

Entwicklung eines modifizierten IQI-Standards für additiv hergestellte (AM) metallische Strukturteile und die Ermittlung relevanter Bildgüteparameter für die digitale Röntgentechnik

Stefan NEUHÄUSLER ¹, Andreas FISCHERSWORRING-BUNK ¹,
Josef SPACHTHOLZ ¹

¹ MTU Aero Engines, München

Kontakt E-Mail: Stefan.Neuhaeusler@mtu.de

Kurzfassung. Bei der additiven Herstellung von metallischen Strukturteilen kann es prozessbedingt zu AM-typischen Fehlstellen kommen. Charakteristisch für solche Fehlstellen ist ihre abgeflachte Defektgeometrie. Die Häufigkeit des Auftretens von Bindefehlern (LoF Lack of Fusion) hängt von Prozessparametern und Maschinentyp ab. Eine effektive zerstörungsfreie Volumenprüfung ist daher von entscheidender Bedeutung. CT ist der sog. „Goldstandard“, stellt jedoch bei größeren Ni-Komponenten sowie bei ausgedehnten bionischen Strukturen eine technische und wirtschaftliche Herausforderung dar. Für Gussteile werden standardmäßig Image Quality Indicators (IQI) verwendet. Die IQI sind u. a. standardisiert in ASTM-E1025-18: „Standard Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiography“. Diese können jedoch nicht ohne weiteres für metallische AM-Bauteile zum Bildgütenachweis verwendet werden. Um AM-Bauteile mit 2D- μ F-Röntgen prüfen zu können, bestand der Bedarf geeignete IQIs zu entwickeln und idealerweise zu standardisieren. Es wurden über 100 LoF-Defekte mit manipulierten Prozessparametern erzeugt und charakterisiert. Durch hochauflösende μ F-CT-Scans wurden die LoF in ihrem Volumen dargestellt und klassifiziert. Eine quaderförmige Darstellung von LoF wird aus der Regressionsanalyse des Durchschnitts abgeleitet. Die so abgeleitete quaderförmige Ersatzfehlergröße (Cuboid-Type-IQI) kann in Standard-IQIs (Hole-Type-IQI) oder direkt in Bauteile eingebracht werden. An diesen Ersatzfehlern können die erforderlichen Mindest-Bildgüteparameter für das digitale Röntgen (SNR-Normiert; CNR) ermittelt werden. Dieser Beitrag diskutiert einen Vorschlag zur Weiterentwicklung des Hole-Type-IQI-Standards für charakteristische AM-Defekte (LoF). Eine Möglichkeit zur Herstellung von Cuboid-Type-IQIs sowie die Ermittlung und Festlegung der Bildgüteparameter für die digitale Röntgenprüfung werden gezeigt.

1 Ausgangslage

Additiv mit dem SLM-Prozess hergestellte Bauteile können prozessbedingt sog. Bindefehler und Poren enthalten. Sind diese Fehlstellen kritisch, dann müssen Sie durch eine Volumenprüfung ausreichend sicher gefunden werden können. Eine hochauflösende digitale Mikro-Fokus Röntgentechnik ist dafür geeignet.

2 Definitionen und Festlegungen

2.1 AM (*Additive Manufacturing*)

Die Bezeichnung AM (*Additive Manufacturing* / Additive Fertigung) ist ein sog. 3D-Druck-Verfahren. AM zeichnet sich durch das Grundprinzip des schichtweisen Aufbaus eines Bauteils aus. Die Formgebung geschieht dabei in der x-y-Ebene durch die Erstellung einzelner äquidistanter Schichten. Mit dem Aufeinanderschichten der Einzelschichten wächst das Bauteil in die z-Dimension.

2.2 SLM (*Selective Laser Melting*)

Der Begriff SLM, *Selective Laser Melting* (dt. Selektives Laserstrahlschweißen) bezeichnet ein generatives Verfahren zur Fertigung von metallischen Bauteilen. Als Halbzeug dient Pulver, welches durch einen Schieber aus einem Reservoir in gleichmäßigen Schichten aufgetragen wird. Ein Laser bringt Energie in das Metallpulver, welches lokal aufgeschmolzen wird. Die Positionierung des Lasers erfolgt über zwei orthogonal zueinander ausgerichtete, motorgetriebene Spiegel. Das Schmelzbad erstarrt bei der Abkühlung zu einem festen Werkstoff.

2.3 Mikro-Erodieren

Erodieren ist ein Bearbeitungsverfahren, bei welchem elektrisch leitendes Material (in diesem Fall IN718 SLM) durch elektrische Entladung (Elektroerosion bzw. Funkenerosion) abgetragen wird. Das bearbeitende Werkzeug berührt dabei nicht das Werkstück. Die Bezeichnung Mikro-Erodieren beschreibt hochpräzise Bearbeitungsmethoden. Genauigkeiten von $<1\mu\text{m}$ sind realisierbar.

2.4 Mikro-Fokus (μF) Röntgentechnik

Beim Mikro-Fokus-Röntgen können hohe Vergrößerungen in Abhängigkeit der Brennfleckgrößen (Fokus) von Röntgenröhren realisiert werden. Durch kleine Brennflecke werden auch bei Vergrößerungen geringe Unschärfen erzielt. Durch die Kombination von μF -Röntgenröhren mit digitalen Detektoren (Pixelgröße $100\mu\text{m}$) können geometrische Auflösungen von $<10\mu\text{m}$ erreicht werden.

2.5 IQI (*Image Quality Indicator*)

Bildgüte-Prüfkörper BPK (engl. IQI, Image Quality Indicator) werden auch als Penetrameter bezeichnet. Sie werden eingesetzt um die Bildgüte eines Röntgenbildes nachzuweisen und Abweichungen in der Prüftechnik festzustellen.



2.6 RQI (*Representative Quality Indicator*)

Die Verwendung von RQIs stellt eine deutliche Abweichung von der normalen Praxis in der industriellen Radiografie dar, da es sich nicht um ein Standarddesign handelt, das von der Anwendung, dem Material und dem Verfahren abhängt und daher keine einfache Platte oder Draht sein kann. Die Verwendung eines RQI liefert den dokumentierten Nachweis, dass radiografische Bilder das erforderliche Qualitätsniveau haben (räumliche Auflösung und Kontrastempfindlichkeit im interessierenden Bereich).

2.7 Mindestanforderungen an das Röntgensystem

Bei einem digitalen Röntgensystem muss die Vergrößerung so gewählt werden, dass das geforderte Bildgütelevel an einem Bildgüteprüfkörper mit einer erforderlichen Mindestanzahl von Pixeln abgebildet wird. Bei etablierten Röntgentechniken werden dazu sog. Hole-Type IQIs (gem. ASTM E1025 oder ASTM E1742) verwendet. Bei AM-Bauteilen werden bei MTU eigens dafür entwickelte Cuboid-Type-IQIs (siehe 2.10) verwendet. Dabei muss eine bestimmte Bildqualität erreicht werden.

2.8 Ersatzfehlergrößen

Als Ersatzfehlergrößen werden Quader mit abgeleiteten Abmaßen (Z; X; Y;) ermittelt. **Abb. 2.1** beschreibt die quaderförmige Ersatzfehlergröße. Dies ist notwendig, damit Referenzkörper reproduzierbar mit Testfehlern versehen werden können und um die detektierten Fehlergrößen vergleichen und bewerten zu können. Die Koordinate Z repräsentiert die Höhe (Öffnung) eines Bindefehlers in Aufbaurichtung. Die Koordinaten X und Y beschreiben den restlichen Quader. Sie haben zueinander immer die gleiche Länge und beschreiben als Fläche ein Quadrat. Die Diagonale des Quadrats entspricht dabei der längsten Fehlerausdehnung.

Die Abmaße X und Y der quaderförmigen Referenzfehler orientieren sich an den IQIs gem. ASTM E1025.

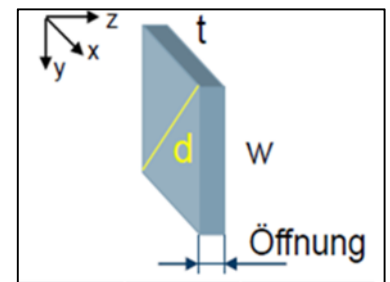


Abb. 2.1. Ersatzfehlergröße

2.9 Bildgüteanforderungen für AM-Bauteile

Zwei Bildgüteparameter werden in diesem Manuskript beschrieben, da sie von den bisher in der Luft- und Raumfahrt geforderten Werten der gültigen Spezifikationen abweichen. Für AM-gefertigte Bauteile müssen strengere Werte herangezogen werden. Es handelt sich dabei um SNR_N (Signal to Noise Ratio Normalized; Signal-Rauschverhältnis Normiert) und Mindest-CNR (Minimum Contrast to Noise Ratio; Mindest-Kontrast-Rausch-Verhältnis).

2.9.1 SNR_N (*Signal to Noise Ratio Normalized*)

Die Definition SNR_N ist in der ASTM-E2737, Abs. 9.4.4 beschrieben. Das SNR_N muss in einer ROI (Region of Interest) von mindestens 50 x 50 Pixeln (wenn möglich in einem gleichförmigen Bereich auf dem Prüfobjekt) ermittelt werden. Ein kleineres ROI von 20 x 20 Pixeln kann auch verwendet werden, wenn es in der Prüfverfahrensnorm beschrieben ist. Der für AM-Bauteile geforderte Wert beträgt $SNR_N=150$. Die Ermittlung des SNR_N wird stark von der Oberflächenrauigkeit beeinflusst. Es muss sichergestellt sein, dass die AM-gefertigten Bauteile einen ausreichend geeigneten Oberflächenzustand haben.

2.9.2 Mindest-CNR (Minimum Contrast to Noise Ratio)

Die Definition CNR ist in der ASTM-E2737, Abs. 9.2 beschrieben. Für die Messung des CNR an AM-Bauteilen wird ein Cuboid-Type-Penetrameter (siehe 2.10) auf einer repräsentativen Stelle des Prüfobjekts auf (mittels IQI) bzw. eingebracht (mittels Mikro-Erodieren). Die Position soll so ausgewählt werden, dass keine Objekt-Strukturen die relevanten quaderförmigen Referenzfehler überdecken und dass kein störender Grauwert-Gradient im Bereich der Quader die Messung stört. Aus dem erstellten Röntgenbild wird die Sichtbarkeit des Quaders, also das CNR, ermittelt. Die Ermittlung des CNR ist in **Abb. 2.2** dargestellt.

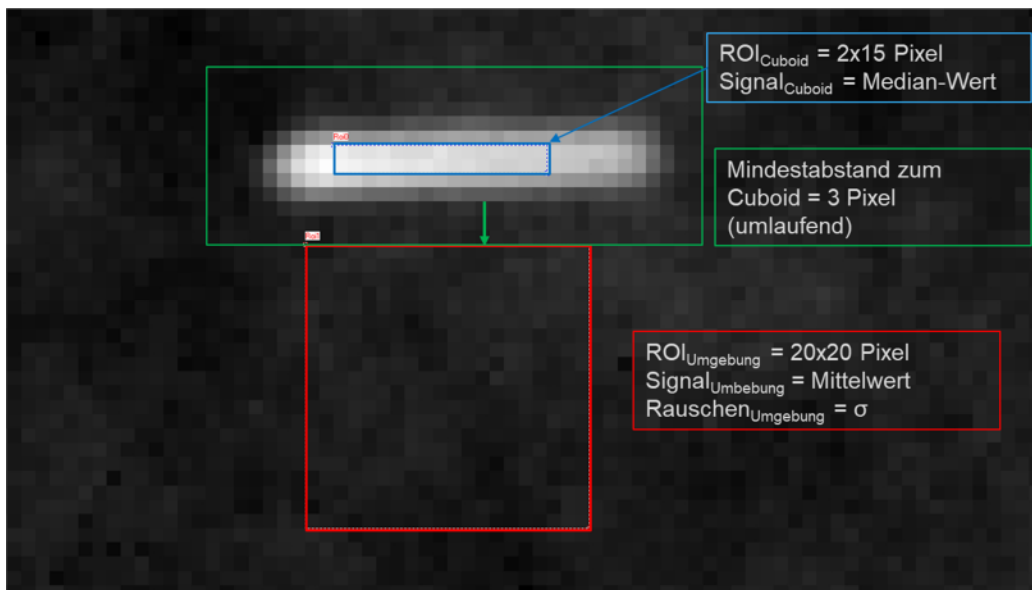


Abb. 2.2. Festlegung der ROIs zur CNR-Berechnung

Die Berechnung des CNR erfolgt nach folgender Formel:

$\text{CNR} = \frac{\text{Signal}_{\text{Cuboid}} - \text{Signal}_{\text{Umgebung}}}{\text{Rauschen}_{\text{Umgebung}}}$	<p>CNR</p> <p>Signal_{Cuboid}</p> <p>Signal_{Umgebung}</p> <p>Rauschen_{Umgeb}</p>	<p>-Kontrast-Rausch-Verhältnis</p> <p>-Median-Wert aller Bildpunkte im ROI_{Cuboid}</p> <p>-Mittelwert aller Bildpunkte im ROI_{Umgebung}</p> <p>-Standardabweichung σ aller Bildpunkte im ROI_{Umgebung}</p>
--	--	---

Das CNR ist an 16-Bit Rohdaten zu ermitteln. Die angewandte Röntgentechnik muss eine maximale Bildunschärfe von 32 μ m erreichen. Dies ist mit dem Doppeldrahtsteg gem. DIN EN ISO 19232-5 (D-18) nachzuweisen und entspricht einer Basis-Ortsauflösung von 16 μ m. Es ist ein ROI in die Anzeige des Quaders mit mind. 2 x 15 Pixeln zu legen. Innerhalb dieses ROI_{Cuboid} ist der Medianwert (Signal_{Cuboid}) der vorhandenen Grauwerte zu ermitteln.

Des weiteren ist ein ROI, mit einem Mindestabstand von 3 Pixeln von der Anzeige des Quaders, in die Umgebung der Anzeige (mit einer Mindestgröße von 20 x 20 Pixeln) zu legen. Innerhalb dieses ROI_{Umgebung} ist der Mittelwert der dort vorhandenen Grauwerte und die Standardabweichung σ aller Bildpunkte zu ermitteln.

Der Quader gilt als sicher erkannt, wenn das CNR **größer als 10** ist.

2.10 Bildgüte-Prüfkörper

2.10.1 Bildgüte-Prüfkörper (Cuboid-Type-IQI)

Cuboid-Type-Penetrameter werden bei MTU für additiv gefertigte Bauteile verwendet. Bei additiv gefertigten Bauteilen können andere Fehlerarten als bei gegossenen Metallbauteilen entstehen. Beim Gießen entstehen im Allgemeinen Poren, Lunken, etc. Bei der additiven Fertigung entstehen andere Fehlerarten z. B. Bindefehler. Diese sind eher flach, also rissähnlich und weisen ein deutlich geringeres Volumen auf. Um diese Art von Fehlern standardisiert nachzubilden wurden die Cuboid-Type-Penetrameter entwickelt. Cuboid-Type-Penetrameter sind den sog. Loch-Penetrametern (Hole-Type-Penetrameter) sehr ähnlich. Sie unterscheiden sich jedoch geometrisch vom jeweiligen kontrastbildenden Element. Beim Loch-Penetrameter sind das kreisförmige Bohrungen (auch „Löcher“ genannt). Bei Cuboid-Type-Penetrametern sind die kontrastbildenden Elemente quaderförmig, daher die Bezeichnung. Die Länge des Schlitzes entspricht in der Regel auch immer der Tiefe, also der Dicke des Penetrameters. Die Schlitzbreite kann dann auf dem jeweiligen Penetrameter variiert werden. Die daraus resultierende Form und das Volumen entsprechen so in guter Näherung den sog. Bindefehlern. Die Penetrameter können auch je nach Anforderung an das Qualitätslevel der Röntgentechnik angepasst werden. Die Cuboid-Type-Penetrameter wurden von MTU entwickelt und sind noch nicht genormt. Die folgenden **Abb. 2.3** und **Abb. 2.4** zeigen ein entsprechendes Penetrameter mit zugehöriger Röntgenaufnahme.



Abb. 2.3. Cuboid-Type-IQI

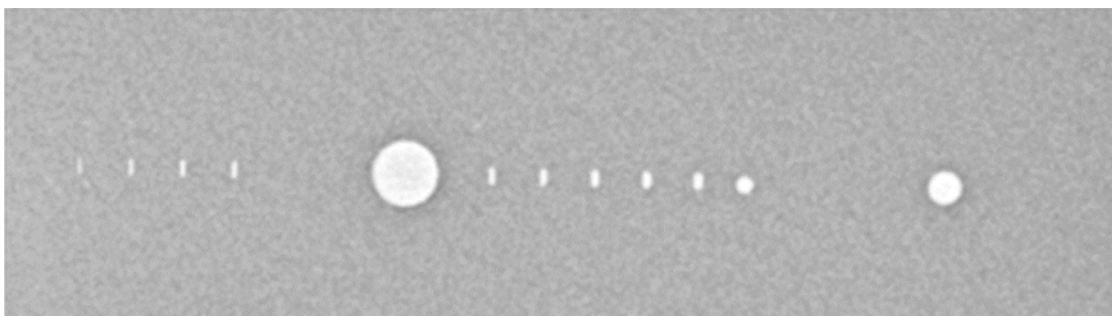


Abb. 2.4. Röntgenbild Cuboid-Type-IQI

2.10.2 Cuboid-Type-RQI [Testkörper / Representative-Quality-Indicator]

In strukturemechanisch kritische Bauteilbereiche können die IQI-Quader direkt in die interessierende Stelle eingebracht werden. Dies kann mittels Laserbearbeitung oder durch Mikro-Erodieren realisiert werden. Die eingebrachten quaderförmigen Vertiefungen entsprechen in ihren Abmaßen den Cuboid-Type-IQIs.

Abb. 2.5 zeigt eine Mikroskopaufnahme von zwei direkt in ein Testbauteil eingebrachten quaderförmigen Schlitzen sowie eine Mikrobohrung. Die Bohrung ist durch einen Aircraft-Marker farblich (Lila) gekennzeichnet und dient der Orientierung auf dem Testkörper.

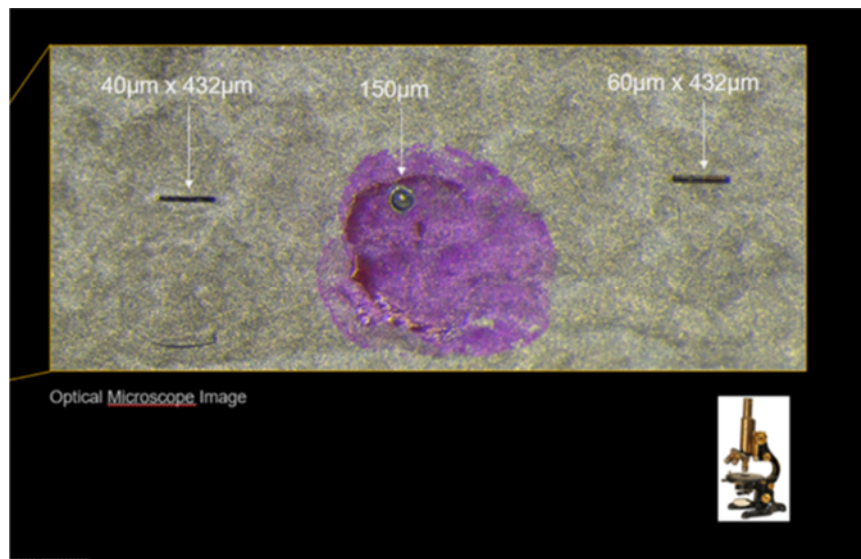


Abb. 2.5. Mikroskopaufnahme RQI, direkt in Bauteil eingebracht

Die erodierten Quader sind in diesem Beispiel 40µm bzw. 60µm breit. Dies repräsentiert einen Bindefehler in einem AM-Bauteil parallel zur Aufbaurichtung. Die Länge und Tiefe betragen in diesem Fall 432µm. Die Mikrobohrung repräsentiert eine Pore mit dem Durchmesser 150µm. Die Größe der eingebrachten Ersatzfehler variiert von Bauteil zu Bauteil. Die Limits werden je nach Bauteilauslegung vorgegeben.

3 Untersuchung der Testkörper (RQIs) mit µF-Röntgen

3.1 Bildgütenachweis für das Volumenprüfverfahren µF-Röntgen

Die Bildgütenachweise für das Volumenprüfverfahren µF-Röntgen hängen u. a. von folgenden Parametern ab:

Röntgensystem; Bauteil (Gefüge, Oberfläche); Prüfpersonal;

3.2 Verifikation der eingebrachten Referenzfehler mit μ F-CT

Die in die AM-gefertigten Bauteile eingebrachten Referenzfehler wurden durch eine hochauflösende μ F-CT bestätigt.

Eine optische Vermessung der Tiefe von $>400\mu\text{m}$ der Quader mit Schlitzbreiten von ca. $40\mu\text{m}$ ist sehr aufwändig. Die Messgenauigkeit einer μ F-CT-Anlage ist aufgrund der Toleranzen, die für IQI und RQI gelten, ausreichend und damit deutlich wirtschaftlicher.

Die vorgegebene Sollgeometrie der Referenzfehler wurde erreicht. Die in ASTM-Normen angegebenen Toleranzen von $\pm 10\%$ sind eingehalten. Zur Überprüfung der Schlitzbreite (Öffnung in „Z“) wurde ein Lichtmikroskop mit Messskala verwendet. Die vorgegebenen Schlitzbreiten von $60\mu\text{m}$ bzw. $40\mu\text{m}$ wurden bestätigt. **Abb. 2.5** zeigt exemplarisch die Überprüfung der Schlitzbreiten sowie der eingebrachten Bohrung mittels Lichtmikroskop. Die Bohrung ist markiert. Diese Überprüfung wird immer bei allen eingebrachten Referenzfehlern durchgeführt.

3.3 Ermittlung des Bildgütelevels durch IQI mit μ F-Digital-Radioskopie

Die Untersuchungen der Referenzteile mit μ F-DR erfolgte ebenfalls mit einer μ F-CT-Anlage.

Anmerkung: Eine CT-Anlage kann auch als Radioskopie-Anlage verwendet werden.

An ebenen Bauteilgeometrien kann der Bildgütenachweis durch direktes Auflegen des jeweiligen IQI auf das zu untersuchende Bauteil geführt werden.

Die schematische Prüfanordnung sowie die Prüfparameter sind aus **Abb. 3.1** ersichtlich.

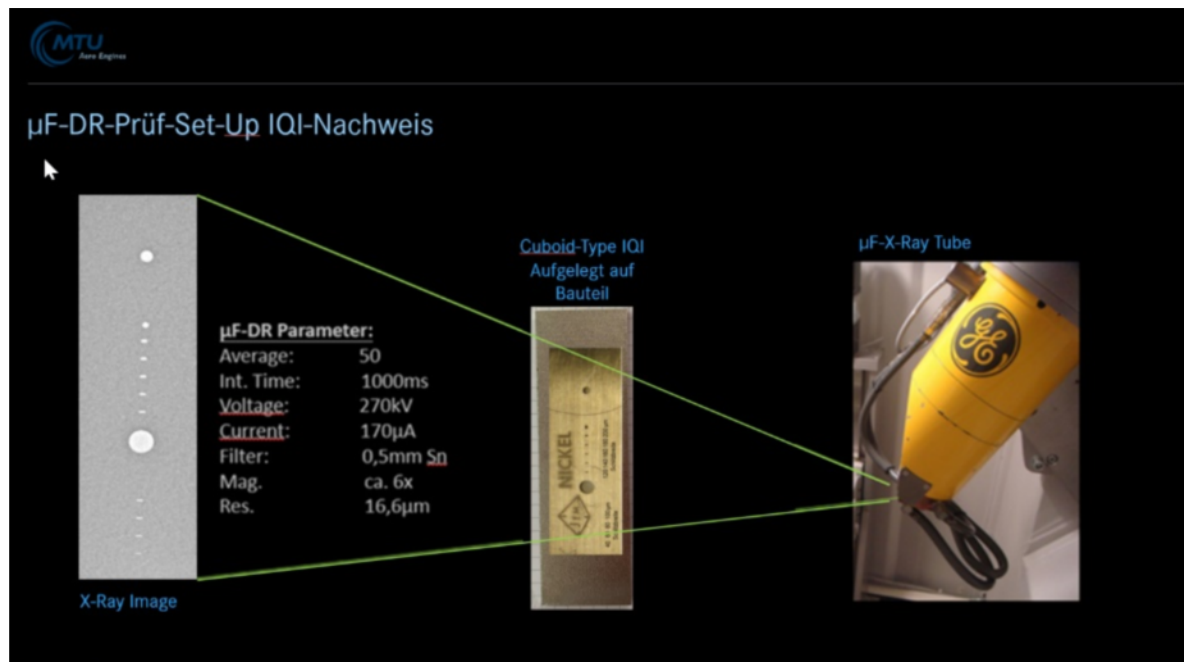


Abb. 3.1. Schematische Prüfanordnung inklusive Prüfparameter

Ein geforderter Schlitz (Bildgüteforderung) gilt als detektiert, wenn er deutlich mit einem **CNR von >10** sichtbar ist. Kann der nächst kleiner breite Schlitz ebenfalls mit einem **CNR >10** detektiert werden, dann ist der geforderte Schlitz abgesichert und gilt als ausreichend sicher detektiert.

Anmerkung:

Die in dieser Dokumentation dargestellten Röntgenaufnahmen entsprechen nicht den Anforderungen der Auflösung von Röntgen-Auswertesystemen. Dies ist technisch bedingt, da Office-Systeme nur 8-Bit Datentiefe auf Monitoren und Ausdrucken darstellen können.

Relevant für die Bewertung von Röntgenbildern ist immer die durchgeführte Auswertung an zugelassenen Röntgen-Auswertesystemen.

3.4 Ermittlung des Bildgütenachweis durch RQI mit μF -Digital-Radioskopie

Muss der Bildgütenachweis an nicht ebenen Bauteilstrukturen oder an kritischen Bereichen erbracht werden, können die IQI (quaderförmig oder zylindrisch) direkt in das Bauteil eingebracht werden. Dann spricht man von einem RQI (Representative Quality Indicator). Für die Bildqualität gelten die gleichen Werte wie bei Verwendung von IQIs. In **Abb. 3.3** erkennt man direkt in ein AM-Bauteil eingebrachte Quader und eine Mikro-Bohrung mit Durchmesser $150\mu\text{m}$. Mit Mikrobohrungen kann man Poren repräsentieren. Die Oberfläche wurde durch Abrasiv-Strahlen bearbeitet. **Abb. 3.2** zeigt das μF -Röntgenbild.

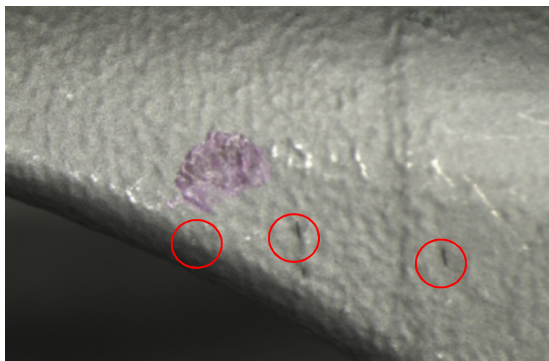


Abb. 3.3. RQI (Quader $40\mu\text{m}$; $60\mu\text{m}$; Bohrung $150\mu\text{m}$)

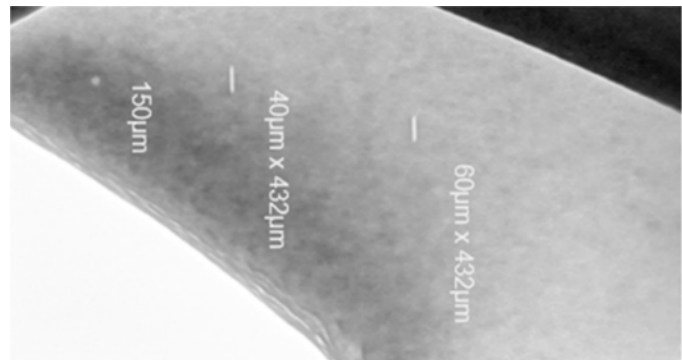


Abb. 3.2. μF -DR-Aufnahme

Ein geforderter Schlitz (Bildgüteforderung) gilt als detektiert, wenn er deutlich mit einem CNR von >10 sichtbar ist. Kann der nächst kleiner breite Schlitz ebenfalls mit einem CNR >10 detektiert werden, dann ist der geforderte Schlitz abgesichert und gilt als ausreichend sicher detektiert. In diesem Beispiel ist der $60\mu\text{m}$ breite Cuboid durch den $40\mu\text{m}$ breiten Cuboid abgesichert.

3.5 Zusammenfassung und Ausblick

Untersuchungen haben gezeigt, dass quaderförmige Volumen, sog. Cuboids reale Bindefehler gut repräsentieren. Dies kann in Form eines IQI oder RQI erfolgen. Mittels Mikrobohrungen können Poren repräsentiert werden. Die Größe der quaderförmigen Volumen hängt von der Belastung des jeweiligen Bauteils ab und muss strukturmechanisch (mit Abschlagsfaktoren) festgelegt werden. Durch diese quaderförmige Normierung kann der IQI oder RQI reproduziert werden. Die Abmaße orientieren sich an den IQI der Normenreihe ASTM-E-1025. Das Ziel dieser Arbeit ist einen Standard zu schaffen, welcher Bildgüte-Prüfkörper für metallische AM-Bauteile repräsentiert. Diese Arbeit wurde erstmalig auf der "ASTM Int. Conference on Additive Manufacturing: AM applications in Aviation" in Orlando, USA, 2022 mit dem Titel:

<Use of a modified IQI Standard - a way forward in NDI of metallic AM parts?>
präsentiert.

Eine Mitarbeit im DIN-Gremium NA 145-04-01 AA "Additive Fertigung - Querschnittsthemen/Digitalisierung" sowie in der internationalen Joint Group 59 des ISO/TC 261 ist geplant.

Die in dieser Dokumentation angegebenen „Fehlergrößen“ geben nur Beispiele wieder und können nicht verallgemeinert werden.