

Eigenschaften und Einsatzgebiete photonenzählender und energieauflösender Röntgenmatrixdetektoren

David WALTER¹, Uwe ZSCHERPEL¹, Uwe EWERT¹, Christer ULLBERG²,
Niclas WEBER², Mattias URECH², Tuomas PANTSAR³, Katya PEREZ-FUSTER³

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² XCounter AB, Danderyd, Schweden

³ Ajat Oy Ltd., Espoo, Finnland

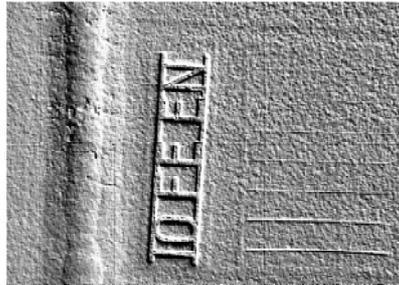
Kurzfassung

Der Einsatz von hochabsorbierenden Photoleitermaterialien (z.B. CdTe) zur Herstellung von Röntgen-Matrixdetektoren ermöglicht seit einigen Jahren die direkte Konvertierung von Röntgenstrahlen in auswertbare elektrische Signale, auch für den ZfP-Energiebereich bis 300 keV. Die herkömmliche Szintillatorschicht entfällt, was eine Verringerung der Bildunschärfe und eine Effizienzsteigerung aufgrund der deutlich größeren Absorptionsdicken zur Folge hat. Auch lassen sich bei einer ausreichend schnellen Auslesegeschwindigkeit (ca. 50 – 100 ns Totzeit) einzelne Photonen zählen und deren Energie bestimmen. Somit entfallen das Ausleserauschen und die Dunkelbildkorrektur. Weiterhin lassen sich durch die Definition von Energieschwellwerten gezielt bestimmte Bereiche des Röntgenenergiespektrums detektieren bzw. ausblenden. Diese Eigenschaft ermöglicht einerseits die Diskriminierung von Materialien durch die Dual-Energie-Technik sowie andererseits die Reduzierung der detektierten Streustrahlung, wodurch sich die Kontrastempfindlichkeit erhöht. Um diese Vorteile effizient nutzen zu können, ist eine spezielle Kalibrierprozedur notwendig, welche zeitabhängige Vorgänge in der Detektorschicht berücksichtigen muss. Vorgestellt werden hier die Eigenschaften dieser neuen Generation von Röntgenmatrixdetektoren im Vergleich zu herkömmlichen indirekt konvertierenden Detektoren anhand von Referenzmessungen an Faserverbundbauteilen und dickwandigen Stahlrohren (bis zu 35 mm). Weiterhin werden mögliche Einsatzgebiete in der ZfP im Hinblick auf die Materialdiskriminierung speziell innerhalb von Faserverbundwerkstoffen (z.B. CFK und GFK) diskutiert.



EIGENSCHAFTEN UND EINSATZGEBIETE PHOTONENZÄHLENDER UND ENERGIEAUFLÖSENDER RÖNTGENMATRIXDETEKTOREN

David Walter¹, Uwe Zscherpel¹, Uwe Ewert¹, Christer Ullberg², Niclas Weber²,
Mattias Urech², Tuomas Pentsar³, Katya Perez-Fuster³



¹ BAM Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung, Berlin
² XCounter AB, Danderyd, Schweden
³ Oy AJAT Ltd., Espoo, Finnland

DACH Jahrestagung 2015
11. – 13. Mai Salzburg

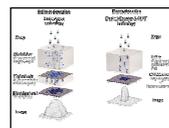
DACH Jahrestagung 2015 Salzburg

David Walter et al.

INHALT

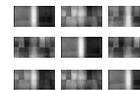
• GRUNDLAGEN

- Funktionsweise
- Aufbau
- Eigenschaften
- Anti-Koinzidenz



• Kalibrierung

- spektrale Empfindlichkeit
- Zeitabhängigkeit



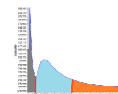
• Vergleichsmessung

- photonenzählend
- integrierend



• Dual Energy

- Prinzip und Möglichkeiten



• Fazit

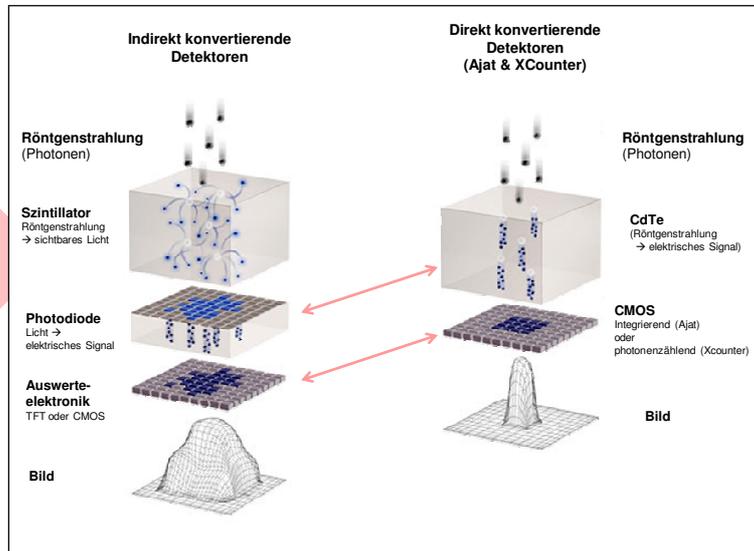


DACH Jahrestagung 2015 Salzburg

David Walter et al.

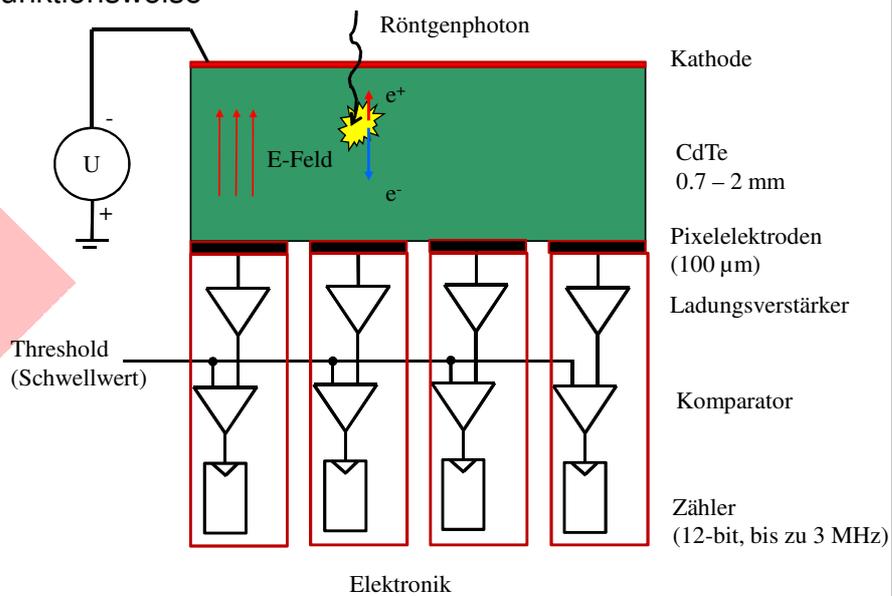
Grundlagen

2



Funktionsweise

3



Grundlagen Kalibrierung Vergleich Dual Energy Fazit

Eigenschaften

- Kein Dunkelbild
(SW_1 – Rauschunterdrückung)
- Reduzierung des Streustrahlungseinflusses
(SW_1 ↑ – höhere Kontrastempfindlichkeit)
- Materialdiskriminierung
(Dual Energy – SW_2)

PCD

CMOS

PCD

CMOS

Legend:
■ nicht berücksichtigt
■ Niederenergie
■ Hochenergie

DACH Jahrestagung 2015 Salzburg

David Walter et al.

Grundlagen Kalibrierung Vergleich Dual Energy Fazit

Eigenschaften

kein Dunkelbild → kein Ausleserauschen

Beispiel:
große Wandstärke und geringe Photonenenergie (geringe Beschleunigungsspannung der Röntgenröhre)

- hier:
 - 70 mm Stahl
 - 270 kV (Maximalwert 600 kV nach ISO 17636-2)
 - 300 W (1,11 mA)
- 4800 einzelne Frames
- 0,5 s pro Frame
- max. Grauwerte (Anzahl Photonen): 10000
- d.h. ca. **2 Photonendetektionen pro Pixel und Frame**

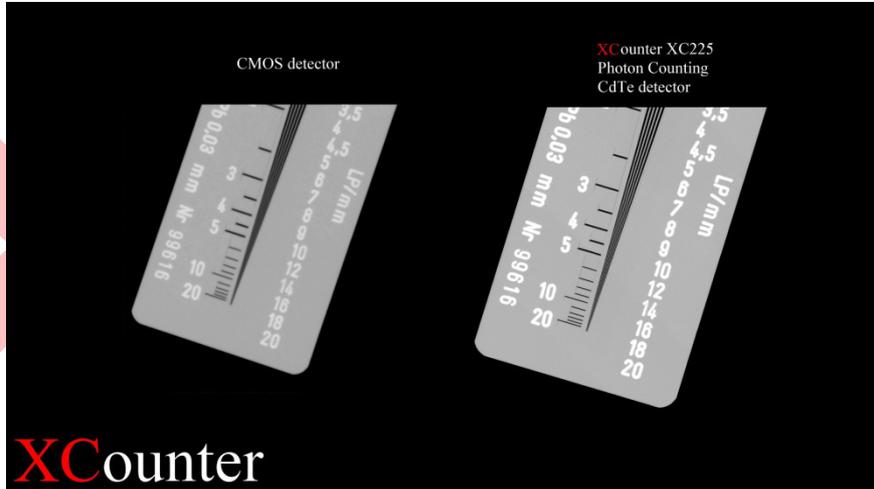
Dennoch Klasse B (nach ISO 17636-2) erreicht:

Bildqualitätsmerkmal	Mindestanforderung nach ISO 17636-2	Direkt konv. Photon zählend
SNR _N in Schweißnaht	70	105
Einzeldraht (Kontrastempf.)	W10	W11
Doppeldraht (Unschärfe)	D10 (0,2 mm)	D10 (0,2 mm)

DACH Jahrestagung 2015 Salzburg

David Walter et al.

Eigenschaften

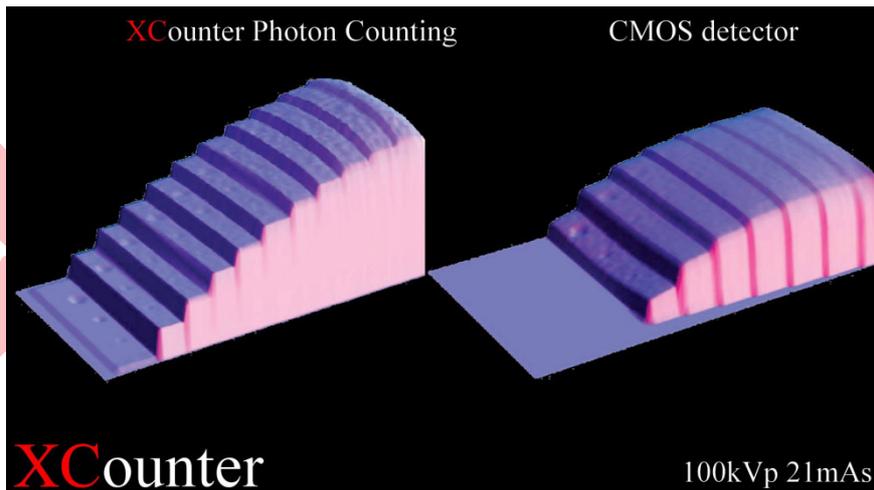


XCounter

direkt konvertierend → schärfere Bilder, mehr Aliasing

6

Eigenschaften



XCounter

100kVp 21mAs

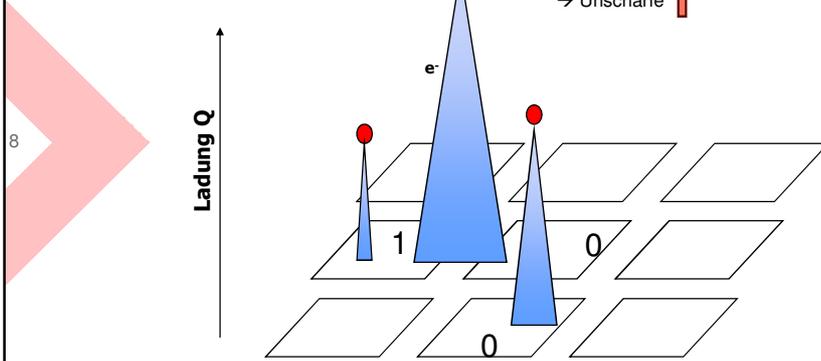
Schwelwertsetzung → geringer Streustrahlungseinfluss → höhere Dynamik

7

Anti-Koinzidenz („Ladungs-Aufteilungskorrektur“)

Problem:
Ladung im CdTe-Kristall (erzeugt von 1 Photon)
kann über mehrere Pixel verteilt sein

→ Unschärfe ↑

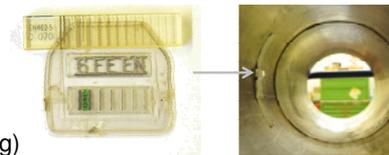


Lösung → Vergleich mit Nachbarpixeln → höchste Q-Summe → Zähler +1

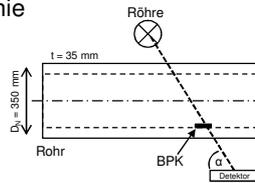


Anti-Koinzidenz („Ladungs-Aufteilungskorrektur“)

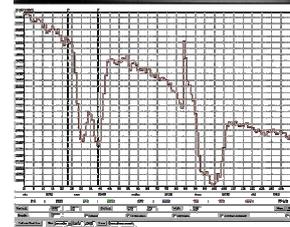
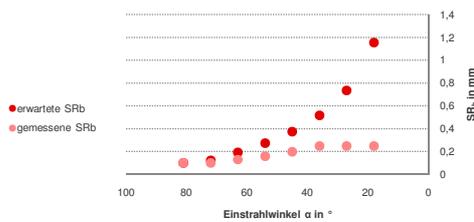
Folge → Verbesserte Auflösung
(besonders unter Schrägeinstrahlung)
→ Laminographie



270kV; 1,11mA; $\alpha = 45^\circ$



erwartete vs. gemessene Basis-Ortsauflösung SR_b für 0.75 mm CdTe



Grundlagen **Kalibrierung** Vergleich Dual Energy Fazit

Kalibrierung (2 Punktkalibrierung)

10

angezeigter Grauwert

pro Pixel

Strahlungsintensität

kalibriertes Bild

- jedes Pixel reagiert unterschiedlich auf dieselbe Strahlungsintensität
- „Gleiche Grauwerte für gleiche Strahlungsintensitäten“

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Grundlagen **Kalibrierung** Vergleich Dual Energy Fazit

Kalibrierung (2 Punktkalibrierung)

11

Schwelwertsetzung → kein Ausleserauschen

angezeigter Grauwert

pro Pixel

Strahlungsintensität

kalibriertes Bild

- jedes Pixel reagiert unterschiedlich auf dieselbe Strahlungsintensität
- „Gleiche Grauwerte für gleiche Strahlungsintensitäten“

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Grundlagen **Kalibrierung** Vergleich Dual Energy Fazit

hohe spektrale Empfindlichkeit

CFK bei 34 kV, 20mA

Bild-Spektrum	Gesamt	High	Low
Kalibriert mit...			
Gesamt			
High			
Low			

12

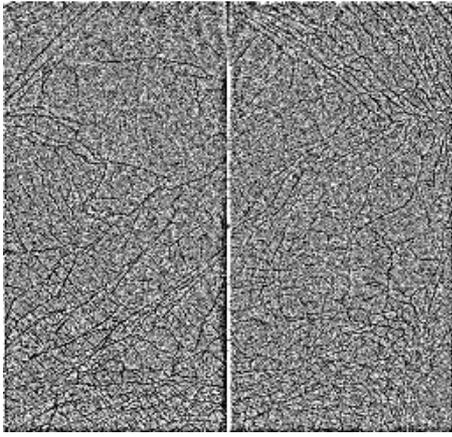
Folge \rightarrow $\text{Spektrum}_{\text{mess}} \equiv \text{Spektrum}_{\text{kalibrier}}$

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Grundlagen **Kalibrierung** Vergleich Dual Energy Fazit

Polarisationseffekte am Einkristall \rightarrow Bildstörungen

13



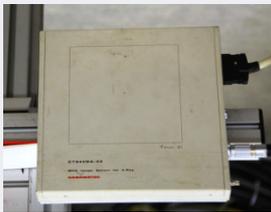
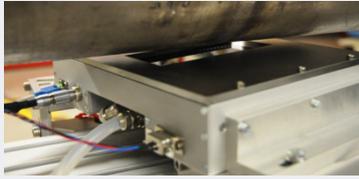
- inhomogene Feldstärke
- zeitabhängig
- Kristalldefekte werden sichtbar
- „Venen“

Lösung \rightarrow Zurücksetzen der Hochspannung nach jedem Frame

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Vergleichsmessungen

Verwendete Detektoren

	Indirekt konvertierend CMOS	Direkt konvertierend Photon zählend
Hersteller	Hamamatsu	Ajat/XCounter
Modell	C7940DA-02	Flite 2X1
Pixel	2240 x 2368 <i>(2x2 Pixel Binning: 1120 x 1184)</i>	1024 x 512
Pixelgröße	50 μm <i>(2x2 Pixel Binning: 100 μm)</i>	100 μm
Aktive Fläche	112 x 118 mm ²	102 x 51 mm ²
Aktive Schicht	CsI	CdTe
Schichtdicke	300 – 400 μm	750
		

14



DACH Jahrestagung 2015 Salzburg

David Walter et al.

1. Fe-Platte; t = 40 mm

2. Fe-Rohr; D = 250 mm; t = 2 x 12 mm; gefüllt mit Wasser



Durchstrahlungsparameter	
Spannung	240 kV
Leistung	600 W
Belichtungszeiten	140 s (Versuch 1) 100 s (Versuch 2)

Filter	Indirekt konvertierend CMOS	Direkt konvertierend Photon zählend
Röhrenseitig	2 mm Cu + 1,5 mm V2A	1,5 mm V2A
Detektorseitig	0,2 mm Cu + 1 mm Al	1 mm CFK



15



DACH Jahrestagung 2015 Salzburg

David Walter et al.

Grundlagen Kalibrierung **Vergleich** Dual Energy Fazit

1. Fe-Platte; t = 40 mm

2. Fe-Rohr; D = 250 mm; t = 2 x 12 mm; gefüllt mit Wasser

Durchstrahlungsparameter	
Spannung	240 kV
Leistung	600 W
Belichtungszeiten	140 s (Versuch 1) 100 s (Versuch 2)

16

Detektor

Primärstrahlung

Primärstrahlung + Streustrahlung

BPK

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Grundlagen Kalibrierung **Vergleich** Dual Energy Fazit

1. Fe-Platte; t = 40 mm

Bildqualitätsmerkmal	Mindestanforderung nach ISO 17636-2 (Klasse B)	Indirekt konv. CMOS	Direkt konv. Photon zählend
SNR _v in Schweißnaht	100	166	165
Einzeldraht (Kontrastempf.)	W10	W11	W12
Doppeldraht (Unschärfe)	D10 (0,20 mm)	D10 (0,20 mm)	D10 (0,20 mm)

Hochpass gefiltert

IOFFEN

W10 W11

EN4625 C 070

EN4625 C 138

Hochpass gefiltert

Querrisse

W10 W11 W12

Photonenzählender Detektor:

- + SNR ähnlich
- + 1 Einzeldraht mehr
- + feine Anzeigen deutlich sichtbar

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Grundlagen Kalibrierung **Vergleich** Dual Energy Fazit

2. Fe-Rohr; D = 250 mm; t = 2 x 12 mm; gefüllt mit Wasser

Bildqualitätsmerkmal	Mindestanforderung nach ISO 17636-2 (Klasse B)	Indirekt konv. CMOS	Direkt konv. Photon zählend
SNR _N in Schweißnaht	100	130 ✓	152 ✓
Einzeldraht (Kontrastempf.)	W13	W12 (W13) 🐜	W14 ✓
Doppeldraht (Unschärfe)	D10 (0,20 mm)	D9 (0,13 mm) ✗	D10 (0,20 mm) ✓

Photonenzählender Detektor:

- + Reduktion der Streustrahlung durch Schwellwertsetzung
- + höhere Kontrastempfindlichkeit
- + höhere Basis-Ortsauflösung
- + mehr Anzeigen sichtbar

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Grundlagen Kalibrierung Vergleich **Dual Energy** Fazit

Dual Energy

- 2 Energiebereiche → 2 Bilder
- Materialunterscheidung
- Schwächungskoeffizient μ abhängig von
 - Energie E
 - Dichte ρ
 - Kernladungszahl Z

Lambert-Beer'sches Gesetz:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

SW₁ → Gesamtenergie + SW₂ → Hochenergie

Legend:

- grey: nicht berücksichtigt
- light blue: Niederenergie
- orange: Hochenergie

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Grundlagen Kalibrierung Vergleich **Dual Energy** Fazit

Gesamtenergie Hochenergie Niederenergie

20

Dual Energy Funktion:

$$F(Z) = \frac{\mu_{Low}(Z)}{\mu_{High}(Z)} = \frac{\int_{E_1=0}^{E_{1max}} W(E_1) \mu(E_1, Z) dE_1}{\int_{E_2=0}^{E_{2max}} W(E_2) \mu(E_2, Z) dE_2}$$

Quelle: S. Kolkoori et al., „Dual High-Energy X-ray Digital Radiography for Material Discrimination in Cargo Containers“, 11th European Conference on Non-Destructive Testing, 2014, Prague, Proceedings

ZIEL:

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Grundlagen Kalibrierung Vergleich Dual Energy **Fazit**

Fazit

Photon zählende Detektoren auf CdTe-Basis überzeugen durch

- hohe Bildschärfe
- kein Ausleserauschen
- sehr gute Kontrastempfindlichkeit
- hohe Biddynamik

21

- Ideal für große Wandstärken und Energien bis 300 keV
- Ideal für große Wandstärkeänderungen

➔ übertrifft die Bildqualität herkömmlicher indirekt konvertierender CMOS Detektoren

Herausforderungen:

- Herstellung und Verarbeitung der CdTe-Einkristalle
- hoher Preis der CdTe-Einkristalle (max. 12 x 25 mm²)
- spektrale Abhängigkeit der Kalibrierung (speziell im Fall von Dual Energy Aufnahmen)
- hohe Wärmeentwicklung → gute Kühlung und thermische Stabilisierung

2000 Transistoren pro Pixel

BAM DACH Jahrestagung 2015 Salzburg David Walter et al.

Dank

Für das Engagement während der Entwicklungszeit, die guten Ideen sowie die tatkräftige Unterstützung danken wir:

- K.-P. Finke-Härkönen (Oy AJAT Ltd., Espoo, Finnland)
- A. Stewart (XCounter AB, Danderyd, Schweden)
- S. Gunn (XCounter AB, Danderyd, Schweden)
- A. Redz (XCounter AB, Danderyd, Schweden)
- S. Hohendorf (BAM, Berlin, Deutschland)
- M. Grunwald (BAM, Berlin, Deutschland)
- C. Bellon (BAM, Berlin, Deutschland)
- B. Redmer (BAM, Berlin, Deutschland)
- M. Tschaikner (BAM, Berlin, Deutschland)
- S. Kolkoori (BAM, Berlin, Deutschland)



<http://www.ajat.fi/>

XCounter

<http://www.xcounter.se/>



<http://www.bam.de/>



DACH Jahrestagung 2015 Salzburg

David Walter et al.

22

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Fragen?

david.walter@bam.de



DACH Jahrestagung 2015 Salzburg

David Walter et al.

23