

Design von Prüfaufgaben-abhängigen Trajektorien in der Tomosynthese

Markus REHAK, Ulf HASSLER

Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT, eine gemeinsame Abteilung der Fraunhofer Institute Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Dr.-Mack-Str. 81, 90762 Fürth, und Institut für Zerstörungsfreie Prüfung IZFP, Saarbrücken

Kurzfassung. Die Auswertung mittels Tomosynthese erzeugter Datensätze wird durch das Vorhandensein von „Hütchen-Artefakten“ erschwert. Die Kombination mehrerer Laminographie-Winkel während der Datenaufnahme führt zu einer Verringerung dieser Artefakte. Dieser Artikel beschreibt, wie durch die Optimierung der Trajektorie die Qualität der Rekonstruktion an das jeweilige Prüfproblem angepasst werden kann.

1 Einleitung

Die Computer-Laminographie (CL) ist eine Variante der Computer-Tomographie (CT), die eine alternative Aufnahmegeometrie verwendet. Bei der rotatorischen CL bewegen sich Quelle und Detektor auf entgegengesetzten Seiten eines zu durchstrahlenden Objekts derart auf phasen-verschobenen Kreisen, dass das Objekt in einem konstanten Laminographie-Winkel durchstrahlt wird (Abb. 1).

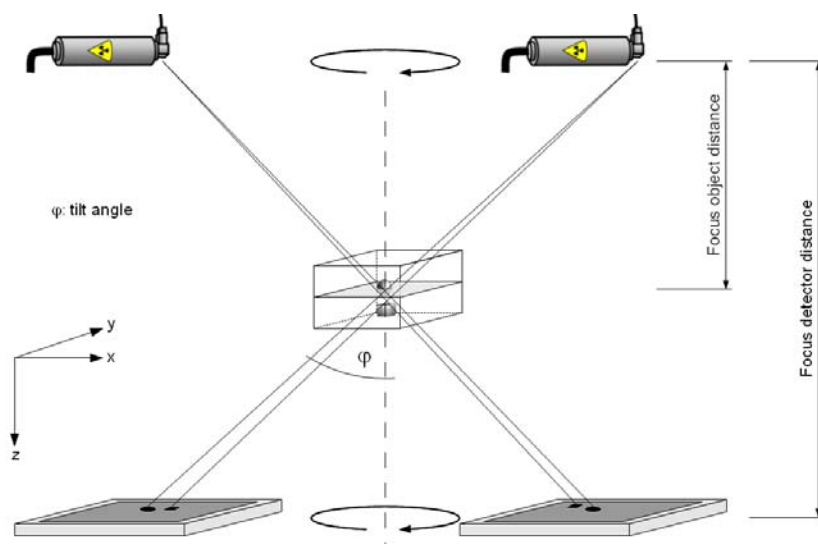


Abbildung 1. Prinzip der zirkulären Laminographie.

Durch diese Art der Datenaufnahme können sehr große, flächige Objekte geprüft werden, für die eine klassische CT wegen einer möglichen Kollision mit Teilen der CT-Anlage nicht geeignet wäre. Auch die Nicht-Durchstrahlbarkeit solcher flächigen Objekte in bestimmten Richtungen stellt bei dieser Geometrie kein Problem mehr dar. Gleichzeitig sind sehr hohe Objektauflösungen realisierbar, da eine sehr Quellen-nahe Positionierung

des Objekts eine beträchtliche Vergrößerung ermöglicht. Als Rekonstruktionsmethoden sind neben der Algebraischen Rekonstruktions-Technik (ART) die Tomosynthese zu nennen, die auf Grund ihrer konkurrenzlosen Geschwindigkeit insbesondere dort eingesetzt werden kann, wo industrielle Produkte im Serientakt geprüft werden sollen. Angesichts dieser Vorteile wird die CL seit Jahren für die Inspektion von Leiterplatten verwendet [2,3].

Durch die veränderte Aufnahmegeometrie kann jedoch, anders als bei der CT, welche einen Winkelbereich von 360° abdeckt, nur ein sehr eingeschränkter Winkelbereich genutzt werden, der in der Regel deutlich unter 180° liegt. Das führt zur Bildung von Artefakten, welche auf die Qualität der Rekonstruktion in Abhängigkeit von der gewählten Aufnahmegeometrie einen mehr oder weniger störenden Einfluss haben. Auf Grund ihres Aussehens werden diese in der CL auch als „Hütchen-Artefakte“ bezeichnet.

Es konnte gezeigt werden, dass subtilere Trajektorien, die mehrere Laminographie-Winkel vereinen, zu einer Verbesserung der Rekonstruktionsqualität führen, da der Kontrast der „Hütchen-Artefakte“ bei gleichbleibendem oder sogar besserem Kontrast des zu prüfenden Objekts verringert wird. Dies kann beispielsweise durch die Kombination mehrerer konzentrischer Kreisbahnen realisiert werden.

Eine Kombination mehrerer Laminographie-Winkel ist jedoch auch dann möglich, wenn keine Kreisbahnen verwendet werden. Ein gutes Beispiel hierfür ist die lineare CL, bei der Quelle und Detektor auf einer gegenläufigen Geraden verfahren werden. So sind zum Beispiel auch rechteckige, elliptische oder gitterförmige Trajektorien denkbar. Wird eine solche Trajektorie jedoch ungeeignet gewählt, so sind Wechselwirkungen mit Objektstrukturen möglich, die in den rekonstruierten Daten zu zusätzlich störenden Interferenzmustern führen können.

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich deshalb mit der Vermeidung solcher Interferenzmuster und der Optimierung der Trajektorie auf ein vorgegebenes Prüfproblem. Das langfristige Ziel ist hierbei die Erstellung eines Regelwerks, das den Benutzer bei der Wahl einer geeigneten Trajektorie unterstützen kann.

2 Reduktion der „Hütchen-Artefakte“

Die bereits erwähnten „Hütchen-Artefakte“ befinden sich auf Grund der Art und Weise, wie der verwendbare Winkelbereich eingeschränkt wird, immer ober- und unterhalb eines Objekts in Durchstrahlungsrichtung. Den größten Einfluss auf die Form eines Artefakts hat hierbei die Form der Objektstruktur, von der das Artefakt ausgeht. So führt ein in der X-Y-Ebene kreisförmiges Objekt zur Bildung eines jeweils nach oben und unten gerichteten kegelförmigen Artefakts (Abb. 2), während ein rechteckiges Objekt ein entsprechend pyramidenförmiges Artefakt entstehen lässt. Somit ist zwischen Objekt und Hintergrund in Durchstrahlungsrichtung kein eindeutig erkennbarer Übergang mehr vorhanden, was zu einer deutlich verringerten räumlichen Auflösung in eben dieser Richtung führt. Die Ausdehnung des Artefakts in Durchstrahlungsrichtung ist maßgeblich vom verwendeten Laminographie-Winkel abhängig. Eine Erhöhung des Laminographie-Winkels führt zu einer geringeren Ausdehnung des Artefakts, leider aber auch zu einer unschärferen Abbildung des Objekts in der X-Y-Ebene.

In [4] konnte gezeigt werden, dass durch die Kombination mehrerer Laminographie-Winkel in einer Trajektorie, beispielsweise durch Verwendung mehrerer konzentrischer Kreise, das Kontrastverhältnis zwischen Objekt und Artefakt zu Gunsten des Objekts beeinflusst werden kann, da sich dabei mehrere unterschiedlich geformte „Hütchen-Artefakte“ gegenseitig überlagern und damit weniger stark zur Geltung kommen (Abb. 2).

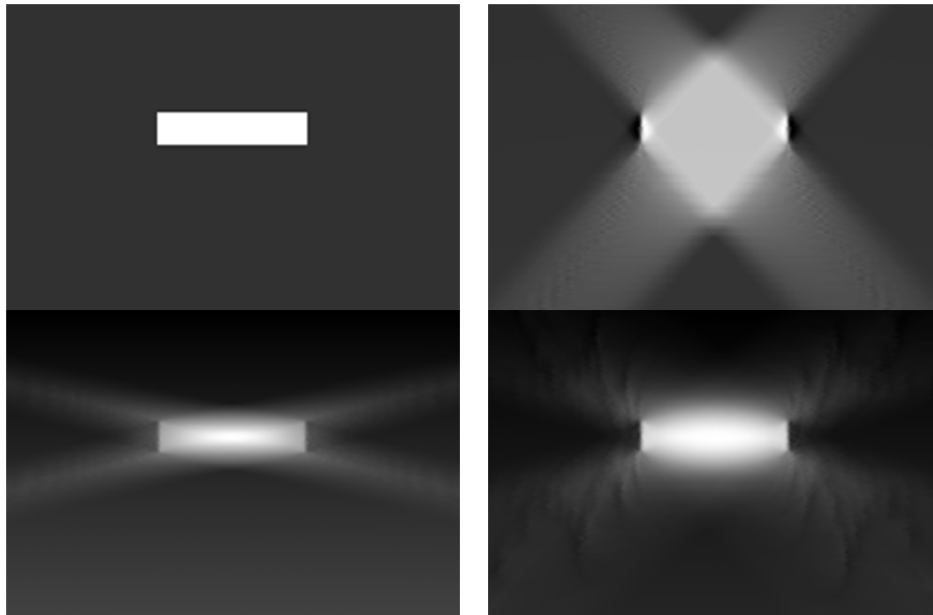


Abbildung 2. Rekonstruierte X-Z-Schichten einer Bohrung. Oben links: Ideale Rekonstruktion. Oben rechts: Tomosynthese bei 15° Laminographie-Winkel. Unten links: Tomosynthese bei 40° Laminographie-Winkel. Unten rechts: Tomosynthese bei einer Kombination aus sechs Tomosynthese-Winkeln von 15° bis 40°.

3 Vorgehensweise

Auf Grund der in [4] gewonnenen Erkenntnisse stellt sich die Frage, ob neben dem von den Laminographie-Winkeln abgedeckten Bereich nicht zusätzlich auch die Form der Trajektorie Einfluss auf die Qualität der rekonstruierten Daten hat. Gegebenenfalls ist dann folgendes Vorgehen für die Auswahl einer geeigneten Trajektorie denkbar:

1. Analyse des Prüfobjekts, beispielsweise auf Regel-Geometrien
2. Definition einer Auswahl von Trajektorien
3. Definition geeigneter Bewertungskriterien
4. Aufnahme des Prüfobjekts mit allen Trajektorien
5. Bewertung der erreichten Rekonstruktionsqualität

Am EZRT wurde am Beispiel einer Karbonfaser-Platte, die einige Glasfasern enthielt, entsprechend vorgegangen. Mangels eines geeigneten Laminographie-Systems wurde eine vorhandene CT-Anlage entsprechend umgerüstet. Wegen der nur sehr eingeschränkten Dimensionierung der Detektor-Achsen konnte hierbei bei Verwendung einer kreisförmigen Trajektorie nur ein sehr geringer Laminographie-Winkel von 11° erreicht werden. Im Zuge einer Maximierung des Laminographie-Winkels führte die dabei maximale Ausnutzung der Achsen deshalb dazu, dass folgende Trajektorien als sehr geeignet erschienen:

Trajektorie	Abgedeckter Winkelbereich
Kreisförmig	11°
Elliptisch	11° bis 14°
Rechteckig	11° bis 17°
Gitterförmig	0° bis 17°

Besonders die Erwartungen an die gitterförmige Trajektorie waren im Vorfeld besonders hoch, da durch diese der maximal mögliche Winkelbereich abgedeckt wurde.

Aber gerade hier wie auch bei der Rechteck-Trajektorie sind störende Interferenzmuster zu erkennen (Abb. 3). Es liegt die Vermutung nahe, dass diese Muster durch eine teilweise Überlagerung von Objektstruktur und Trajektorie zustande kommen. Deshalb werden die möglichen Zusammenhänge im folgenden Kapitel analysiert.

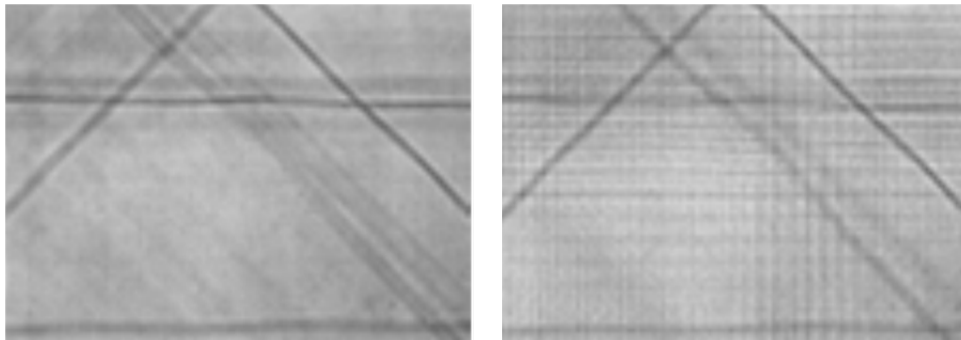


Abbildung 3. X-Y-Ansicht einer rekonstruierten Schicht. Links: Kreisförmige Trajektorie. Rechts: Gitterförmige Trajektorie.

4 Analyse von Objekt-Trajektorien-Überlagerungen

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen Objektstruktur und Trajektorie analysieren zu können, bietet sich insbesondere eine Simulation der CL an, da hier neben beliebigen Trajektorien vor allem eine Vielzahl an aus geometrischen Primitiven aufgebauten Objekten denkbar ist.

4.1 Definition von Prüfobjekten

Um mögliche Überlagerungen analysieren zu können, wurden Prüfobjekte gewählt, die in ihrer Form Ähnlichkeiten mit den noch zu definierenden Trajektorien aufweisen. Es wurden dabei bewusst linienförmige Objekte gewählt, da sich eventuell auftretende Interferenzmuster damit sehr viel deutlicher darstellen lassen als bei Verwendung gefüllter Objekte. Zusätzlich weisen alle definierten Objekte (Abb. 4) Ähnlichkeit zu Bauteilstrukturen real existierender Prüfaufgaben auf.

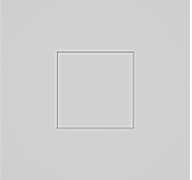
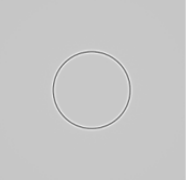
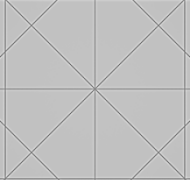

Objekt	Rekonstruktion	Objekt	Rekonstruktion
Rechteck (IC-Gehäuse)		Kreis (Lötstellen)	
Geraden (Textilstrukturen)		Mischobjekt	

Abbildung 4. Verwendete Prüfobjekte sowie Rekonstruktion der Fokusebene.

Als Objektmaterial wurden Glasfasern mit einem Faserdurchmesser von 50 μm gewählt, welche in einen Block aus Kohlefaser-Verbundwerkstoff eingebettet wurden. Der Objektdurchmesser respektive Faserabstand betrug 5 mm.

4.2 Definition von Trajektorien

Da zwischen den Objekten und Trajektorien gewisse Ähnlichkeiten existieren sollten, wurden kreisförmige, rechteckige und gitterförmige Trajektorien gewählt. Um ein vergleichbares Signal- zu Rausch-Verhältnis sicherzustellen, wurden alle Trajektorien mit jeweils 144 Projektionen bei gleichem Fokus-Objekt-Abstand von 168 mm und Fokus-Detektor-Abstand von 810 mm realisiert. Die simulierte Röhrenspannung betrug jeweils 110 kV, der Laminographie-Winkel war auf den Bereich zwischen 15° und 40° eingeschränkt. Das Objekt befand sich jeweils exakt in der Fokusebene. Neben vier aus geometrischen Primitiven aufgebauten Trajektorien wurde eine problemoptimierte Trajektorie entwickelt, bei der eine besonders gute Qualität bei der Rekonstruktion des Mischobjekts erwartet wurde (Abb. 5).

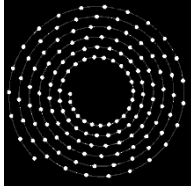

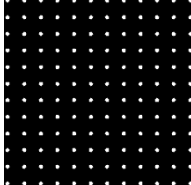
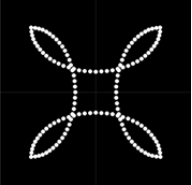
Name der Trajektorie	Positionen Detektorebene	Name der Trajektorie	Positionen Detektorebene
Spirale mit sechs Windungen, Laminographie-Winkel von 15° bis 40°		Rechteck mit 36 Positionen pro Seite, Laminographie-Winkel von 31° bis 40°	
Gitterstruktur, bestehend aus 12 x 12 Positionen, Laminographie-Winkel 9° bis 40°		Problemorientierte Trajektorie, Laminographie-Winkel von 15° bis 40°	

Abbildung 5. Übersicht über die Trajektorien. Die Bilder zeigen die Detektor-Ebene, jeder Punkt entspricht einer Position des Detektors innerhalb dieser Ebene.

4.3 Definition von Bewertungskriterien

Um die Qualität der Rekonstruktionen objektiv miteinander vergleichen zu können, wurden zwei schichtweise zu berechnende Bewertungskriterien verwendet. Dies war einerseits die auf die Fokusebene normierte Standardabweichung in den Grauwerten, welche ein Maß für die globale Intensität bezüglich der Objektintensität darstellt:

$$\sigma_{\text{Norm}} = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{Fokusebene}}}$$

Die Standardabweichung einer Schicht errechnet sich dabei aus den einzelnen Grauwerten dieser Schicht:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{B \cdot H - 1} \cdot \sum_{xy} (g_{xy} - \bar{g})^2}$$

Dabei bezeichnen B und H die Breite und Höhe der rekonstruierten Schicht und es gilt:

$$\begin{aligned} x &\in [1; B] \\ y &\in [1; H] \\ g_{xy} &= \text{Grauwert an der Position } (x, y) \\ \bar{g} &= \text{Mittlerer Grauwert} \end{aligned}$$

Andererseits wurde noch die normierte Standardabweichung der zweiten Ableitung in den Grauwerten verwendet, welche speziell ein Maß für die Intensität lokaler Grauwertsprünge darstellt. Die Berechnung entspricht weitestgehend der Berechnung der Grauwert-basierten normierten Standardabweichung, nur dass statt der Grauwerte die Werte der zweiten Ableitung verwendet werden. Die zweite Ableitung wurde dabei mit Hilfe des Marr-Hildreth-Operators approximiert [5].

Durch die schichtweise Berechnung beider Maßzahlen ist eine Bewertung der Artefakt-Intensität in Abhängigkeit vom Abstand zur Fokusebene möglich. Für komplett Artefakt- und rauschfrei rekonstruierte Schichten sollten beide Maße in allen Schichten außerhalb der Fokusebene einen Wert von null annehmen. Die Werte für die Schicht der Fokusebene nehmen indes generell den Wert eins an.

4.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden speziell diejenigen Ergebnisse dargestellt, welche sich besonders gut für die Erstellung eines ersten Regelwerk-Entwurfs geeignet haben. Auf Grund der Ergebnisse für die Karbonfaser-Platte aus Abschnitt 3 ist dies an erster Stelle die Rekonstruktion der geradlinig verlaufenden Faserstrukturen mit unterschiedlichen Trajektorien (Abb. 6).

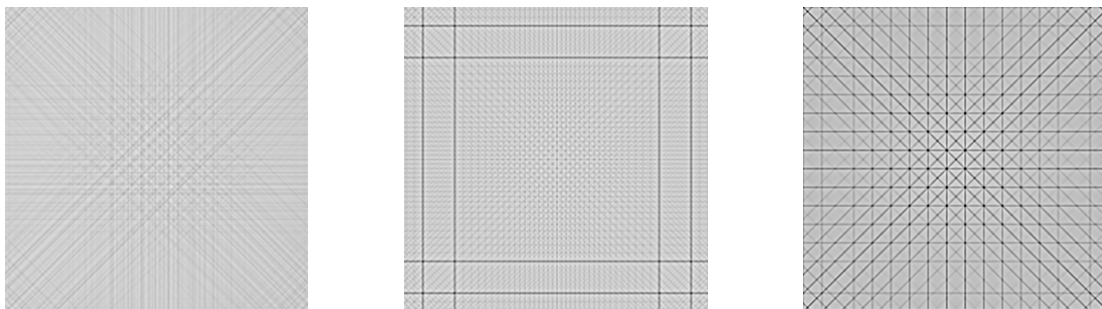


Abbildung 6. Rekonstruktion einer Schicht im Abstand von 3,0 mm zur Fokusebene. Links: Spiralförmige Trajektorie. Mitte: Rechteckige Trajektorie. Rechts: Gitterförmige Trajektorie.

Besonders bei der rechteckigen und gitterförmigen Trajektorie sind hier verstärkt Artefakte zu erkennen, die parallel zu den Fasern verlaufen. Im Unterschied zur rechteckigen verlaufen diese bei der gitterförmigen Trajektorie auch diagonal. Im Vergleich zur spiralförmigen Trajektorie wäre somit in beiden Fällen die Wahrscheinlichkeit deutlich größer, dass bei einer automatischen Auswertung Fasern detektiert werden, die real nicht vorhanden sind.

Der Grund hierfür ist, dass bei beiden Trajektorien Positionen des Detektors zu Geraden verbunden werden können, die zu Objektstrukturen parallel verlaufen. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher linearer Zusammenhänge ist bei einem regelmäßigen Gitter am Höchsten (Abb. 7).

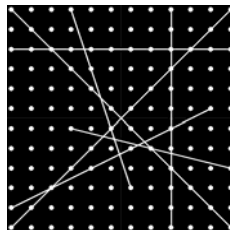


Abbildung 7. Bei einer gitterförmigen Trajektorie lassen sich sehr viele Detektorpositionen durch Geraden miteinander verbinden.

Anders als bei der CT kann hier auch nicht über eine erhöhte Anzahl von Projektionen Abhilfe geschaffen werden. Eine rechteckige Trajektorie wird immer aus vier Geraden bestehen, bei einer gitterförmigen Trajektorie steigt die Anzahl der möglichen linearen Zusammenhänge bei einer erhöhten Anzahl von Projektionen sogar an.

Vergleicht man diese Trajektorien dementsprechend mit Hilfe der in Abschnitt 4.3 definierten Gütemaße, so ist die spiralförmige Trajektorie mit Abstand am besten zu bewerten (Abb. 8). Dies gilt ohne Einschränkung auch für ein rechteckiges Objekt, solange die Seiten des Rechtecks parallel zur Trajektorie liegen.

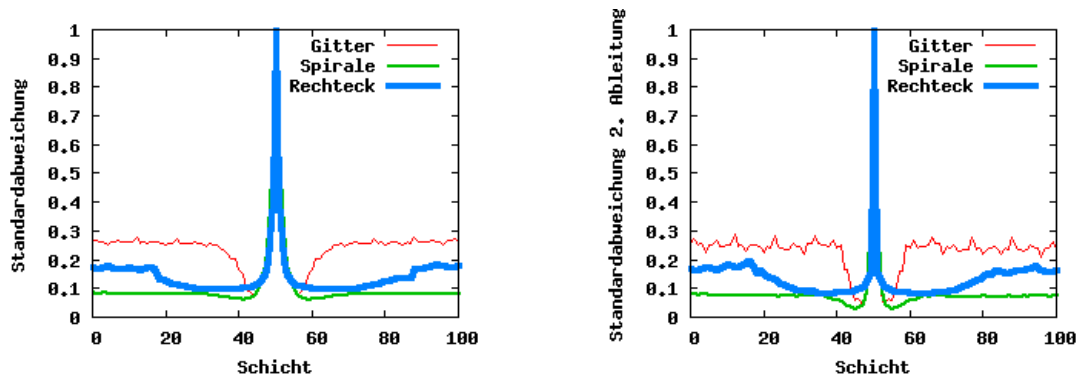


Abbildung 8. Links: Standardabweichung in den Grauwerten. Rechts: Standardabweichung in den Werten der approximierten zweiten Ableitung.

Die beiden Diagramme zeigen jedoch auch ansatzweise, dass eine bestimmte Trajektorie nicht generell besser sein muss. Zu diesem Zweck wird als Nächstes das rechteckige Objekt um 45° verdreht, so dass bei Verwendung der rechteckigen Trajektorie keine Interferenzen mehr auftreten sollten. Verglichen werden nun zwei Schichten mit unterschiedlichem Abstand zur Fokusebene. Bei sehr geringem Abstand zur Fokusebene lässt sich mit der gitterförmigen Trajektorie die qualitativ beste Rekonstruktion erzeugen (Abb. 9), was sich jedoch bei größerem Abstand ins Gegenteil umkehrt (Abb. 10). Hier ist die rechteckige Trajektorie sogar deutlich besser als die spiralförmige Trajektorie zu bewerten.

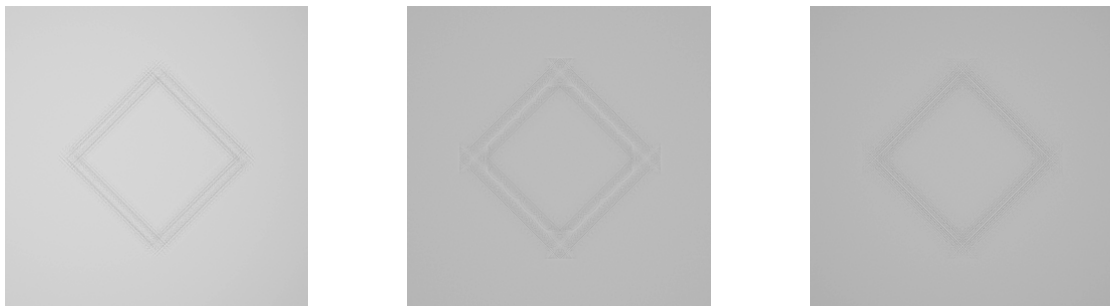


Abbildung 9. Rekonstruktion einer Schicht im Abstand von 0,5 mm zur Fokusebene. Links: Spiralförmige Trajektorie. Mitte: Rechteckige Trajektorie. Rechts: Gitterförmige Trajektorie.

Welche Trajektorie hier gewählt werden soll, hängt deshalb maßgeblich davon ab, was genau geprüft werden soll. Um den Übergang von Objekt zu Hintergrund erkennen zu können, ist mit Sicherheit die gitterförmige Trajektorie am besten geeignet, soll hingegen ein anderes Objekt geprüft werden, das ober- oder unterhalb liegt, dann würde das Interferenzmuster hier störend wirken und die rechteckige Trajektorie wäre zu bevorzugen (Abb. 11).

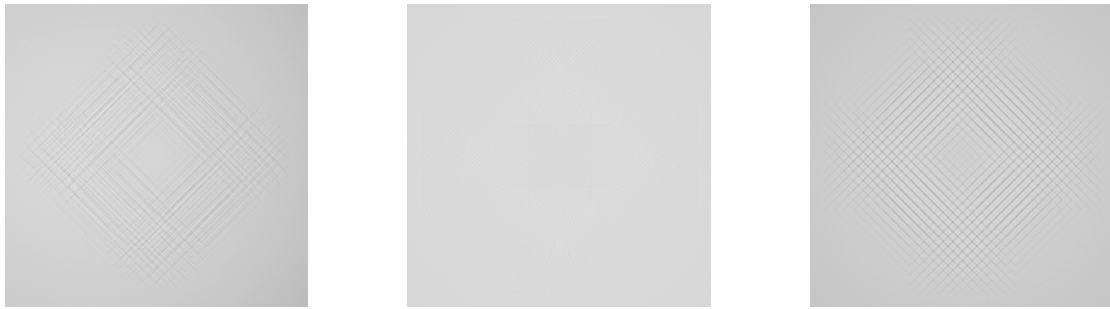


Abbildung 10. Rekonstruktion einer Schicht im Abstand von 1,6 mm zur Fokusebene. Links: Spiralförmige Trajektorie. Mitte: Rechteckige Trajektorie. Rechts: Gitterförmige Trajektorie.

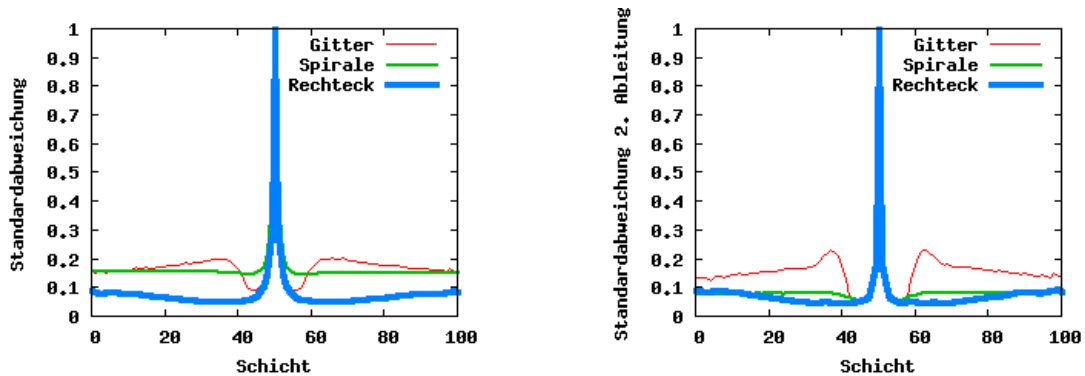


Abbildung 11. Links: Standardabweichung in den Grauwerten. Rechts: Standardabweichung in den Werten der approximierten zweiten Ableitung.

In der Realität gibt es jedoch nur äußerst selten Fälle, wo ein Prüfobjekt derart einfach aufgebaut ist. Vielmehr lassen sich eine Vielzahl unterschiedlicher geometrischer Primitive finden, so dass die Wahl einer Trajektorie nicht unbedingt als einfach zu bezeichnen ist. Das Ziel sollte deshalb sein, nach Analyse der Objektgeometrie eine Trajektorie zu entwickeln, die möglichst wenig Interferenzmuster in den rekonstruierten Daten erzeugt. Deshalb wurde für das Mischobjekt aus Abb. 5 eine spezielle Trajektorie entwickelt und mit der spiralförmigen Trajektorie verglichen.

Die spezielle Trajektorie ist insgesamt gesehen zwar besser, Schichten in ganz bestimmten Abständen zur Fokusebene weisen aber trotzdem teils punktuelle starke Interferenzen auf (Abb. 12). Ob und wo solche Störungen auftreten, ist nur sehr schwer vorhersagbar, was die Anpassung einer Trajektorie an ein Prüfproblem äußerst schwierig macht. Und auch in diesem Fall ist die angepasste Trajektorie nur in einem bestimmten Abstand zur Fokusebene besser als die spiralförmige Trajektorie (Abb. 13).

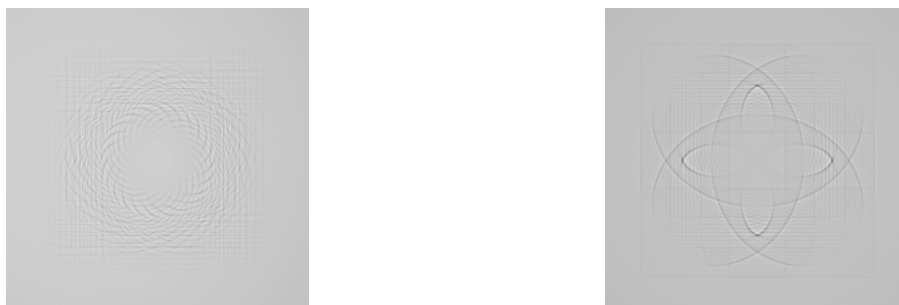


Abbildung 12. Rekonstruktion einer Schicht im Abstand von 1,4 mm zur Fokusebene. Links: Spiralförmige Trajektorie. Rechts: Problem-angepasste Trajektorie.

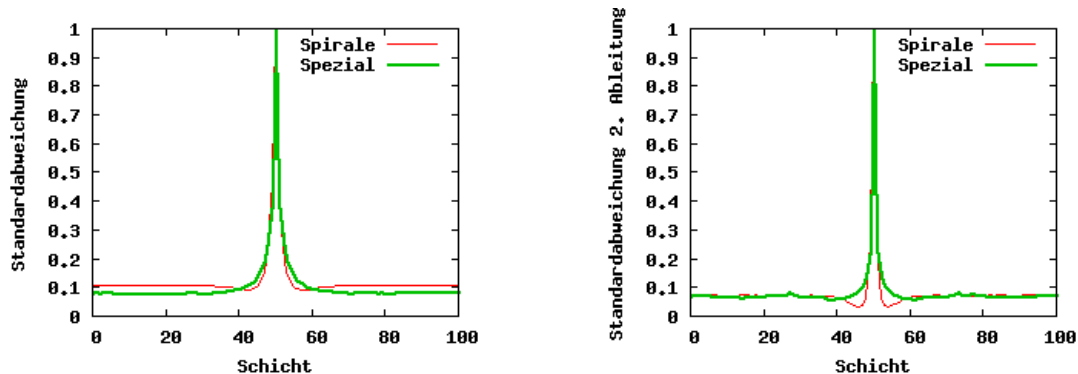


Abbildung 13. Links: Standardabweichung in den Grauwerten. Rechts: Standardabweichung in den Werten der approximierten zweiten Ableitung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination mehrerer Laminographie-Winkel hat zwar eine deutliche Verbesserung der Rekonstruktionsqualität zur Folge, aber eine Anpassung der Trajektorien an ein Prüfproblem kann die Qualität der Rekonstruktion nochmals entscheidend erhöhen, wenn die Trajektorie gut abgestimmt wird. Aus den Ergebnissen aus Abschnitt 4 folgt jedoch, dass dies nicht intuitiv möglich ist, da das Auftreten von störenden Interferenzmustern nur sehr schwer abgeschätzt werden kann.

Der Wunsch nach einem Regelwerk kann deshalb nur in Ansätzen erfüllt werden, wobei sich aus den bisherigen Erkenntnissen folgende einfache Regeln ableiten lassen:

- Durch spiralförmige oder aus konzentrischen Kreisen aufgebaute Trajektorien lassen sich generell qualitativ gute Rekonstruktionsergebnisse erzielen.
- Trajektorien sind oftmals nur in einem definierten Abstand zur Fokusebene optimal.
- Die gitterförmige Trajektorie sollte unbedingt gemieden werden, außer das Prüfproblem ist auf eine ideale Rekonstruktionsqualität sehr nahe am Objekt angewiesen.
- Bei Verwendung einer rechteckigen Trajektorie sollten geradlinige Objektstrukturen nicht parallel, sondern idealerweise in einem Winkel von beispielsweise 45° zur Trajektorie verlaufen

Referenzen

- [1] S. Gondrom, S. Schröpfer: "Digital computed laminography and tomosynthesis - functional principles and industrial applications", International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, 15.-17. März 1999, Berlin, Proceedings BB 67-CD
- [2] T.D. Moore, D. Vanderstraeten, P. Forsell: „Determination of BGA structural defects and solder joint defects by 3D X-ray laminography“, Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2001. IPFA 2001. Proceedings of the 2001 8th International Symposium on the, S. 146-150, 2001 doi: 10.1109/IPFA.2001.941474
- [3] H. Reiter, M. Maisl, J. Zhou, S. Gondrom: "Computed Laminography - A X-Ray-Method for Image Analysis of Solder Joints", Inspection of Bonded Structures (Digest No. 1997/008), IEE Colloquium on Techniques for the, S. 10/1-10/3, 10. März 1997
- [4] M. Rehak, U. Haßler, R. Hanke: "Acquisition Trajectories for X-Ray Tomosynthesis Applied to Planar Samples", 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, 22.-24. November 2010, Hamburg, DGZfP-Proceedings BB 124-CD
- [5] D. Marr, E.C. Hildreth: "Theory of Edge Detection", Proceedings of the Royal Society of London. B 207, 1980, S. 187-217