

# Mehr Strom oder mehr Spannung, ein Vergleich dreier Röntgenröhren in der CT

Bernhard ILLERHAUS\*, Yener ONEL \*

\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

email: [bernhard.illerhaus@bam.de](mailto:bernhard.illerhaus@bam.de)

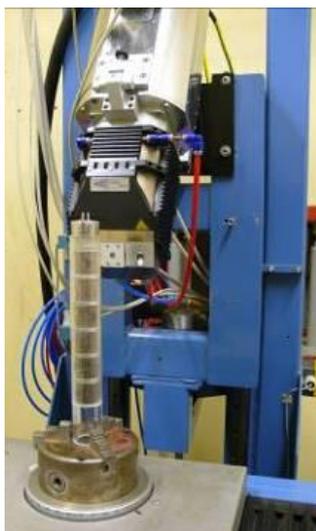
**Kurzfassung.** Sollen CT Aufnahmen quantitativ und automatisch ausgewertet werden, ist die Qualität der Tomogramme ein wesentlicher Punkt. Außerdem steht bei Serienmessungen nur eine begrenzte Meßzeit für jede Probe. Es werden die verschiedenen Mikrofokusröhren in Bezug auf die Parameter Orts- und Dichteauflösung, sowie Meßzeit verglichen, CT Beispiele dazu gezeigt.

## Einführung

Traditionell gibt es in der CT die Regel, daß eine Tomographie bei höheren Spannungen zu besseren Ergebnissen führt, als eine Tomographie bei niedrigerer Spannung, die eigentlich zu einem höheren Kontrast zwischen Materialien mit verschiedenem Schwächungskoeffizienten führen sollte, aufgrund der überproportional steigenden Zahl der Röntgenphotonen bei höherer Spannung aber gleicher Leistung. Dies ist aber durch die heute verwendeten Flachdetektoren begrenzt, da diese ab einer Spannung von 200kV deutlich durchstrahlt werden, wodurch ein Verlust in der Zahl der gemessenen Photonen eintritt. Bei Zeilendetektoren tritt dieser Effekt allerdings erst später ein.

Für ein Projekt im Rahmen des DFG „Biodiversitäts Exploratoriums“ [1] sollten rund 600 Bodenproben eines Durchmessers und einer Höhe von 30mm gemessen und anschließend automatisch ausgewertet werden. Es mußte sowohl eine „maximale“ Dichte- als auch Ortsauflösung erreicht werden, da einerseits eine Bestimmung der Wurzelmenge und Oberfläche im Verhältnis zur Oberfläche und Volumen der festen Erde bestimmt werden sollte. Insbesondere aber sollte andererseits die Kurtosität eines bestimmten Bereichs gemessen werden.

Es konnten pro Tag 12 Proben in 16 von 24 Stunden bei 5 von 7 Tagen Betrieb gemessen werden, wobei nur am Anfang eines Monats der Untergrund und freie Strahl des Detektors bestimmt wurde. Da zudem der Plexiglas Behälter der Proben in der CT größer als das Sichtfeld war, konnte während der gesamten Meßzeit keine Normierung einzelner Bilder erfolgen. Die Tomogramme wurden alle mit festen Grauwertgrenzen ausgewertet. Die Messungen wurden mit 190kV und 70µA bei 1mm Al Vorfilter durchgeführt [2]. Waren die gewählten Einstellungen sinnvoll und wenn ja warum?



**Abb. 1.** Stapel von sechs Bodenproben aus der Serie zur statistischen Analyse von Bodenkennwerten.

## 2. Dosisleistung

Vor allem durch BAM interne Projekte bedingt, werden im Fachbereich 8.5 zur Zeit drei  $\mu$ CT Anlagen mit fünf verschiedenen Röntgenröhren betrieben, die vorhandene „Nanofokusröhre“ bleibt hier außer Betracht. Dadurch ergab sich die Möglichkeit des Vergleichs zum Thema dieses Artikels, da es sich hierbei um drei Röntgenröhren mit 225kV Beschleunigungsspannung und zwei Röhren mit höherer Spannung handelt. Es sind das: eine 225kV Röhre von X-RAY WorX (225kV), eine 300kV Röhre von GE (300kV)<sup>1</sup>, eine 225kV Röhre (225kVN), eine 225kV Röhre mit Rotationstarget (225kVR) und eine bipolare 320kV Röhre (320kVH)<sup>2</sup>, alle drei von Nikon. Erschwert wird dieser Vergleich dadurch, daß bei allen drei CT-Anlagen verschiedene Flachdetektoren verwendet werden.

Deswegen ergab sich zunächst die Notwendigkeit, die Strahlungsleistung der verschiedenen Röhren zu vergleichen. Dazu wurde eine Meßkammer (Meßgerät: PTW UNIDOS) in 1m Entfernung von der Röhre, in der Mitte vor dem Detektor, aufgebaut, und die jeweilige Dosis gemessen.

Die Dosis wurde bei 200kV jeweils ohne Vorfilter gemessen. Bei der 320kVH Röhre besteht ein intrinsischer Vorfilter aus 3,5mm Aluminium durch das Fenster. Man kann annehmen, daß sich dadurch die gemessenen Brennfleckgrößen verschlechtern. Die Meßwerte wurden deswegen umgerechnet in die Werte 320kVHcor, wobei der Umrechnungsfaktor, wegen der Energieabhängigkeit, nur geschätzt werden konnte. Interessanterweise lassen sich zwei Gruppen von Effizienz bei der Umsetzung von angegebenen Stromwerten in gemessene Strahlung pro Fläche erkennen.

Nach der allgemein bekannten Faustformel soll die Brennfleckgröße in Mikrometern der Leistung in Watt entsprechen. Um eine Vorhersagbarkeit der CT-Ergebnisse zu erzielen, sollte aber die Abhängigkeit der Brennfleckgröße von der Leistung, von Spannung und Strom, überprüft werden. Für vier Mikrofokusröntgenröhren haben wir die Brennflecke jeweils ausführlich bestimmt.

---

<sup>1</sup> Bauartbeding ist die Röhre auf eine maximale Strahlzeit von zwei Stunden begrenzt.

<sup>2</sup> Bauartbedingt ist der minimale Abstand zum Brennfleck der Röhre größer als 3cm.

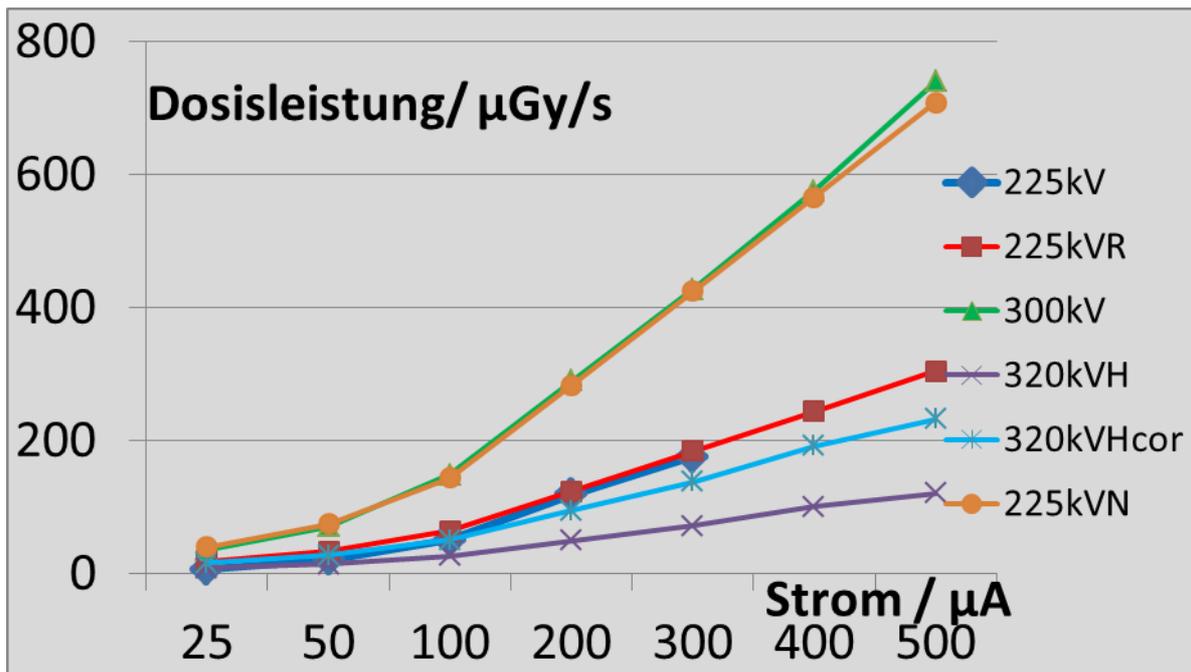
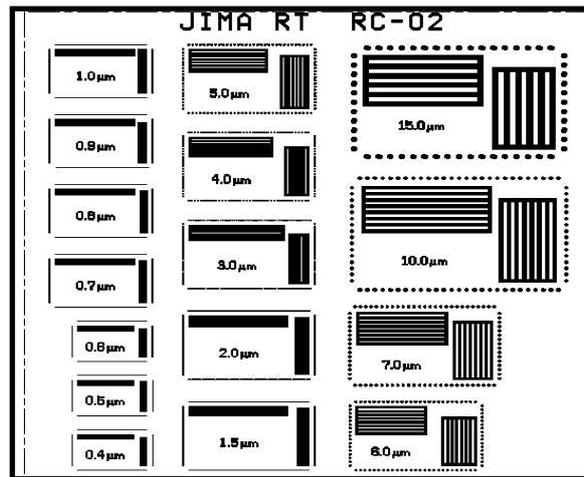


Abb. 2. Dosisleistung der verschiedenen Röntgenröhren in ein Meter Abstand und 200kV in Abhängigkeit vom Röhrenstrom.

### 3. Brennfleckgrößenbestimmung

Die Bestimmung der Brennfleckgröße wurde mit Hilfe eines Auflösungsstestkörpers realisiert. Ein Auflösungsstestkörper enthält eine Serie von Linienmustern mit definierten Strichbreiten. Der Testkörper „JIMA RT RC-02“ [3] zum Beispiel deckt einen Bereich von 0,4 µm bis zu 15 µm ab. Aufgestellt direkt vor dem Röhrenfenster erlaubt die Abbildung dieses Testkörpers auf einem Flachdetektor die direkte und reproduzierbare Bestimmung der aktuellen Auflösung bei vorgegebener Beschleunigungsspannung und Strom. Die anhand der Linienmuster ermittelte Auflösung entspricht in der Regel etwa der halben Brennfleckgröße. Jedoch werden beide Begriffe in der Praxis fälschlicherweise gleichbedeutend aufgefasst.

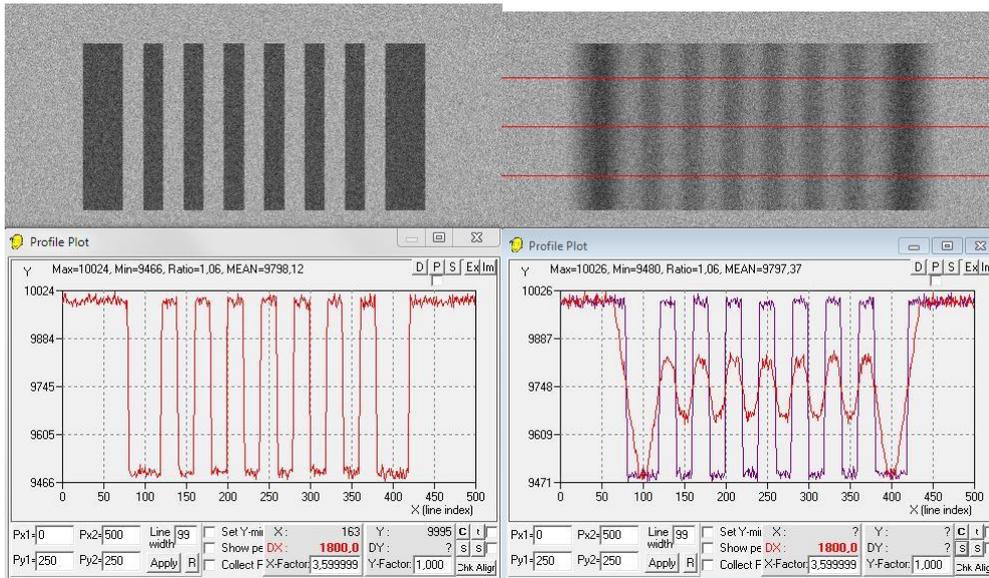
Bei der Herstellung eines Auflösungsstestkörpers wird ein Silizium Träger mit Wolfram beschichtet und anschließend werden die Linienmuster per Lithographie aus der 1 µm dicken Schicht herausgearbeitet. Auf dem Auflösungsstestkörper sind für jede vorgegebene Auflösung ein Paar Linienmuster, die im rechten Winkel zueinander stehen, aufgebracht. Die horizontal verlaufenden Linien dienen zur Bestimmung der vertikalen Auflösung. Für die Bestimmung der horizontalen Auflösung der Röntgenröhre müssen die vertikal verlaufenden Linienmuster ausgewertet werden. Für die Computertomographie ist die horizontale Auflösung, d.h. die vertikalen Linienmuster, maßgeblich von Bedeutung.



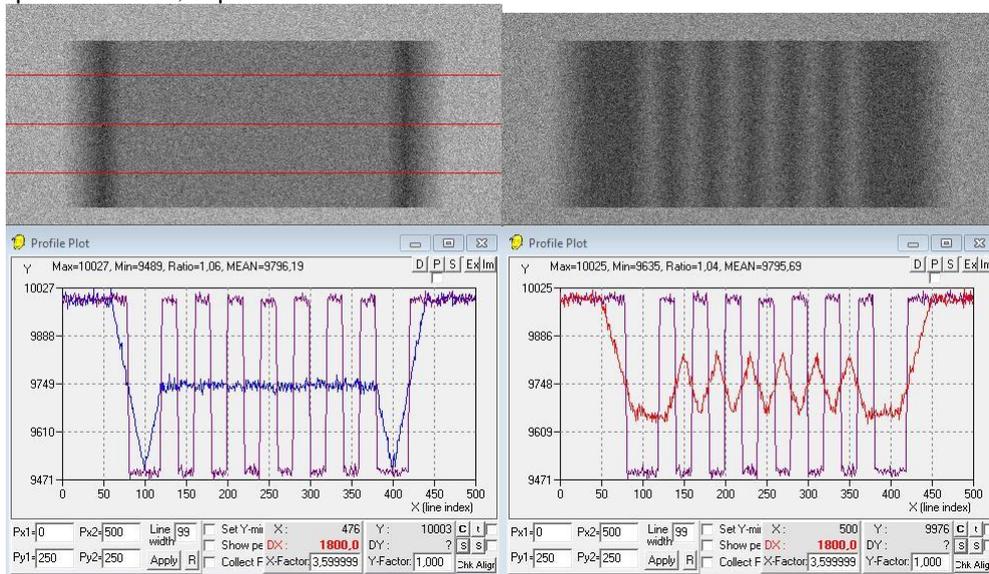
**Abb. 3.** Linienmuster des „JIMA RT RC-02“ Testkörpers für die Bestimmung der horiz. und vert. Auflösung

Die geringe Dicke führt dazu, daß die Teststreifen insbesondere bei höheren Energien fast vollständig durchstrahlt werden können. Daher kann die wahre Brennfleckgröße nicht einfach absolut aus der Breite der Gitterstreifen bestimmt werden. Hinzukommt, daß für die Berechnung des Brennflecks aus einem Gitter oder Doppeldrahtsteg sich die Größe des Brennflecks wie 1,9 zu 1 ergibt (19µm Brennfleck bei 10µm Gitter, bei einem Faktor 2 wäre das Gitter ausgeglichen). Für einen Vergleich zwischen Röhren ist der Testkörper jedoch bestens geeignet. Zudem kann man feststellen, daß, wegen der Durchstrahlung, der tatsächliche Brennfleck auf jeden Fall kleiner als der hier gemessene sein muß. Mit dem JIMA-Testkörper lassen sich so aber auf einen Blick horizontale und vertikale Größe bestimmen. Die Messungen erfolgten unter für eine CT realistischen Bedingungen, d. h. die Integrationszeit war begrenzt.

Bei der Bestimmung der Brennfleckgröße mittels Linienraster (Abb. 4 korrektes Verhalten) muß beachtet werden, daß es zu Interferenzen kommen kann. Es ist also nicht die erste Abbildung eines Gitters in Streifenstruktur als positiv zu bewerten, sondern es ist unbedingt die richtige Anzahl der Streifen nachzuzählen (Abb. 5). In den Bildern ist jeweils zum Vergleich die richtige Struktur eingeblendet. Für die „225kV“ (Abb. 7), die „225kVN“ (Abb. 8), „225kVD“ und die „300kV“ (Abb. 6) wurde die Brennfleckgröße so bei verschiedenen Spannungen und Stromstärken bestimmt. Die Abbildung der Gitter wurde über bis zu 20 Sekunden und die gesamte Breite des jeweiligen Gitters gemittelt (z. B. mit dem Programm CTViewer der BAM). Trotzdem ist nicht auszuschließen, daß bei sehr feinen Gittern, bei sehr viel längerer Meßzeit, ein besserer Wert hätte abgelesen werden können. Dies könnte z. B. bei dem Diagramm „225kVN“ der Fall sein. Bei der Röhre „225kV“ sind zwei Punkte erwähnenswert: Zum einen zeigen die Werte für 100kV ein ungewöhnliches Verhalten, obwohl bei 90kV die beste Auflösung gemessen wird. Zum anderen ist der Brennfleck bei 200kV mit 5 zu 4 außerordentlich gering. Damit läßt sich auch die erreichte gute Ortsauflösung in den Tomogrammen der oben erwähnten Serienmessung erklären.



**Abb. 4.** Simulierte Durchstrahlungsaufnahmen, links: Brennfleck min. Faktor 2 kleiner als Strichbreite, rechts: 15 $\mu$ m Brennfleck, 10 $\mu$ m Strichbreite.



**Abb. 5.** Simulierte Durchstrahlungsaufnahmen, links: 20 $\mu$ m Brennfleck und 10 $\mu$ m Strichbreite, rechts: Interferenzen bei 30 $\mu$ m Brennfleck, 10 $\mu$ m Strichbreite verursachen eine unwahre positive Aussage. Es sind jedoch nur 6 vertikale helle Streifen erkennbar, obwohl 7 helle Streifen vorhanden sind.

Abb. 9 zeigt einen Vergleich des Brennflecks der Röhren bei der gleichen Spannung von 190kV, horizontal und vertikal, für verschiedene Stromstärken. Hier zeigt sich, daß bei der „225kVR“ für alle gemessenen Stromstärken der gleiche JIMA-Wert erreicht wird. Der JIMA Testkörper hat die Einteilung 7 $\mu$ m, 10 $\mu$ m, 15 $\mu$ m. Ein Wert von 10 kann also bedeuten: besser als sieben, das nicht erreicht wird, aber auch bis zu 10. Diese Art Röhre scheint daher bestens für einen Detektor mit 4K x 4K Pixeln geeignet zu sein, da hier neben einer guten Ortsauflösung, eine geeignete Photonenleistung erzeugt wird. Sie ist allerdings nicht für Anforderungen unter 10 $\mu$ m geeignet. Um die Auswirkungen des 3,5mm Al Fensters zu messen, wurde zusätzlich bei der „225kV“ ein 3,5mm Al Filter mitgemessen. Es zeigte sich eine deutliche Verschlechterung der Ergebnisse.

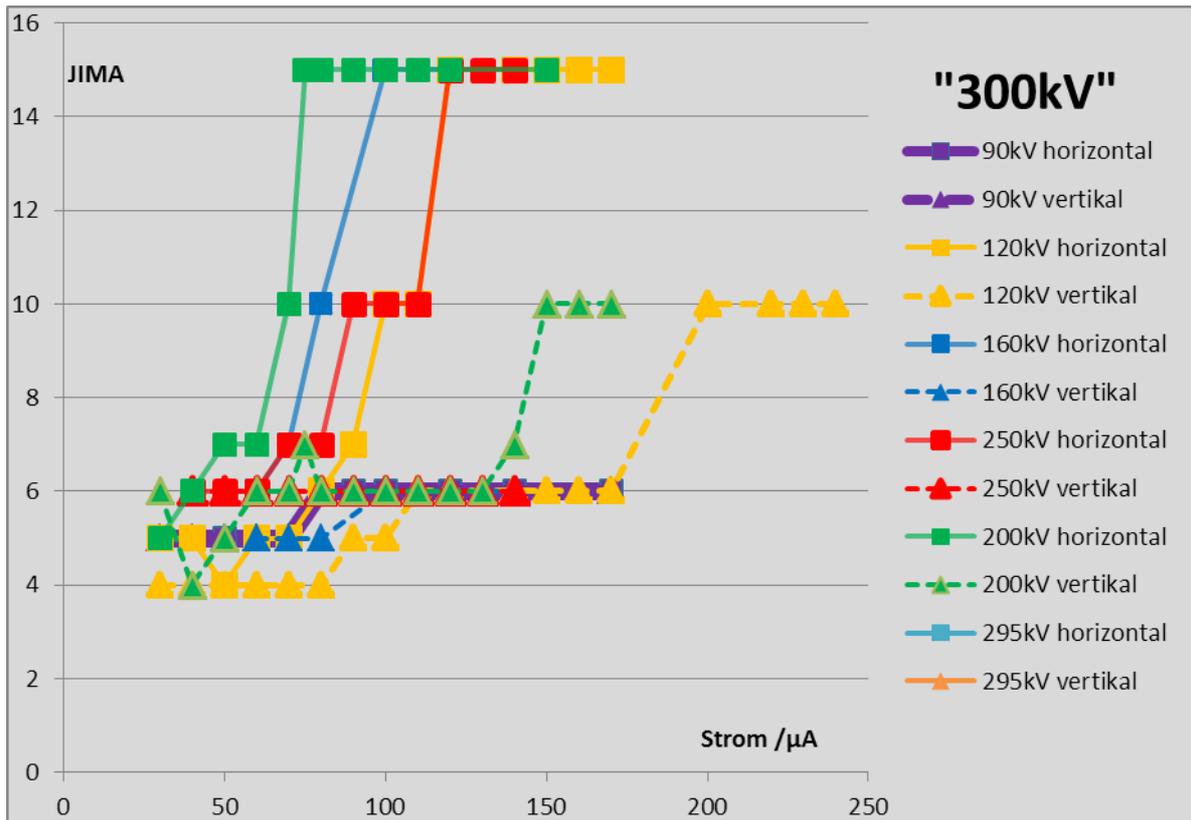


Abb. 6. Auswertung der Erkennbarkeit des Liniengitters auf dem JIMA-Testkörper für die „300kV“

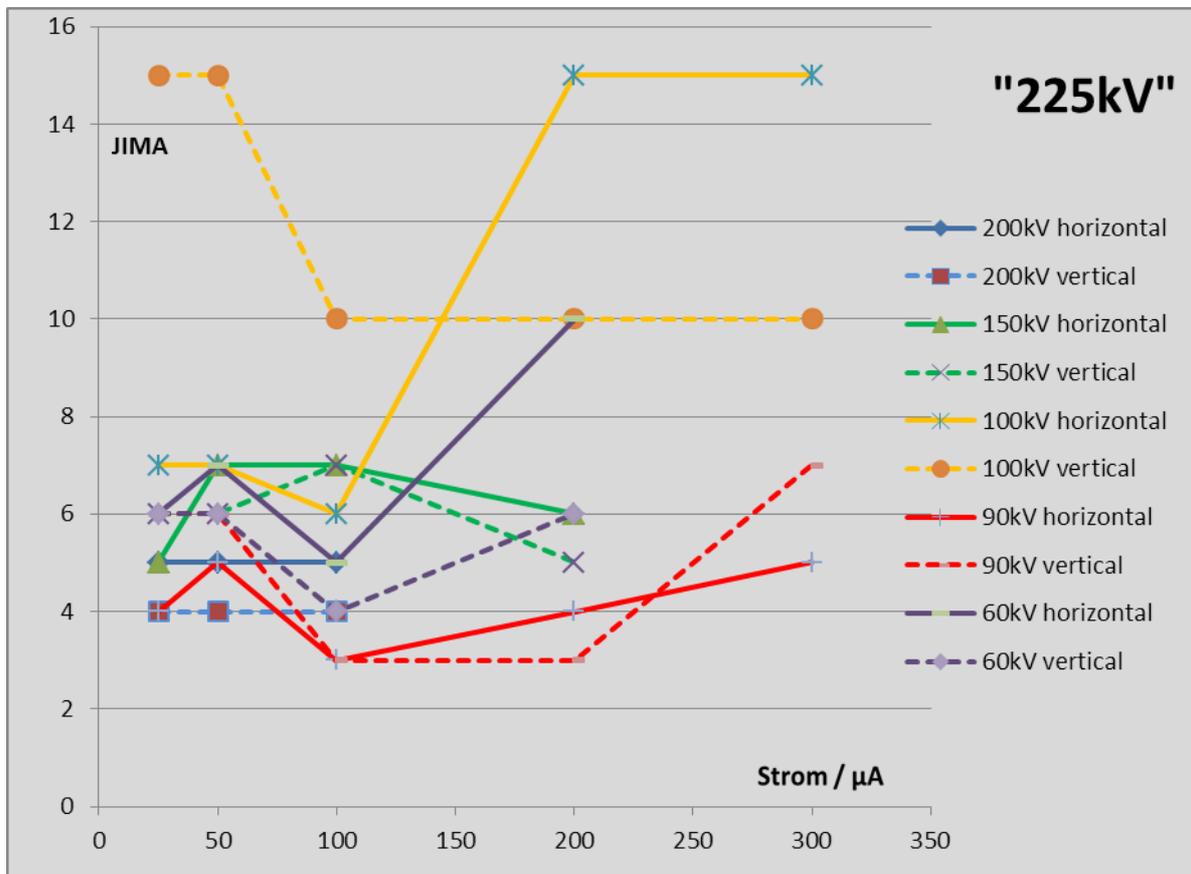


Abb. 7. Auswertung der Erkennbarkeit des Liniengitters auf dem JIMA-Testkörper für die „225kV“

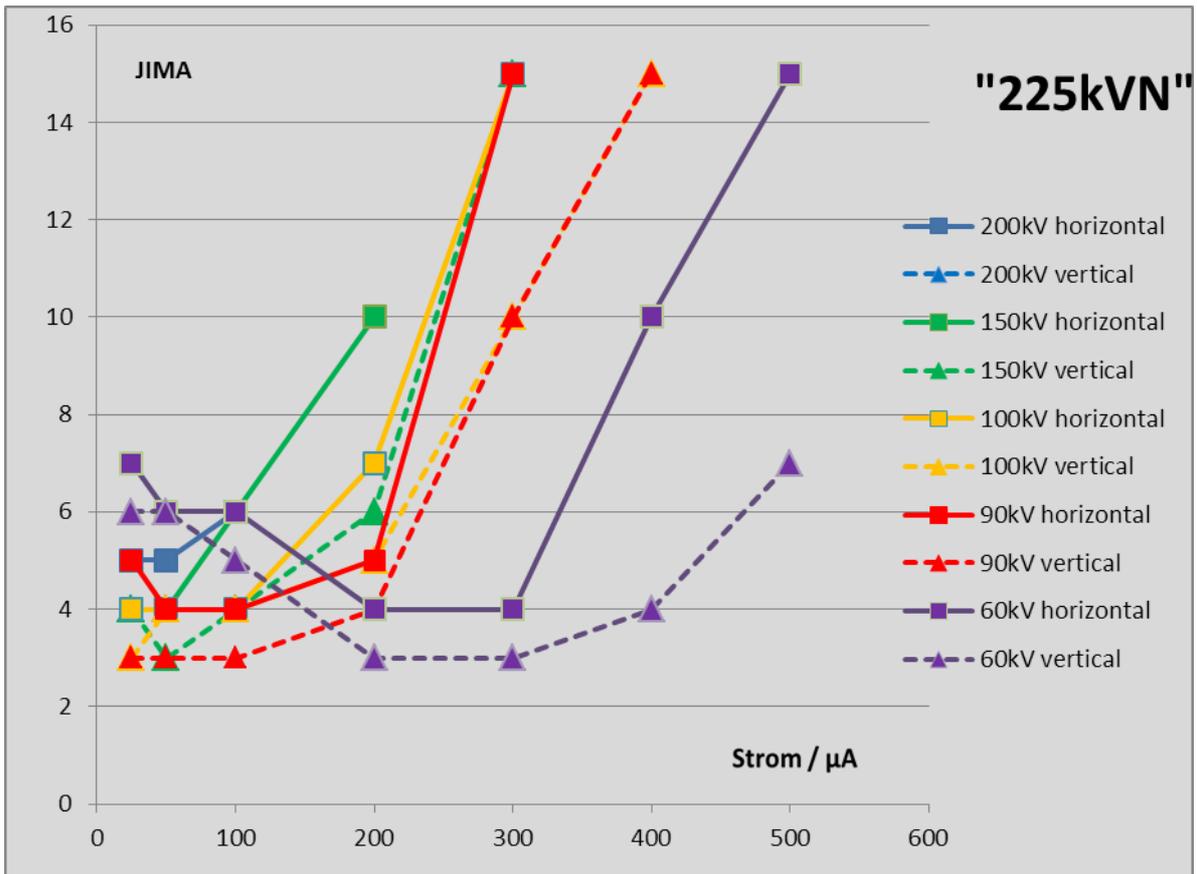


Abb. 8. Auswertung der Erkennbarkeit des Liniengitters auf dem JIMA-Testkörper für die „225kVN“

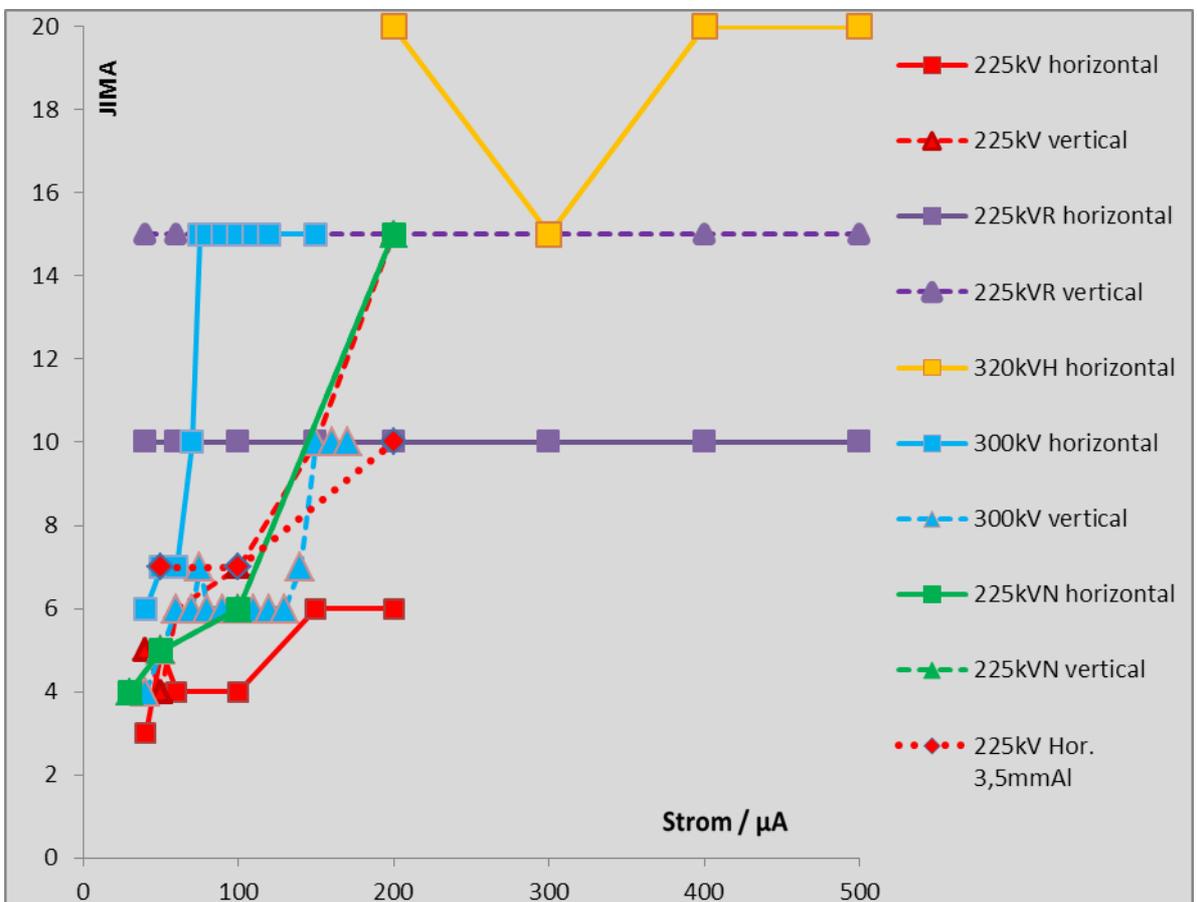


Abb. 9. Auswertung Liniengitters des JIMA-Testkörper vergleichend für verschiedene Röhren bei 190kV.

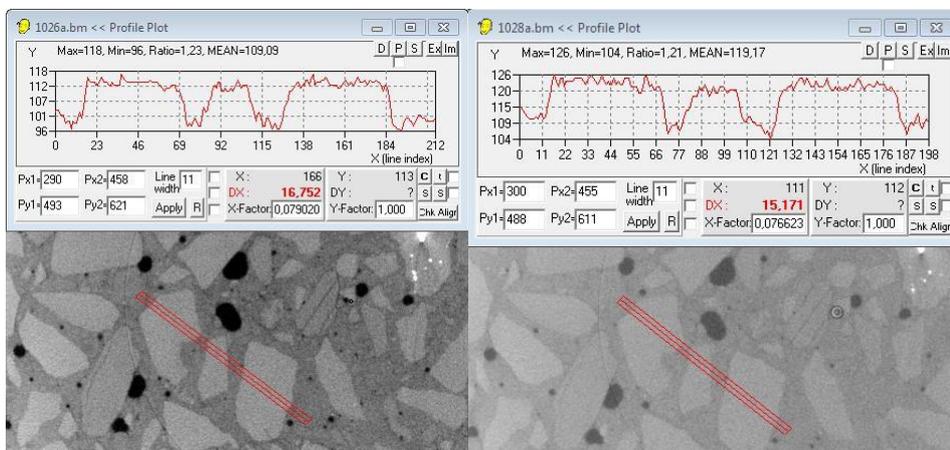
#### 4. Auswertung an einem Testobjekt

Eines unserer Prüfprobleme ist die Untersuchung von Betonproben (Bohrkerne). Dabei sollen sowohl die Steine in der Matrix (hohe Dichteanforderung), als auch kleinstmögliche Risse automatisch bewertet werden. An einem Betonbohrkern mit 70mm Durchmesser wurden Messungen an den verschiedenen Systemen durchgeführt. Dabei wurden Spannung und Strom an die jeweils möglichen Werte angepaßt. Alle Tomogramme wurden wie gemessen rekonstruiert, es erfolgte keine Aufhärtungskorrektur und keine Vorfilterung der Daten. An einem recht großen und homogenen Stein, in jeweils derselben Schnittebene, wurde die Dichteauflösung bestimmt.

**Tabelle 1.** Bestimmung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (SNR) im CT

Nr.	Röhre	Detektorgröße	Spannung /kV	Strom / $\mu$ A	Vorfilter /mm	Meßzeit /h	Bildnr.	SNR
1	225R	1K	190	450	0,5 Cu	1	1026	36
2	225R	2K	190	450	0,5 Cu	5	1027	31
3	300	1K	290	200	1,0 Cu	1	0162	42
4	300	1K	190	200	0,5 Cu	1	0167	41
5	225	1K	190	140	0,5 Cu	1	5603	25 <sup>3</sup>
6	225	2K	190	140	0,5 Cu	13,3	5604	28
7	320H	1K	290	200	3,5 Al	1	1028	30
8	320H	2K	290	200	3,5 Al	5	1029	
9	225N	1K	190	200	0,5 Cu	1	1018	28

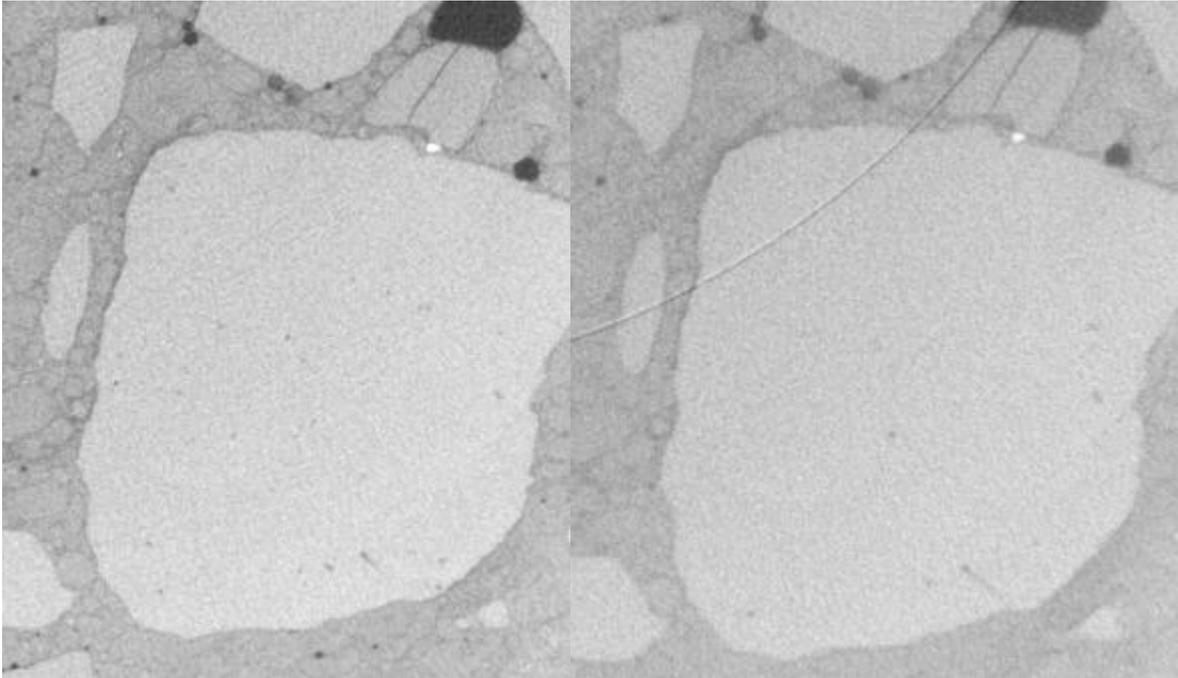
Interessanterweise ergeben sich für die Messung 1 und 7 sehr ähnliche Bilder, selbst der Kontrast in Probenmitte zwischen Stein und Matrix ist bei beiden sehr ähnlich (Abb. 10). Dies gilt genauso für die Messungen 3 und 4.



**Abb. 10.** Vergleich der Messung 1 und 7 aus Tabelle 1: In den Bildern ohne Grauwertspreizung erscheint die Aufnahme mit 190kV mit einem höheren Kontrast, der Schnitt zeigt die Ähnlichkeit beider Messungen.

Kommt es nicht auf die Meßzeit an, so ergibt die CT Aufnahme der „225kV“ Röhre den besten Kompromiß: sowohl Dichte als auch Ortsauflösung sind gut (Abb. 11).

<sup>3</sup> Der verwendete Detektor hat eine höhere Nachweißwahrscheinlichkeit. Deswegen wurde der Strom bei sonst gleichen Einstellungen gegenüber den anderen Messungen reduziert. Ein Umschalten auf die nächst größere Kapazität hätte bessere Werte bei höherem Strom gebracht.



**Abb. 11.** Vergleich der Messung 6 (links) und 2 (rechts) aus Tabelle 1: In den Bildern (ohne Grauwertspreizung) erscheint die Aufnahme links mit einer besseren Ortsauflösung. Der Ringartefakt ist detektorbedingt.

### **Zusammenfassung**

Fünf verschiedene Mikrofokusröhren, die für die Computertomographie verwendet werden, wurden auf Strahlungsleistung und Brennfleckgröße untersucht. Dazu verglichen wurden die Ergebnisse von CT-Messungen an einem Probekörper, und sowohl die Orts- als auch die Dichteauflösung bestimmt. Die Frage nach „mehr Strom oder mehr Spannung“ ist falsch gestellt. Man muß unbedingt die jeweiligen Charakteristika einer Röntgenröhre kennen, wenn man eine zur Anwendung optimale Tomographie erhalten möchte.

### **Danksagung**

Die Dosismessungen wurden in freundlicher Zusammenarbeit mit U. Zscherpel, BAM 8.3 durchgeführt.

### **Referenzen**

- [1] <http://www.biodiversity-exploratories.de/>
- [2] Kuka, K., B. Illerhaus, C.A. Fox and M. Joschko. 2013a. X-ray Computed Microtomography for the Study of the Soil–Root Relationship in Grassland Soils. *gsvadzone* 12: -. doi:10.2136/vzj2013.01.0014.
- [3] <http://jima.jp/english/assen-e.html>