-Strukturen und CFK-Metallhybridkomponenten mit Bindungsfehlern, Impactschäden und Herstellungsfehlern wie Trockenstellen und Porositäten. Bei der aktiven Thermografie wird der Einfluss von Anregungsbedingungen (Blitzlichtanregung und Ultraschall) sowie der Auswertung (Lockin- und Pulsphasenthermografie) betrachtet.

Die Röntgentechnik im digitalen Zeitalter. Wo liegt der Unterschied zum klassischen Film?

R. Scholz¹, S. Keitel¹

¹ SLV Halle

Die Durchstrahlungsprüfung (RT-F/S/D) ist neben der Ultraschallprüfung (UT) eines der am häufigsten angewandten Volumenprüfverfahren in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP), um innere Unregelmäßigkeiten in Bauteilen für die unterschiedlichsten Anwendungen nachzuweisen.

Die Röntgen- oder Gammastrahlen werden an verschiedenen Materialien oder Inhomogenitäten unterschiedlich geschwächt. Diesen Schwächungsgrad können wir uns auf einem Röntgenfilm oder mit Hilfe von verschiedenen Detektoren auf einem Monitor sichtbar machen. Seit der Entdeckung der Röntgenstrahlung, durch Wilhelm Conrad Röntgen im Jahre 1895, und der Gammastrahlung, durch Henri Becquerel im Jahre 1896, wird der Röntgenfilm als bildgebendes Medium genutzt.

Aber der technische Fortschritt lässt sich nicht aufhalten. Bereits 1975 gab es das erste Patent für Phosphorspeicherfolien (engl. Computed Radiographie „CR“) als Ersatz für den Röntgenfilm. In dieser Zeit wurde die Rechenteknik immer leistungsfähiger und preiswerter. Die Speicherfolientechnik fand ihre ersten Anwendungen in der Medizin. In der zerstörungsfreien Prüfung sind sie seit Anfang 2000 ebenfalls zusammen mit digitalen Flächen- oder Zeilendetektoren in der Anwendung zu finden.

Die wesentlichen Vorteile der digitalen Technik sind der größere Dynamikbereich bei gleichzeitig höherer Empfindlichkeit. Aber auch der Entfall der chemischen Entwicklung, welcher immer mit hohen Kosten verbunden ist, sowie eine geringere erforderliche Dosisleistung für die Belichtung sind nicht zu vernachlässigen. Weiterhin ergibt sich durch den Einsatz eines Flächen- oder Zeilendetektors die Möglichkeit einer Computertomographie, also einer Dreidimensionalen Abbildung eines Bauteiles und somit eine exakte Lagen- und Größenbestimmung einer Unregelmäßigkeit. Zusätzliche Software in Form von Filter- und Analysetools erleichtern und verbessern zusätzlich die Bildauswertung erheblich.

Mit dem Poster soll der Unterschied zwischen den digitalen Detektoren und dem „klassischen“ Röntgenfilm dargestellt werden.

Ein Hardwaremodul zur intuitiven Interaktion mit technischen Geräten

C. Tschöpe¹, F. Duckhorn¹, M. Wolff²

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden; ² BTU Cottbus-Senftenberg

Immer komplexer werdende Prüfgeräte erfordern neue Wege der Mensch-Technik-Interaktion zwischen Prüfer und Prüfgerät hin zu natürlicher und intuitiver Kommunikation, beispielsweise über Sprache, aber auch über Touchscreen, Gesten oder Signaltöne. Auch technische Geräte im Haus- und Heimelektronikbereich gewinnen durch eine intuitive Bedienbarkeit deutlich an Akzeptanz.

Die vorgestellte Lösung bietet verschiedene Möglichkeiten zur Bedienbarkeit. Neben Touchscreen-Bedienung ist eine Steuerung per Sprache und durch Gestenerkennung möglich, unterstützt durch Signaltöne zur Quittierung. Das System interpretiert die Nutzereingaben und sendet die daraus ermittelten Steuerbefehle über eine Standard-Schnittstelle (z. B. RS232 oder USB) an das Prüfgerät. Ein besonderes Merkmal ist, dass das System das Verhalten des Nutzers erlernen und sich dadurch optimal auf ihn einstellen kann. Die sensiblen Daten werden per Design im Gerät gehalten und nicht an externe Server übertragen und sind dadurch auch gegenüber anderen Nutzern geschützt.

Die Anwendungen sind vielfältig. Neben Prüfgeräten können beispielsweise auch Anlagen (z. B. Heizungen) gesteuert werden.

Wir möchten die kognitive Benutzerschnittstelle vorstellen und die Einsatzmöglichkeiten anhand von Beispielen erläutern.

Altenburg, S.J.	Di.2.C.2	del Galdo, G.	P2
Altin, K.	P20	Delhaes, C.	P16
Amiri, M.	Di.2.B.2	Denzel, W.	Mo.3.A.2
Anton, G.	Mi.1.C.1, P11	Deutsch, W.A.K.	Mo.2.B.3, P15
Awerbuch, M.	Di.1.C.4	Dieckmann, S.	Mo.2.B.2
Ballmann, H.	Di.2.B.2	Dierker, T.	Mo.2.A.3
Barton, S.	Di.1.C.3, Mi.1.A.2	Dierks, T.	Mo.2.B.3
Bauscher, I.	Mi.2.C.2	Dilger, K.	Di.2.C.3
Bechtel, S.	P30	Dollase, A.	P8
Becker, M.	P30	Donath, T.	Mi.1.C.3
Becker, S.	Mo.3.C.3	Duckhorn, F.	P39
Beerlink, A.	Mi.2.C.5	Ebell, G.	Mo.3.A.3
Berg, H.M.	Di.1.A.3	Ebsen, B.	Mo.3.A.2
Berg, H.W.	Di.1.A.3	Eisenkrein, H.	Di.2.C.2
Bernhardt, Y.	Mi.1.A.3, Mi.2.B.5	Erkens, C.	P34
Bernthaler, T.	Mi.2.C.4	Ernst, A.	Mi.2.A.3
Betz, B.	Mi.3.A.3	Eshete, T.	Mi.3.A.3
Blass, D.	Di.2.C.3	Essig, W.	Mo.3.B.4, Mi.1.A.3, Mi.2.B.5
Bleicher, C.	Di.2.B.1	Ewert, U.	Mi.1.C.2
Bodi, A.	Mo.3.B.3, P19	Falter, S.	Mi.1.A.1, Mi.3.B.2, P16, P34
Boehm, R.	P4	Feistkorn, S.	Mo.3.A.2, Mo.3.A.5
Böhm, S.	Mi.2.B.4	Firsching, M.	Mi.2.C.2
Boller, C.	Di.1.C.1, Mi.2.A.3	Fischer, B.	Mo.3.B.5, P19
Bongartz, B.	Di.1.C.3	Fischer, C.	Mo.2.A.1
Bonitz, F.	Di.1.A.4	Florin, C.	P27
Bonten, C.	Mi.2.C.5	Frackowiak, W.	Di.1.C.3, Mi.1.A.2
Borchers, K.-W.	Di.1.B.4	Franz, P.	Mo.2.A.1
Brackrock, D.	Mo.2.A.1, Di.1.B.1, P4	Frey, J.	Di.2.C.4
Breidenbach, C.	Mi.3.B.2, P16	Friederich, F.	Mo.3.C.5
Bruchwald, O.	Di.1.C.3, Mi.1.A.2	Friese, M.	Mo.3.A.2
Brückner, B.	P14	Fuchs, F.	P10
Bruno, G.	Mo.2.A.2	Fuchs, G.	P32
Büchler, J.	Di.1.A.1	Funk, C.	Mi.2.C.3
Bühling, L.	Mi.3.B.3, P33	Gaal, M.	Mo.3.B.1, Di.1.B.1, Di.1.B.3
Bulling, J.	Mi.2.A.4	Gallersdörfer, M.	Mi.1.C.1, P11
Burzic, M.	P20	Ganster, M.	P26
Buske, S.	Mi.3.A.2	Gauder, P.	Mo.2.C.2
Bustani, A.	Mo.2.B.1	Gaul, T.	Mi.1.B.2, Mi.2.A.2, P1
Cerbe, B.	Di.1.B.4	Gautzsch, T.	Mo.3.B.3
Chinta, P.K.	P32	Gebhardt, S.	Mi.3.C.1
Coelho Lima, I.	Mi.3.A.4	Germes, A.	P16
Cusenza, S.	Mi.2.B.1	Gilch, T.	Mo.3.C.3
Czuratis, P.	P20	Goerz, O.	Mo.2.B.3
De Acosta, R.	Di.1.C.1	Göller, A.	Mo.3.C.2, Mo.3.C.4, P8
Dehn, F.	P10	Grohmann, M.	Mi.3.A.4

Große, C.U.	Mo.3.A.2	Kais, A.	Di.2.B.3
Guerrero-Santafe, J.	Mi.1.B.2	Kämmler, A.	Di.1.A.2
Habl, M.	Mi.1.C.3	Kanzler, D.	Mi.3.B.1
Hagner, L.	Mo.2.A.3	Käppler, S.	Mi.1.C.1, P11
Hämmerle, V.	Mi.1.B.3	Kasperl, S.	Di.1.A.2
Hanke, R.	Di.1.A.2	Kasperovich, G.	Mo.2.A.2
Härtel, K.	Di.2.A.4	Kathage, S.	Mo.3.A.2
Heckel, T.	Di.1.B.1, P4	Keil, A.	Mo.3.C.3
Heckmann, K.	Di.1.C.1	Keitel, S.	Mo.2.C.1, Di.2.A.1, Di.2.A.2, Di.2.C.1, P38
Heinz, D.	Di.1.A.2	Keßler, S.	Mo.3.A.2
Herbrand, M.	Mo.3.A.4	Kiel, M.	Mi.3.C.4
Herl, G.	Di.1.A.2	Kierspel, S.	P15
Herold, F.	Mi.3.A.1	Kieß, S.	Mi.3.A.3
Herrmann, H.-G.	P30	Kinne, R.	Mi.2.C.1
Heuer, H.	Mi.2.B.1	Kirchhof, J.	P2
Heutling, B.	Di.1.C.4	Klausing, M.	Mi.2.B.1
Hickmann, S.	Di.1.B.3	Klein, M.	Di.1.C.1
Hiller, J.	Di.1.A.2	Klein, P.	Mi.3.A.1
Hillger, W.	Mi.3.B.3, P33	Klesse, T.	Mi.1.B.2
Hinken, J.H.	P9	Klier, J.	Mo.3.C.1
Hipp, R.	Mo.2.C.3	Klisch, A.	Di.2.C.1
Hoffmann, D.	P23	Knupe, G.	Mi.3.A.3
Hoffrogge, P.	P20	Knyazeva, M.	Di.1.C.1
Hohlfeld, K.	Mi.3.C.1	Koch, C.	Di.1.A.4
Holstein, P.	P19	Koch, R.H.	Mi.2.A.1
Holzapfel, H.	P16	Koers, D.	Mi.1.A.1, P32
Hömske, B.	Mi.3.B.2, P16	Kolb, C.	P5, P23
Huber, B.	Di.2.A.3	Kolkoori, S.	Mi.2.A.1
Hunter, L.	Mi.2.C.3	Köllner, S.	Di.1.C.4
Ihlow, A.	P2	König, A.	P10
Illerhaus, B.	Mi.2.C.1	König, C.	Mi.2.B.3
Ilse, D.	Mi.3.B.3, P33	König, H.-H.	Mi.3.C.2
Ininger, J.	P34	Kopp, A.	Mi.2.C.4
Jahn, S.	Di.2.C.1	Köpp, C.	Mo.3.A.2
Jamrozny, M.	Di.1.C.1	Kopylow, A.	Mi.3.A.1
Janßen, M.	Di.1.C.2	Koster, D.	P25, P26
Jatzlau, P.	Mo.3.C.3	Krankenhagen, R.	Di.1.B.1, Di.1.B.3, Di.2.C.2
Jelito, V.	Mi.2.C.2	Kraus, E.	P23
Joas, S.	Di.1.B.2	Krause, M.	Mo.3.A.2
Jonuscheit, J.	Mo.3.C.1	Kreutzbruck, M.	Mo.3.B.4, Di.1.B.2, Mi.1.A.3, Mi.2.A.5, Mi.2.B.2, Mi.2.B.5, Mi.2.C.5, Mi.3.B.4
Josek, O.	Mo.2.B.3	Krieg, F.	P2
Jüngert, A.	Mo.2.C.2	Krome, F.	Mi.2.A.4
Jungmann, C.	P25	Krumm, M.	Mi.1.B.3, Mi.3.A.3
Jungstand, B.	Mo.3.C.2, Mo.3.C.4, P8	Kruschwitz, S.	Mo.3.A.3
Kahmann, F.	P16		

Kryukov, I.	Mi.2.B.4	Oberhagemann-Gerardi, U.	P12
Kübler, B.-J.	P20	Oeckl, S.	Di.1.A.2
Küchler, H.	P28	Orf, L.	P23
Kühnicke, H.	P31	Osman, A.	P2
Kunisch, E.	Mi.2.C.1	Oswald, J.	P26
Kupsch, A.	Di.1.B.3	Paetsch, O.	Mo.3.A.1
Lapsien, J.	P17	Pelzer, G.	Mi.1.C.1, P11
Laqui, R.	Mo.2.A.2	Peters, R.	P16
Lieske, U.	Mi.1.B.2	Pfeffer, P.	P5, P23
Long, N.X.	Mi.1.C.2	Pfeiffer, M.	Mo.3.B.3
Lorch, Y.	P22	Pfortje, R.	Mi.3.B.2, P16
Lösche, C.	Mi.3.C.4	Phong, N.	Mi.1.C.2
Ludwig, V.	Mi.1.C.1, P11	Pick, C.	P19
Lugovtsova, Y.	Mi.2.A.4	Pientschke, C.	Mi.3.C.4
Maack, S.	Mo.3.A.2	Pietzsch, A.	Di.1.B.4
Maier, A.	P11	Pohl, J.	P19, P37
Maierhofer, C.	Mo.2.A.1, Di.1.B.1	Prager, J.	Mi.2.A.4
Meier, R.	Mi.3.C.3	Pushkarev, S.	Di.2.B.2
Metayer, J.-F.	Mi.2.C.5	Rademacher, H.-G.	Mo.2.B.2, P21, P22
Metz, C.	Mo.2.A.1	Rahammer, M.	Mi.2.A.5, Mi.3.B.4
Michel, R.	P16	Rast, H.	P15
Michel, T.	Mi.1.C.1, P11	Ratering, R.	Di.1.A.1
Miller, T.	Di.1.A.2	Redmer, B.	Di.1.B.3
Mohr, M.	P23	Reimche, W.	Di.1.C.3, Mi.1.A.2
Molenda, D.	Di.2.B.2	Requena, G.	Mo.2.A.2
Möller, U.	P8	Rieder, H.	Di.2.B.4, P3
Molter, D.	Mo.3.C.1	Riegel, H.	P20
Mora, P.	Di.2.B.4	Rieger, J.	Mi.1.C.1, P11
Morgenstern, G.	Di.2.A.4	Riess, C.	P11
Mück, A.	Mo.3.B.2	Riess, N.	P7
Müller, B.R.	Mo.2.A.2	Rittmann, J.	Mo.3.B.4, Di.1.B.2, Mi.1.A.3
Müller, M.	Mo.3.A.4	Robens, S.	Mo.2.B.3
Mund, M.	Di.2.C.3	Röllig, M.	Di.1.B.1
Murer, D.	Mi.1.C.3	Römer, F.	P2
Mußmann, J.	Mi.1.B.1	Rosenberg, D.	Di.2.B.3
Neubeck, R.	Mi.3.A.2, P1	Sand, D.	Mi.1.C.1
Neubert, H.	Mi.3.C.1	Sauer, T.	Di.1.A.2
Neumann, L.	P20	Sauerwein, C.	Mi.1.B.3
Neumeister, P.	Mi.3.C.1	Schadow, F.	Mo.3.B.1
Niederer, M.	P20	Scherrer, M.	Mo.3.A.5
Niederleithinger, E.	Mo.3.A.4, Mi.3.A.4	Scheunemann, S.	Mo.3.B.2
Niedermeier, J.	Mi.2.C.4	Schickert, M.	Mo.3.A.2, Di.1.A.4
Nielow, D.	Mo.3.B.1, Di.1.B.3	Schiermeyer, S.	Di.2.B.3
Nitsche, S.	P16	Schmidt, J.	Mi.2.C.4
Noel, A.	P16	Schmidt, P.	Mi.2.C.3, Mi.2.C.4

Schmitt, P.	Di.1.A.2	Trautmann, F.	Mo.2.A.3
Schneider, G.	Mi.2.C.4	Triebel, M.	Mo.2.B.1
Schneider, H.	Mo.2.C.1	Tschöke, K.	Mi.1.B.2, Mi.2.A.2
Schober, G.	P5, P23	Tschöpe, C.	P39
Scholz, R.	P38	Tschuncky, R.	Di.2.B.1, P35
Schönberg, F.	Mo.3.B.3	Uebrig, H.-J.	Di.1.C.4
Schopf, T.	Di.1.C.1	Uhlmann, N.	Di.1.A.2
Schreiber, H.	P9	Ulrich, S.	Di.2.C.1
Schubert, F.	Mo.2.C.3	Vandenbrande, A.	Di.1.B.4
Schubert, L.	Di.1.B.4, Mi.3.A.2, P1	Veile, I.	Mi.3.C.2, P35
Schuhmacher, S.	P20	Vogt, B.	Mi.1.B.1
Schuler, X.	Mo.2.C.2, Di.1.C.1	Vogt, G.	Mi.1.B.1
Schulze, E.	Di.1.B.4	Völker, C.	Mo.3.A.3
Segur, D.	Mi.2.B.2	von Dungern, F.	Mi.1.B.2
Seidel, M.	Di.2.A.4	von Freymann, G.	Mo.3.C.1
Siebert, T.	Mi.2.B.3	Vu, H.	Di.1.B.2
Sievers, J.	Di.1.C.1	Wachtendorf, V.	Mo.2.A.1
Sievers, N.	P21	Wack, Y.	P4
Simon, S.	Mi.3.A.3	Wagner, S.	Di.2.A.2
Söhnchen, R.	P29	Walther, A.	Mo.3.A.2
Solodov, I.	Mi.2.B.2	Walther, F.	Di.1.C.1
Sommerhuber, R.	Mo.3.B.5	Weber, F.	Di.2.B.1, Mi.3.C.2
Sperling, T.	Mi.3.C.4	Weber, S.	Mo.3.C.1
Spies, M.	Di.2.B.4, P3	Weihnacht, B.	Di.1.B.4, P1
Spieß, L.	Di.2.B.3	Weinert, T.	Di.2.A.1
Šrajbr, C.	Di.2.C.4	Werner, M.	P5, P23
Sridaran Venkat, R.	Mi.2.A.3	Wessel-Segebade, H.	Mi.1.B.2
Standop, S.	Mi.1.A.1, P32	Wiesler, I.	P20
Starke, P.	Di.1.C.1	Wilcke, M.	Mo.3.A.2
Steinhausen, R.	Mo.3.B.3, Mi.3.C.4	Willems, F.	Mi.2.C.5
Stetson, J.	P16	Wolf, J.	Mo.3.A.2
Stiller, W.K.	Mi.1.B.1	Wolff, M.	P39
Stock, A.M.	Di.1.A.2	Würschig, T.	Mi.3.B.2, P16
Stocker, T.	Mi.2.C.2	Youssef, A.	Di.2.B.2
Stöß, P.	P7	Youssef, S.	Di.2.B.2
Straube, C.	P13	Zaremba, D.	Di.1.C.3, Mi.1.A.2
Stürzel, T.	Di.2.B.3	Zhang, F.	Mi.1.C.2
Swacek, C.	Mo.2.C.2	Zielke, R.	P21, P22
Szewieczek, A.	Mi.3.B.3, P33	Ziep, C.	P9
Szielasko, K.	Mi.3.C.2, P35	Zösch, A.	Di.2.A.4
Taffe, A.	Mo.3.A.2	Zscherpel, U.	Mi.1.C.2, P14
Teichert, G.	Di.2.B.3		
Tillmann, W.	Mo.2.B.2, P21, P22		
Timofeev, J.	Mo.3.A.2		
Trappe, V.	Mo.3.B.1, Di.1.B.3		

