

Modellierung digitaler radiographischer Techniken im Rahmen des FilmFree Projektes

Gerd-Rüdiger JAENISCH, Carsten BELLON, BAM Berlin

Kurzfassung. Im Rahmen des europäischen Projektes „FilmFree“ zur Entwicklung digitaler Techniken mit dem Ziel, die Erfolgsgeschichte der digitalen Fotografie auf industrielle Radiographie zu übertragen, wird der Entwicklung und Anwendung von Modellen eine zentrale Rolle zugeschrieben. Zielstellung dabei ist, zum Ende des Projektes eine marktfähige Simulationssoftware zur Verfügung zu stellen, die den praktischen Erfordernissen der Industrie entspricht und für die Prüfplanung eingesetzt werden kann. Weitere Anwendungsgebiete der Software sind die Entwicklung oder Optimierung spezieller Prüftechniken, einschließlich der automatischen Bewertung von Radiographien, sowie ihr Einsatz bei der Ausbildung von ZfP-Personal. Dabei bietet die Modellierung neue Möglichkeiten der gezielten Betrachtung radiographischer Parameter und reduziert den experimentellen Aufwand. Der Beitrag gibt einen Überblick über die laufenden Aktivitäten und den derzeit erreichten Entwicklungsstand.

Einführung

Vorgestellt wird ein Simulationswerkzeug, das anhand virtueller Bauteilrepräsentationen und Prüfanordnungen realistische Durchstrahlungsaufnahmen unter Beachtung definierter Durchstrahlungsparameter berechnet.

Im Rahmen des europäischen Projektes „FilmFree“ [1] zur Entwicklung digitaler Techniken mit dem Ziel, die Erfolgsgeschichte der digitalen Fotografie auf industrielle Radiographie zu übertragen, wird der Entwicklung und Anwendung von Modellen eine zentrale Rolle zugeschrieben. Zielstellung dabei ist, zum Ende des Projektes eine marktfähige Simulationssoftware zur Verfügung zu stellen, die den praktischen Erfordernissen der Industrie entspricht und für die Prüfplanung eingesetzt werden kann. Das Projekt „FilmFree“ wird im 6. Rahmenprogramm der EU gefördert. Das Programm ist auf klein- und mittelständische Firmen ausgerichtet. Von dem 33 Partner umfassenden Konsortium haben 18 Partner diesen Status.

Neben der Prüfplanung wird die Simulation in der Radiographie bei der Entwicklung oder Optimierung spezieller Prüftechniken, einschließlich der automatischen Bewertung von Radiographien eingesetzt. Bei der Ausbildung von Prüfpersonal ist die Computer-Simulation ein interaktives Hilfsmittel zur Visualisierung grundlegender Prinzipien und bietet Möglichkeiten für zusätzliche „praktische“ Übungen ohne materiellen Mehraufwand. Kosteneinsparungen sind insbesondere bei Zuverlässigkeitsbewertungen im Rahmen der Anwendung von ZfP zu erwarten, wenn umfangreiche experimentelle Untersuchungen durch den Einsatz der Computer-Simulation ergänzt und teilweise ersetzt werden können.

Modellierung radiographischer Techniken

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 [2]. 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 die Strahlungsintensität als Funktion der Energie sowie 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 der 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 Waddickenschwankungen 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 die stochastischen 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 je nach Genauigkeit notwendige Anzahl ebener Facetten approximiert. Für facettierte Modellgeometrien wird mit dem STL-Format [4] ein Industriestandard aus dem CAD-Bereich genutzt. Die Bereitstellung entsprechender Bauteilrepräsentationen kann durch die praxisübliche 3D-CAD erfolgen.

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 Ausnutzung der geradlinigen Ausbreitung der Primärstrahlung wurde ein Facettenprojektionsalgorithmus [3] implementiert, der die Behandlung realistischer Szenen in praxisrelevanter Zeit gewährleistet.

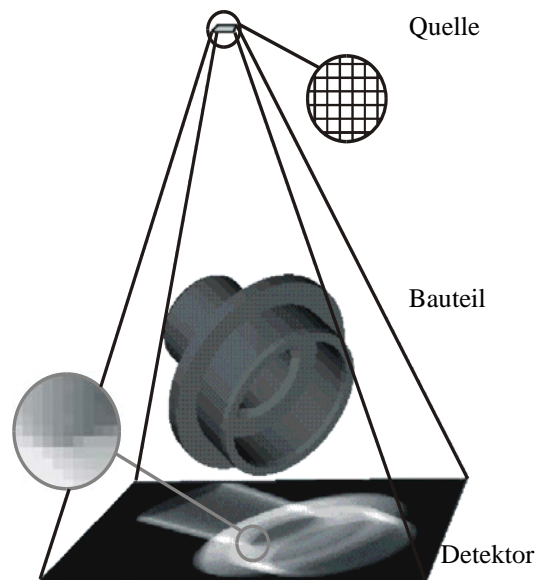


Abbildung 1: Geometriemodell zur Durchstrahlungssimulation.

Durchstrahlungssimulation mit dem Simulationsprogramm aRTist

Die beschriebenen Modellansätze wurden im Simulationsprogramm „aRTist“ (analytical RT inspection simulation tool) umgesetzt. Damit ein Softwarewerkzeug für den Arbeitsplatzrechner (keine besonderen Hard-/Software-Anforderungen) zur Verfügung, mit dem Durchstrahlungsprüfungen am Computer simuliert werden können. Neben den Anforderungen spezieller Fragestellungen, die bei verschiedenen begleitenden Forschungsprojekten im Vordergrund standen, wurden die Entwicklungsarbeiten auch an den praktischen Erfordernissen der Industrie ausgerichtet. Im Vordergrund standen dabei die Bedienbarkeit im Allgemeinen, die Möglichkeit der Gestaltung realistischer Durchstrahlungsszenarien sowie möglichst kurze Antwortzeiten.

Die grafische Benutzeroberfläche der Simulationssoftware besteht im wesentlichen aus drei Programmfenstern. Das Hauptfenster ermöglicht einen strukturierten Zugriff auf die Parameter zum Aufbau der Durchstrahlungsszene und zur Steuerung der Simulation. In einem weiteren Programmfenster erfolgt die Darstellung der virtuellen Durchstrahlungsszene, wobei der dreidimensionale Durchstrahlungsaufbau interaktiv von allen Seiten

betrachtet werden kann. Ein Programmfenster zur Betrachtung der synthetischen Durchstrahlungsbilder komplettiert die Benutzeroberfläche.

Abbildung 2 präsentiert eine Momentaufnahme der Benutzeroberfläche bei der Simulation der Durchstrahlung eines Gussteils (Teil eines Zylinderkopfes). In diesem Fall besteht die Bauteilrepräsentation aus einer Million Dreiecksfacetten.

Das ebenfalls zu sehende synthetische Durchstrahlungsbild wurde unter Annahme einer Punktquelle mit einem 120kV-Röntgenspektrum und eines Flachdetektors mit einer Auflösung von 2048x2048 Pixel berechnet. Dafür wurden etwa 40 Sekunden auf einem 3,2GHz-PentiumIV-PC benötigt. Eine Angabe der Rechenzeit ist sehr stark vom Durchstrahlungsszenario abhängig und verlängert sich insbesondere mit der Pixelanzahl. Dieses komplexe Szenario wurde gewählt, um die Möglichkeiten des Programms zu unterstreichen.

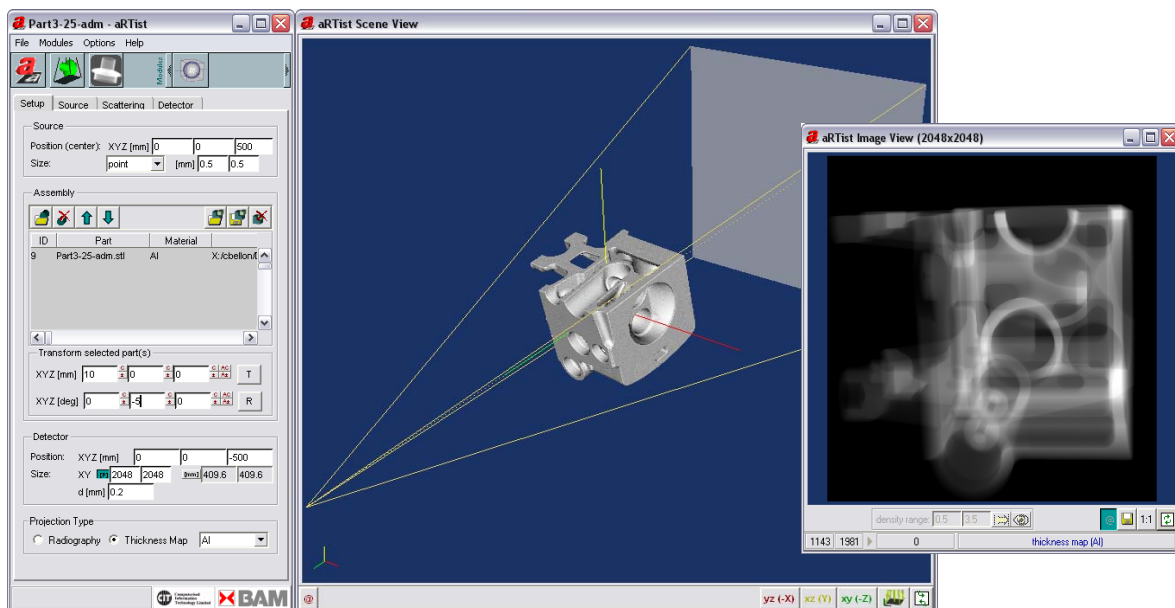


Abbildung 2: Benutzerschnittstelle des Simulationsprogramms "aRTist".

Voraussetzung für die Anwendung des Simulationsprogramms ist die Verfügbarkeit entsprechender Bauteilrepräsentationen. Programmintern können geometrische Primitive, wie Quader, Zylinder und Ellipsoid, generiert werden. Diese eignen sich insbesondere zur unabhängigen Definition einfacher Ungängen durch boolesche Verknüpfung mit Bauteilrepräsentationen. Andere Bauteilrepräsentationen müssen zur Nutzung im Simulationsprogramm vorab im STL-Format bereitgestellt werden. Quellen für realistische Bauteilgeometrien sind neben dem CAD beispielsweise auch optische 3D-Scans oder CT-Aufnahmen. In all diesen Bereichen wird das STL-Format oft direkt unterstützt. In Abbildung 3 werden Beispiele entsprechender Bauteilrepräsentationen gezeigt. Die Zuordnung von Materialien zu den Bauteilgeometrien erfolgt immer im Simulationsprogramm.

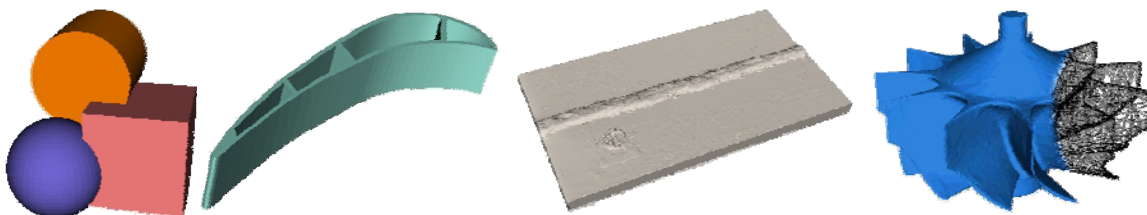


Abbildung 3: Beispiele für Bauteilrepräsentationen im Simulationsprogramm unterschiedlichen Ursprungs: programminternes Modul für parametrische Primitive, CAD, 3D-Oberflächenscann mittels Streifenprojektion, CT (v.l.n.r.).

Abbildung 4 veranschaulicht die wesentlichen Schritte bei der Durchstrahlungssimulation mit dem Computerprogramm „aRTist“. Zur Gestaltung des virtuellen Durchstrahlungsaufbaus müssen Bauteilgeometrien vorab bereitgestellt werden. Im betrachteten Fall handelt es sich um die äußere Struktur einer Schweißnaht, die mit einem optischen Verfahren Digitalisiert wurde. Die Durchstrahlungsszene wurde mit Geometriemodellen von Bildgüteprüfkörpern vervollständigt. Nach der Definition der Parameter von Strahlenquelle und -detektor erfolgt die eigentliche Simulation der Durchstrahlung und ergibt das synthetische Durchstrahlungsbild.

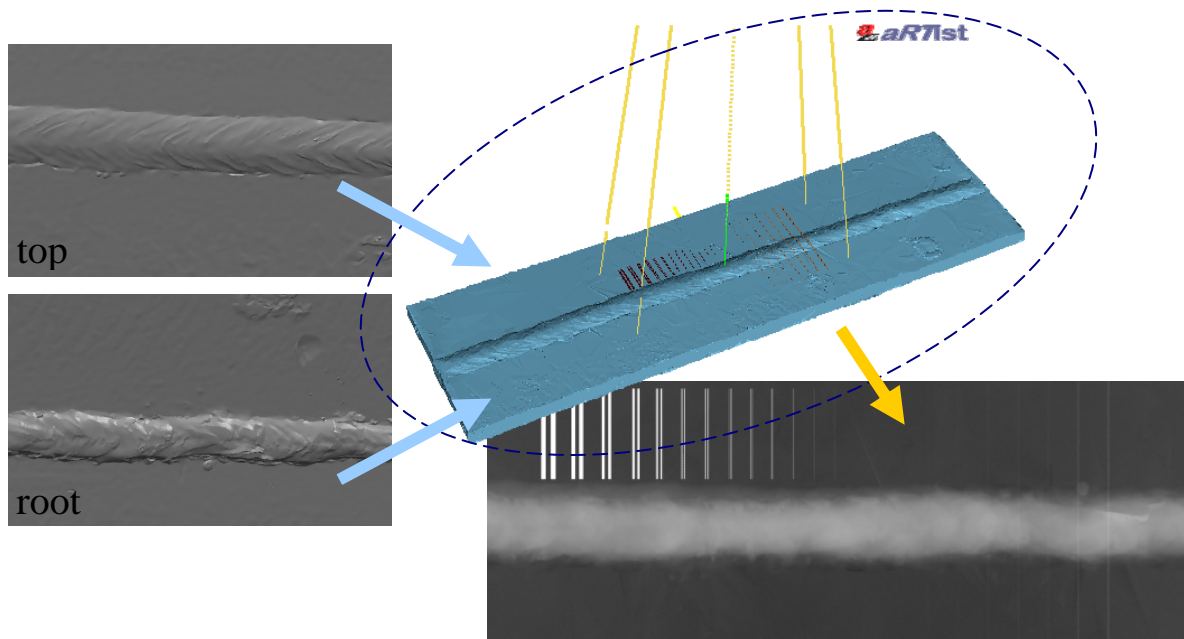


Abbildung 4: Durchstrahlungsprüfung am Computer simuliert. Durchstrahlungsszenario im Simulationsprogramm „aRTist“; Input: realistische Bauteilgeometrien; Output: synthetisches Durchstrahlungsbild.

Zusammenfassung

Es wurde ein Computerprogramm vorgestellt, das Durchstrahlungsprüfungen am PC simuliert. Beliebige Bauteilgeometrien können im STL-Format gelesen und zu einem virtuellen Durchstrahlungsaufbau kombiniert werden. Anschließend wird unter Wahl der gewünschten Durchstrahlungsparameter ein realistisches Durchstrahlungsbild errechnet.

Im Rahmen des Projektes „FilmFree“ wird das Simulationsprogramm weiterentwickelt und bei verschiedenen Partnern getestet. Dabei stehen die Modellierung digitaler Detektoren und die Benutzerfreundlichkeit des Programms im Vordergrund. Ein weiteres Entwicklungsziel stellt die Verfeinerung des Streustrahlungsmodells dar. So kann mit der An- bzw. Einbindung eines Monte-Carlo-Modells auch die Berechnung komplexer Streustrahlungsverteilungen realisiert werden.

Referenzen

- [1] <http://www.filmfree.eu.com>
- [2] Gerd-Rüdiger Tillack, Christina Nockemann und Carsten Bellon: X-ray modelling for industrial applications. NDT & E International, 33:481–488, 2000
- [3] Carsten Bellon: Computersimulation radiographischer Prüfverfahren. Logos, Berlin, 2001
- [4] <http://www.ennex.com/~fabbers/StL.asp>