

Effektive Bestimmung der Fokusparameter von Mikrofokus-Röntgenquellen

Jens ILLEMANN¹, Dietmar MEINEL², Carsten BELLON²
¹ PTB, Braunschweig
² BAM, Berlin

Kontakt E-Mail: jens.illemann@ptb.de

Kurzfassung. Mikrofokus-Röntgenquellen werden in der industriellen CT flexibel verwendet, um mit kleiner Leistung hohe Auflösung zu erzielen oder mit verminderter Auflösung bei höherer Leistung kürzere Messzeiten zu erreichen. Insbesondere Quellen in offener Bauweise benötigen Wartung wie Filamentwechsel und Nachstellen der Fokusparameter. Ziel ist es, einen optimal kleinen Quellfleck bei bekannter Spannung einzustellen und dessen Größe zu bestimmen.

Zur Überprüfung der Quellfleckgröße sind bereits Verfahren unter Verwendung lithographisch hergestellter Masken mit Strichmustern oder Siemenssternen aus Mikrometer dünnen Schichten aus stark absorbierendem Material wie z.B. Gold bekannt. Diese erfordern wegen der geringen Absorption eine lange Messzeit und sind nur kostenintensiv herzustellen. Ihre Verwendung zur regelmäßigen Qualitätsüberprüfung von CT-Anlagen ist daher nicht verbreitet.

Ziel dieser Arbeit ist es, die richtungsabhängige Quellfleckgröße absolut zu bestimmen, wobei nur einfach zu beschaffende Wolframspitzen verwendet werden. Dazu werden radiographische Bilder in hoher Vergrößerung aufgenommen und die Grauwertverteilung parametrisiert. Unter Verwendung der Kenntnis von Targetmaterial und Spannung wird eine eindeutige Zuordnung zur Quellfleckgröße vorgenommen.

Dieses erfordert eine extensive Simulation für verschiedene Spannungen, Fokusgrößen und andere Einflussgrößen, sowie die experimentelle Verifikation an verschiedenen CT-Anlagen im Vergleich zu einer bekannten Methode. Erste Ergebnisse werden vorgestellt und die praktische Implementierung unter Angabe der Einschränkungen der Verwendbarkeit diskutiert. Die Autoren hoffen, damit einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Qualitätssicherung und zur Arbeitseffizienz in der Mikrocomputertomographie leisten zu können.

Einführung

Mit aufwändigeren lithographischen Mustern kann der Strahlfleck durch Entfaltung berechnet werden [1]. Hier soll es aber um pragmatische Tests gehen. Als solche sind JIMA-Masken [2,3] und Siemenssterne bekannt, die in einem binären Muster bestehen. D.h. eine dünne Schicht stark absorbierenden Metalls konstanter Dicke ist auf einem Träger aufgebracht.

Im Folgenden wird ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem eine konische Spitze aus stark absorbierendem Wolfram zur Bestimmung der Strahlfleckgröße in seinen Hauptachsen benutzt wird. Um experimentell eine Referenz zu haben, wird eine JIMA RT-RC-05 Maske verwendet, die Strichstrukturen von 3 μm bis 50 μm besitzt. Die einfache Methode der



Kantenbewertung eines Platindrahtes nach [4] und die Messung größerer Fokusgrößen, z.B. mit Pinhole-Kamera [5], werden hier nicht angewendet.

Nach der Erklärung der verwendeten Verfahren in Abschnitt 1 werden in Abschnitt 2 ausführlich Simulationen sowohl von der JIMA-Maske als auch von der Wolframspitze mit dem CT-Simulationstool aRTist [6] gezeigt, die die Auswertung erläutern. Experimentelle Ergebnisse mit einer Gegenüberstellung finden sich im dritten Abschnitt.

1. Verfahren

1.1 Modellannahmen

In diesem Beitrag wird von der Quelle als einem Gaußförmigen Fokus in einer Ebene ausgegangen

$$I(x, y) = e^{-\left(|x/x_0|^r + |y/y_0|^r\right)}, r = 2, \quad (1)$$

wobei dieser eine unterschiedliche Breite in den zwei Hauptachsen X/Y haben kann. Im verallgemeinerten Fall wird ein Exponent r mit $2 \geq r > 1$ angenommen. Vereinfacht für $r = 2$ ergibt sich

$$I(x, y) = e^{-4 \ln(2) \left(\left(\frac{x}{d_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{d_y} \right)^2 \right)}, \quad (2)$$

wobei d_x und d_y die Fokusgrößen als volle Breite auf halber Maximalintensität (FWHM) sind.

1.2 Referenzverfahren JIMA-Maske

Übliches Verfahren bei Mikrofokusquellen ist die Verwendung einer JIMA-Maske [2,3]. Dazu wird die Maske mit 1-2 μm dicken Goldstrichen in möglichst hoher geometrischer Vergrößerung gemessen. Der Messwert der Fokusgröße im Bild ergibt sich als Effektivwert aus fundamentaler Pixelauflösung (insofern nicht vernachlässigbar) und Fokusgröße.

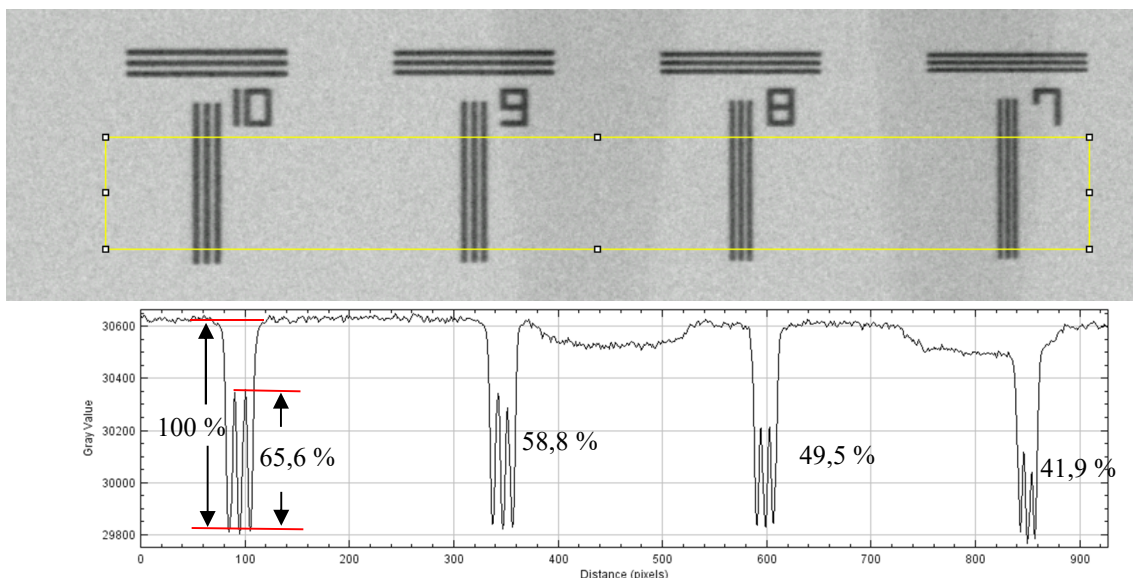


Abb. 1. Typische Auswertung der JIMA-Maske. Im gemittelten Profilplot unten ist die relative Modulationstiefe eingetragen. Die Absätze sind durch Fading verursacht und berücksichtigt. Die Auswertung wurde in der Bildbearbeitungssoftware FIJI (<https://fiji.sc/>) vorgenommen.

Die Struktur, bei der 2/3 Kontrast vorliegt, hat die Strich/Lückenbreite des Brennfleckdurchmessers in „FWHM“, siehe dazu auch [7]. In Abschnitt 2.4 werden die Simulationen dazu gezeigt.

1.3 Verfahren mit Kegelspitze

Das neue Verfahren benutzt radiographische Bilder einer konischen Spitze (s. Abb. 2) in möglichst großer geometrischer Vergrößerung. Es ist prinzipiell zu beliebig kleinen Fokusgrößen skalierbar.

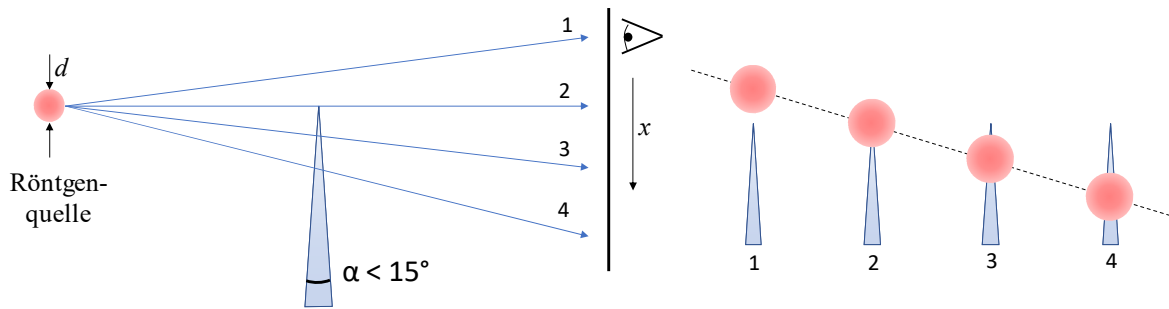


Abb. 2. Erklärung des Verfahrens zur Messung der Auflösung mittels Kegelspitze. In verschiedenen Positionen auf dem Detektor unterliegt der beitragende Quellbereich unterschiedlichen Bedeckungen.

Die zentrale Intensitätskurve wird ausgewertet (s. Abb. 3). Die absorbierte Intensität im Verlauf (1-2-3-4) ändert sich durch den scheinbaren Bedeckungsgrad des Spots durch die Spitze unter Berücksichtigung ihrer durchstrahlten Dicke. Wie in Abbildung 3 angedeutet, wird die mittlere Steigung $|\partial I / \partial x|$ als Maßzahl zur Beschreibung der Kurve in einem Bereich, der typisch 85 % bis 95 % Transmission hat, bestimmt.

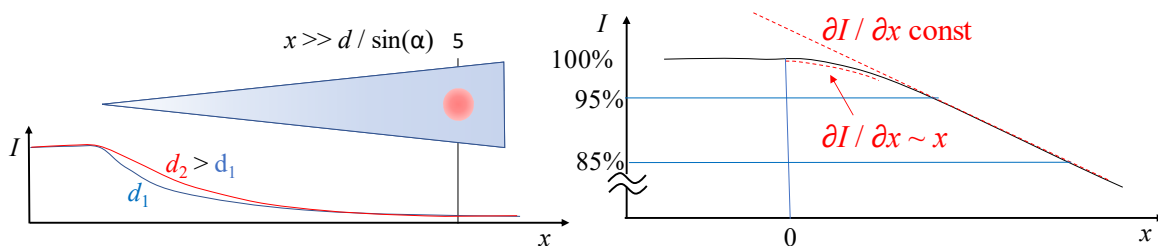


Abb. 3. Erklärung des Verfahrens zur Messung der Auflösung mittels konischer Spitze.

Die dünne Nadel deckt vom Beobachter aus gesehen nur den mittleren Streifen des Strahlflecks ab. Die Intensität des Strahlflecks hat im Wesentlichen nur eine Abhängigkeit in Richtung der Nadel. Eine Verschiebung der Nadel in Achsrichtung (s. Abb. 2) – oder Veränderung der Beobachterposition – führt zu einer proportionalen Zunahme der abgedeckten Fläche, so dass ein quadratischer Zusammenhang für die absorbierte Intensität entsteht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Absorptionskoeffizient μ vom Spektrum, also insbesondere von der Beschleunigungsspannung, abhängt. Weiterhin geht der (volle) Kegelwinkel α in zweiter Potenz ein, so dass er gut definiert und genau bekannt sein sollte. Im weiteren Verlauf wird die Ableitung nach etwa dem doppelten Fokusdurchmesser konstant (s. im nachfolgenden Abschnitt).

2. Simulationen

Die Simulationen wurden mit aRTist v2.10 [6] berechnet. So nicht anders beschrieben, wurde ein als rauschfrei angenommener Detektor mit 2000×2000 Pixel á $200 \mu\text{m}$ Pixelgröße und effektiver Pixelgröße von $1,5 \mu\text{m}$ angenommen. Dies entspricht idealisiert den späteren Messungen mit der MCT 225.

2.1 Simulation der Abhängigkeit von der Fokusgröße

Exemplarisch werden in Abbildung 4 die Simulationen für 140 kV und einem Wolfram-Reflexionstarget gezeigt. Es wird in allen Simulationen ein Kegelwinkel der Spitze von $10,5^\circ$ angenommen. In den Grafiken ist die scheinbare Position auf der Spitzenachse als unabhängige Variable dargestellt. Da im Kegelstrahl außerhalb der Bildmitte das Material schräg durchdrungen wird, wird die Durchdringungslänge mit dem Sekans größer. Dies bleibt hier unberücksichtigt, und in der Simulation wird eine einzelne Spitze etwa in der Bildfeldmitte angenommen.

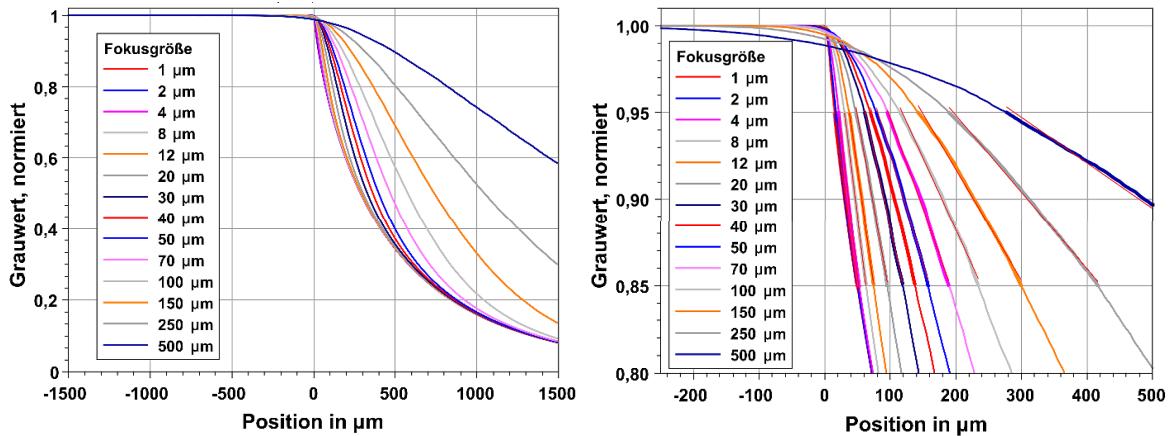


Abb. 4. Simulation der Abhängigkeit der zentralen Profillinie von der Fokusgröße bei 140 kV. In der Detailvergrößerung rechts ist der für die Steigungsbestimmung berücksichtigte Bereich dick eingezeichnet.

Zur Parametrisierung der Kurven wird im Folgenden die (negative) durchschnittliche Steigung der Kurven benutzt. Diese wird über den nahezu linearen Bereich ermittelt, der zwischen 85 % und 95 % Transmission hat. Die Ergebnisse für 70 kV, 140 kV und 225 kV sind in Abschnitt 2.3 dargestellt.

2.2 Spannungsabhängigkeit und Abhängigkeit von anderen Einflussgrößen

Abbildung 5 zeigt die Spannungsabhängigkeit des Zentralprofils. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 2.3 tabelliert.

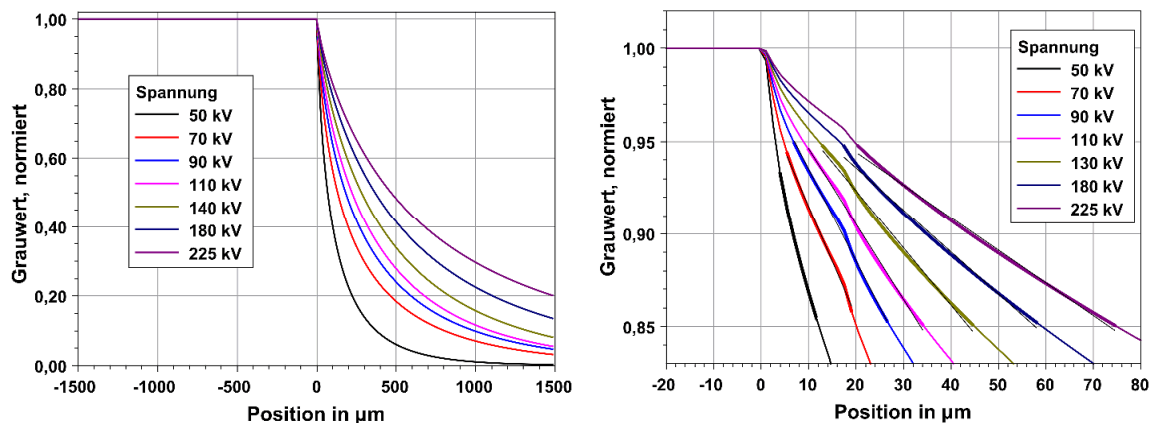


Abb. 5. Links: Spannungsabhängigkeit der zentralen Profillinie. Rechts: Detail mit fetter Markierung des für die Steigungsberechnung berücksichtigten Bereiches.

Es stellt sich heraus, dass das Verfahren sehr gut geeignet ist, die beiden Strahlachsen unabhängig voneinander zu bestimmen, da es nahezu kein Übersprechen der Ausdehnung des Fokus in Richtung der Spitzenachse auf die Profillinie gibt, solange die vertikale Ausdehnung kleiner als das betrachtete Auswertintervall bleibt (Abb. 6, links).

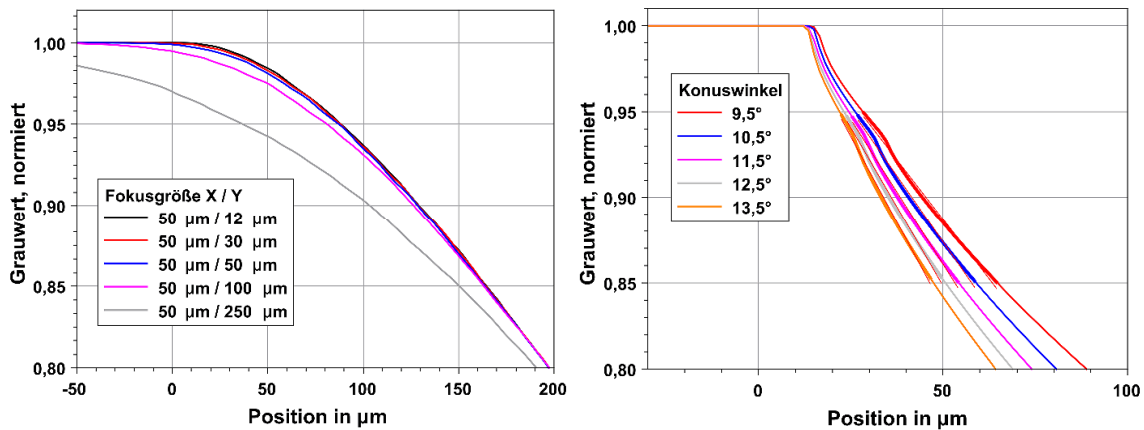


Abb. 6. Links: Beispielhafte Simulationen für verschieden elliptische Foki bei 140 kV.
Rechts: Detailvergrößerung für die Abhängigkeit der Steigung vom Kegelwinkel bei 140 kV.

In Abb. 6, rechts, ist die Abhängigkeit der mittleren Steigung vom Kegelwinkel dargestellt, die Ergebnisse sind in Abschnitt 2.3 tabelliert. Weitere Simulationen wurden durchgeführt mit folgenden Änderungen am Aufbau:

- verschieden dicke Alu-Vorfilter
- Transmissions- statt Reflexionstarget
- veränderter Reflexionswinkel 90° statt 135° zwischen Elektronenstrahl und Achse
- verschieden langreichweitiger Streuuntergrund im Detektor

Änderungen ergeben sich merklich im Bereich zwischen 20 % und 80 % Transmission und nur wenig im ausgewerteten Bereich zwischen 85 % und 95 % Transmission.

2.3 Ergebnisse der Simulationen für die Steigungskoeffizienten

In Tabelle 1 sind die mittleren Steigungswerte für Spannungen von 50 kV bis 225 kV gelistet. Es wurde dabei ein idealer Detektor (2000×2000) mit 1,5 μm effektiver Pixelgröße und ein punktförmiger Fokus angenommen. Als Kegelwinkel wurde 10,5° benutzt – die Abhängigkeit vom Kegelwinkel (Abb. 6) ist in Tabelle 2 gelistet und offenbar linear.

Tabelle 1. Spannungsabhängigkeit des Steigungskoeffizienten aus Abb. 5 für 10,5° Kegelwinkel

Spannung in kV	50	70	90	110	140	180	225
Steigung in % ₀ je μm	10,2	5,98	4,98	4,08	3,09	2,28	1,77

Tabelle 2. Winkelabhängigkeit des Steigungskoeffizienten aus Abb. 6 für 140 kV

Kegelwinkel in °	9,5	10,5	11,5	12,6	13,6
Steigung in % ₀ je μm	2,79	3,09	3,39	3,70	4,00

In Abbildung 7 ist eine Übersicht der Abhängigkeit der Steigung von der Fokusgröße D bei verschiedenen Spannungen aufgetragen. Die Berechnungen wurden mit einem doppelt so hoch auflösendem 4000×4000 Detektor und 0,75 μm äquivalenter Pixelgröße durchgeführt, dennoch knicken die Werte schon bei 10 μm ab.

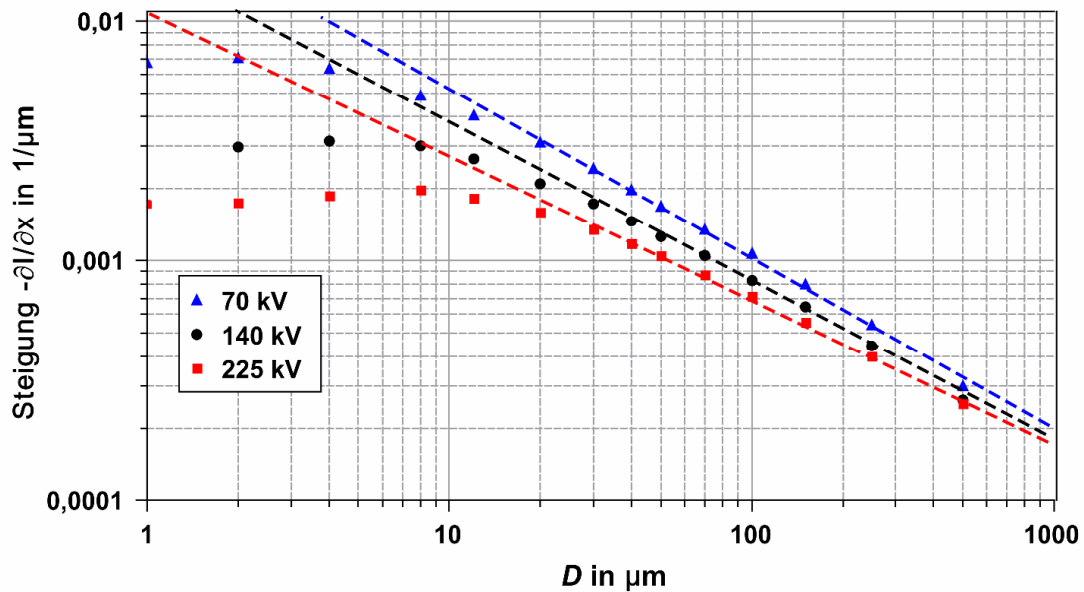


Abb. 7. Abhängigkeit der mittleren Steigung (85 %-95 % Transmission) von der Brennfleckgröße D und der Quellspannung.

Die Ursache dafür wird in Abbildung 8 veranschaulicht (Detailvergrößerung von Abb. 4). Für Foki kleiner als $10\ \mu\text{m}$ schlägt die Krümmung des Profils im Bereich von 85 % - 95 % Transmission in das negative Vorzeichen um, was bei den übrigen Kurven erst bei geringerer Transmission geschieht. In künftigen Arbeiten sollte daher die Parametrisierung anders vorgenommen werden – z.B. Abnahme auf 90 % (mit eventuell höherer Empfindlichkeit auf einen Untergrund).

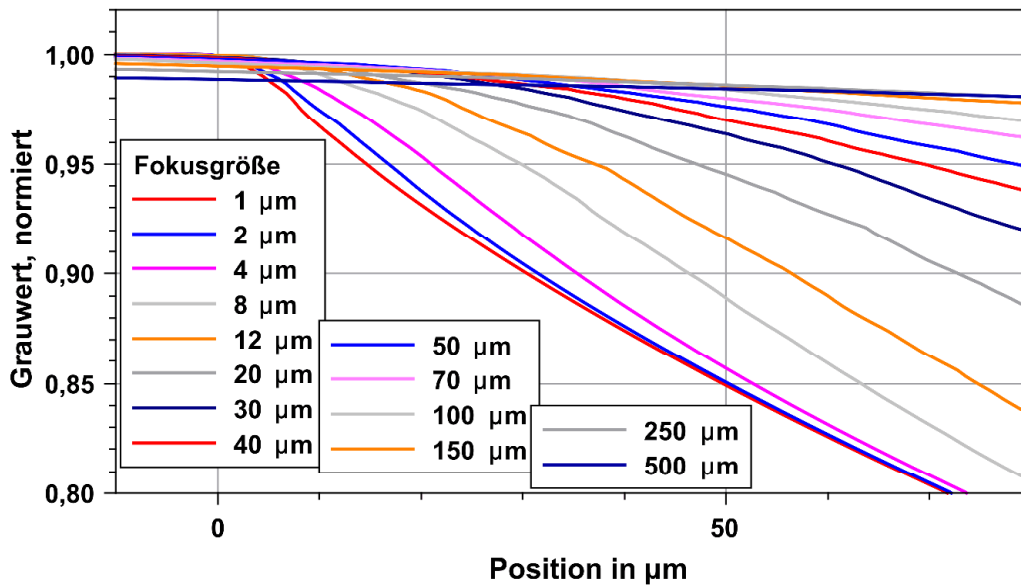


Abb. 8. Detailvergrößerung von Abbildung 4.

2.4 Simulation der JIMA-Maske

Die Auswertung der Bilder der JIMA-Maske geschieht über die Bestimmung der Modulationstiefe der Strichmuster wie bereits in Abbildung 1 illustriert. Es wurde ein vollständiges Modell der JIMA RT-RC-05 Maske in aRTist erstellt und Bilder für verschiedene Werte der Fokusgröße von 0 bis 100 μm berechnet. Der Detektor wurde mit realistischen Werten für seine Übertragungsfunktion entsprechend dem später verwendeten PE XRD 1620 modelliert. Von allen relevanten Strichmustern auf den Bildern wurde die Modulationstiefe in Abhängigkeit der Strukturbreite tabelliert (Abb. 9).

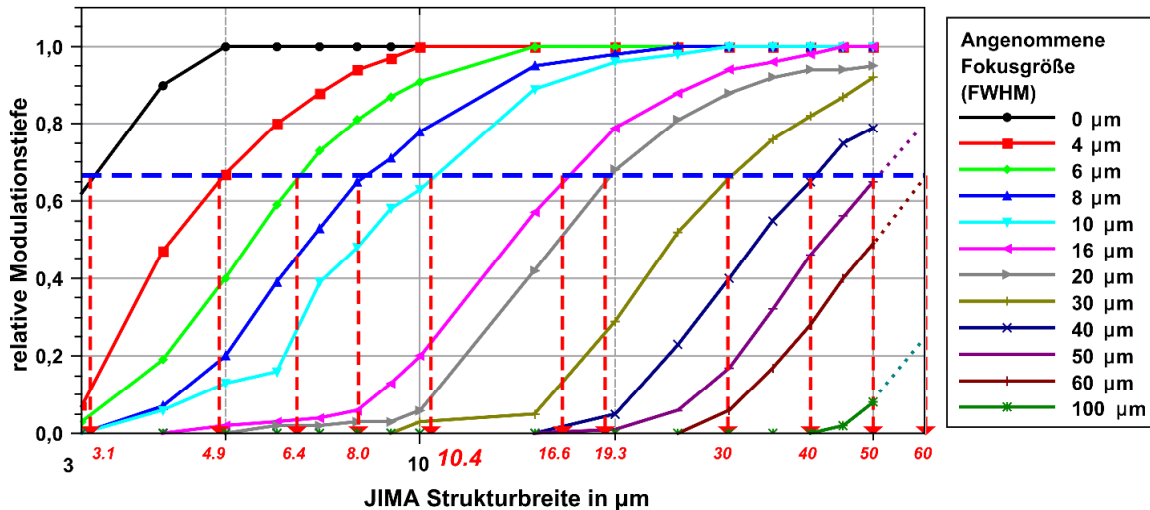


Abb. 9. Ergebnis der Simulationen einer Strichmustermaske vom Typ JIMA RT-RC-05.

Die zu den in der Simulation angenommenen Fokusgrößen zugehörigen Kurven werden in 2/3 ihrer Höhe geschnitten und der zugehörige Wert der Strukturbreite abgelesen. Es zeigt sich, dass die Strukturbreite gerade dem Wert des Fokus (FWHM) entspricht. Da die Kurven in dieser Höhe nahezu ihre größte Steigung haben und weit genug vom Niedrigkontrastbereich entfernt liegen, bei dem Detektorfehler stören, ist das Verfahren robust.

3. Experimente

3.1 Verwendete Geräte und Materialien

Die Experimente wurden an Nadeln des Typs Picoprobe ST-20-0.5 vorgenommen. Dies sind geätzte Wolframspitzen, die als Tastkopfnadeln mit definierten Spitzenradius (hier 0,5 μm) verwendet werden. Zwei dieser Nadeln wurden in einem Halter zusammengeklebt, so dass sie einen definierten Abstand ihres Durchmessers von 0,51 mm haben (s. Abb. 10). Optische Bilder des Profils wurden mit einem Werth Videocheck UA mit telezentrischem 10x-Objektiv in Durchlichtbeleuchtung aufgenommen, um den Kantenwinkel zu bestimmen – eine grobe Auswertung lässt die Bestimmung auf ca. 0,5° genau zu. So variieren die Winkel auch innerhalb einer Charge signifikant, die Kanten sind aber hinreichend geradlinig. Die Abweichung im Spitzenbereich ist optischer Beugung zuzuschreiben.

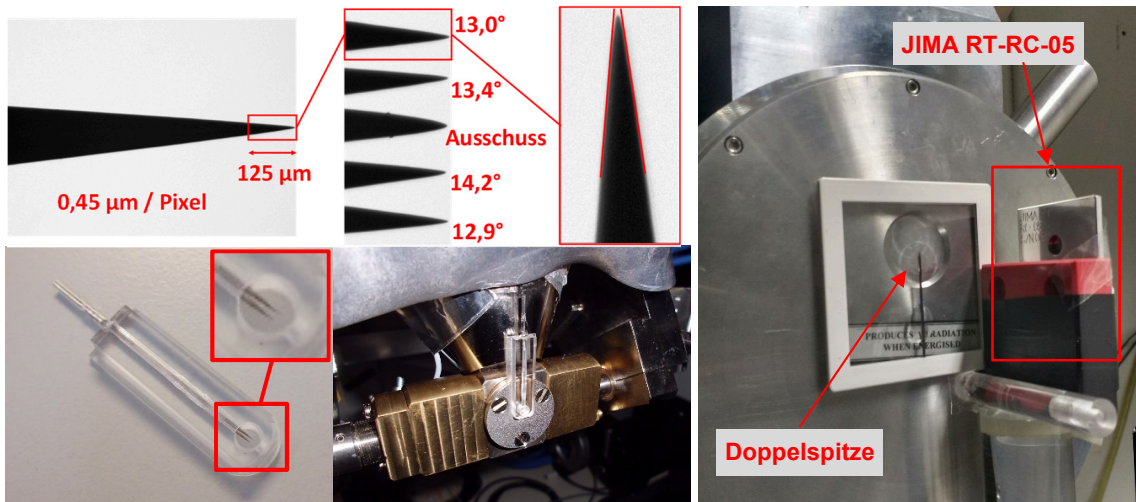


Abb. 10. Oben links: Optische Aufnahmen einer Charge Nadeln zur Bestimmung des Kegelwinkels. Unten links: Zwei Nadeln eingeklebt in einen durchbohrten Plexiglashalter. Unten Mitte: Eingesetzt in den Filterhalter einer NIKON MCT 225. Rechts: Aufbau vor einer NIKON XTH 320kV Quelle. An der Rotationsachse sind die JIMA-Maske und in einem Diarahmen die zwei Nadeln befestigt und können direkt vor das Austrittsfenster geschwenkt werden.

Die Experimente wurden an zwei Anlagen durchgeführt: Einer kompakten NIKON MCT 225 mit 225 kV Mikrofokusröhre und Perkin Elmer XRD 1620 (CsI, 2000 × 2000) Flat-Panel-Detektor ausgerüstet sowie einer freistehenden NIKON XTH 320 kV Mikrofokusröhre mit Perkin Elmer XRD 1611 (CsI, 4000 × 4000) Detektor. Als Referenz wurde eine JIMA RT-RC-05 Strichmaske verwendet. Beispielaufnahmen sind in Abb. 11 zu sehen.

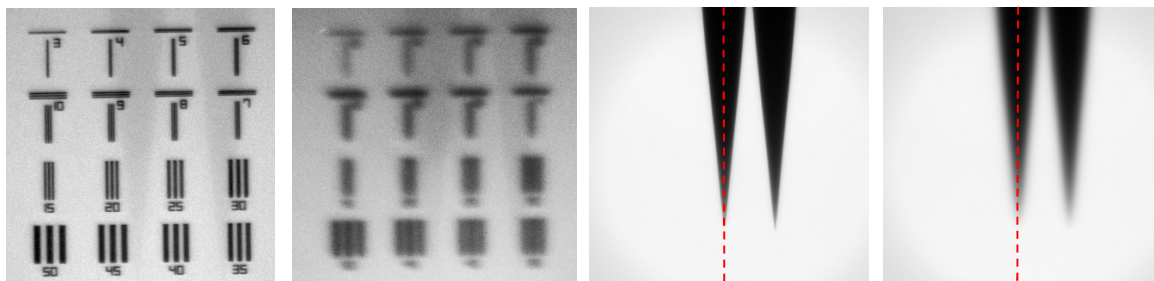


Abb. 11. Links: Radiographien der JIMA-Maske bei bestmöglichem und defokussiertem Brennfleck. Rechts die dazugehörigen Bilder der Wolfram-Doppelspitze. Das Profil wurde entlang der Linie der im Bild linken Nadel ausgewertet. Auf dem Foto in Abb. 10 ist das die rechte Nadel mit 12,9° Kegelwinkel.

3.2 Ausführliche Beispielmessung und Auswertung mit JIMA-Maske

Dieser und der folgende Abschnitt zeigen Messungen, die an einer NIKON MCT 225 mit Wolfram-Reflexionstarget aufgenommen wurden. Die Messungen wurden bei nur 4 Watt Elektronenstrahlleistung durchgeführt, um einen optimal kleinen Fokus zu erreichen. Der Brennfleck wurde nachfolgend durch Veränderung des Spulenstroms schrittweise defokussiert. Dieser Abschnitt zeigt die Untersuchung mittels JIMA-Maske bei 140 kV, die in beiden Achsrichtungen separat durchgeführt wurde. Dazu sind in Abb. 12 die Modulationstiefe der Strichmuster über ihre Strukturbreite aufgetragen. Der zur Defokussierung nötige Spulenstrom-Offset dient als Parameter. Entsprechend Abschnitt 2.4 werden die Strukturbreiten bei 2/3 Modulationstiefe abgelesen. Es zeigt sich, dass der Spot nur im optimalen Fall nahezu kreisrund ist und sich dann zunehmend in Richtung der Targetachse in die Länge zieht.

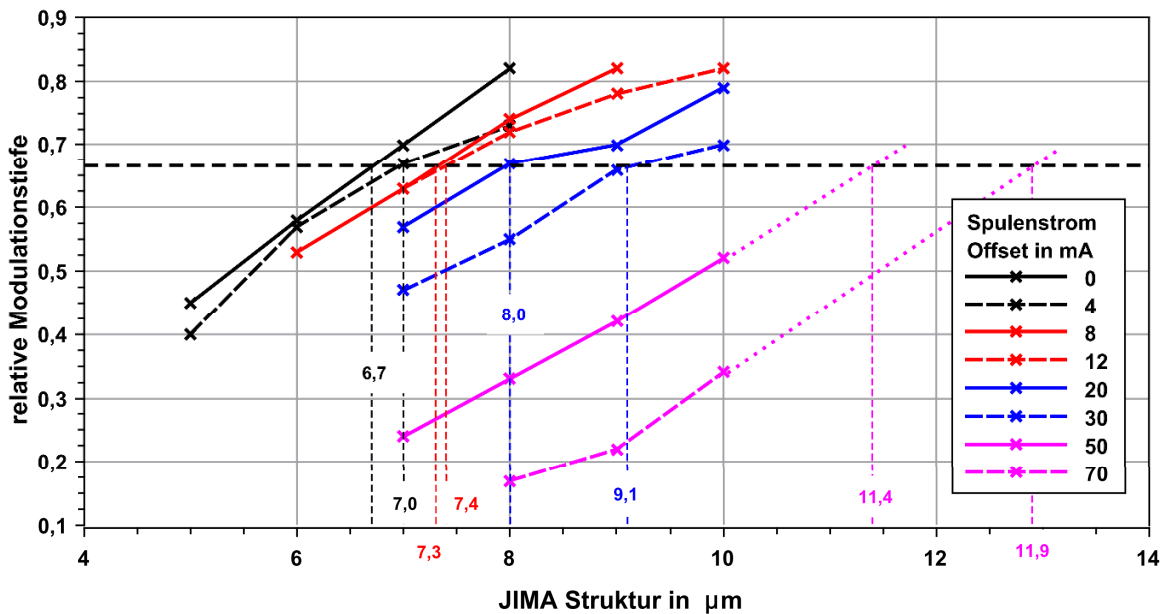
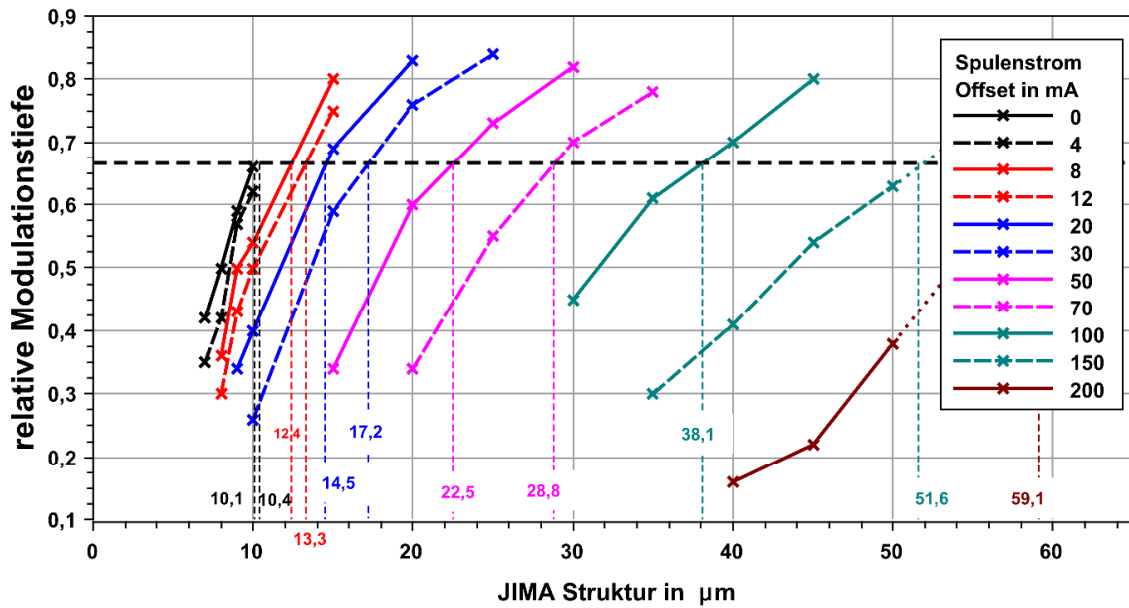


Abb. 12. Beispiel der systematischen Auswertung der JIMA-Masken-Messung bei Defokussierung bei einer NIKON MCT 225 und 140 kV. Oben: horizontale Richtung. Unten: vertikale Richtung.

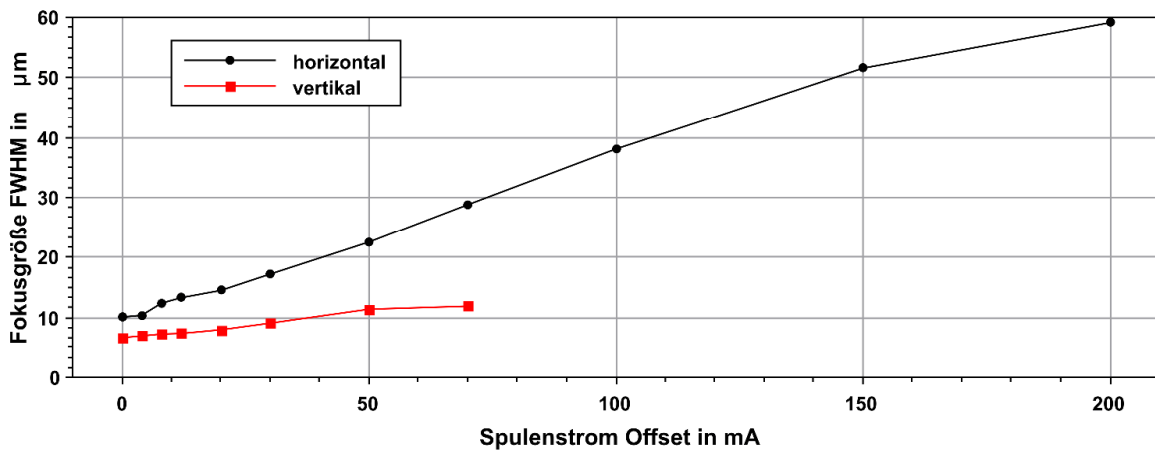


Abb. 13. Zuordnung der Fokusgröße zum Offsetstrom bei 140 kV. Die JIMA-Maske hat vertikale Strichmuster bis 50 µm und horizontale Strichmuster bis 10 µm, so dass aus einer Aufnahme in nur einer Orientierung die Auswertbarkeit der Fokusgröße in vertikaler Richtung eingeschränkt ist.

Diese Werte können also dem Offsetstrom der Defokussierung zugeordnet werden (Abb. 13) und nachfolgend als Vergleichsgröße zum neuen Verfahren herangezogen werden.

3.3 Ausführliche Beispielmessung mit Nadel

Es wurden mit der Doppelspitze Experimente mit vertikaler Ausrichtung (Abb.10, unten Mitte) und horizontaler Ausrichtung durchgeführt. Im ersten Fall bestimmt man die horizontale, im zweiten die vertikale Fokusaussdehnung.

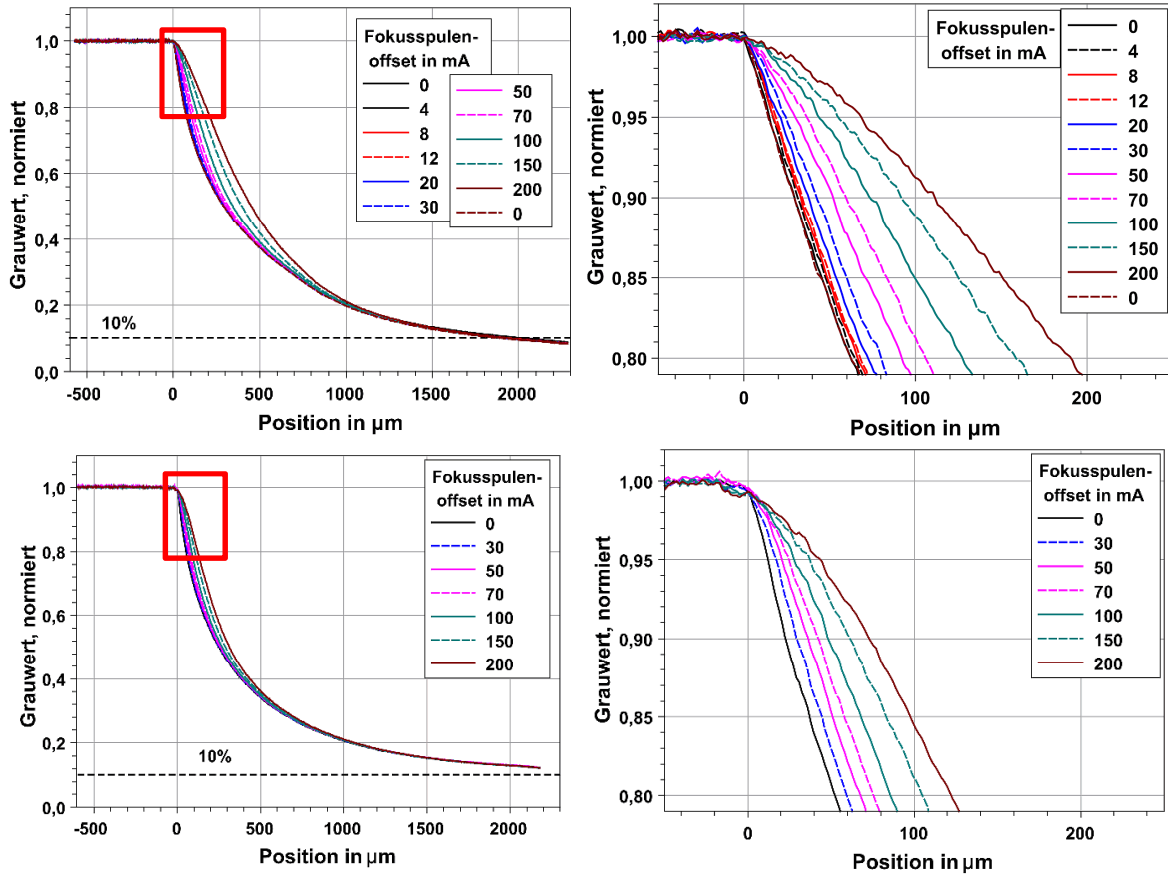


Abb. 14. Messungen für 140 kV, 4 Watt mit Spitzen in vertikaler (oben) und horizontaler (unten) Ausrichtung. Dieses beschreibt umgekehrt die horizontale/vertikale Fokusgröße.

Die Skalierung der Bildpixel zu Mikrometer auf der Spitzenachse wird mit Hilfe des Abstandes der beiden Spitzen vorgenommen. Für die einzelnen Aufnahmen wurden 16 Bilder á 2000 ms gemittelt. In Abb. 14 ist die Messung der linken Nadel bei 140 kV dargestellt, die optisch gemessen einen Kegelwinkel von $12,9^\circ$ hat. Die ermittelten Steigungen sind über den Fokusdurchmesser in Abb. 15 aufgetragen. Die Durchmesser ergeben sich aus den Offsetströmen mit Hilfe von Abb. 13.

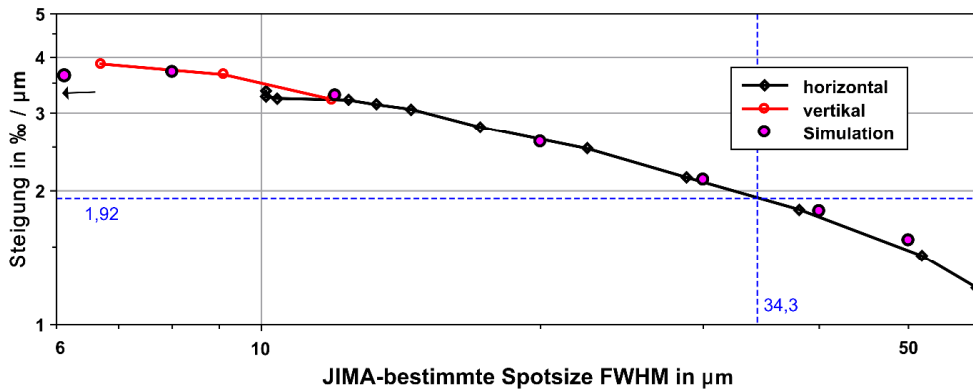


Abb. 15. Auftragung der Steigungen aus Abb. 14 über die Fokusgröße unter Benutzung der Abb. 13. Der farbige Kreis am Anfang stellt das Simulationsergebnis für einen punktförmigen Fokus dar, die kleineren Kreise die korrigierten Simulationen ab 8 μm Fokusgröße aus Abb.7.

Aus den Simulationen in Tabelle 1 ergibt sich bei 140 kV eine zu erwartende Steigung von 3,09 % je Mikrometer bei $10,5^\circ$ Kegelwinkel. Nach Tabelle 2 ist der Steigungswert proportional zum Kegelwinkel, in diesem Fall $12,9^\circ$, und ist damit 3,8 % je Mikrometer ($(3,09 \cdot 12,9 / 10,5)$ % je Mikrometer). Dieser Wert und die entsprechend korrigierten Werte mit Defokussierung aus Abb. 7 sind in Abb. 15 eingezeichnet und stimmen sehr gut mit dem Messergebnis überein.

3.4 Beispiel aus dem praktischen Betrieb

An der in Abschnitt 3.1 beschriebenen CT-Anlage mit NIKON XTH 320 kV Mikrofokusquelle wurden Aufnahmen der JIMA-Maske und der Doppelspitze bei 140 kV, 140 μA (19,6 W) aufgenommen. Bedingt durch die Bauform dieser Röntgenquelle kann nur mit etwa einem Viertel der geometrischen Vergrößerung der MCT 225 gearbeitet werden. Wegen des doppelt so hoch auflösenden Detektors beträgt die minimale Voxelgröße etwa 3 μm statt 1,5 μm . In Abb. 16 wird die Aufnahme der JIMA-Maske gezeigt. Die Absorption ausgedehnter Goldstrukturen beträgt nur 1,5 % des Weißwertes und wird überlagert durch einen kurzwelligen (10 Pixel) Untergrund von 0,1 % und einem längerwelligen Untergrund von 0,5 %. Die Ursache ist bisher nicht aufgeklärt, es wird aber vermutet, dass es sich um eine Kombination aus Fokusdrift und Rauheit des Austrittsfensters handelt. Die Auswertung der Modulation für die Strukturen von 30 μm bis 50 μm ist dennoch möglich. Aus einer Ausgleichsgeraden ergibt sich der Wert für 66,6 % Modulation bei etwa 37 μm als Fokusgröße.

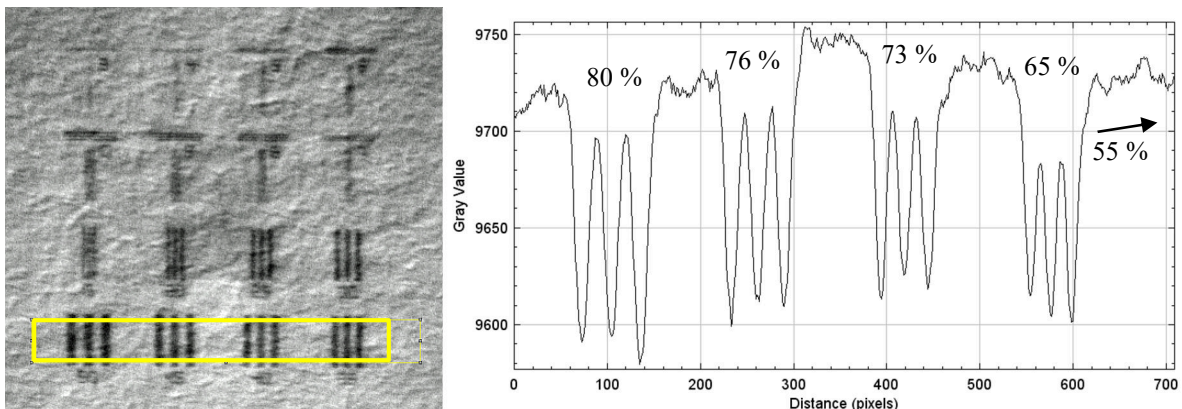


Abb. 16. Bestimmung der Fokusgröße bei 140 kV 19,6 W an einer NIKON XTH 320 kV-Quelle mit JIMA-Maske. Die gezeigten Strukturbreiten sind 50 μm , 45 μm , 40 μm und 35 μm . Die Modulationstiefe ist zusätzlich noch für eine Breite von 30 μm angegeben.

Entsprechend ist das linke Zentralprofil der Messung der Doppelspitze in Abbildung 17 aufgetragen. Es wird vermutet, dass der optimale Fokus bei einem Offset von -5 (der Steuersoftware) liegt. Die Steigung im Bereich zwischen 85 % und 95 % der Transmission beträgt 1,6 ‰ je Mikrometer.

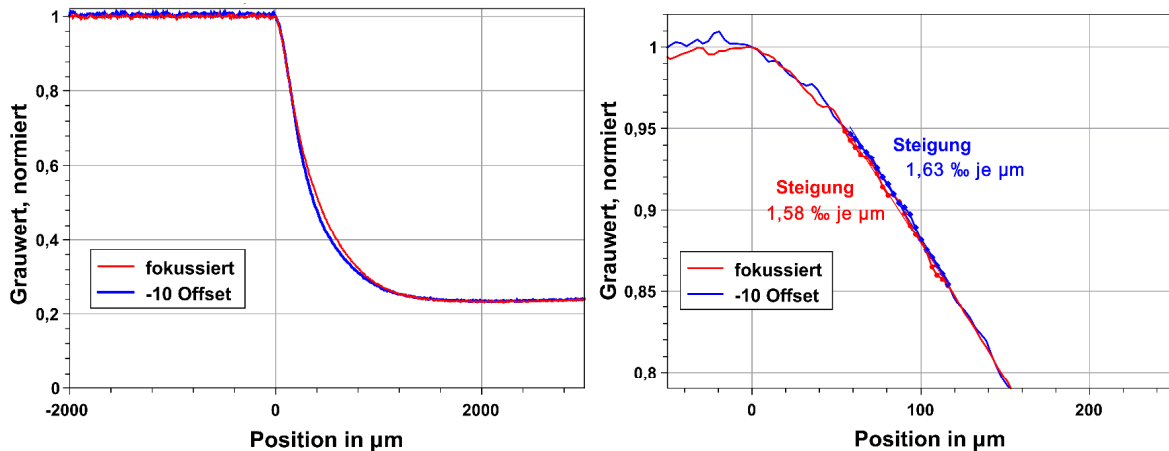


Abb. 17. Bestimmung der Fokusgröße bei 140 kV 19,6 W an einer NIKON XTH 320 kV-Quelle mit Wolframspitze. Die Steigung für die beiden Fokuseinstellungen unterscheidet sich wenig.

Der Kegelwinkel wird angenommen als $14,2^\circ$, da er einen identischen Winkel im Röntgenbild wie die Spitze im Abschnitt 3.3 hat – eine optische Messung der benutzten Spitze steht im Moment der Manuskriptabgabe noch aus. Auffällig ist der hohe Untergrund von ca. 25 %, der bei den Messungen in Abschnitt 3.3 nur 10 % betrug. Mögliche Ursachen können Streuung in Ausrüstungsgegenständen, den Kabinen- bzw. hier Laborwänden und im Detektor sein, dazu Fading oder eine falsche Schwarztonkorrektur. Zudem kann es Strahlung durch parasitäre Entladung in der Quelle gegeben haben. Daher muss die Steigung mit dem Faktor 90 % / 75 % korrigiert werden, um Vergleichbarkeit zu Abschnitt 3.3 herzustellen. Es ergibt sich also eine effektive Steigung von 1,92 ‰ je Mikrometer. Die Fokusgröße, die sich aus Abb. 15 ergibt, beträgt $34,3 \mu\text{m}$, was nahe an dem Wert $37 \mu\text{m}$ aus dem ersten Verfahren liegt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Es wird als Messverfahren zur Bestimmung der Fokusgröße von Röntgenquellen vorgeschlagen, eine konische Spitze – bevorzugt aus Wolfram oder anderen hoch absorbierenden Materialien – in den Kegelstrahl bei hoher geometrischer Vergrößerung zu platzieren. Das zentrale Absorptionsprofil wird erfasst und der Anstieg längs der Profillinie ausgewertet. Dieses stellt bei bekannter Spannung und Kegelwinkel der Spitze ein Maß für den Fokusbereich dar, das eindeutig zugeordnet werden kann. Grundsätzlich ist das Verfahren mit der Spitze störunanfälliger als mit einer dünnen Maske, da auf zehnfach höherem Absorptionsniveau gearbeitet wird.

Es wurden ausführliche Simulationen mit der Software aRTist durchgeführt und das neue Verfahren mit der bekannten Nutzung von dünnen lithographisch hergestellten Strichmasken verglichen. Das Kegelspitzenverfahren ist nur sensitiv auf den Fokusbereich senkrecht zur Kegellachse. Weiterhin ist es auch in den Nanofokusbereich nach unten skalierbar. Es sollte daher für Quellen von Minifokus über Mikrofokus bis hin zum Nanofokus mit nur einem Messobjekt einsetzbar sein. Angespitzte Wolframdrähte haben eine hohe technische Bedeutung als Tastkopfspitzen und in der Rastertunnelmikroskopie und sind daher leicht und in verschiedenen Ausführungen verfügbar. Das Wirkprinzip konnte in dieser Arbeit für Fokusbereich im Bereich $6 \mu\text{m}$ bis $60 \mu\text{m}$ experimentell bestätigt werden. Zur

Bestimmung von Absolutwerten wird der genaue Kegelwinkel, der auch im relevanten Spitzenbereich gut definiert sein muss, benötigt. Zur reinen Fokusoptimierung entfällt dieses und das Verfahren wird in seiner Durchführung besonders einfach.

Weitere Untersuchungen sind nötig, um das Verfahren zu etablieren: der Einfluss von gerätespezifischen Eigenschaften, wie die des eingesetzten Detektors, der Quellkonstellation, des Streuuntergrundes etc. und ihre Auswirkungen auf das Profil müssen ausgeschlossen oder entsprechende Korrekturen angegeben werden. Es bietet sich eventuell an, statt mit dem durchschnittlichen linearen Anstieg bei 85 % - 95 % Transmission mit einem anderen Maß zu arbeiten, das das Absorptionsprofil beschreibt. Andererseits könnten zusätzlich das Quellspektrum oder zumindest die Quellspannung aus dem Profil extrahiert werden, da die Profillinie effektiv die Absorption eines sehr dünnen gut definierten Keilfilters darstellt. Besonders interessant werden Messungen bei sehr kleinen Fokusgrößen im Bereich $< 5 \mu\text{m}$ sein, insofern sehr feine Kegelspitzen eingesetzt werden, da die Bestimmung dort ein bekanntermaßen schwieriges Problem darstellt.

Danksagung

Die Autoren danken Dr. Ulrich Neuschaefer-Rube für die kritische Durchsicht des Manuskripts und für die nützlichen Hinweise.

Referenzen

- [1] M. Engelhardt, J. Baumann, "Determination of Size and Intensity Distribution of the Focal Spot of a Microfocus X-ray Tube Using Image Processing", Proc. ECNDT 2006, <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Th.2.5.4.pdf>
- [2] A. Jobst, G. Kostka, P. Schmitt, „Neue Methode zur Charakterisierung von Brennflecken kleiner als $5 \mu\text{m}$ “, DGzFP DACH-Tagung 2004, <https://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/p16/p16.htm>
- [3] Japan Inspection Instruments Manufacturers' Association (JIMA), www.jima.jp
- [4] DIN EN 12543 – 5 (1999), „Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung von Brennflecken in Industrie-Röntgenanlagen für die zerstörungsfreie Prüfung - Teil 5: Messung der effektiven Brennfleckgröße von Mini- und Mikrofokus-Röntgenröhren; Deutsche Fassung EN 12543-5:1999“
- [5] K. Bavendiek, U. Ewert, A. Riedo, U. Heike, U. Zscherpel, "New Measurement Methods of Focal Spot Size and Shape of X-ray Tubes in Digital Radiological Applications in Comparison to Current Standards", Proc. WCNDT 2012, https://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/346_wcndtfinal00346.pdf
- [6] C. Bellon, G.-R. Jaenisch, A. Deresch, "Combining Analytical and Monte Carlo Modelling for Industrial Radiology", Proceedings of the 19th World Conference on Non-Destructive Testing, Munich, Germany, 2016
- [7] M. Salamon et al, "Comparison of different methods for determining the size of a focal spot of microfocus X-ray tubes", Nucl. Instr. Meth. A 591(2008) 54-48