



## Abstract

U. Ewert, J. Jechow, U. Zscherpel, C. Gollwitzer,  
BAM, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, [uwe.ewert@bam.de](mailto:uwe.ewert@bam.de)

Die Einführung digitaler Detektoren in der Radiographie sollte vorrangig die Effizienz der Durchstrahlungsprüfung durch Einsparung von Belichtungszeit und automatische Bildauswertung erhöhen. Alternativ kann eine höhere Kontrastempfindlichkeit und ein größerer Wanddickenumfang insbesondere bei Einsatz von Matrixdetektoren (DDA) im Vergleich zu Röntgenfilmen erreicht werden. Dazu ist es erforderlich die Detektoren zu kalibrieren. Die Kalibrierung ist erforderlich, um die Unterschiede zwischen den einzelnen Detektorelementen (korreliertes Strukturrauschen) auszugleichen. Das lässt sich besonders gut bei DDAs erreichen, da die einzelnen Detektorelemente genau adressiert werden können. Die Kalibrierung erfolgt ohne Strahlung für die Untergrundkalibrierung und mit Strahlung bei ggf. verschiedener Dosis zur Kennlinienkompensation der Detektorelemente. Die Kalibrierung wird hier allerdings durch das Photonenrauschen gestört, das das maximal erreichbare Signal-zu-Rauschverhältnis begrenzt. Verschiedene Kalibrierungsprozeduren werden diskutiert und die erreichbare Bildgüte wird im Vergleich zur ermittelten Bildgüte (Draht und Stufe-Loch-Testkörper) mit einem mathematischen Modell berechnet. SNR-Messungen werden auch für die Messung der Effizienz und des erreichbaren Wanddickenumfanges vorgestellt. Erste Anwendungen für Speicherfoliensysteme werden vorgestellt.

VIII<sup>te</sup> Jahrestagung der Deutschen Röntgenologen

Bildqualität digitaler Detektoren in der Radiographie

Sept., 2012



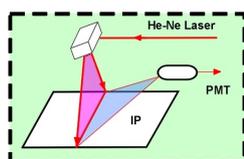
2

## Motivation

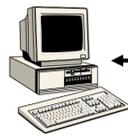
- Der Ersatz von Röntgenfilmen erfordert die korrekte Nutzung von digitalen Detektoren, wobei Speicherfolien und Matrixdetektoren (DDAs) betrachtet werden.
- Die essentiellen Parameter, die die Bildqualität in der digitalen Radiographie bestimmen, werden diskutiert.
- Der Einsatz von Matrixdetektoren in der ZfP erfordert abweichende Kalibrierprozeduren im Vergleich zur Medizin.
- Ausgewählte Kalibrierprozeduren für Matrixdetektoren werden diskutiert sowie ihr Einfluss auf die Bildqualität und die Messbedingungen.
- Die Möglichkeiten einer Kalibrierung von Speicherfolien zur Verbesserung der Bildqualität werden vorgestellt.

## Kontrastempfindlichkeit und Bildunschärfe in der Radiographie

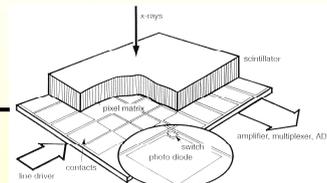
Speicherfolien für die  
Computerradiographie



Data Output



Matrixdetektoren



# Die Erkennbarkeit von Bildgüteprüfkörpern hängt ab von:

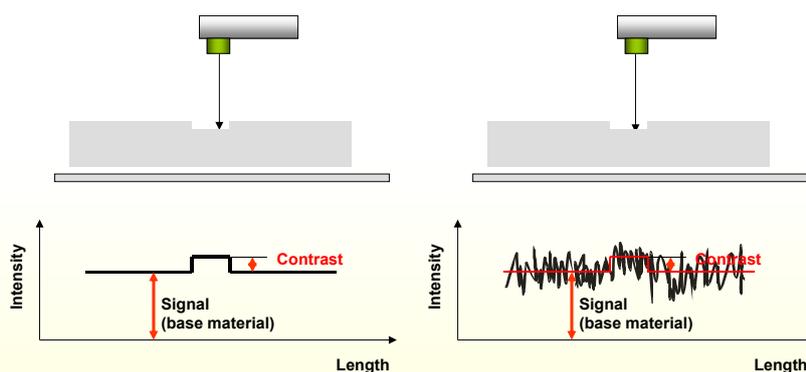
Signal-zu-Rausch-Verhältnis **SNR**,

Effektivem spezifischen Kontrast  $\mu_{\text{eff}}$   
und

Basisortsauflösung **SR<sub>b</sub>**

Das sind die drei essentiellen Parameter!

## Einfluss des Bildrauschens und SNR/CNR auf die Detailerkennbarkeit



**Nut sichtbar!**

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

**Nut nicht sichtbar!**

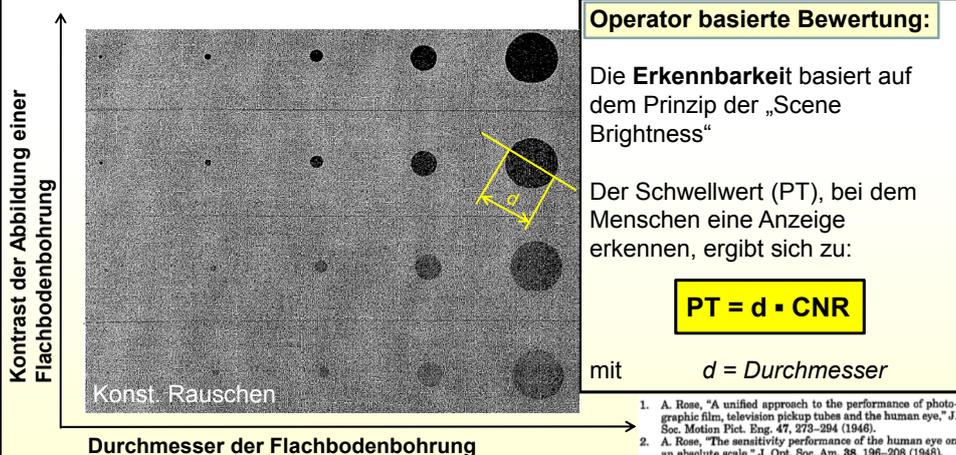
**Kontrast/Rauschen ist niedrig  
Signal/Rauschen ist niedrig**

## Rauschquellen

- **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)

Grundlagen für ISO 17636-2

## Erkennbarkeit von Löchern



1. A. Rose, "A unified approach to the performance of photographic film, television pickup tubes and the human eye," J. Soc. Motion Pict. Eng. 47, 273-294 (1946).
2. A. Rose, "The sensitivity performance of the human eye on an absolute scale," J. Opt. Soc. Am. 38, 196-208 (1948).
3. A. Rose, "Television pickup tubes and the problem of vision," in *Advances in Electronics and Electron Physics*, L. Marten, ed. (Academic, New York, 1948), Vol. 1, pp. 131-166.

## Berechnung des Mindest-Durchmessers eines Stufe-Loch-Bildgüte-Prüfkörpers

Die essentiellen Einflussparameter sind:  $\mu_{eff}$ , SNR und  $SR_b$

### Neue Formel

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

Abhängig von der Hardware, **Pixelgröße**  
**Vergrößerung**  
**Brennfleckgröße**

SNR - Signal zu Rauschverhältnis  
 $\mu_{eff}$  - spezifischer Kontrast,  
(effektiver Schwächungskoeffizient)  
 $SR_b$  - effektive Pixel-Größe im Bild,  
(Basisortsauflösung im Bild)

Material,  
keV, Strahlertyp  
Streustrahlung  
Folien und Filter

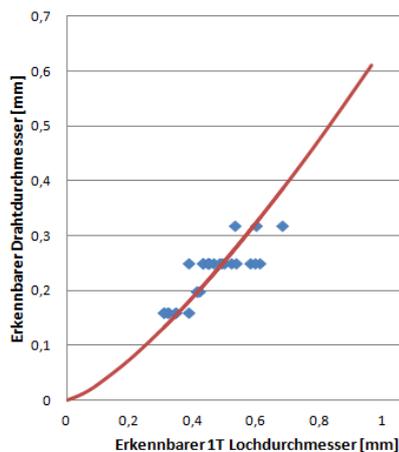
Belichtungszeit, FFA  
Röhrenstrom, Aktivität  
Detektorempfindlichkeit  
**Kalibrierung**

$d_{visible}$  - Mindest-Durchmesser eines erkennbaren 1T-Loches eines BPKs

$PT \approx 2,8$  für 1T-Löcher ; schwankt etwas mit Betrachtungsbedingungen und Operator

## Draht BPK Erkennbarkeit vs. Stufe-Loch-Erkennbarkeit

### Draht- gegen Loch-Erkennbarkeit



Erkennbarer minimaler Draht- und Lochdurchmesser können nicht linear ineinander umgerechnet werden.

$$d_{Draht} \approx 0,65 \cdot d_{Loch}^{4/3}$$

◆ wire diameter  
— calc Wire diameter

Wenn ein **Draht von 100  $\mu$ m** Durchmesser (W16) erkannt wird, muss das entsprechende **1T-Loch ca. 250  $\mu$ m** Durchmesser haben, um erkannt zu werden.

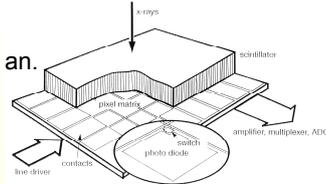
Der Faktor, 0,65, kann sich bei unterschiedlichen Monitor-Betrachtungsbedingungen ändern.

## Datenerfassung mit Matrixdetektoren

- Matrixdetektoren haben zwei Erfassungsmodii:

### 1. Einzelbildbelichtung („on chip“ Integration, ähnlich wie optisch Kameras)

- Der Detektor wird eine bestimmte Zeit belichtet und dann ausgelesen.
- Die typische Belichtungszeit liegt im Bereich von Milli-Sekunden bis zu mehreren Sekunden.
- Das SNR steigt mit der Belichtungszeit nichtlinear an.

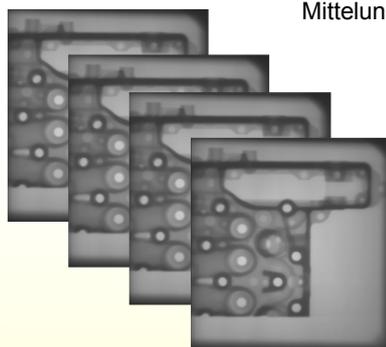


### 2. Bildmittelung (frame averaging or frame integration)

- Es werden mehrere Bilder per „on chip“ Integration gemessen.
- Nach jeder Bilderfassung werden alle Detektorelemente gelöscht und ein neues Bild wird gemessen.
- Der Mittelwert aller gemessenen Bilder wird im Computer berechnet, um längere Gesamtbelichtungszeiten zu ermöglichen und das SNR zu verbessern.

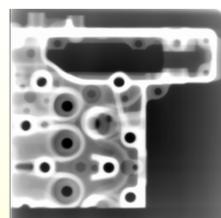
## Bildmittelung

Mittelung von 4 Bildern erhöht das SNR um den Faktor 2



Positive Rohbilder  
nach Kalibrierung

Resultat der Bildmittelung

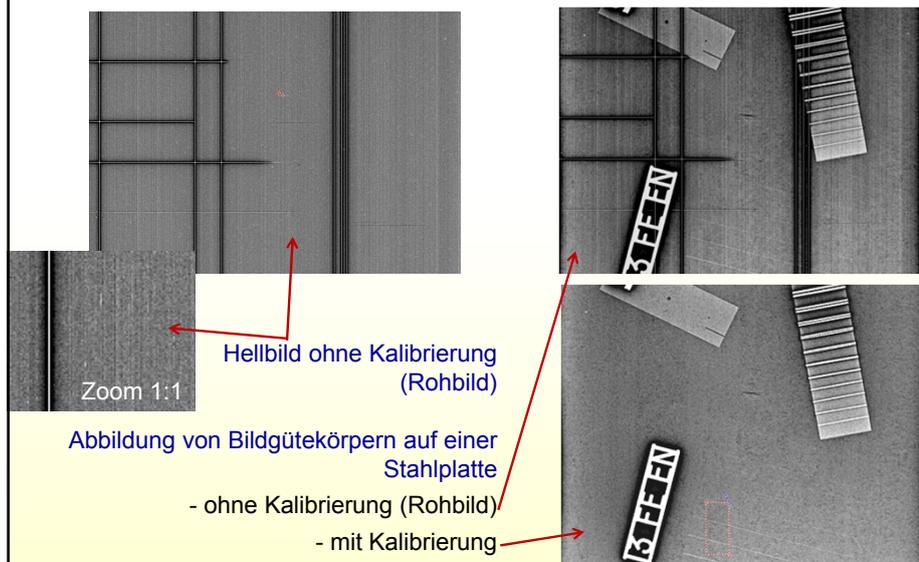


Gemittelttes Negativbild  
→ Erhöhte Dynamik

## Kalibrierung von Matrixdetektoren

- Aufgabe ist die **Korrektur der Abweichung der Kennlinien aller Pixel** sowie die **Interpolation von Pixeln ungenügender Detektions-Qualität** (Bad Pixels).
- Dazu wird üblicherweise eine **Kalibrierung mit Röntgen- (oder Gamma-) Strahlung** durchgeführt, die allerdings *immer* durch **Photonenrauschen** gestört ist.
- Zur Kalibrierung und Messung benötigt man **die eindeutige Zuordnung der Pixel-Adressen** der Kalibrierbilder und der Durchstrahlungsbilder der Testobjekte.
  - Für eine Kalibrierung wird **mindestens ein Dunkelbild und ein Hellbild** (Detektor mit konstanter Dosis gleichmäßig belichtet) benötigt.
  - In vielen Fällen werden **mehrere Kalibrierbilder** (Gain Images) **bei unterschiedlich hoher Dosis** verwendet um auch Nichtlinearitäten der Kennlinien der Detektorelemente zu korrigieren.
  - Ziel der Kalibrierung ist es, **Messungen mit hohem SNR und CNR** zu ermöglichen und Artefakte (bad pixel) zu beseitigen.

## Kalibrierung von Matrixdetektoren

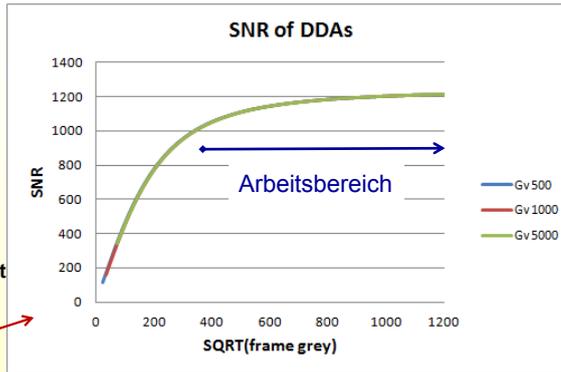


## Zweipunkt-Kalibrierung von Matrixdetektoren

- Zur **Kalibrierung** wird ein **Dunkelbild** und ein **Hellbild** (gain image) aufgenommen.
- Das **SNR erreicht einen Sättigungswert**,  $SNR_{max}$ , ähnlich wie bei Speicherfolien.
  - Bei **Speicherfolien** hängt  $SNR_{max}$  von der **Struktur des Leuchtstoffes** und der Detektoroberfläche ab.
  - Bei **Matrixdetektoren** hängt  $SNR_{max}$  von dem **Photonenrauschen** bzw. dem SNR des Hellbildes und dem geringeren thermischen Rauschen des Dunkelbildes ab.

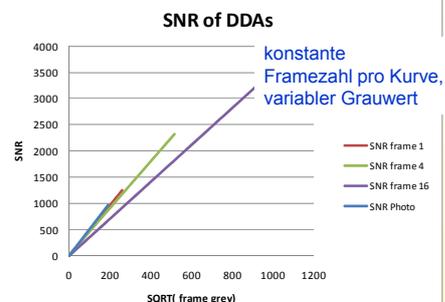
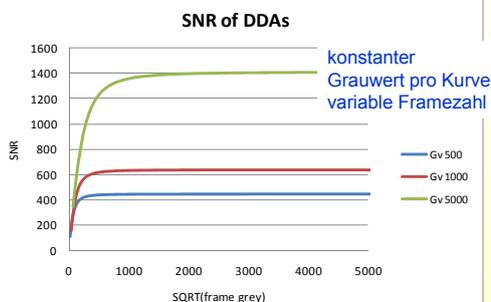
- **DDAs können belichtet werden** durch eine
  - **hohe „on chip“ Belichtungsdosis**, die zur Grauerhöhung (GV) führt, und eine
  - **hohe Zahl der gemessenen Bilder (Framezahl, FZ)** die gemittelt werden.

- Das **SNR steigt bis zum Grenzwert** des eingebrachten **Photonenrauschens** mit „FZ-GV“.
  - Beispiel:  $SNR_{max} = 1250$



## Mehrpunkt-Kalibrierung von Matrixdetektoren

- Zur **Kalibrierung** wird ein **Dunkelbild** und **mehrere Hellbilder** (gain images) bei unterschiedlichen „on chip“ Belichtungs-Werten, also bei verschiedenen Grauwerten, und konstanter Framezahl aufgenommen.
- Die **SNR-Charakteristik bei Mehrpunktkalibrierung unterscheidet sich deutlich von der SNR-Charakteristik der Zweipunktkalibrierung**.
- Das **SNR erreicht einen Sättigungswert**,  $SNR_{max}$ , ähnlich wie bei Speicherfolien, wenn die Framezahl über den Wert der Kalibrierungsframezahl erhöht wird. **Aber** der **Grenzwert  $SNR_{max}$  steigt mit der on chip-Dosis bzw. mit dem Grauwert**.

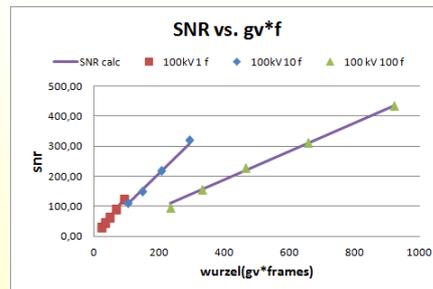
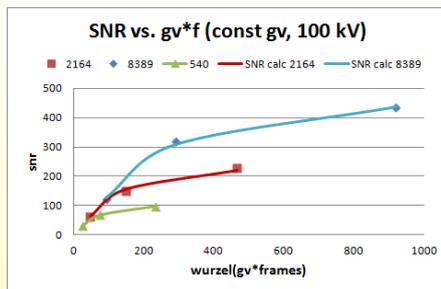


## Mehrpunkt-Kalibrierung von Matrixdetektoren – Beispiel

- Zur **Kalibrierung** wird ein **Dunkelbild** und **fünf Hellbilder** (gain images) bei unterschiedlichen „on chip“ Dosis-Werten bei verschiedenen Grauwerten aufgenommen.
- **Experimentelle Daten** für **Perkin Elmer XRD 0822 CO15 IND**
- Kalibrierung mit 10 Frames und 5 Gain Images (6-Punkt-Kalibrierung)
- Kalibrierungs-Software: **BAM ISee! V. 1.10.2**: <http://www.dir.bam.de/ic/>

$$SNR = \frac{Eff \cdot \sqrt{GV \cdot FN}}{\sqrt{\frac{FN \cdot Eff^2}{SNR_{max}^2} + 1}}$$

Eff – Grauwert-Effizienz  
GV – Grauwert  
FN – Framezahl



VIII-3  
Medizinische  
Vorfahren

Bildqualität digitaler Detektoren in der  
Radiographie

Sept., 2012

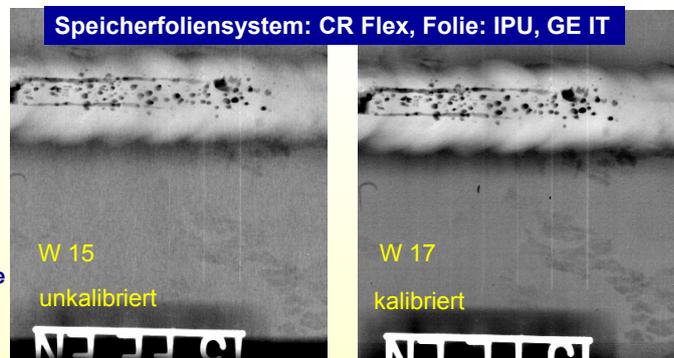
17

## Kalibrierung von Speicherfolien Zwei-Punkt-Kalibrierung

- Zur **Kalibrierung** wird ein **Dunkelbild** und ein **Hellbild** (gain image) aufgenommen.
- Das **SNR** erreicht einen **Sättigungswert**,  $SNR_{max}$  wegen der Folienkörnigkeit.
  - Bei **Speicherfolien** hängt  $SNR_{max}$  von der **Struktur des Leuchtstoffes** und der **Detektoroberfläche** ab.

- Über eine **Mustererkennung** wird die **Außengeometrie** der Speicherfolie ermittelt

- Nach **Positionsnormierung** wird die gleiche **Kalibrierprozedur** wie bei **Flachdetektoren** verwendet.



VIII-3  
Medizinische  
Vorfahren

Bildqualität digitaler Detektoren in der  
Radiographie

Sept., 2012

18

## Zusammenfassung

- In der digitalen Radiographie wird die Bildgüte vorrangig durch das Signal zu Rauschverhältnis (SNR), den effektiven spezifischen Kontrast  $\mu_{\text{eff}}$  und die Ortsunschärfe bestimmt.
- Die Unregelmäßigkeiten in der Detektorschicht von Speicherfolien und die unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Detektorelemente von Matrixdetektoren begrenzen das maximal erreichbare  $\text{SNR}_{\text{max}}$  und damit auch die Kontrastempfindlichkeit.
- Durch eine Kalibrierung mit einem Dunkel- und einem oder mehreren Hellbildern kann das „Strukturrauschen“ der digitalen Detektoren erheblich verringert werden.
- Das Photonenrauschen der Kalibrierbilder wird nach der Detektor-Kalibrierung zum begrenzenden Wert für das erreichbare maximale  $\text{SNR}_{\text{max}}$ .
- Ein numerisches Modell wurde verifiziert, das es gestattet das maximal erreichbare  $\text{SNR}_{\text{max}}$  bei zwei und Mehrpunkt-Kalibrierung zu berechnen.
- Durch eine Positionsbestimmung und eine Positionsnormierung konnten erstmals auch Speicherfolienaufnahmen durch eine Kalibrierprozedur ohne Erhöhung der Belichtungszeit signifikant verbessert werden.



**Ende**

uwe.ewert@bam.de

*Kalibrierung?*  
*DDA und Speicherfolien?*  
*SNR?*  
*CNR?*

