

Durchstrahlungsprüfung am Computer simuliert

C. Bellon, G.-R. Jaenisch, Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM), Berlin

Vorgestellt wird ein Simulationswerkzeug, das anhand virtueller Bauteilrepräsentationen und Prüfanordnungen realistische Durchstrahlungsaufnahmen unter Beachtung definierter Durchstrahlungsparameter berechnet. Die Durchstrahlungssimulation kann vielseitig angewandt werden, z.B. zur Optimierung von Prüfparametern, bei Machbarkeitsuntersuchungen für spezielle Prüfaufgaben und als Hilfsmittel bei der Interpretation von Durchstrahlungsaufnahmen. Die theoretische Leistungsvorhersage durch Computer-Simulation ist auch Teil eines umfassenden Konzepts zur Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfungen.

Die Modellierung des Durchstrahlungsprozesses erfordert die Berücksichtigung verschiedener theoretischer und praktischer Aspekte. Im Mittelpunkt der theoretischen Betrachtung steht die Auswahl geeigneter physikalischer Näherungen zur Implementierung schneller Simulationsprogramme bei gleichzeitig ausreichender, dem Problem angepasster Genauigkeit. Für die Anwendung in der industriellen Prüfpraxis ist insbesondere die Bereitstellung geeigneter Schnittstellen zur Handhabung virtueller Bauteilrepräsentationen von Bedeutung [1]. Das vorgestellte Programmsystem nutzt folgende Techniken: analytisches Prozessmodell, Strahlenverfolgungsalgorithmen, CAD-Beschreibung von Prüfobjekten und grafische Benutzeroberfläche.

Durchstrahlungsprozess-Modell

Die wesentlichen Parameter bei der Beschreibung von Röntgenquellen und Gammastrahlern sind Strahlungsintensität als Funktion der Energie und die optisch wirksame Strahlerfläche. Die Energiespektren können mit einer Anzahl diskreter Bereiche angegeben werden, z.B. aus Messungen oder in Form tabellarischer Linienspektren von Gammaquellen. Ein integriertes Modul erlaubt die Berechnung von Spektren von Röntgenröhren auf der Grundlage tabellierter Wechselwirkungsquerschnitte für die Entstehung von Bremsstrahlung. Die endliche Größe des Brennflecks einer Strahlenquelle wird durch ein Raster von Punktstrahlern beschrieben, wobei jedem Rasterpunkt das gewichtete Energiespektrum der Strahlenquelle zugeordnet wird.

Bei der Ausbreitung von Photonen der Röntgen- und Gammastrahlung kommt es zu Wechselwirkungen einzelner Photonen mit der Materie. Neben der Absorption sind das im betrachteten Energiebereich (< 1 MeV) vor allem die Compton- und Rayleigh-Streuung. Ein Teil der Photonen erreicht die Detektorebene ohne Wechselwirkungen und ergibt den bildgebenden Primärstrahlenanteil. Mit dem exponentiellen Schwächungsgesetz wird die geradlinige Strahlungsausbreitung beschrieben und die Primärintensitätsverteilung in der Detektorebene effizient berechnet. Bei den Wechselwirkungen der Photonen mit der Materie entsteht die Sekundär- und Streustrahlung, die im Wesentlichen zu einer Kontrastminderung im Durchstrahlungsbild führt. Eine detaillierte Beschreibung der Streuprozesse ist mit der Forderung kürzester Rechenzeiten in der Praxis nicht vereinbar. Mit dem Aufbaufaktor kann die Kontrastminderung durch Streustrahlung im Durchstrahlungsbild insbesondere bei Objekten mit geringen Wanddickenschwankungen beschrieben werden, da in diesen Fällen von einer homogenen Streustrahlungsverteilung ausgegangen werden kann.

Die Abbildungseigenschaften des Detektorsystems werden durch die Transferfunktion, z.B. gemessene Filmkurve, beschrieben. Zusätzlich werden innere Unschärfe und Rauschen, stochastische Grauwertschwankungen im Durchstrahlungsbild, berücksichtigt.

Geometriemodell

Der Durchstrahlungsaufbau einer realen Prüfsituation wird im Rahmen der Computersimulation in einem virtuellen Raum nachgestellt. Die geometrisch wirksamen Komponenten einer Durchstrahlungseinrichtung sind der optische Brennfleck der Strahlenquelle sowie die Bildfläche des Detektorsystems. Diese werden jeweils durch eine ebene Pixelfläche beschrieben. Als weiteres geometrisches Element können ein oder mehrere Prüfobjektrepräsentationen frei im Raum positioniert werden (siehe Abbildung 1).

Die Prüfobjekte werden durch dreidimensional geschlossene Oberflächen repräsentiert, die homogene Materialbereiche abgrenzen. Die Oberflächenbeschreibung erfolgt mittels ebener Polygone, die eine einfache mathematische Behandlung der einzelnen Facetten ermöglichen. Gekrümmte Oberflächen werden durch die nötige Anzahl ebener Facetten approximiert. Für facettierte Modellgeometrien wird mit dem STL-Format ein Standard-Austauschformat aus dem CAD-Bereich genutzt. Die Bereitstellung entsprechender Bauteilrepräsentationen wird durch die praxisübliche 3D-CAD abgedeckt. Weiterhin können für mittels Computertomografie untersuchte Bauteile die Oberflächen aus den gemessenen Volumendaten extrahiert und ins STL-Format überführt werden. Modelloberflächen für einige Grundkörper können programmintern parametrisch erstellt werden.

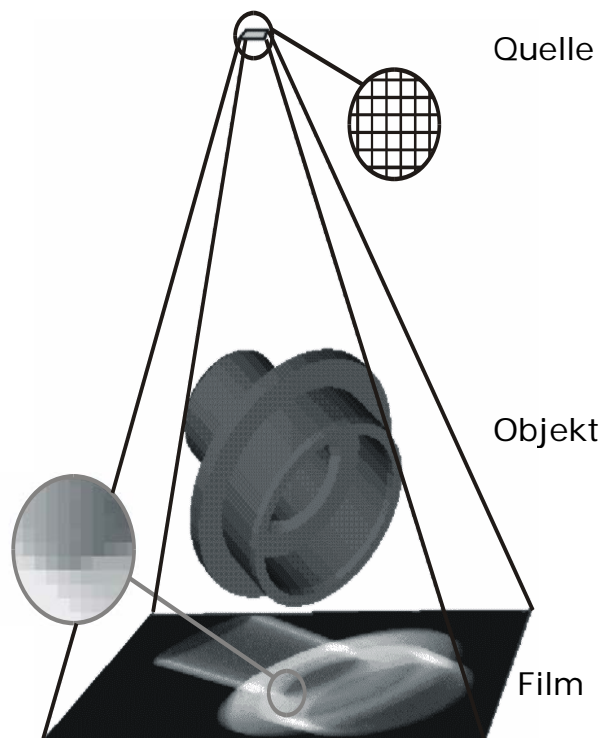


Abb. 1: Geometriemodell zur Durchstrahlungssimulation.

Die Ermittlung der zur Berechnung der Strahlungsschwächung erforderlichen Längen homogener Materialabschnitte entlang der geradlinigen Verbindungen von Quell- und Detektorpunkten erfolgt mit Algorithmen der Strahlverfolgung, die in der Computergrafik vielfältige Anwendung gefunden haben. Unter Ausnut-

zung der geradlinigen Ausbreitung der Primärstrahlung wurde ein Facetten-Projektionsalgorithmus [2] implementiert, der die Behandlung realistischer Szenen in praxisrelevanter Zeit gewährleistet.

Anwendungsbeispiel

Anwendung findet die beschriebene Simulationssoftware im Rahmen einer Zuverlässigkeitsanalyse von zerstörungsfreien Prüfverfahren bei der Fehlersuche an Deckelschweißungen dickwandiger Kupferbehälter. Entsprechende Behälter sind in Schweden für die Versiegelung verbrauchter Kernbrennstäbe zur Endlagerung in Felsgestein in 500 Meter Tiefe vorgesehen. Es handelt sich um zylindrische Behälter von etwa 5 Metern Länge und einem Meter Durchmesser mit einer Wanddicke von 50 Millimetern Kupfer. Verschlossen werden diese Behälter durch Verschweißen von Deckeln. Zur Prüfung dieser Rundnähte wird auch die Durchstrahlungstechnik angewandt. Dabei wird ein Linearbeschleuniger als Strahlungsquelle eingesetzt. Mit einer Zeilenkamera wird die Schweißnaht abgescannt, wobei der Behälter um die Längsachse rotiert (siehe Abbildung 2).

Abbildung 3 zeigt einen virtuellen Durchstrahlungsaufbau zur Simulation einer entsprechenden Schweißnahtprüfung. Die radiographischen Eigenschaften der Anlage wurden vor Ort gemessen und ins Simulationsprogramm übernommen. Anhand eines Vergleichs von synthetischen und experimentellen Stufenkeilaufnahmen wurde das Modell für den Anwendungsbereich (30-150 mm Kupfer) überprüft. Die mittleren Abweichungen der Grauwerte der Stufenpaare beträgt 1,6 % und des Rauschens 7,1 %.



Abb 2: Durchstrahlungseinrichtung für zylindrische Behälter. Die umlaufende Deckelverschweißung wird bei rotierendem Behälter mittels einer Zeilenkamera abgescannt.

Modellgeometrien von realen Schweißnahtfehlern, die in Testschweißungen am Behälter erzeugt wurden, wurden mittels Computertomographie von Schweißnahtsegmenten erstellt. Mittels Computersimulation kann somit das Abbildungsverhalten realer Schweißnahtfehler unter Berücksichtigung konkreter Prüfparameter und deren Variation untersucht werden. Abbildung 4 ist die Gegenüberstellung der synthetischen und experimentellen Abbildung eines voluminösen

Schweißnahtfehlers zu entnehmen. Neben dem radiografischen Abbildungsverhalten sind bei der Simulation auch bestimmte geometrische Parameter leicht zugänglich, die in die Zuverlässigkeitsberechnungen eingehen. Von Interesse sind hier z.B. die exakten Ausdehnungen von Schweißnahtfehlern in Durchstrahlungsrichtung. Durch die Behandlung weiterer, theoretischer Fehlergeometrien kann der Größenbereich von Testfehlern erweitert werden, bzw. die statistische Basis für Nachweisbarkeitsuntersuchungen verbessert werden.

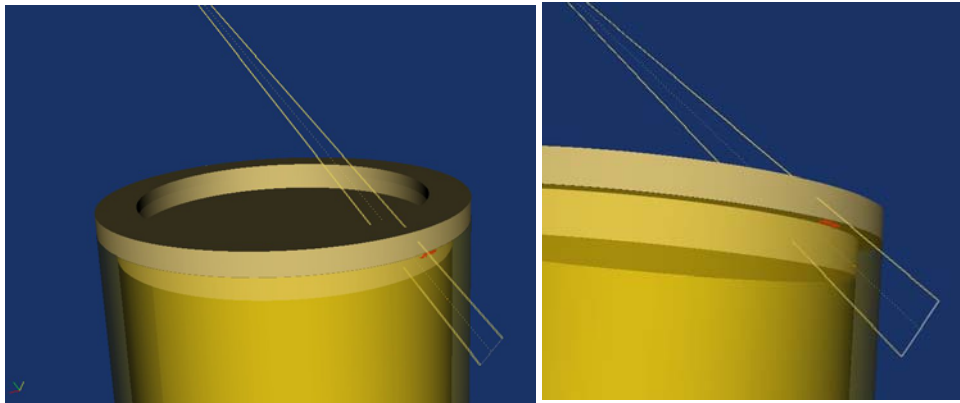


Abb. 3: Zwei Ansichten eines virtuellen Durchstrahlungsaufbaus zur Simulation der Behälterprüfung entsprechend Abbildung 2.

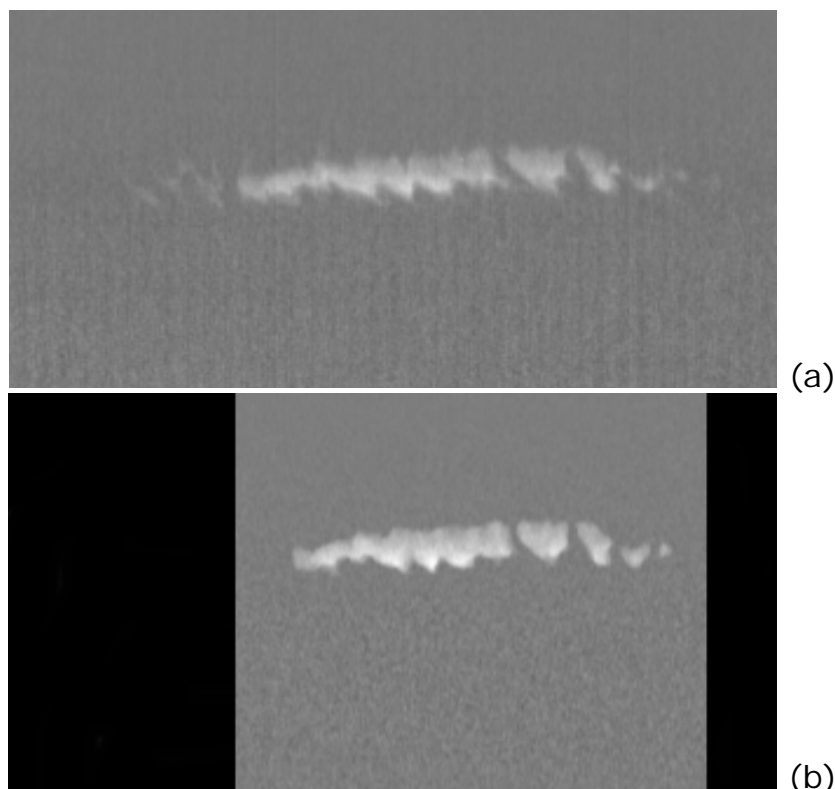


Abb. 4: Radiografische Abbildung eines voluminösen Schweißnahtfehlers bei der Behälterprüfung (a) und Simulation (b).

Literaturverzeichnis

- [1] Gerd-Rüdiger Tillack, Christina Nockemann und Carsten Bellon. X-ray modelling for industrial applications. NDT & E International, 33: 481–488, 2000
- [2] Bellon, C: Computersimulation radiographischer Prüfverfahren, Logos, Berlin, 2001