

Computermodellierung von radiologischen Prüfverfahren

Gerd-Rüdiger Tillack und Carsten Bellon, Berlin

Zusammenfassung: Anhand von Beispielen wird die Anwendung der Computersimulation in der Durchstrahlungsprüfung beschrieben. Es wird gezeigt, daß die Simulation in der Durchstrahlungsprüfung einen Stand erreicht hat, der einen für die Prüfpraxis nutzbringenden Einsatz ermöglicht. Die gezielte Untersuchung einzelner Einflußfaktoren sowie die große Variationsmöglichkeit der Parameter bei schneller Verfügbarkeit der Ergebnisse und Verringerung des experimentellen Aufwandes unterstreichen das Potential dieser Technik.

Einführung

Die zerstörungsfreie Prüfung leistet einen wichtigen Beitrag zur Überwachung des Produktionsprozesses sowie zur Integrität und zum sicheren Betrieb von industriellen Anlagen, indem Informationen über den momentanen Zustand sowie über vorhandene herstellungs- oder betriebsbedingte Fehler bereitgestellt werden. Die Nutzung problemangepaßter Modelle für ZfP-Verfahren, die in der Lage sind, das Ergebnis der ZfP quantitativ vorherzusagen, kann in Zukunft einen bedeutenden Beitrag zur Zuverlässigkeit und Effektivität moderner ZfP-Verfahren leisten. In den letzten Jahren kann ein bemerkenswerter Fortschritt bei der Entwicklung und Anwendung von Modellen, die die vollständige Übertragungskette eines ZfP-Systems beschreiben, verzeichnet werden. Diese Übertragungskette schließt die Physik der betrachteten ZfP-Methode genauso ein wie ihre technische Realisierung. Heute sind eine Reihe von CAD-basierten Simulationswerkzeugen für verschiedene ZfP-Techniken, wie Ultraschall-, Wirbelstrom- und Durchstrahlungsprüfung verfügbar. Ein Überblick über den aktuellen Stand bei der Entwicklung und praktischen Anwendung von Modellen in der ZfP wird in [1] gegeben. Als Einsatzgebiete dieser Simulationswerkzeuge sind u. a. zu nennen:

1. Verständnis der einem Prüfverfahren zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge als Voraussetzung für die Untersuchung der das Prüfergebnis beeinflussenden Parameter einschließlich Bestimmung der wesentlichen Parameter und Angabe ihrer Anwendungsbereiche
2. Prüfgerechtes Konstruieren, d. h. die Prüfbarkeit kritischer Bereiche des Bauteils zum frühest möglichen Zeitpunkt, also bereits während der Konstruktion sicherzustellen
3. Machbarkeitsstudien, z. B. um zu untersuchen, ob eine ausgewählte Prüftechnik in der Lage ist, die an die Prüfung gestellten Anforderungen zu erfüllen, um zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes der Komponente oder Anlage beizutragen bzw. die

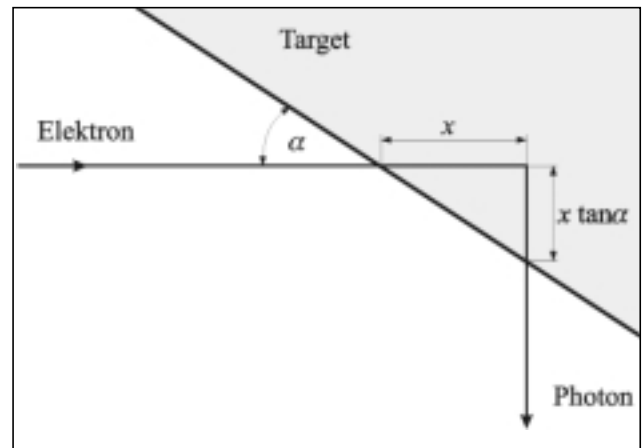


Abb. 1: Angenommene Geometrie für die Berücksichtigung der Selbstabsorption im dicken Target.

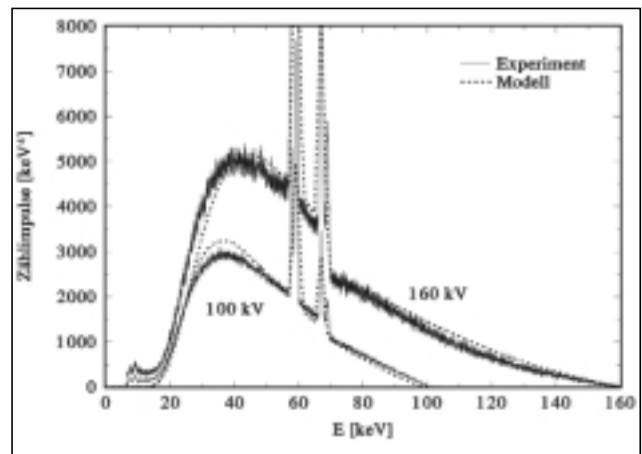


Abb. 2: Vergleich von simulierten Bremspektrums mit experimentellen Resultaten nach [12]: ISOVOLT 320, Röhrenspannung 100 kV und 160 kV, Wolframtarget, $\alpha=70^\circ$, 1 mm Be-Vakuumsfenster, 2 mm Al-Vorfilterung (Reskalierung des 160 kV Spektrums zur Berücksichtigung der Verdopplung des Quelle-Detektor-Abstandes bei der Messung)

Auswahl der für eine gestellte Aufgabe geeignete Methode zu unterstützen

4. Unterstützung bei der Entwicklung bzw. Optimierung von ZfP-Techniken, Erweiterung ihrer Möglichkeiten zur Quantifizierung von Materialeigenschaften einschließlich modellbasierter Datenanalyse bzw. -interpretation
5. Zuverlässigkeitsanalysen zur Untersuchung des Potentials einer eingesetzten Prüftechnik, Qualifikation bzw. Validierung von ZfP-Verfahren
6. Ergänzung der Ausbildung von Studenten und Prüfpersonal zur Erhöhung von Lernergebnis und -effektivität, Senkung von Ausbildungskosten, z. B. durch Reduktion von Ausbildungszeiten, Material-

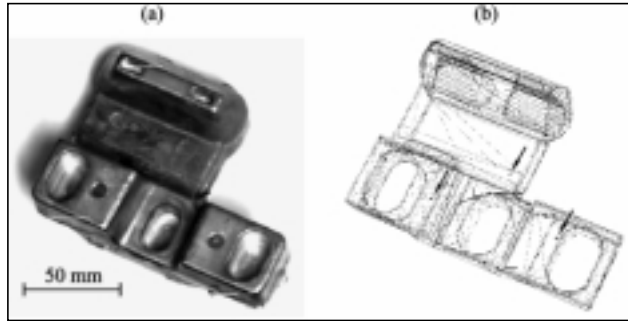


Abb. 3: Prüfung eines Aluminiumgußteiles auf herstellungsbedingte Fehler: (a) Bild und (b) CAD-Zeichnung des Gußteiles [15] mit durch Pfeile gekennzeichneten Poren

kosten oder Verfügbarkeit von Geräten, durch den Einsatz interaktiver PC-basierter Ausbildungshilfen.

Die hier nur kurz genannten Einsatzgebiete erfordern die Entwicklung von Simulationswerkzeugen, die eine Reihe praktischer Anforderungen erfüllen müssen. Diese lassen sich in drei Gruppen unterteilen: (i) die Auswahl des Prozeßmodells für ein vorliegendes Problem, (ii) die praktischen Anforderungen an Handhabbarkeit und Nutzbarkeit sowie (iii) die Bereitstellung von Schnittstellen zu anderen, in der Ingenieurtechnik eingesetzten Systemen.

Die erste Gruppe schließt die Auswahl des physikalischen Modells zur Beschreibung der Erzeugung von Strahlung, Wellen oder Feldern, deren Wechselwirkungsprozesse mit dem Material, sowie Detektion bzw.

Messung ein. Dabei ist zu beachten, daß die ausgewählte physikalische Näherung den praktischen Genauigkeitsanforderungen, die an das ZfP-System gestellt werden, anzupassen ist, d. h. nur solche Prozesse mit entsprechender Genauigkeit sind zu berücksichtigen, die zu durch den Prüfer interpretierbaren Signalen führen, wohingegen Effekte zweiter oder höherer Ordnung zu vernachlässigen sind. Dementsprechend ist die Genauigkeit der mathematischen Formulierung des Problems und dessen zumeist numerische Lösung zu wählen.

Der zweiten Gruppe sind Anforderungen zuzuordnen, wie z. B. PC-basierte Lösungen, die dem Nutzer ein User-Interface mit ihm aus der Praxis bekannten Interaktionsmöglichkeiten zur Verfügung stellen und keine speziellen Kenntnisse auf dem Gebiet der Computertechnik voraussetzen, einschließlich einfacher nutzerfreundlicher Handhabbarkeit durch eine menügesteuerte graphische Oberfläche. In diesem Zusammenhang spielen geringe Rechenzeiten eine wichtige Rolle, um Parametervariationen und deren Einfluß auf das Prüfergebnis schneller und effektiver als durch eine praktische Versuchsdurchführung zu ermöglichen.

Die Systeme müssen aber nicht nur handhabbar für den einzelnen Nutzer sein, sondern ebenfalls Schnittstellen zu anderen, standardmäßig im Ingenieurbereich eingesetzten Systemen zur Verfügung stellen. Darunter ist im Speziellen die Kopplung der Modelle mit Standard-CAD-Systemen, die Entwicklung und Implementierung

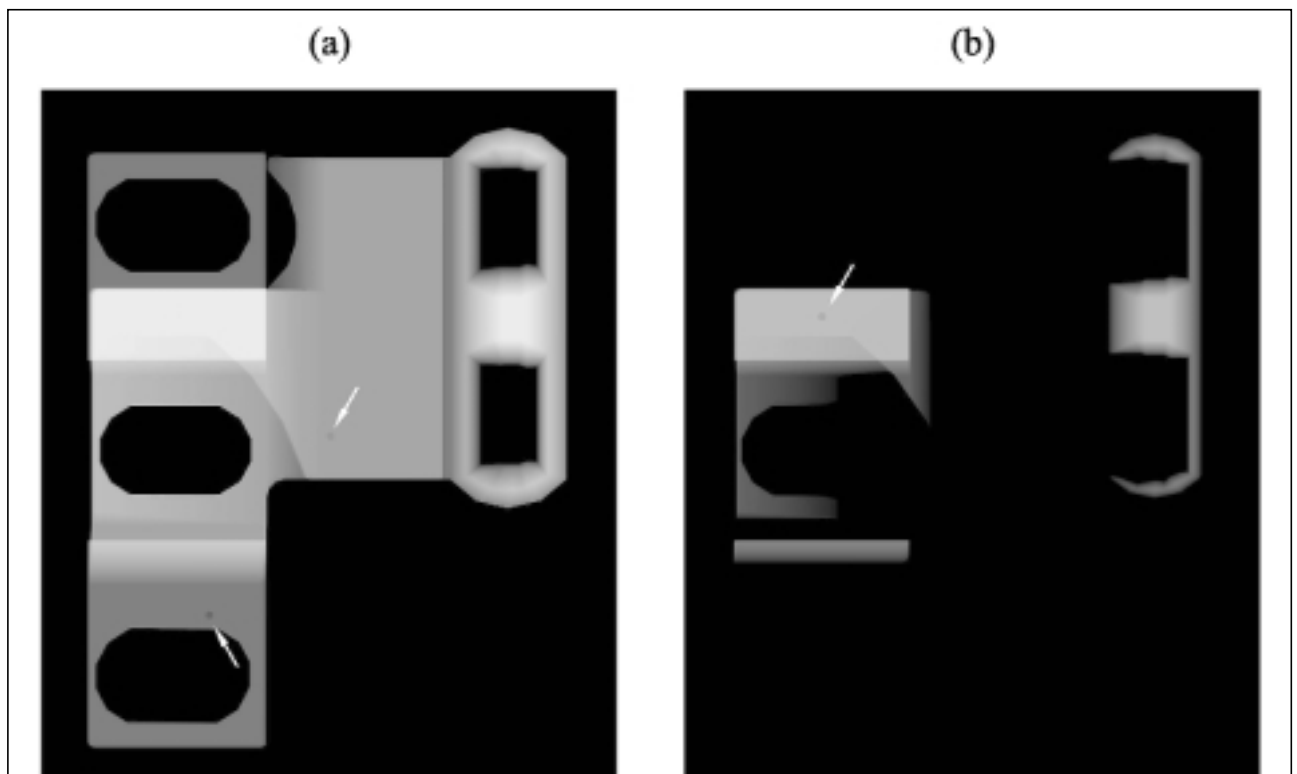


Abb. 4: Prüfung eines Aluminiumgußteiles auf herstellungsbedingte Fehler im Bereich unterschiedlicher Wanddicken mit Belichtungszeit von (a) 100 s und (b) 500 s (80 kV, 1 mA, Brennfleck 2 mm, FFA 1000 mm, AGFA D4-Film).

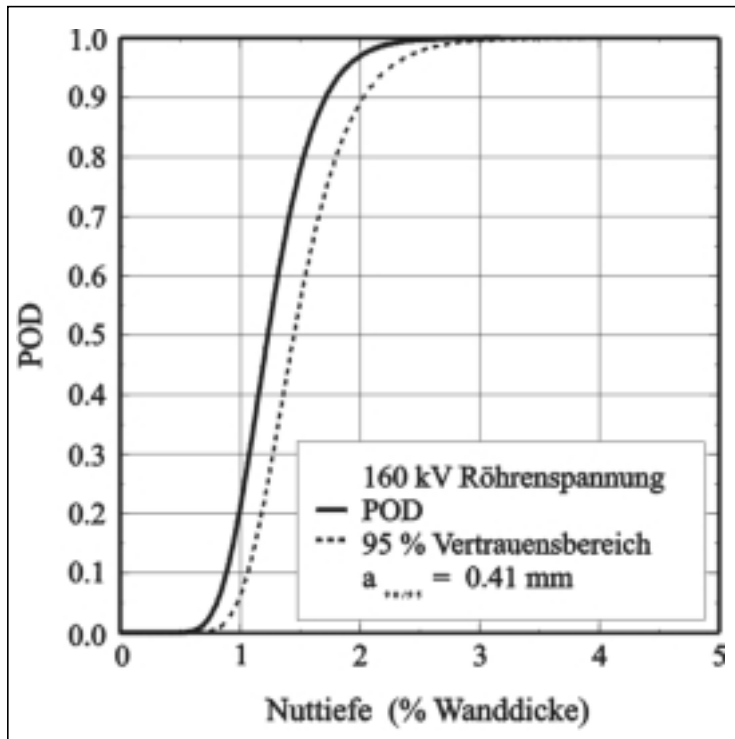


Abb. 5: Theoretische POD-Kurve (—) einschließlich 95%-Vertrauensbereich (- - -) für eine Nut in einer 20 mm dicken Stahlplatte (Nutbreite 40 μm; 160 kV, Fokus 4 mm, FFA 700 mm; AGFA D4, minimale Schwärzung $D_{min}=2$)

von Schnittstellen zu POD-Modellen zu verstehen, einschließlich Anbindung an Modelle zur Schadensanalyse und Lebenszeitvorhersage. In diesem Sinne können dem Ingenieur Informationen über die Effektivität und den Beitrag der ZfP im Rahmen eines allgemeinen Konzeptes zur Zuverlässigkeit und zum störungsfreien Betrieb komplexer Komponenten oder Anlagen zur Verfügung gestellt werden.

Ohne Erfüllung der angeführten Forderungen kann die Simulation in der ZfP keinem breiten Anwenderkreis in der Praxis zugänglich gemacht werden, sondern bleibt Laborlösung.

Mit dem Problem der Simulation der Durchstrahlungstechnik haben sich eine Reihe Autoren beschäftigt. Einfache Modellansätze [2-4] sind nicht in der Lage, reale Objektgeometrien zu behandeln und liefern daher in der Regel eine konservative Abschätzung der Einsatzgrenzen radiographischer Verfahren. Als Verallgemeinerung zu diesen Ansätzen seien hier stellvertretend Arbeiten aufgeführt [5-8], die die Behandlung komplexer Objektstrukturen einschließen.

Diese Arbeiten enthalten unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung der physikalischen Wechselwirkungsprozesse, von Strahlverfolgungsalgorithmen, gekoppelt mit dem Schwächungsgesetz, bis hin zu Monte-Carlo-Modellen, die eine detaillierte Beschreibung der konkurrierenden Wechselwirkungsmechanismen ermöglichen.

Weiterhin werden dort verschiedene Möglichkeiten zur geometrischen Repräsentation des Prüfobjektes sowie zur Kopplung der Geometriebeschreibung mit Strahlverfolgungsalgorithmen betrachtet. Weiterhin wurden neue Ansätze zur Erfassung des Einflusses der Streustrahlung auf die Qualität des Durchstrahlungsbildes entwickelt, die auf der Lösung der integralen Transportgleichung [9] basieren, oder den Prozeß der Photonenstreuung im Material als Markov'schen Prozeß mit zufälliger Struktur auffassen [10].

Modell der Durchstrahlungsprüfung

Die Durchstrahlungsprüfung gliedert sich in drei wesentliche Komponenten: die Erzeugung von Strahlung in einer Strahlenquelle, die Wechselwirkung der Strahlung mit dem durchstrahlten Material und der Strahlungsnachweis. Diese drei Komponenten sind in einem sie vereinenden Geometriemodell zu beschreiben.

Das Modell für die Strahlenquelle beschreibt die Ausdehnung des austretenden Strahlenbündels und das Energiespektrum, das zu berücksichtigen ist, da die Wechselwirkung der Strahlung mit Materie von der Energie der Strahlung abhängt. Ein Raster von Punktstrahlern beschreibt den Brennfleck der Strahlenquelle in seiner Ausdehnung und Intensitätsverteilung. Jedem Rasterpunkt wird das Energiespektrum der Strahlenquelle zugeordnet.

Dabei ist zwischen Röntgen- und γ -Quellen zu unterscheiden. Für Röntgenröhren kann das Spektrum durch eine Messung oder durch theoretische Beschreibung der Entstehung von Bremsstrahlung, wie sie in [11] und Referenzen dort beschrieben ist, erfaßt werden.

Dabei ist die Intensität der Bremsstrahlung durch den differentiellen Wirkungsquerschnitt $\sigma(E, \Omega; E_e^-)$ für die Erzeugung eines Photons der Energie E durch ein Elektron mit der kinetischen Energie E_e^- und der Bewegungsrichtung Ω relativ zur Einschubrichtung des Elektrons gegeben.

Moderne Modelle zur Bestimmung der Querschnitte basieren auf einer direkten numerischen Lösung der relativistischen Feldgleichung, wodurch der Gültigkeitsbereich sowie die Genauigkeit der erhaltenen Resultate erheblich verbessert wird.

Das Modell faßt den Prozeß der Erzeugung von Bremsstrahlung als Ein-Elektronen-Übergang in einem selbstkonsistenten abgeschirmten Zentralpotential auf.

Die entsprechenden Elektronenwellenfunktionen werden in Partialwellen zerlegt und durch numerische Integration der Dirac-Gleichung bestimmt. Die sich so erge-

benden winkelintegrierten Querschnitte $\sigma(E, ;E_{\bar{e}})$ sind für Einschußenergien von 1...2000 keV für neutrale Atome mit $1 \leq Z \leq 92$ tabelliert, was der Annahme eines Lambert-Strahlers entspricht.

Wird zusätzlich – wie in Abb. 1 dargestellt – berücksichtigt, daß die Elektronen vollständig im Targetmaterial abgebremst werden, gegeben durch den mittleren Energieverlust der Elektronen (dE/dx) mit der Eindringtiefe x , und bei Berücksichtigung der Eigenabsorption im Targetmaterial ergibt sich für das Bremspektrum

$$I(E)/I_{scale} = \frac{\rho}{4\pi e} \frac{N_A}{A} \int_E^{E_0} dE' \sigma(E, E') \cdot \left(\frac{dE'}{dx}\right)^{-1} e^{-\mu(E') \left(\frac{E_0^2 - E'^2}{\rho C}\right)^{\tan \alpha}} \quad (1)$$

mit dem Skalierungsfaktors I_{scale} , der Avogadro'sche Zahl N_A , der Elementarladung e , der Atommasse A und der Dichte ρ des Targetmaterials, sowie der Thompson-Widdington-Konstante C .

Zur Berücksichtigung der charakteristischen Strahlung im Röhrenspektrum, die durch Übergänge zwischen den Elektronenschalen entsteht, werden die Floreszenzenergien einschließlich relativer Ausbeuten verwendet. Zur Vereinfachung werden die K_{a1} und K_{a2} Übergänge sowie die $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 3}$ und $K_{\beta 5}$ Übergänge zusammengefaßt und der resultierenden Linie eine gewisse Breite Δ_a bzw. Δ_β zugeordnet, die aus dem Abstand der zu berücksichtigenden L- bzw. M-Energieniveaus folgt. In analoger Weise werden die L-Linien behandelt.

Diese grobe Vereinfachung erscheint für radiographische Anwendungen sinnvoll, da die charakteristische Röntgenstrahlung nur unwesentlich zur Abbildung beiträgt. Das so erhaltene vereinfachte Spektrum I_{char} zur Beschreibung der charakteristischen Strahlung, die durch Rekombinationsprozesse im Target entsteht, wird dem mit Gl. (1) bestimmten kontinuierlichen Bremspektrum additiv überlagert.

Zur Überprüfung der Genauigkeit des beschriebenen Modells werden simulierte Spektren quantitativ mit an Röntgenröhren unterschiedlicher Bauart gemessenen Spektren verglichen. In Abb. 2 ist als Beispiel ein Vergleich der durch das Modell vorhergesagten Spektren für 100 kV und 160 kV Röhrenspannung mit experimentellen Spektren [12] für eine ISOVOLT 320 verglichen. Dabei zeigt sich, daß das Modell in der Lage ist, das von der Röntgenröhre erzeugte Energiespektrum unter Berücksichtigung von Bauart und Vorfilterung quantitativ zu beschreiben.

Um die Charakteristika einer Röntgenröhre realistisch erfassen zu können wird zusätzlich die Vorfilterung zur Aufhärtung des Spektrums mit dem Schwächungsgesetz berücksichtigt. Weiterhin wird der Einfluß einer endlichen Brennfleckgröße auf die radiographische Ab-

bildung berücksichtigt, wobei der Brennfleck durch ein Pixelgitter endlicher Ausdehnung dargestellt wird. Jedem Pixel wird das Spektrum (1) sowie eine Intensität zugeordnet, die sich aus der Messung der Intensitätsverteilung (z. B. mittels Scan-Verfahren nach EN-12543 Teil 1) oder durch vereinfachter Annahmen, wie z. B. einer homogenen Verteilung oder einer Doppellinien-Struktur, ergibt.

Gamma-Strahler werden durch ihr charakteristisches Linienspektrum und die effektive Strahlergröße beschrieben.

Die Wechselwirkung von Strahlung und Material wird im allgemeinen durch das Schwächungsgesetz

$$I(\mathbf{r}, E) = \int_{source} \frac{I_0(\mathbf{r}', E)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} e^{-\int_0^{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \mu(\mathbf{r}-\mathbf{r}', E) dr'} d^2r' \quad (2)$$

mit dem energieabhängigen linearen Schwächungskoeffizienten $\mu(E)$ beschrieben, der sich aus Beiträgen der Photoabsorption sowie der Rayleigh- und Compton-Streuung zusammensetzt. Der Paarbildungseffekt, der oberhalb 1.022 MeV Strahlungsenergie einsetzt, wird im Modell vernachlässigt, da bei der industriellen Anwendung der Radiographie im wesentlichen Energien kleiner 1 MeV zum Einsatz kommen (Ausnahme Co-60).

Weiterhin ist eine Beschreibung des Strahlenanteils aus Streuprozessen entsprechend der konkreten Anwendung erforderlich. Eine detaillierte Beschreibung der Streuprozesse ist mit der Monte-Carlo-Methode (vgl. z.B. [7,8]) möglich. Da eine Implementierung dieser Technik für beliebige Bauteilgeometrien schwierig ist und die Berechnungen zeitaufwendig sind, ist eine Anwendung nur auf ausgewählte Fälle beschränkt. Insbesondere bei Objekten mit geringen Wanddickenschwankungen kann die Kontrastminderung durch Streustrahlung im Durchstrahlungsbild näherungsweise durch den Aufbaufaktor bestimmt werden, da in diesen Fällen von einer homogenen Verteilung der Streustrahlung ausgegangen werden kann [13].

Der Abbildungsprozeß wird durch die charakteristische Filmkurve beschrieben. Weiterhin steht ein einfaches Modell zur Beschreibung der Filmresponse zur Verfügung. Dabei wird angenommen, daß die entwickelte Filmemulsion eine dreidimensionale Verteilung identischer Silberkörner ist. Wird weiterhin angenommen, daß ein Silberkorn durch die Absorption von mindestens m Photonen latent wird, also zur radiographischen Abbildung beiträgt, kann ein einfaches Poisson-Modell abgeleitet werden, das die wesentlichen Abbildungscharakteristika eines Röntgenfilms enthält. Zusätzlich wird die Körnigkeit σ_D und innere Unschärfe des Film-Folien-Systems durch Filterung des entstandenen Bildes

berücksichtigt. Neben Quelle, Wechselwirkungsmechanismen und Detektor gehört auch eine geometrische Beschreibung des Prüfaufbaus zum Durchstrahlungsmodell. Mittels einer CAD-Schnittstelle [5] werden alle geometrischen Komponenten in einem gemeinsamen virtuellen Raum zusammengeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Projektionsmodells gekoppelt mit einer CAD-orientierten Objektbeschreibung kann [11,14] entnommen werden. Standardformate ermöglichen den Austausch von Bauteilgeometrien mit 3D-CAD-Systemen. Dabei ist es möglich, dem Prüfteil separate Fehlerstrukturen zu überlagern.

Anwendungsbeispiele

Aluminiumgußteil

Im ersten Beispiel wird die Detektion von herstellungsbedingten Fehlern in Gußteilen untersucht. Dazu wird das in Abb. 3 dargestellte Aluminiumgußteil betrachtet, das als Motoraufhängung in PKW dient. Als herstellungsbedingte Fehler sind in diesem Fall Poren zu erwarten, die mit einem Durchmesser von mehr als 0.5 mm zu detektieren sind. Deshalb werden als Modellfehler Kugeln mit entsprechendem Durchmesser verwendet, deren Schwächungseigenschaften denen von Luft gleichgesetzt werden. Das Objekt weist Wanddickenunterschiede im Bereich zwischen 20 mm und 40 mm auf. Zur Untersuchung der Detektierbarkeit von Poren in unterschiedlichen Wanddickenbereichen werden Modellfehler mit einem Durchmesser von 0.5 mm in unterschiedlichen Bereichen des Objektes positioniert, wie Abb. 1 (b) zu entnehmen ist.

Die Simulationsergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt. Für die radiographischen Aufnahmen werden folgende Parameter verwendet: 80 kV Röntgenquelle mit 2 mm Brennfleck, FFA 1000 mm, AGFA D4-Film mit 0.02/0.02 Pb Vorder- und Hinterfolie. Durch Variation der Belichtungszeit werden verschiedene Wanddickenbereiche ausgewählt, für die ein optimaler Abbildungs- kontrast erreicht wird. Objektbereiche mit größerer oder kleinerer Wanddicke werden dementsprechend unter- bzw. überbelichtet, was eine Auswertung dieser Bereiche unmöglich macht. Für Abb. 4 (a) ist eine Belichtungszeit von 100 s gewählt, so das der Bereich kleinster Wanddicke optimal abgebildet wird. Die Pore ist in diesem Bereich mit gutem Kontrast sichtbar. Im Bereich mittlerer Wanddicke kann sie auch noch mit ausreichendem aber geringerem Kontrast wahrgenommen werden. Aufgrund der großen Wanddicke im mittleren Bereich des Objektes ist dieser Bereich stark unterbelichtet. Durch Erhöhung der Belichtungszeit auf 500 s ist in diesem Bereich die Pore mit gutem Kontrast zu sehen (vgl. Abb. 4 (b)). Der dünnwandige Teil des Objektes erscheint stark überbelichtet und kann nicht mehr ausgewertet werden. Dasselbe trifft für den Bereich mittlerer Wanddicke zu. Dieses Beispiel zeigt, daß bei großen Wanddickenunterschieden in den meisten Fällen

mehrere Aufnahmen anzufertigen sind, um in den verschiedenen Wanddickenbereichen Unganzen finden zu können.

Erwähnt sei in diesem Zusammenhang noch, daß auch durch Erhöhung der verwendeten Strahlungsenergie der abbildbare Objektumfang erhöht werden kann, was aber zu einer Verringerung des Abbildungs- kontrastes führt. Letztendlich ist ein Kompromiß zwischen Prüfaufgabe, Prüfaufwand, d. h. Prüfkosten, und Sicherheitsanforderungen zu finden. Um den Prüfer dabei zu unterstützen, kann mit Hilfe der Computersimulation die Aussage getroffen werden, (i) wie die Detektierbarkeit eines Fehlers gegebener Größe oder (ii) was die Größe des noch zu detektierenden Fehlers bei vorgegebenen Durchstrahlungsparametern in jedem interessierenden Bereich des zu prüfenden Objektes ist. Dazu wird das Objekt in ein äquidistantes Gitter frei wählbarer Größe aufgeteilt, der Fehler nacheinander in jedem der Gitterelemente positioniert und auf der Grundlage des ermittelten Abbildungs- kontrast, z. B. mit Hilfe einer Schwellwertoperation, die Detektierbarkeit des Fehlers ermittelt. Damit wird dem ZfP-Personal ein praktisches Werkzeug zur Prüfplanung in die Hand gegeben.

Zuverlässigkeitsanalyse

Als wichtig für die Akzeptanz von ZfP-Verfahren erweist sich die Untersuchung des Potentials der eingesetzten Prüftechnik. Dafür kann die POD (Probability Of Detection), gekoppelt mit Modellen für das ZfP-Verfahren eingesetzt werden. Eine Möglichkeit, die Signale eines ZfP-Systems mit der Fehlergröße zu korrelieren und daraus eine POD abzuleiten, ist in [16] vorgestellt. Diesem Schema folgend kann durch Verknüpfung des Abbildungs- kontrastes mit der Änderung der Wanddicke in Durchstrahlungsrichtung das Potential der Durchstrahlungsprüfung abgeschätzt werden. Für diese Untersuchung wurde der Kontrast im radiographischen Bild als Funktion der Wanddickenänderung – dargestellt durch Nutzen unterschiedlicher Tiefe in einer Stahlplatte – mit dem oben vorgestellten Modell berechnet. Die sich daraus ergebende POD ist beispielhaft in Bild 5 einschließlich 95% Vertrauensbereich dargestellt. Es ergibt sich ein sehr schmaler Übergangsbereich in dem die POD von Null auf nahezu Eins ansteigt. Das theoretisch erhaltene Resultat stimmt mit der praktischen Erfahrung überein: In Abhängigkeit von der Wanddicke können Wanddickenunterschiede zwischen 3% und 1% im radiographischen Bild sicher unterschieden werden. Voraussetzung ist natürlich die Verwendung einer normgerechten Durchstrahlungstechnik. Im dargestellten Fall wird eine POD von 90% mit einem Vertrauensniveau von 95% für eine 2%ige Wanddickenminderung erreicht.

Dieses exemplarische Beispiel zeigt, daß schwierige und aufwendige statistische Untersuchungen teilweise durch Modellvorhersagen ersetzt werden können.

Zusammenfassung

Die vorgestellten Beispiele haben gezeigt, daß die Computersimulation von ZfP-Verfahren Beiträge zur Zuverlässigkeit und Effektivität moderner ZfP liefern kann. Dazu ist eine den Erfordernissen der ZfP angepaßte Modellbildung zur Beschreibung der vollständigen Übertragungskette des ZfP-Systems notwendig. Dementsprechend sollten moderne Simulationswerkzeuge (i) den Anwendungsbereich entsprechend der Gültigkeit der implementierten physikalischen Näherung beschränken oder (ii) dem Nutzer eine Reihe physikalischer Näherungen mit unterschiedlicher Genauigkeit zur Verfügung stellen. Im zweiten Fall muß der Nutzer über genügend Fach- und Sachkenntnis verfügen, um die Simulationsergebnisse kritisch beurteilen und deren Aussagekraft auf der Grundlage der ausgewählten Näherung bewerten zu können.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für vielfältige Diskussionen und hilfreiche Hinweise zur Entwicklung und Implementierung des Durchstrahlungsmodells bei J. N. Gray (CNDE, Iowa State University, Ames, IA, USA), R. K. Chapman (Nuclear Electric, Barnwood, UK), A. B. Wooldridge (BNFL Magnox Generation, Berkeley, UK), D. Schnitger (BAM, Berlin) und V. M. Artemiev (Institute of Applied Physics, Minsk, Belarus).

Literaturverzeichnis

1. Thompson, D. O.; Chimenti, D. E. (Editoren): Review of Progress in QNDE Vol 18, Plenum Press, New York, 1999
2. Pollitt, C. G.: British Journal of NDT 4 9 (1962) 71-80
3. Möller, H.; Weeber, H.: Die Bildgüte bei der Durchstrahlung von Werkstoffen mit Röntgen- oder Gammastrahlen von 0.1 bis 31 MeV. Westdeutscher Verlag, Köln, 1963
4. Borke, E.; Obakowski, D.; Weigand, H.: Qualitätswertsystem Radiographie (QWS-RAD). AGFA-GEVERT AG, München, 1992.
5. Tillack, G.-R.; Bellon, C.; Nockemann, C.; Stenzel, L.: Computer Simulation of X-Ray NDE Process Coupled with CAD Interface. Review of Progress in QNDE Vol 16, herausgegeben von D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, 1997, S. 325-330
6. Elshafiey, I.; Gray, J. N.: Optimization Tool for X-Ray Radiography NDE. Review of Progress in QNDE Vol 15, herausgegeben von D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, 1996, S. 425-432
7. Bell, Z. W.: Monte Carlo Simulation of Shadow Formation by Planar Objects Illuminated by an Extended Source. Review of Progress in QNDE Vol 10, herausgegeben von D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, 1991, S. 347-353

8. Aerts, W.; De Meester, P. J.; Bollen, R.: A Monte Carlo Simulation of Complete Systems for Radiographic Image Registration. Mat. Eval. 40 9 (1982), S. 1071-1075
9. Inanc, F.; Gray, J. N.: Applied Radiation and Isotopes 48 10-12 (1997) 1299-1305
10. Tillack, G.-R.; Artemiev, V. M.; Naumov, A. O.: Ein neues Modell für die Streustrahlung. Materialprüfung 38 11-12 (1996), S. 469-472
11. Tillack, G.-R.: Simulation und Rekonstruktion für Strahlendiagnostische Verfahren. Monographie (Manuskript), 2000
12. Beckmann, J.: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, private Mitteilung, 1999.
13. Halmshaw, R.: Industrial Radiology. Theory and Practice. Chapman&Hall, London, 1995
14. Bellon, C.: Computersimulation radiographischer Prüfverfahren. Doktorarbeit (Manuskript), Technische Universität Dresden, Institut für Werkstoffwissenschaft der Fakultät Maschinenwesen, 2000
15. Gray, J. N.: CNDE, Iowa State University, Ames, USA, private Mitteilung, 1999.
16. Berens, A. P.: NDE Reliability Data Analysis. Metals Handbook, Vol 17, ASM International, Metals Park, Ohio, 1989, S. 669-701

Die Autoren:



Dr. rer. nat. Gerd-Rüdiger Tillack, Jahrgang 1963, studierte Physik an der Technischen Universität Dresden, wo er 1992 am Institut für Theoretische Physik promovierte. Seit 1992 ist er Mitarbeiter der BAM im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung. Dort beschäftigt er sich vor allem mit Modellbildung und 3D-Rekonstruktion für Strahlenverfahren.

Dipl.-Ing. Carsten Bellon, geboren 1967, studierte Werkstofftechnik an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.



Seit 1993 arbeitet er als Wissenschaftler an der BAM auf dem Gebiet der Computersimulation von Durchstrahlungsprüfung.

Beide sind Träger des Berthold-Preises 1999 der DGZfP.