

Ortsauflösung in der Computertomographie – Vergleich von MTF und Linienpaarstrukturen

Andreas STAUDE, Jürgen GOEBBELS
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung,
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin (andreas.staude@bam.de)

Kurzfassung. Anhand von Messungen an geeigneten Prüfkörpern werden die beiden etablierten Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Auflösung von CT-Daten (MTF und Kontrast von Linienpaaren), wie in den entsprechenden Normen beschrieben, durchgeführt und ihre Ergebnisse verglichen.

Einführung

Die räumliche Auflösung einer CT-Messung wird durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt. Wesentlichen Anteil haben daran die Eigenschaften der Teile des CT-Gerätes, wie Röntgenquelle (Brennfleck-Ausdehnung) und der Detektor (Pixelgröße, Streuung), aber auch die gewählte Vergrößerung in Kegelstrahlgeometrie. Die Messstrategie, hauptsächlich die Zahl der Projektionen für die 360°-Drehung, und die Rekonstruktion (Voxelgröße, Interpolation, Filterung) haben auch großen Einfluss. Grundsätzlich beeinflusst auch die Probe die Auflösung, etwa durch Beugung und Brechung der Röntgenstrahlen, aber bei den hier gezeigten Messungen mit typischen μ CT-Parametern spielt sie eine untergeordnete Rolle.

Die Anteile der einzelnen Effekte sind in der Praxis schwer zu bestimmen, aber durch Messung am rekonstruierten Datensatz erhält man die resultierende Auflösung unter Berücksichtigung aller Effekte.

Im folgenden werden die zwei gängigen Methoden zur Bestimmung der räumlichen Auflösung, Berechnung der MTF und Messung des Kontrastes von Linienpaarmustern, vorgestellt, ihre Anwendung auf Datensätze von für beide Methoden geeigneten Testkörpern beschrieben und die Ergebnisse diskutiert.

1. Ermittlung der Auflösung

Zur Ermittlung der räumlichen Auflösung gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten, die auch in den die CT betreffenden Normen beschrieben werden. Dies ist zum einen die Bestimmung der *Modulation Transfer Function* (MTF) aus der Messung der Kante eines Zylinders, zum anderen die Bestimmung des Kontrastes von Material zu Hintergrund in Abhängigkeit von der Strukturgröße der Linienpaare.

1.1 Berechnung der MTF

Die MTF zeigt die Kontrastamplitude in Abhängigkeit von der Ortsauflösung. In der Norm ISO 15708-2:2002 ist beschrieben, wie sie aus der Messung der Kante eines Zylinders berechnet wird (Abbildung 1).



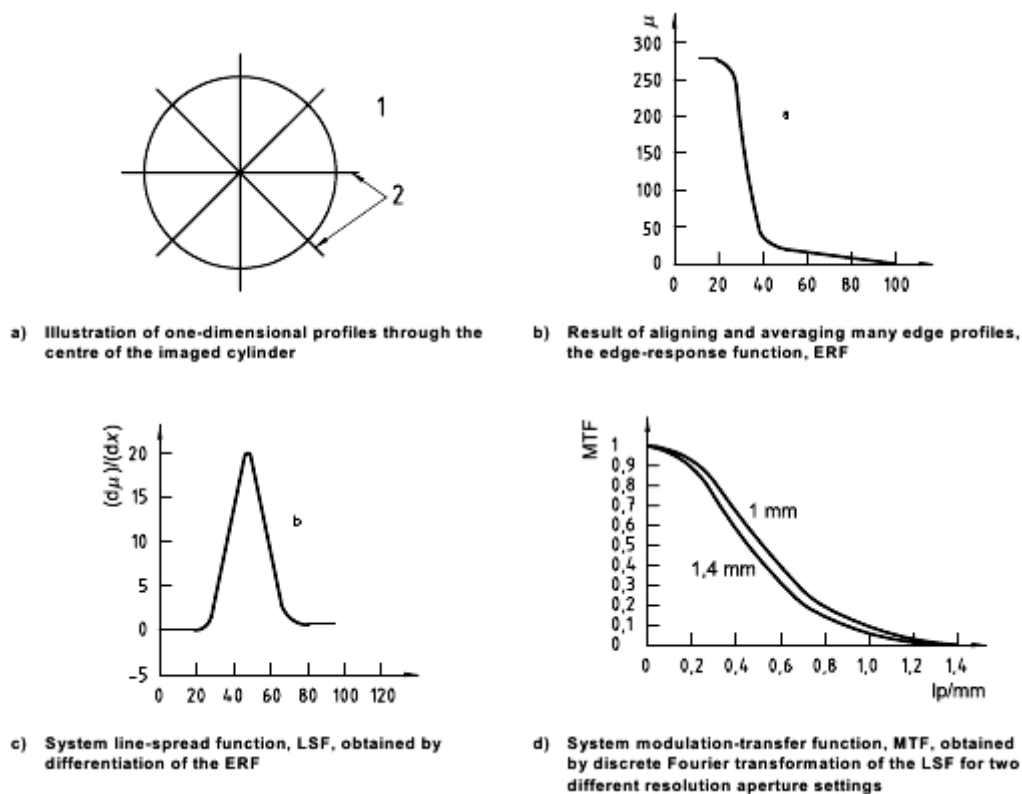


Abbildung 1. Bestimmung der MTF aus der Kante eines rekonstruierten Datensatzes eines mit CT gemessenen Zylinders. (aus ISO 15708-2:2002)

Dazu werden durch den Mittelpunkt des gemessenen Zylinders Profillinien gelegt, die Kantenfunktionen (*Edge Response Function*, ERF) entlang dieser Linien bestimmt (a), aus den gemittelten ERFs (b) durch Ableitung die Linienabbildungsfunktion (*Line Spread Function*, LSF) errechnet (c) und zum Schluss die MTF durch Fourier-Transformation der LSF ermittelt (d).

Eine alternative Berechnungsmethode der MTF direkt aus der ERF wurde in [1] beschrieben. Bei den hier betrachteten Messungen ergaben beide Verfahren nahezu identische Resultate.

Die Konvention besagt, dass die MTF auf 1 normiert wird und in Linienpaaren pro mm (LP/mm) angegeben wird.

1.2 Ermittlung der räumlichen Auflösung aus Linienpaarstrukturen

Als Alternative zur Ermittlung der räumlichen Auflösung durch Berechnung der MTF nennt die Norm FprEN 16016-3:2010 (document CEN/TC 138 N 1153, Annex A) die Berechnung eines Kontrastfaktors als Funktion der Auflösung ermittelt an Linienpaarstrukturen. In der Norm werden Linienpaarstrukturen vorgestellt, die aus zwischen Material und Luft wechselnden Strukturen jeweils gleicher Breite und quadratischer Form bestehen und in Zylinder von 65 mm Durchmesser eingebracht sind (Abbildung 2).

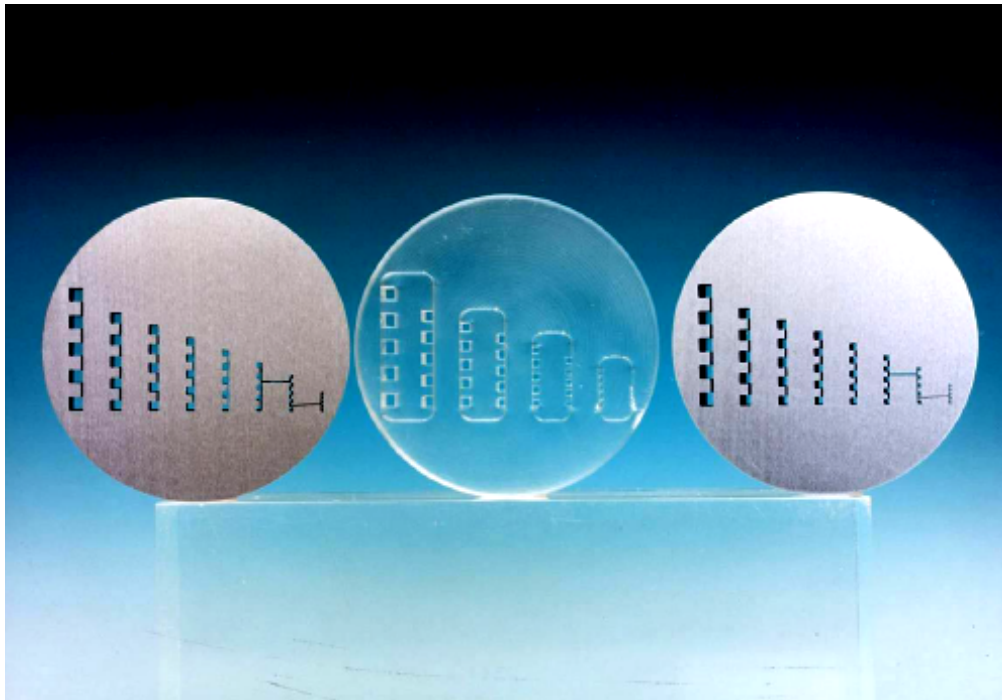


Abbildung 2. Prüfkörper mit Linienpaarstrukturen (von links nach rechts: Aluminium, Plexiglas, Stahl, aus FprEN 16016-3:2010)

Die acht unterschiedlichen Strukturgrößen liegen im Bereich von 0,4 mm bis 2,5 mm, was einer Auflösung von 1,25 LP/mm bzw. 0,2 LP/mm entspricht.

Zur Bestimmung des Kontrastes wird lt. Norm ein Linienprofil durch eine Linienpaarstruktur im rekonstruierten Volumen gelegt und die Grauwertminima ($N_A(i)$) in den Aussparungen bzw. die Grauwertmaxima ($N_B(i)$) an den Materialbrücken ermittelt (Abbildung 3).

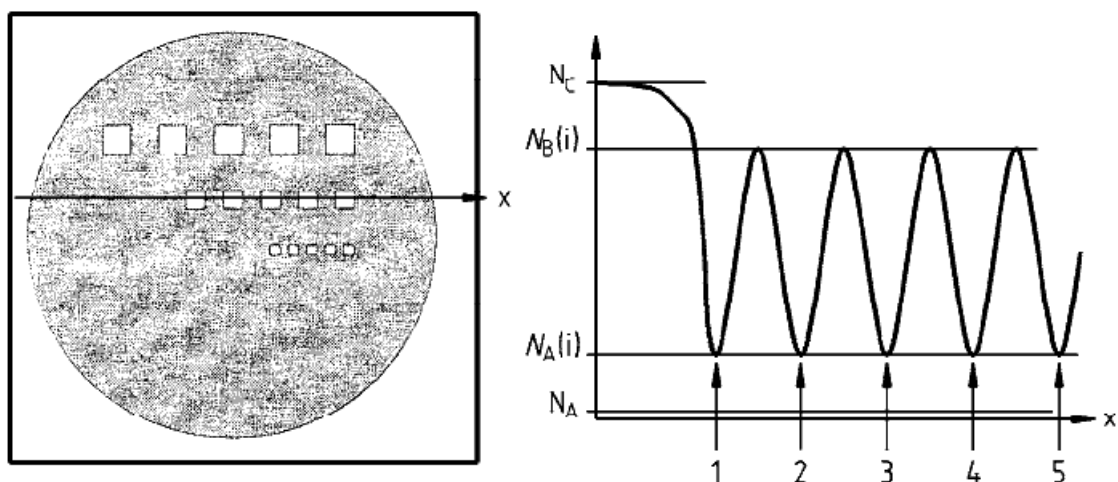


Abbildung 3. Bestimmung der Grauwerte an den Linienpaarstrukturen (aus FprEN 16016-3:2010)

Der Kontrastfaktor $R(i)$ ist dann die auf den Grauwertkontrast des ungestörten Materials N_A zum ungestörten Hintergrund N_C normierte Differenz der Maxima $N_B(i)$ und Minima $N_A(i)$, multipliziert mit 100 (Gleichung A.1 in FprEN 16016-3:2010):

$$R(i) = \frac{N_B(i) - N_A(i)}{N_C - N_A} \times 100$$

3. Vergleich beider Verfahren

Die in der Norm FprEN 16016-3:2010 gezeigten Prüfkörper sind Zylinder mit eingebrachten Linienpaarstrukturen. Daher eignen sie sich für die Bestimmung der räumlichen Auflösung mit beiden oben beschriebenen Verfahren. Die im Folgenden gezeigten Messungen wurden an den in Abbildung 4 gezeigten beiden, an der BAM gefertigten, Prüfkörpern aus Messing bzw. Aluminium durchgeführt.

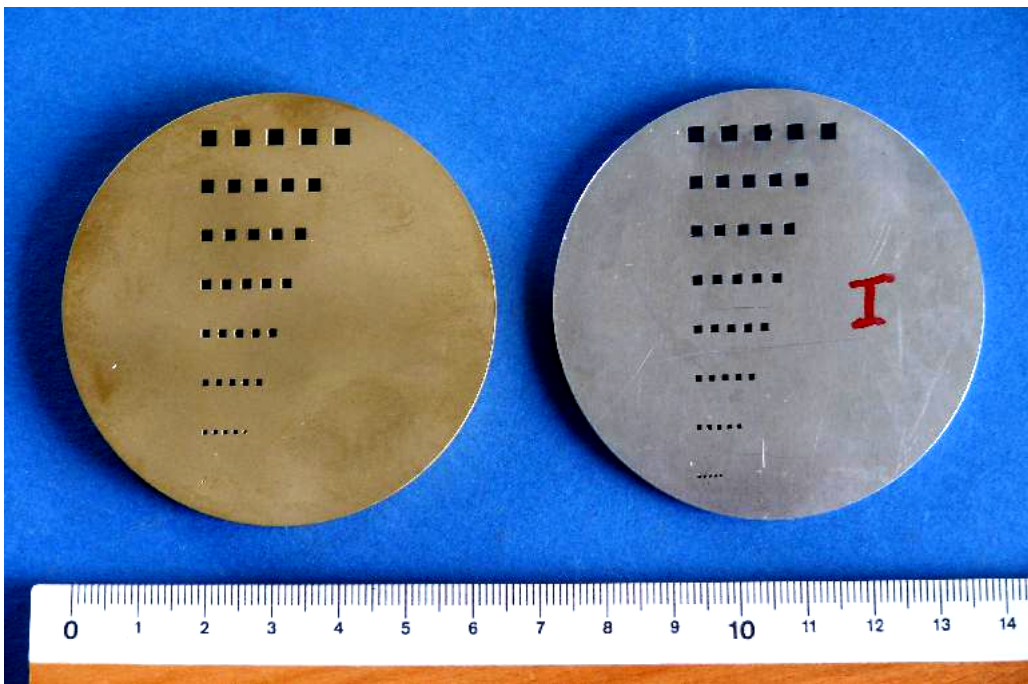


Abbildung 4. Die an der BAM gefertigten Prüfkörper aus Messing (links) und Aluminium (rechts)

3.1 Messung am Messing-Prüfkörper

Die Messung am Messingkörper wurde mit dem 12-MeV-Linac der BAM durchgeführt. Dabei wurde ein Vorfilter von 20 mm Eisen verwendet, die Vergrößerung betrug 1,38 und die resultierende Voxelgröße ist 0,145 mm. Für die Auswertung wurde der Datensatz so rekonstruiert, dass die Linienpaare parallel zum Voxelraster ausgerichtet sind. Um zu untersuchen, welchen Einfluss eine Aufhärtungskorrektur auf die Messung der räumlichen Auflösung hat, wurde sowohl der originale als auch der aufhärtungskorrigierte Datensatz ausgewertet.

Um die MTF aus dem Kantenprofil des Zylinders bestimmen zu können, wurde in der betrachteten Schnittebene senkrecht zur Zylinderachse sein Mittelpunkt durch Anpassen eines Kreises an den Umriss ermittelt. Entlang verschiedener Linien durch den Mittelpunkt wurden die Grauwertprofile bestimmt, das gemittelte Kantenprofil errechnet und daraus die MTF erzeugt.

Im Kapitel zur Bestimmung der Auflösung anhand der Linienpaarstrukturen in der FprEN 16016-3:2010 steht geschrieben, dass nicht mehrere Linienprofile gemittelt werden

sollen („These two values are measured using a grey-level profile determined along the hole axis and unaveraged.“). Dieser Punkt ist insofern unverständlich, als dass durch eine Mittelung von am Voxelraster ausgerichteten Linienpaarstrukturen keine die Auflösung reduzierende Interpolation nötig ist. Durch eine Mittelung kann jedoch ein höheres Signal-zu-Rausch-Verhältnis erreicht und der Nutzereinfluss (Auswahl eines einzelnen Profils) reduziert werden. Für die Auswertung werden im Folgenden gemittelte Linienprofile verwendet.

Weiterhin ist in der Norm nicht geregelt, wie die einzelnen Extrema bestimmt werden sollen. Bei dem hier vorliegenden Datensatz bietet es sich an, an die Maxima bzw. Minima Gauß-Kurven anzupassen (Abbildung 5).

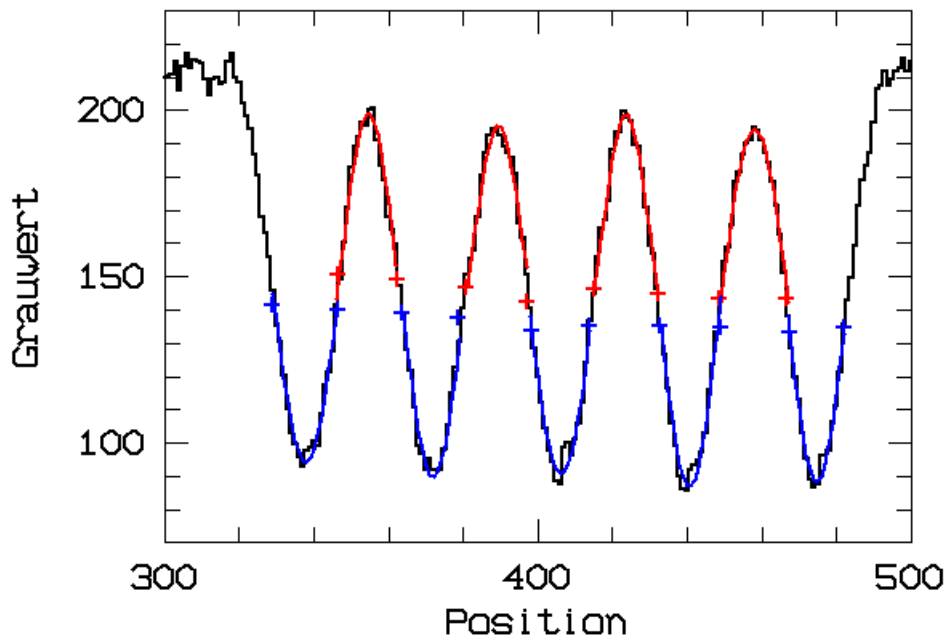


Abbildung 5. Anpassung von Gauß-Kurven an die Maxima (rot) bzw. Minima (blau).

Durch Mittelung der Maxima der Gauß-Kurven erhält man nun die für die Berechnung von R erforderlichen Werte $N_B(i)$ bzw. aus den Minima die $N_A(i)$. Die Bereiche zur Bestimmung der für die Normierung nötigen Grauwerte des ungestörten Materials N_A bzw. des Hintergrunds N_C sind in Abbildung 6 markiert.

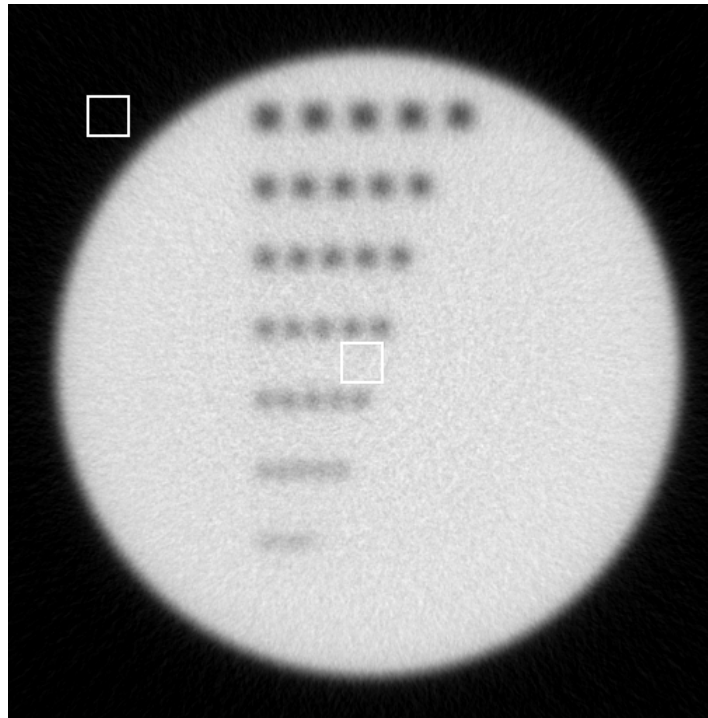


Abbildung 6. Lage der Bereiche zur Bestimmung der Grauwerte des ungestörten Materials bzw. des Hintergrunds.

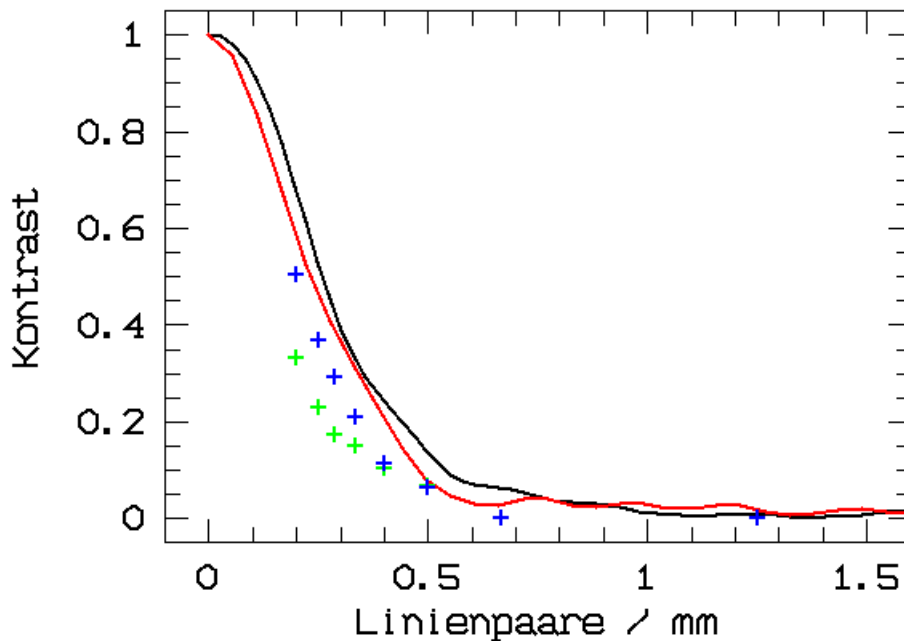


Abbildung 7. Am Messingprüfkörper ermittelte MTF (schwarz: nicht aufhärtungs-korrigiert, rot: aufhärtungskorrigiert) und Kontrastfaktor $R/100$ (blau: aufhärtungskorrigiert, grün: nicht aufhärtungskorrigiert).

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Auflösungsbestimmung am Messingprüfkörper. Zwecks Vergleichbarkeit mit der MTF wird dort $R/100$ gezeigt und die Auflösung in LP/mm angegeben.

Der Verlauf der beiden MTFs ist nahezu identisch, so dass die Aufhärtungskorrektur auf ihre Berechnung hier keinen Einfluss zu haben scheint. Die

Werte von R aus den Linienpaaren sind deutlich kleiner als die entsprechenden MTF-Werte, wobei zusätzlich ein großer Unterschied zwischen den beiden R -Kurven festzustellen ist. Die Abweichungen sind hauptsächlich auf die Normierung der Kontrastwerte zurückzuführen. Während die MTFs ganz am Ende der Berechnung auf 1 normiert werden, wird R auf die gemessene Differenz der Grauwerte von ungestörtem Material und Luft normiert. Durch Streustrahlung und Aufhärtung werden aber z.B. die Grauwerte im Inneren des Prüfkörpers, vor allem in den Aussparungen, immer von den erwarteten abweichen.

3.2 Messung am Aluminium-Prüfkörper

Die Messung am Aluminium-Prüfkörper wurde auf der BAM-225kV- μ CT-Anlage durchgeführt. Die Beschleunigungsspannung betrug 200 kV, als Vorfilter wurde 1 mm Kupfer verwendet. Die resultierende Voxelgröße beträgt $35,8 \mu\text{m}$ bei einer Brennfleckgröße von etwa $8 \mu\text{m}$ und einer Vergrößerung von 5,6. Auch dieser Datensatz wurde mit und ohne Aufhärtungskorrektur ausgewertet.

Nach Ermittlung des Kreismittelpunktes in der Mittelebene der Messung (Abbildung 8) wurde über das gemittelte Kantenprofil die MTF errechnet.

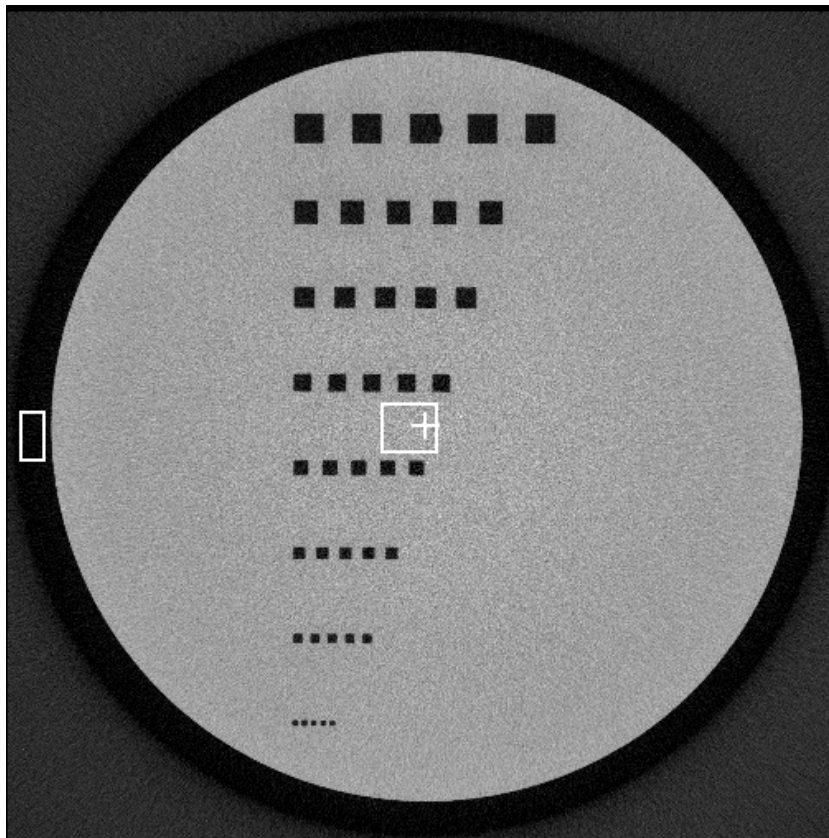


Abbildung 8. Der mit Aufhärtungskorrektur rekonstruierte Datensatz des Aluminiumprüfkörpers. Der Mittelpunkt des angepassten Kreises und die Bereiche für die Bestimmung der Grauwerte des ungestörten Materials und des Hintergrunds sind markiert.

Für die Bestimmung der Auflösung an den Linienpaaren wurde jeweils wieder über mehrere Linienprofile gemittelt, um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Bei dieser Messung zeigen die gemittelten Linienprofile eine rechteckförmige Modulation. Daher ist es nicht sinnvoll, zur Bestimmung der Extrema Gauß-Kurven anzupassen, sondern die lokalen Extrema durch Anpassen von Linien zu ermitteln (Abbildung 9).

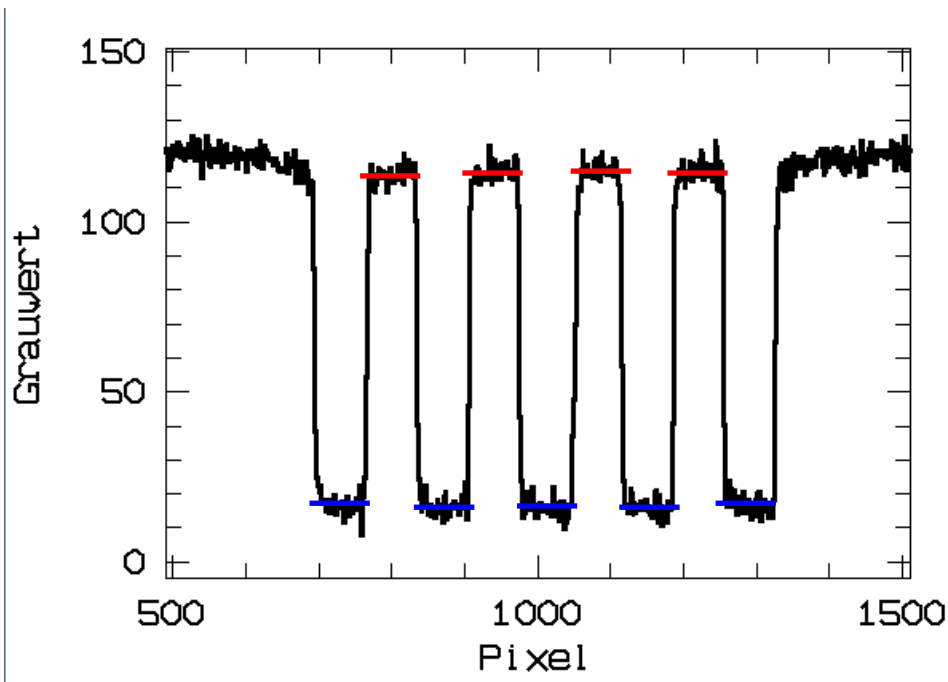


Abbildung 9. Bestimmung der Minima (blau) bzw. Maxima (rot) am gemittelten Linienprofil der Messung am Aluminiumprüfkörper.

Durch Mittelung der einzelnen Maxima bzw. Minima erhält man wiederum die Werte $N_B(i)$ und $N_A(i)$. Die Bereiche zur Bestimmung der für die Normierung nötigen Grauwerte des ungestörten Materials N_A bzw. des Hintergrunds N_C sind in Abbildung 8 markiert.

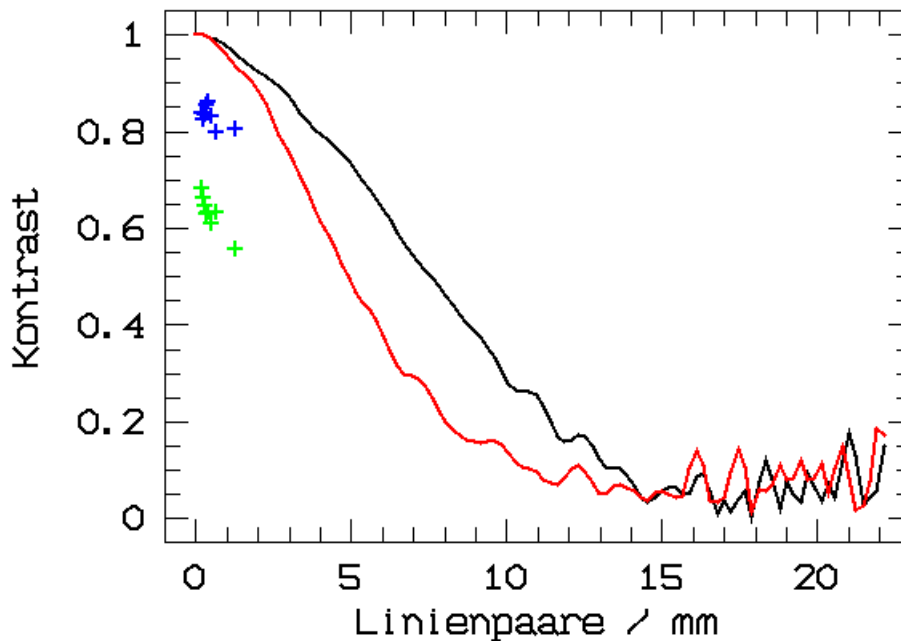


Abbildung 10. Ergebnisse der Auflösungsbestimmung am Aluminiumprüfkörper (schwarz: nicht aufhärtungskorrigiert, rot: aufhärtungskorrigiert) und Kontrastfaktor $R/100$ (blau: aufhärtungskorrigiert, grün: nicht aufhärtungskorrigiert).

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Auflösungsbestimmung für die Messung am Aluminiumprüfkörper. Die dem Kontrastwert 0,2 entsprechende Auflösung von etwa 11 LP/mm, ermittelt am nicht aufhärtungskorrigierten Datensatz (schwarze Kurve), liegt mit ungefähr 1 LP pro 2,5 Voxel nahe an der theoretisch maximal möglichen Auflösung.

Es fällt der große Unterschied zur am aufhärtungskorrigierten Datensatz bestimmten MTF (rote Kurve) auf. Dieser lässt sich durch die bei der Aufhärtungskorrektur stattfindende Veränderung der Grauwerte in den Projektionsdaten erklären. Bei der hohen Auflösung dieser Messung findet der Übergang Kante zu Material auf etwa einer Pixellänge statt. Die Grauwerte angeschnittener Pixel werden aber bei der Aufhärtungskorrektur mit *look-up table* (LUT) wie Regionen geringer durchstrahlter Dicke behandelt und im Grauwert verändert. Dies führt im rekonstruierten Datensatz zu einer unschärferen Kante des Zylinders und damit zu schlechteren MTF-Werten.

Die an den Linienpaarstrukturen ermittelten Kontrastwerte häufen sich nahe der Null und geben keinen Aufschluss über die bei der Messung erreichte Auflösung, etwa wenn man Kontrastwerte von 0,2 oder 0,5 als „die Auflösung der Messung“ betrachtet. Einmal mehr wird klar, dass die Werte von MTF und R nicht wirklich vergleichbar sind, da R nicht wie die MTF auf Eins normiert wird und so immer eine geringere Auflösung vorspiegelt.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Beschreibung der Ermittlung der Ortsauflösung anhand von Linienpaarstrukturen in der FprEN 16016-3:2010, die hier zur Grundlage der Auflösungsbestimmung gemacht wurde, weist einige Unklarheiten auf und lässt viel Interpretationsspielraum. So ist nicht klar, warum Profile durch die rekonstruierten Linienpaarstrukturen nicht zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses gemittelt werden sollen. Völlig offen ist, wie die Maxima und Minima in den jeweiligen Linienprofilen zu bestimmen sind. Außerdem ist noch ein Druckfehler enthalten: So soll der Grauwert für das Umgebungsmaterial aus einem Bereich „*located at the centre of the reference part*“ bestimmt werden.

Beim Vergleich der an identischen Datensätzen ermittelten MTFs und Kontrastfaktoren R wird offensichtlich, dass Linienpaare für die Bestimmung der räumlichen Auflösung von Mikro-CT-Anlagen nur begrenzt geeignet sind, da die benötigten Strukturgrößen von deutlich unter einem Millimeter nicht zu fertigen sind. Die Fertigung eines hinreichend genauen Zylinders und die Ermittlung der MTF an ihm sind hingegen immer möglich. Als Prüfkörper für Makro-CT-Anlagen ergeben Linienpaare jedoch nahezu identische Auflösungen wie die MTF aus der Zylinderkante.

Die deutlich schlechter erscheinenden Werte der Kontrastfaktoren R im Vergleich zur MTF sind durch die jeweils verwendeten Normierungen bedingt.

Die Verwendung von aufhärtungskorrigierten Datensätzen zur Auflösungsbestimmung bietet keinen Vorteil bei Messungen mit Brennflecken deutlich größer als die an den Ort der Drehachse skalierten Detektorpixel. Bei wesentlich kleineren Brennflecken, wie sie bei Messungen auf Mikro-CT-Anlagen vorhanden sind, hat die Aufhärtungskorrektur negative Auswirkungen auf die Grauwerte der Objektkante in den Projektionen, die zu einer Verschmierung der Zylindermantelfläche führt und die MTF verschlechtert.

Um eine aussagekräftige MTF zu erhalten, muss der Mittelpunkt des Zylinders im rekonstruierten Datensatz mit hoher Genauigkeit ermittelt werden, da ansonsten bei der Mittelung von Linienprofilen durch den falschen Mittelpunkt die Kante verschmiert würde.

Bei beiden hier gezeigten Messungen lag der Prüfkörper nahezu zentriert auf die Drehachse in der Mittelebene. Die eventuelle Orts- und Richtungsabhängigkeit der räumlichen Auflösung wurde hier nicht untersucht. Außerdem wurde die Auflösung mithilfe der MTF bei einem anderen Abstand von der Drehachse als bei den Linienpaaren bestimmt.

Referenzen

[1] Schneiders, N. J. & Bushong, S. C.: Single-step calculation of the MTF from the ERF, Medical Physics, 1978, 5, 31-33