

Essentielle Parameter zur numerischen Abschätzung der Sichtbarkeit von Bildgüteprüfkörpern in der digitalen Radiographie

Uwe EWERT¹, Uwe ZSCHERPEL¹, Fangzhou ZHANG², Nghiem Xuan LONG³,
Nguyen PHONG³

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² Dresden International University (DIU), Dresden


³ Center for Non-Destructive Evaluation, (NDE); Vietnam Atomic Energy Institute (VINATOM); Ministry of Science and Technology (MOST), Hanoi, Vietnam

Kontakt E-Mail: uwe@ewert-net.de

Kurzfassung

Die Voraussetzungen für die Vorhersage der Sichtbarkeit von Bildgüteprüfkörpern (BPK) wurden seit Beginn der kommerziellen Anwendung der technischen Radiographie diskutiert und in diversen nationalen und internationalen Standards festgeschrieben. Diese Fragen werden nach Einführung der digitalen Radiographie und der CT wieder neu diskutiert. Draht BPKs wurden in Deutschland seit 1935 (DIN 1915: 1935) und später in den meisten europäischen Ländern benutzt. In den USA und Frankreich wurden vorzugsweise BPKs mit Löchern verwendet (ASTM E 1025 seit 1984 oder E 1742 seit 1992 bzw. die Vorgängernorm MIL STD-543 seit 1962). Jetzt werden auch die Umrechnungsnormen zur Erkennbarkeit von Draht zu Loch-BPKs in Frage gestellt. ISO 19232-3, der französische RCCM-Kode einerseits und ASTM E 747 und ASME BPVC Section V Tab. T-276 andererseits unterscheiden sich erheblich bei den Anforderungen im Bereich hoher Wandstärken (Hochenergierradiographie). Untersuchungen dazu werden vorgestellt. Mit Einführung der digitalen Detektoren ändern sich auch die Rauschspektren. Durch die Herstellung werden insbesondere bei Speicherfolien "Rauschmuster" eingeprägt, die bei hohen Belichtungs Dosen sichtbar werden. Diese veränderten Rauschspektren ergeben auch veränderte Erkennungsparameter für menschliche Bildauswerter. Hierzu wurden an ausgewählten Detektoren MTFs (presampled) und normierte Rauschspektren gemessen. Erweiterte Erkennbarkeits-Formeln zur Vorhersage der Sichtbarkeit von BPKs für Bildauswerter und erste Ergebnisse werden vorgestellt.





BAM
Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Sicherheit in Technik und Chemie


9. Mai 2018, Jahrestagung, Leipzig

**ESSENTIELLE PARAMETER ZUR NUMERISCHEN
ABSCHÄTZUNG DER SICHTBARKEIT VON
BILDGÜTEPRÜFKÖRPERN UND KLEINEN ANZEIGEN IN DER
DIGITALEN RADIOGRAPHIE**

U. Ewert¹, U. Zscherpel¹, F. Zhang², N.X. Long³, T.P. Nguyen³

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Germany
² Dresden International University, Germany
³ NDE Center, VINATOM, Hanoi, Vietnam

uwe.ewert@bam.de




BAM

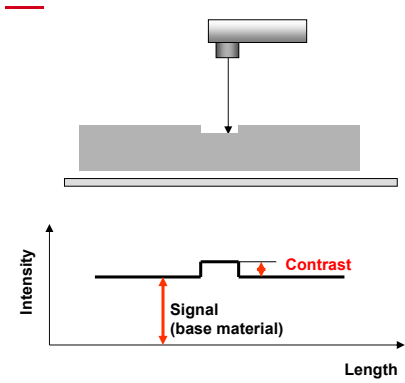
Outline

- Bildqualität in der Radiographie
- Beobachtermodell nach Rose
- **Essentielle Systemparameter für die Sichtbarkeit von Löchern**
 - Basisortsauflösung (SR_b^{image}),
 - SNR and SNR_N ,
 - Relativer spezifischer Kontrast und effektiver Schwächungskoeffizient.
- **Charakterisierungsstandards für CR-Systeme and DDA-Systeme.**
- Äquivalente Penetrametersensivität (EPS) and Nachweiswahrscheinlichkeit (probability of detection - POD)
- Drahterkennbarkeit vs. Locherkennbarkeit (ISO 19232-3, ISO 17636-2 vs. ASME BPVC Sect. V article 2 , ASTM E 747-10)
- **Erweitertes Beobachtermodell basierend auf presampled Modulation Transfer Funktionen (MTF) und normalisierter Rausch-Powerspektren (NNPS)**

09.05.2018 Bildqualität in der Radiographie 2

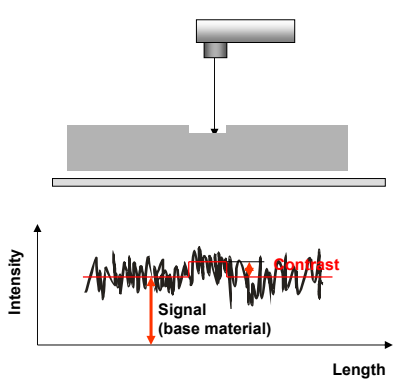
Einfluss des Bildrauschens auf die Detailerkennbarkeit





Nut sichtbar!

**Kontrast/ Rauschen ist hoch
Signal/ Rauschen ist hoch**




Nut nicht sichtbar!

**Kontrast/ Rauschen ist niedrig
Signal/ Rauschen ist niedrig**

09.05.2018
Bildqualität in der Radiographie
3

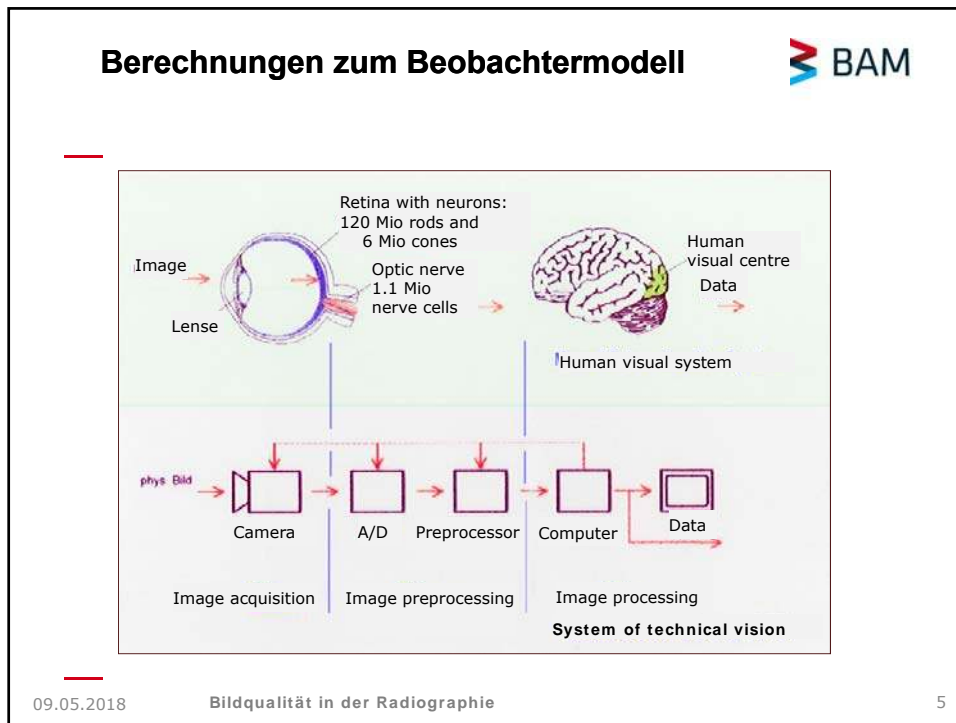
Rauschquellen in radiographischen Bildern



Typische Rauschquellen in der digitalen Radiographie

- **Photonenrauschen** – ändert sich mit der *Wurzel der Belichtungsdosis* (z.B. mA·s or GBq·min)
- **Strukturrauschen** (Fluktuation der Empfindlichkeit der strahlungsempfindlichen Schicht bzw. der Detektorelemente) ändert sich *proportional zur Belichtungsdosis*
- **Rauschquellen im Testobjekt**
 - **Kristalline Struktur** des Materials (z.B. nickelbasierte Legierungen, Mottling)
 - **Oberflächenrauheit** des Prüfobjektes (z.B. Gussteile)

09.05.2018
Bildqualität in der Radiographie
4



Das Beobachtermodell nach Rose und der Erkennbarkeitsschwellwert (Perception Threshold PT) BAM

Flat bottom holes of different depth and diameter
 $SR_b \text{ image} = 50 \mu\text{m}$

Rauschen (σ) = 1000
 Signal = 30000

Detektor = 50 μm Pixelgröße (oder Vergrößerungstechnik)

CNR = 2.5 → $A_{lateral}$

CNR = 1.25

CNR = 0.625

2T = 0.5 mm / 0.02"
 Berechnet $CNR_{min} = 1$

- Großflächige Anzeigen sind besser sichtbar als kleine bei gleichem CNR
- Jede Zeile hat Anzeigen mit gleichem CNR = C_{depth}/σ
- Jede Spalte hat Löcher mit gleichem Durchmesser

$$PT_{const} = \frac{\sqrt{A_{lateral}} \cdot C_{depth}}{SR_b \cdot \sigma}$$

Rose-Näherung, 1946

PT - Menschlicher Beobachtergrenzwert
 $A_{lateral}$ - Fläche der gerade noch erkennbaren Anzeige
 C_{depth} - Mittlerer Kontrast der gerade noch erkennbaren Anzeige
 σ - Bildrauschen (Standardabweichung)
 SR_b - Basisortsauflösung (effektive Pixelgröße)

Essentielle Parameter zur Berechnung von gerade noch sichtbaren Bildgütestestkörpern für 1T-Löcher BAM

Die essentiellen Parameters sind: μ_{eff} , SNR and SR_b^{image}

Observer-Formel

$$d_{visible} = PT' \cdot \sqrt{\frac{SR_b^{image}}{\mu_{eff} \cdot SNR}}$$

SNR - Signal zu Rauschverhältnis
 μ_{eff} - spezifischer Kontrast, (effektiver Schwächungskoeffizient)
 SR_b^{image} - effektive Pixel-Größe im Bild, (Basisortsauflösung im Bild)

Material, keV, Strahlenquelle
 Streustrahlung
 Folien und Filter

Belichtungszeit
 Röhrenstrom, Aktivität
 Detektoreffizienz
 Quelle zu Detektor-Abstand

PT' ≈ 2,8 for 1T-holes ; etwas abhängig von Betrachtungsbedingungen und Operator

Neues CR-Charakterisierungsschema BAM

Neue Charakterisierung durch Performance-Levels in ASTM E 2446-15

CR System Performance Levels	Required Minimum SNR _N (Normalized to SR _b =88.6 μm)	Permitted Maximum iSR _b ^{detector} Value [μm]	Permitted Maximum EPS by E746 [%] ^A
CR Special	200	50	1.00
CR Level I	100	100	1.41
CR Level II	70	160	1.66
CR Level III	50	200	1.92

CR level II example:
 EPS = 1.4 %
 with $\mu_{eff} = 0.05 \text{ mm}^{-1}$, $SNR_N = 100$,
 $PT = 200$, $t_{testplate} = 19 \text{ mm}$

$$EPS = \frac{200\%}{19\text{mm}} \sqrt{\frac{0.0886}{0.05 \cdot 100}}$$

$$EPS = \frac{PT'}{t_{testplate}} \sqrt{\frac{SR_b^{image}}{\mu_{eff} \cdot SNR}}$$

09.05.2018 Bildqualität in der Radiographie 8

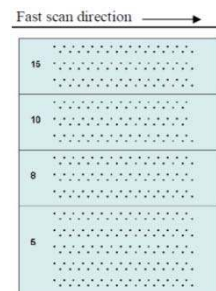
EPS Charakterisierung von CR-Systemen - ASTM EPS Procedure E 746 -



Die EPS – Prozedure wurde akzeptiert zur CR-Qualifizierung in *ASTM E 2445/6* und *“Practice for the Use of Computed Radiography for Aerospace Casting Inspections”* (USA: MAI – group, *Guidelines for the Use of DDA and CR for Aerospace Casting Inspections*)

➤ Die EPS-Messung (equivalent penetrameter sensitivity) basiert auf der ASTM E 746

- Eine glatte $\frac{3}{4}$ inch (19 mm) Stahlplatte mit einem Satz von Lochplatten wird bei 200 kV durchstrahlt (Abstand SOD ≥ 1 m)
- Die Durchstrahlung wird mit verschiedenen mAs-Einstellungen zur Bestimmung des Arbeitsbereiches ausgeführt



ASTM E 746

09.05.2018

Bildqualität in der Radiographie

9

Beispiel: EPS-Test mit HD CR Scanner, HD IP und der Datenerfassung mit 20 μ m Pixelgröße



09.05.2018

Bildqualität in der Radiographie

10

Sichtbarkeit der EPS-Löcher (E 746) BAM

Sehen Sie die Löcher?

CNR ≈ 0.8

09.05.2018
Bildqualität in der Radiographie
11

Arbeitsbereich für ein CR-System (ASTM E 2445/ 6, MAI) BAM

EPS= equivalent penetrameter sensitivity (siehe ASTM E 746, E 747, E 1025)

09.05.2018
Bildqualität in der Radiographie
12

POD mittels EPS



Die EPS-Methode und die POD-Methode (\hat{a} vs. a) haben Ähnlichkeiten

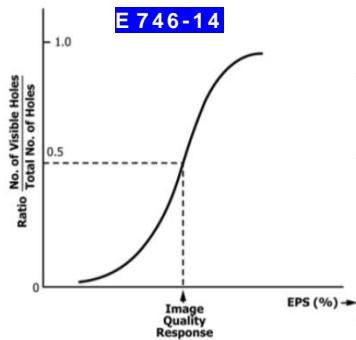


FIG. 4 Graph Method for Determining RIQI

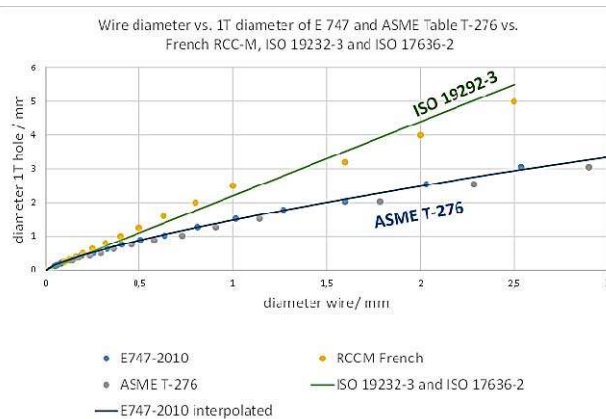
- Die Sichtbarkeit von Löchern hängt vom Durchmesser, Kontrast und Rauschen ab.
- Prozedur: Auszählen der sichtbaren Löcher von 30 vorhandenen Löchern innerhalb der verschiedenen Reihen und Berechnung der Erkennbarkeit in %.
- Graphische Darstellung der prozentualen erkannten Löcher in % (\hat{a}) als Funktion der EPS-Platten-Werte (a) zur Ermittlung des $POD_{50\%}$ - Wertes.

09.05.2018

Bildqualität in der Radiographie

13

Draht- vs. Locherkennbarkeit



- Verschiedene internationale Standards verwenden verschiedene Umrechnungen von äquivalenter Drahtstärke zu Lochdurchmessern.
- Beide wurden validiert - eine ist voraussichtlich falsch.
- BAM hat die ISO-Konversionsformel mit gutem Resultat bewertet.
- Daher wurde nur die Locherkennbarkeit im folgenden bewertet.

09.05.2018

Bildqualität in der Radiographie

14

Testresultate für verschiedene digitale Systeme BAM

- Das **Rose**konzept basiert auf "weißem Rauschen", aber praktische Resultate sind von den gemessenen presampled MTFs und den Rauschspektren abhängig.
- Die Änderung von PT' in Abhängigkeit von gemessenen MTFs und Rauschspektren wurde untersucht.
- Zusätzlich wurde auch die EPS-Abhängigkeit von der Streustrahlung berücksichtigt.

Beispiel: Berechnete und gemessene EPS [%] **Dexela 1512NDT, CsI, 75 μ m**

— Measured EPS — Calculated

PV ~ 6600
 aSNR_N = 700
 aEPS = 0.6%
 SR_b = 0.08 mm
 225 kV
 19 mm steel
 PT' = 230

09.05.2018 Bildqualität in der Radiographie 15

Ergebnisse für verschiedene digitale Systeme: 1x DDA, 2x CR BAM

PT' sollte 200 betragen! Empfindlich gegen Streustrahlung, wenn $\mu_{eff} < 0.05 \text{ mm}^{-1}$

System	SR _b detector average mm	PT'	Contrast $\mu_{eff} \text{ mm}^{-1}$	aSNR	aSNR _N	aEPS %
DDA Dexela CsI	0.081	230	0.05	650	720	¹ 0.59
IP standard	0.098	280	0.038	270	265	1.41
IP high resolution	0.077	280	0.036	130	145	1.85
						¹ calculated

25,5%
09.05.2018 Bildqualität in der Radiographie

- Kann nicht mit Rose-Konzept erklärt werden.
- Rauschspektren sind erforderlich
- Die Bildqualität von Speicherfolien ist begrenzt durch das Strukturrauschen bei Belichtung mit höheren Dosiswerten.

09.05.2018 Bildqualität in der Radiographie 16

MTF und SNR als Funktion der Ortsfrequenz BAM

- Die **Kontrastantwort** wird gemessen über die *presampled Modulation Transfer Function (MTF)*.
- Die **Rauschantwort** wird gemessen über das *normalized noise power spectrum (NNPS)*.
- Das in der „Public Domain“ verfügbare Tool **“DQE panel v7“** für ImageJ wurde benutzt.
- Bilder mit **“weißem Rauschen“** und **frequenzbegrenztem Rauschen** wurden simuliert mit Matlab (keine Streustrahlung, kein Shading) um die Prozedur von **“DQE panel v7“** zu validieren.
- **Zwei CR-Systeme und ein DDA-System** wurden bewertet um die Unterschiede bei den gemessenen PT⁻-Werten zu untersuchen.

Bilder mit pixelbegrenzter Unschärfe (e.g. digitalisierter Film) und weißem Rauschen als Funktion der Ortsfrequenz

MTF hor

Radial

Rosekonzept gültig

09.05.2018 Bildqualität in der Radiographie 17

MTF und SNR als Funktion der Ortsfrequenz BAM

Frequenzlimitierte Bilder, gefiltert with 2x2 moving average filter (e.g. digitized film)

MTF (x,y)

SNR radial

CNR

$\mu_{\text{eff}} = 1 \text{ mm}^{-1}$
 $\Delta w = 1 \text{ mm}$

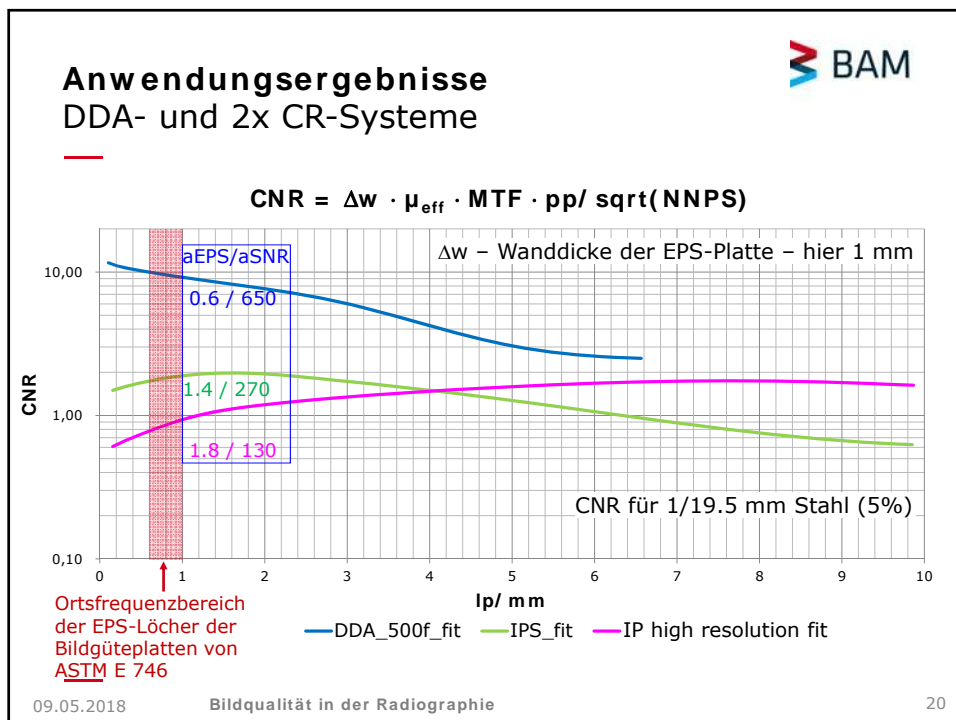
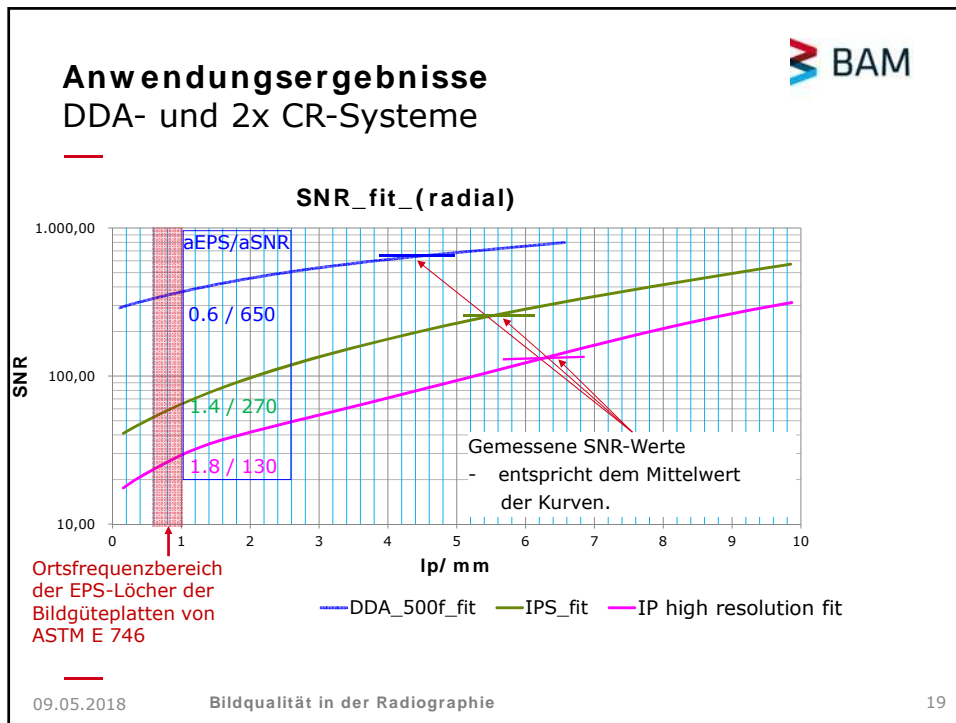
- Das Bild mit weißem Rauschen hat ein SNR = 300
- Nach Anwendung eines Filters ist das gemessene SNR = 600
- Die folgenden Formeln wurden verwendet:

$$SNR(fs) = \frac{pp}{\sqrt{NNPS}}$$

pp – pixel pitch
fs – spatial frequency

$$CNR(fs) = \Delta w \cdot \mu_{\text{eff}}(fs = 0) \cdot MTF(fs) \cdot SNR(fs)$$

09.05.2018 Bildqualität in der Radiographie 18



Erkennbarkeit von Lochplatten-BPKs in verrauschten Bildern



- Die Erkennbarkeitsberechnung basiert auf einem erweiterten Rose-Konzept.
- Die Näherung zur Berechnung der Sichtbarkeit ist gültig für Loch-Bilder mit Durchmessern < 12 mm und mindestens 2x2 Pixeln in der Lochanzeige von rauschbehafteten Bildern.
- Eine Sichtbarkeitsfunktion (Visibility function "V") wird berechnet:

$$V(fs) = (d_{hole}/SR_b^{image}) \cdot CNR(fs, \Delta w)/(2 \cdot fs)$$

- Die Lochanzeige ist sichtbar, wenn $V > PT'(EPS_shim_thickness \Delta w)$ ist.
- Das **CNR(fs)** wird hier berechnet für eine Lochplattendicke von 1mm mit Löchern verschiedener Durchmesser (0.5 – 0.81 mm) über einer Absorberplatte von 19 mm Dicke wie in ASTM E746 beschrieben.
- Verschiedene PT'-Werte werden berechnet basierend auf der Dicke der EPS-Platten in mm (siehe ASTM E 746).

09.05.2018

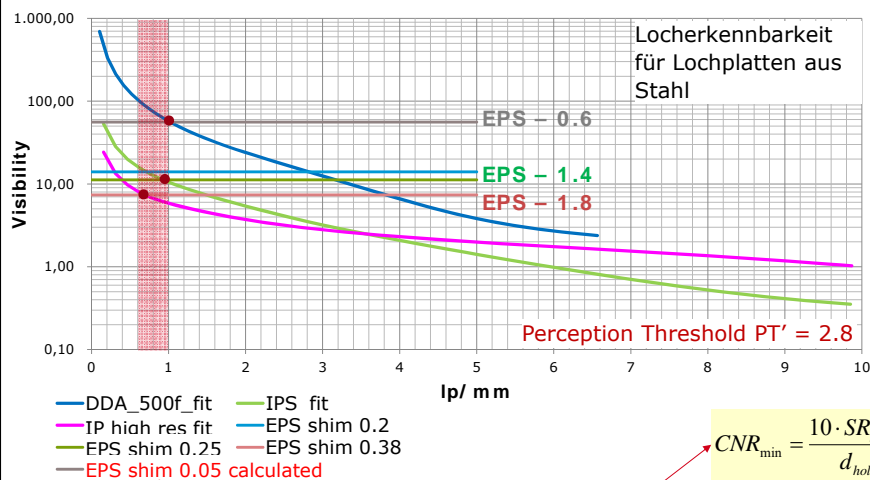
Bildqualität in der Radiographie

21

Anwendungsergebnisse DDA- und 2x CR-Systeme



$$Visibility = \Delta w \cdot d_{hole} \cdot \mu_{eff} \cdot MTF \cdot pp / (\sqrt{NNPS}) \cdot 2 \cdot fs \cdot SR_b$$



09.05.2018

Bildqualität in der Radiographie

Ewert, Zscherpel, Heyne, Jechow, Bavendiek
Materials Evaluation, 70, No.8, pp. 955-964, 2012

22

Zusammenfassung



- Die **Sichtbarkeit von Bildgütestestkörpern (BPK)** hängt hauptsächlich von Kontrast, Unschärfe und Rauschen in digitalen Bildern ab.
- Rose hat 1946 gezeigt, dass die Sichtbarkeit von Lochanzeigen in Kamerabildern vom **Lochdurchmesser (d_{hole}) und dem CNR** abhängt.
 - Die Anzeigen sind sichtbar für menschliche Beobachter, wenn $d_{\text{hole}} \cdot \text{CNR} > \text{PT}$ ist, mit **PT** as Erkennbarkeitsschwellwert.
- Zusätzlich zu den Parametern SNR_N and $i\text{SR}_b^{\text{detector}}$, wurde die **Äquivalent-Penetrations-Sensitivität (EPS)** eingeführt als Klassifizier für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit von CR-Systemen in ASTM E 2446-16.
- Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass der **PT-Wert sich in Abhängigkeit von den Systemparametern digitaler Systeme verändert**.
- Das Rose-Modell wurde erweitert durch Einbeziehung der **presampled Modulation-Transfer-Funktionen (MTF) and normalisierten Rauschleistungsspektren (NNPS)**.
- **SNR, CNR und Sichtbarkeitskurven wurden abgeleitet als Funktion der Ortsfrequenz.**

09.05.2018

Bildqualität in der Radiographie

23

Danksagung




- Wir danken
Dr. P. Willems für interessante Diskussionen und die Unterstützung.

09.05.2018


Bildqualität in der Radiographie

24

Sicherheit in Technik und Chemie



Fragen



Ende

uwe.ewert@bam.de

09.05.2018 Bildqualität in der Radiographie 25