

## **Digitale Radiologie in der ZfP**

### **Belichtungszeit und Kontrastempfindlichkeit – Der Äquivalenzwert zur optischen Dichte des Films**

U. Ewert, U. Zscherpel, BAM, Berlin  
K. Bavendiek, YXLON International, Hamburg

#### **Zusammenfassung**

Neue digitale Detektoren wurden vorrangig für medizinische Anwendungen entwickelt. Sie haben das Potential Röntgenfilme zu ersetzen und damit die radiologische Technik zu revolutionieren. Digitale Matrixdetektoren (Digital Detector Arrays – DDA) und Speicherfolien (auch: Computed Radiography – CR) gestatten die Aufnahme von radiographischen Bildern in einer kürzeren Zeit und mit höherer Dynamik als Filmanwendungen. Firmen berichten über eine Reduktion der Belichtungszeit auf 5 – 25% im Vergleich zum Industrieröntgenfilm. Daraus ergeben sich zusammen mit der Reduktion von Verbrauchsmaterialien ökonomische (auch ökologische) Vorteile und eine kurze Amortisationszeit. Leider liefern die digitalen Detektoren nicht immer die gleiche Bildqualität wie industrielle Röntgenfilme. Flachdetektoren haben allerdings das Potential auch eine wesentlich höhere Bildqualität als Industrieröntgenfilme zu erreichen. Die Anforderungen von europäischen und USA-Standards für die industrielle Filmradiographie werden analysiert, um korrekte Anforderungen an die digitalen Detektoren zu stellen und sie korrekt einzusetzen. Es werden Prozeduren zur Vorhersage und Messung der erforderlichen Bildqualität vorgestellt. USA-Standards scheinen toleranter für diese neuen innovativen Technologien als europäische. Die neu entwickelten Standards nutzen das Signal/Rauschverhältnis (Signal/Noise Ratio - SNR) und die Detektorunschärfe als dominante Parameter für die Bildqualität. Messprozeduren werden beschrieben, um die geforderte Kontrastempfindlichkeit nach Norm zu erreichen und die zugehörige Belichtungszeit zu ermitteln. Insbesondere wird darauf eingegangen, wie die Parameter zu wählen sind, wenn von Filmradiographie auf Digitaltechnik umgestellt werden soll. Der Äquivalenzwert zur optischen Dichte  $D = 2$  wird auf Basis von SNR-Messungen beschrieben. Durch die pixelgenaue nichtlineare Shadingkorrektur (auch: Kalibrierung), kann bei Flachdetektoren (DDA) eine wesentlich höhere Kontrastempfindlichkeit (Faktor 10!) als bei Industrieröntgenfilmen erreicht werden. Hier ergeben sich völlig neue Anwendungsgebiete.

#### **Einleitung:**

Seit mehr als 100 Jahren wird die industrielle Radiologie mit Röntgenfilmen ausgeführt. Spezielle Röntgenfilmsysteme wurden für ZfP-Anwendungen entwickelt. Mit diesen Filmen erreicht man eine deutlich bessere Bildqualität als mit medizinischen Filmsystemen. Dafür wird die Belichtungszeit länger. Eine hohe Ortsauflösung wird mit diesen doppelseitig beschichteten Filmen durch Kombination mit Bleifolien anstatt mit Fluoreszenzfolien erreicht. Filme für medizinische Anwendungen wurden unter anderen Voraussetzungen entwickelt. Hier ist es immer erforderlich, einen Kompromiss zwischen geringer Dosisbelastung für den Patienten und hoher Bildqualität zu finden.

Die neuen digitalen Detektoren wurden vorrangig für medizinische Anwendungen entwickelt. Sie haben das Potential den Röntgenfilm zu ersetzen und damit die radiologische Technik zu revolutionieren. Diese Detektoren ermöglichen neue intelligente Computer-basierte Anwendungen. Sie können sowohl klassische Filmanwendungen ersetzen als auch neue ZfP-Technologien ermöglichen.

Es gibt aber auch Risiken. Die digitalen Techniken wurden vorrangig für medizinische Anwendungen entwickelt. Ihr schwächster Punkt ist die geringe Ortsauflösung im Vergleich zu ZfP-Filmen. Der Anwendungsbereich vieler DDAs ist auf niedrigere Röntgenenergien begrenzt ( $< 250$  keV). Trotzdem gibt es außergewöhnliche wirtschaftliche Vorteile, wenn die klassische Filmtechnik durch digitale Technik ersetzt wird. Kürzere Handhabungs- und Auswertezeiten (H+A) bei hoher Bildqualität führen zu einer besseren Produktqualität in einer kürzeren Zeit. Die Prüfzeit kann 25% des H+A-Zyklus bei mobiler Prüfung (z.B. CR) und sogar weniger als 5% bei der Serienprüfung (Guss- und Schweißtechnik) betragen. Für spezielle Anwendungen ist auch die wesentlich höhere Kontrastaufklärung von Vor-

teil ( Fig. 1), die neue Anwendungen ermöglicht. Zusätzliche Einsparungen ergeben sich durch Reduktion von Verbrauchsmaterialien. In einigen Bereichen sind auch ökologische Vorteile durch den Wegfall chemischer Abfälle vorhanden.

## Motivation für Filmersatz durch Speicherfolien und Flachdetektoren

- Kürzere Prüf- und Auswertezeiten (P+A)
- Neue Einsatzgebiete durch höhere Prüfqualität und Objektumfang
- Keine Chemikalien und gefährlichen Stoffe
- Weniger Verbrauchsmaterial

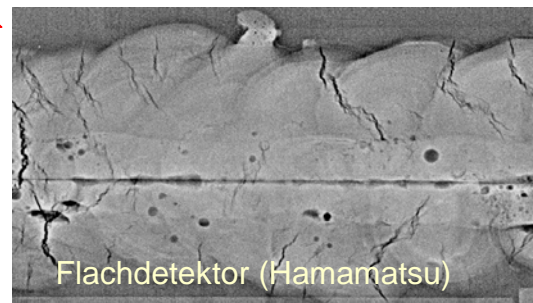
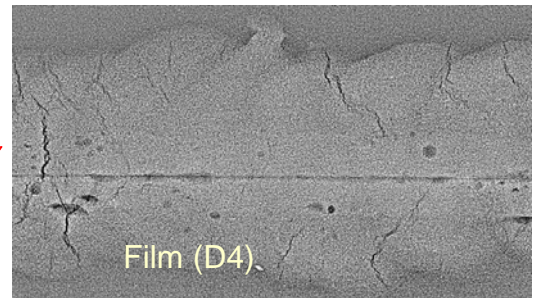


Fig. 1: Filmersatz – Vorteile und Möglichkeiten

Bei den Einsatzbereichen ist vorrangig zwischen mobiler und stationärer Prüfung zu unterscheiden. Vorteilhaft werden Speicherfolien bei vor-Ort-Prüfungen eingesetzt, da sie absolut wetterfest sind. Nachteilig sind im Vergleich zu DDAs die etwas längeren Handhabungszeiten durch das separate Auslesen in einem Scanner. Flachdetektoren haben sich bei in-Haus-Anwendungen und Serien-Prüfungen durchgesetzt. Sie haben außerdem zur Einführung von neuen industriellen Anwendungen wie Computer-Tomographie und Automatischer Defekterkennung beigetragen (siehe Fig. 2). Filmersatz unter Berücksichtigung von Standards betrifft im Wesentlichen nur den Bereich Schweißen und Guss.

### Diskussion:

#### Vergleich der Bildqualität von Film und digitalen Systemen:

Industrielle Röntgenfilme sind doppelseitig beschichtet, sie werden hauptsächlich mit verstärkenden Bleifolien in vakuumverpackten (oder unter Andruck) Kassetten verwendet. Sie liefern eine erheblich bessere Bildqualität als medizinische Filmsysteme. Dafür benötigen sie 10 bis 100-fach höhere Belichtungszeiten. Die höhere Dosisbelastung stellt für ZfP-Anwendungen im Allgemeinen kein Problem dar. Weiterhin werden ZfP-Filme auf eine optischen Dichte zwischen 2 und 4 belichtet. Das ist etwa der doppelte Wert, der im medizinischen Bereich erforderlich ist. Die hohe ZfP-Bildqualität ist insbesondere wichtig für den Bereich Schweißen und Guss, da hier feine Risse und geringe Wanddickenänderungen nachgewiesen werden müssen. Die Anforderungen sind in verschiedenen Normen niedergeschrieben.

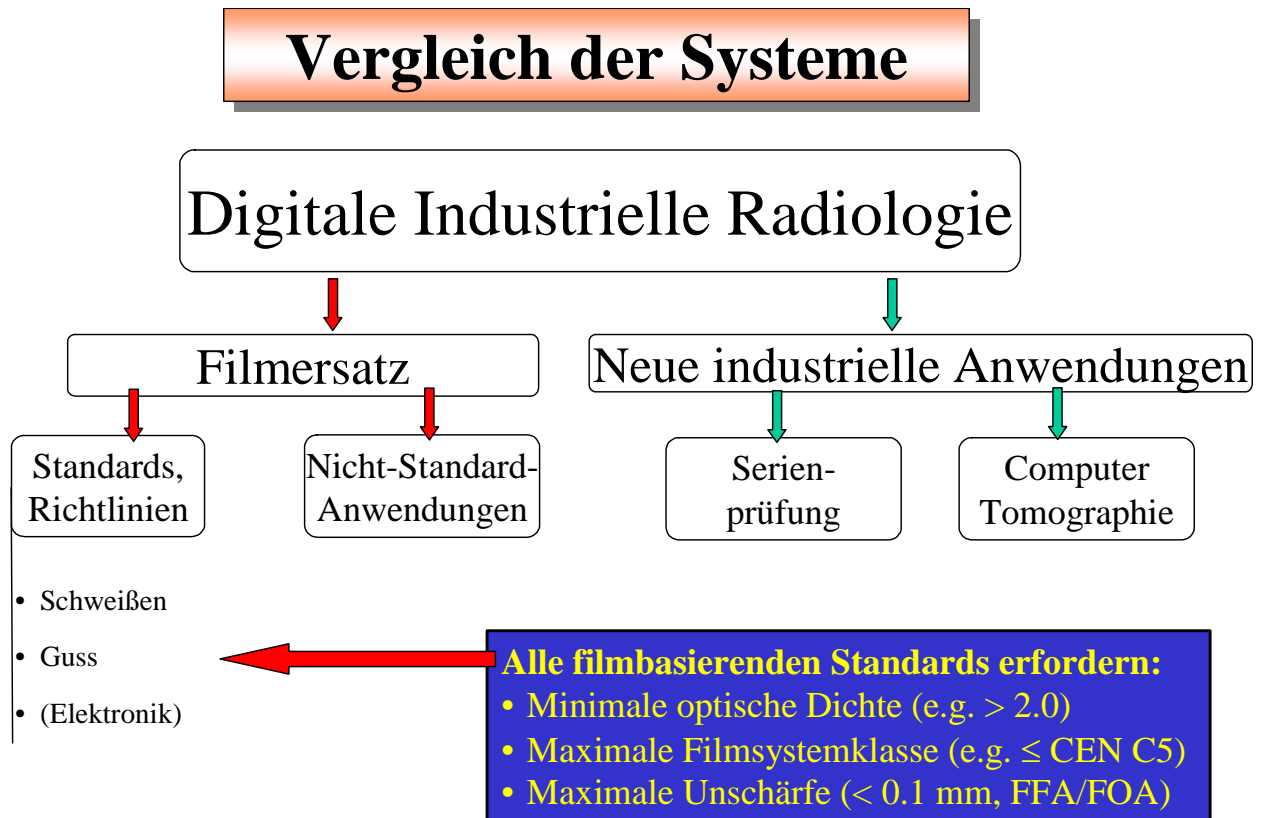


Fig. 2 Anwendungsbereiche der digitalen Radiologie in der Industrie

**Normiertes Signal/Rauschverhältnis und Basis-Ortsauflösung:**

Das Signal/Rauschverhältnis von industriellen Filmen wird indirekt in den Standards EN 584-1, E 1815, K 7627, ISO 11699-1 (Tab. 1) angegeben. Filmsysteme sind durch Gradient (bei  $D = 2$  und  $D = 4$  über Schleier und Basis) und die Körnigkeit  $\sigma_D$  at  $D = 2$  über Schleier und Basis charakterisierbar. Der wichtigste Parameter für die Erkennbarkeit feiner Details ist das Gradient/Körnigkeitsverhältnis  $G_2/\sigma_D$ , das verwendet werden kann, um das entsprechende Signal/Rauschverhältnis zu berechnen. Der Leser der Standards sollte wissen, dass das Gradient/Körnigkeitsverhältnis als aufgerundeter Wert von Gradient und Körnigkeit angegeben wird. Tab. 1 zeigt die verschiedenen Werte und Systemklassen. Die verschiedenen Nationen und Komitees haben zwar entschieden verschiedene Namen und Bereiche für gleiche Systemklassen zu vergeben, aber sie haben sich auf dieselben Zahlenwerte als Grenzwerte geeinigt.

Die Umrechnung von  $G_2/\sigma_D$  in SNR setzt voraus, dass beide Systeme, ZfP-Film und digitale Detektoren (CR und DDA), Signale liefern, die näherungsweise proportional zur Belichtungsdosis sind. Nicht-lineare Systeme (z.B. einige CR-Geräte von FujiFilm, GE-IT, Kodak) müssen in Bezug auf ihre Kennlinien linearisiert werden (Look Up Table Korrektur – LUT), bevor SNR und Ortsauflösung bestimmt werden können. „W“-Filmsysteme von Tab. 1 und Film-Fluoreszenzfolien-Systeme werden hier ausgeschlossen, da sie eine nichtlineare Charakteristik besitzen. Das SNR wird für lineare Systeme folgendermaßen berechnet:

$$SNR = (G_2/\sigma_D) / \ln(10) \tag{1}$$

Tab. 1: Überblick über Filmsystemklassen verschiedener Standards und die entsprechenden SNR- und  $G_2/\sigma_D$ -Werte.

System class				Minimum gradient-noise ratio at	Signal to Noise Ratio
World ISO 11699-1	Europe CEN 584-1	USA ASTM E1815-01	Japan K7627-97	D=2 above $D_0$	D=2 above $D_0$
				$G_2/\sigma_D$	SNR
T1	C1	Special	T1	300	130
	C2			270	117
T2	C3	I	T2	180	78
	C4			150	65
T3	C5	II	T3	120	52
T4	C6	III	T4	100	43
		W-A	W-A	135	
		W-B	W-B	110	
		W-C	W-C	80	

Das SNR von Filmen wird mit einer runden Blende von 100  $\mu\text{m}$  Durchmesser (siehe obige Standards), nach Belichtung des Films auf eine diffuse optische Dichte von 2 über Schleier und Basis gemessen. Die Fläche der Blende (Aperture) wird nur auf eine quadratische Blende umgerechnet da die Bildelemente (Pixel) eines Digitalbildes eine quadratische Fläche ausfüllen. Die Äquivalentfläche beträgt  $88,6 \times 88,6 \mu\text{m}^2$ . Das entspricht einer Auflösung von 287 dpi. Die Pixel-Fläche ist wichtig, weil das SNR von der Detektorelementfläche abhängt. Das SNR steigt proportional zur Wurzel der Detektorfläche bei gleicher Belichtungszeit bzw. gleichen Belichtungsbedingungen.

Daher wird in den neuen Standardentwürfen zur CR-Radiologie ein normiertes Mindest-SNR<sub>N</sub> für die Systemklassifizierung gefordert (CEN: prEN 14784-1, ASTM: Z7024Z). Das gemessene SNR<sub>meas</sub> muss entsprechend korrigiert werden:

$$SNR_N = SNR_{meas} \cdot \frac{88.6 \mu\text{m}}{SR_b} \quad (2)$$

SR<sub>b</sub> ist die Basisortsauflösung (basic spatial resolution – BSR), die der effektiven Pixelgröße (Wurzel der Pixelfläche) entspricht. SR<sub>b</sub> kann auf verschiedene Art und Weise gemessen werden. In den Standardkomitees wurde der Doppeldrahtmethode (EN 462-5, ASTM, E 2002) der Vorzug gegeben, da sie sehr einfach ist und schnell Ergebnisse erhalten werden können. Die Standards beschreiben die Messung der Gesamtunschärfe (total unsharpness - u<sub>T</sub>). Die Basisortsauflösung wird dann folgendermaßen berechnet:

$$SR_b = u_T / 2 \quad (3)$$

SR<sub>b</sub> entspricht im Allgemeinen der Pixelgröße direkt umwandelnder Systeme (z.B.  $\alpha$ -Se-Flachdetektoren, CdTe-Detektoren). Sie ist im Allgemeinen größer als die Pixelgröße von CR- bzw. DDA-Systemen mit fluoreszierenden Konverterfolien.

### Filmersatz auf der Basis von Bildgüteparametern

Die Klassifikation von digitalen Detektorsystemen zum Vergleich mit ZfP-Filmsystemen erfordert die Angabe / Ermittlung von zwei Parametern:

- Basisortsauflösung  $SR_b$  und
- normiertes SNR<sub>N</sub> als Funktion der Belichtungsbedingungen (typisch: Speed und Strahlenqualität).

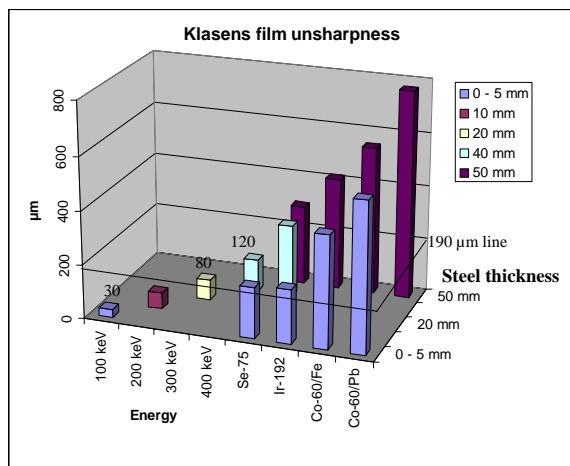


Fig. 3: Gemessene Unschärfe von ZfP-Filmsystemen für verschiedene Folien, Wanddicken und Energien.

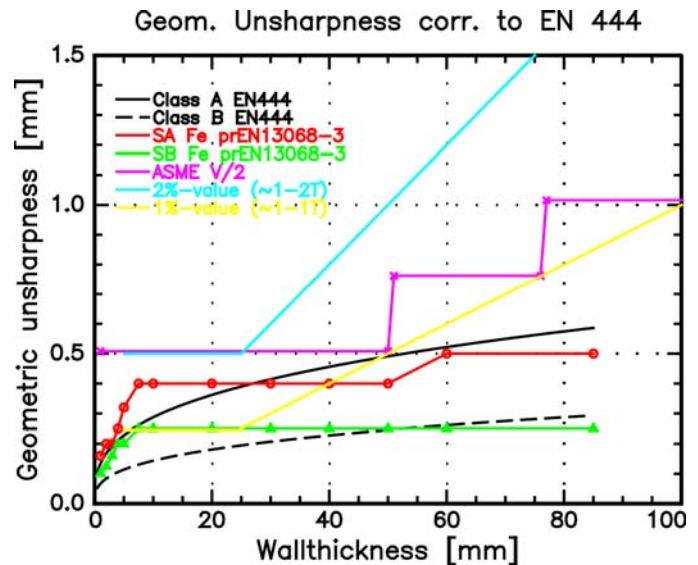


Fig 4: Geometrische Unschärfe als Funktion der Wanddicke für verschiedene Standards

Das Konzept der Detektor-Quantenausbeute (detective quantum efficiency - DQE), das in der Medizin zur Charakterisierung von Detektoren genutzt wird, ist wesentlich komplizierter als die vorgeschlagene Methode und erfordert eine komplexere Messung. Allerdings werden ähnliche Elemente wie bei der Messung von SNR und BSR verwendet. Das  $SNR_N$  entspricht dem Rauschquantenäquivalent (noise quanta equivalent - NQE) bei der Ortsfrequenz Null. Das Verhältnis zu den eingehenden Quanten wird nur indirekt über die zu bestimmende Speed (Empfindlichkeit) betrachtet. Die Speed wird als inverse Dosis (in Gray) definiert, die notwendig ist, um ein bestimmtes Klassenlimit von Tab. 1 zu erreichen. Da die meisten Detektoren in der Lage sind, die beste definierte Systemklasse zu erreichen, kann jedes Detektorsystem durch Paare von  $SNR_N$ -Klasse and Speed-Wert zusätzlich zur Basisortsauflösung klassifiziert werden.

Die erforderliche Bildqualität bzw. digitale Systemklasse kann nun für jedes ZfP-Problem definiert werden. Zum Ersatz von Filmanwendungen ist es möglich den entsprechenden Wert für die genutzte Filmsystemklasse nach Tab. 1 vorzugeben.

Die erforderliche Basisortsauflösung ( $SR_b$ ) kann auch aus existierenden Standards abgeleitet werden. ZfP-Filmsysteme mit Bleifolien zeichnen sich durch eine sehr geringe Unschärfe aus (Fig. 3). Diese hängt im Wesentlichen von der Strahlenqualität, Foliendicke und Foliematerial ab, aber nicht vom Filmtyp. Fig. 3 zeigt Filmunschärfewerte, die mit einem Mikrophotometer gemessen und nach Klasens (ASTM E1000) bestimmt wurden. Diese Werte sind im Allgemeinen viel kleiner als die geforderten geometrischen Unschärfen. Normalerweise kann die Detektorunschärfe im Bereich der geforderten geometrischen Unschärfe (oder kleiner) liegen. Leider sind diese Werte weltweit nicht harmonisiert. Europäische Standards definieren die geometrische Unschärfe als Funktion der Wanddicke für zwei Klassen (Standardtechnik A und verbesserte Technik B). ASTM- und ASME-Standards fordern sehr moderate Unschärfe-Werte, insbesondere im unteren Wanddickenbereich. Die ursprüngliche Idee in den US-Standards war es zu fordern, dass die Unschärfe dem erkennbaren Wanddickenkontrast entspricht. Diese Werte liegen normalerweise zwischen 1% und 2% der maximalen zu durchstrahlenden Materialdicke. Die typische ZfP-Prüfanforderung in den USA erfordert die Erkennbarkeit des 2-2T-Penetrimeters. Das entspricht einer Unschärfe von ca. 4% der Materialdicke. Nur der neue Standard E2104 (Radiographische Prüfung von Komponenten der Aerospace-Industrie) enthält reduzierte Unschärfenanforderungen. Figur 2 zeigt einen Vergleich der Anforderungen verschiedener Standards an die maximal zulässige geometrische Unschärfe. ASME V/2 ist äquivalent zu ASTM E 1032.

Letztendlich sollte der Anwender auf der Basis der zutreffenden Standards festgelegten, welche Anforderungen an das  $SNR_N$  (see Tab. 1) und die Basisortsunschärfe in Abhängigkeit von der Materialdicke, Energie und den Firmenforderungen zu fordern sind.

Die europäischen Standards EN 444, EN 1435 and EN 12681-5 fordern z. B.:

- 1<sup>st</sup> eine minimale geometrische Unschärfe als Funktion der Wanddicke ( $w$ ) und Prüfklasse sowie  
2<sup>nd</sup> eine Filmsystemklasse zwischen C3 und C5 ( $SNR_N \geq 52 \dots 78$  bei  $D=2$  über Schleier uns Basis)  
als Funktion der Wanddicke, Strahlenenergie und Prüfklasse.

**Table 2: Required spatial system resolution in dependence on energy and wall thickness**

Radiation source	Wall thickness $w$ [mm]	Class IPA		Class IPB	
		Max. Pixel <sup>1)</sup> Size [ $\mu\text{m}$ ]	Double wire IQI-number <sup>2)</sup>	Max. Pixel <sup>1)</sup> size [ $\mu\text{m}$ ]	Double wire IQI-number <sup>2)</sup>
X-ray $Up \leq 50$ kV	$w < 4$	40	$> 13^{3)}$	30	$\gg 13^{4)}$
	$4 \leq w$	60	13	40	$> 13^{3)}$
X-ray $50 < Up \leq 150$ kV	$w < 4$	60	13	30	$\gg 13^{4)}$
	$4 \leq w < 12$	70	12	40	$> 13^{3)}$
	$w \geq 12$	85	11	60	13
X-ray $150 < Up \leq 250$ kV	$w < 4$	60	13	30	$\gg 13^{4)}$
	$4 \leq w < 12$	70	12	40	$> 13^{3)}$
	$w \geq 12$	85	11	60	13
X-ray $250 < Up \leq 350$ kV	$12 \leq w < 50$	110	10	70	12
	$w \geq 50$	125	9	110	10
X-ray $350 < Up < 450$ kV	$w < 50$	125	9	85	11
	$w \geq 50$	160	8	110	10
Yb 169, Tm 170		85	11	60	13
Se 75, Ir 192	$w < 40$	160	8	110	10
	$w \geq 40$	200	7	125	9
Co 60		250	6	200	7
X-ray $Up > 1\text{MeV}$		250	6	200	7
NOTE:	<sup>1)</sup> If magnification technique is used, double wire IQI-readout is required only. <sup>2)</sup> The given IQI-numbers indicate the readout value of the first unresolved wire pair corr. to <b>EN 462-5</b> . <sup>3)</sup> The symbol ">13" requires the 13th wire pair to be resolved. <sup>4)</sup> The ">>13" requires the 13 <sup>th</sup> wire pair to be resolved with > 50% dip between the maxima. Up - Tube voltage.				

Die zulässige Gesamtunschärfe  $u_T$  wird nun durch die geometrische Unschärfe  $u_g$  ersetzt, die in der EN 444 folgendermaßen berechnet wird:

$$u_g = \frac{1}{a} \cdot w^{1/3} \quad (4)$$

mit  $a = 15$  für Klasse B-Prüfung und  $a = 7.5$  für Klasse A-Prüfung und  
 $w$  - in mm.

Die "europäische" Gleichung 4 gestattet die Berechnung der erforderlichen Pixelgröße des Detektors für ein europäisches Prüfproblem. Aufgrund der Differenz zwischen  $u_g$  und  $SR_b$  entspricht die empfohlene Pixelgröße der halben geometrischen Unschärfe  $u_g$ . Falls die Detektorunschärfe höher ist als der geforderte Wert, kann Vergrößerungstechnik angewendet werden. Tab. 2 fasst diese Diskussion zusammen. Die Werte dieser Tabelle für CR-Systeme sind dem prEN 14784-2 entnommen.



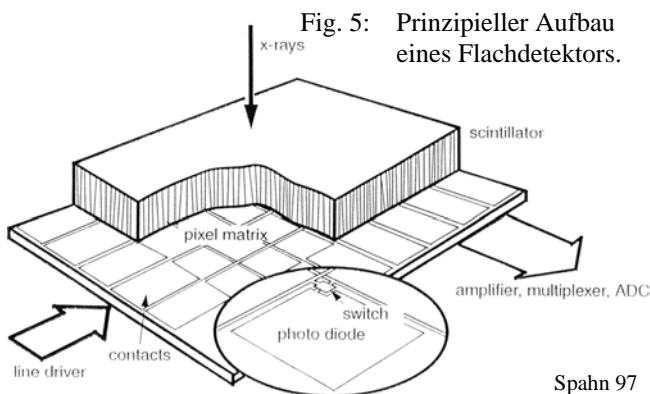
Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die oben beschriebene Prozedur nur anzuwenden ist, wenn die strikte Einhaltung der EN 444 oder einer Folgenorm gefordert wird. Es gibt eine Vielzahl von Anwendungen, die nicht die geringen Unschärfen der Prüfklassen A oder B erfordern. Firmen können auch ihre eigenen Anforderungen definieren. Das ist der übliche Fall bei automatischen Prüfsystemen mit computerbasierter Bildauswertung. Hier wird die Unschärfe (kleinster zu findender Fehler) von bruchmechanischen und Prüfzeitanforderungen bestimmt. Der europäische Standard EN 13068-3 (Radioskopie) gestattet die Akzeptanz höherer Unschärfewerte im geringen Wanddickenbereich. Zum Ausgleich wird gefordert, die Strahlenergie zu reduzieren, um hier durch höhere Kontraste zu kompensieren.

Die ASTM/ASME-Standards sind durch moderate Anforderungen an die Unschärfe gekennzeichnet. Das trifft wie gesagt insbesondere auf den niederen Wanddickenbereich zu. Dadurch wird allerdings die Anwendung von neuen digitalen Systemen (mit hoher Unschärfe) in den USA durch die dortige Standardisierungssituation sehr unterstützt. Der Prüfer sollte sich hier über die Risiken im Klaren sein. Die Auffindrate für feine Details kann erheblich geringer sein als bei der Filmradiographie. Typischerweise legt die durch die Firma festgelegte niedergeschriebene Prozedur Unschärfe und Kontrastanforderung in den USA fest. Prüfklassen sind unbekannt.

Einige digitale Detektoren zeigen erhebliche Unterschiede der spektralen Empfindlichkeit im Vergleich zu Film-Bleifoliensystemen auf. DDA-Systeme auf der Basis von Fluoreszenzfolie und CR-Systeme sind besonders empfindlich im niedrigen Energiebereich. Das heißt, sie sind auch sehr empfindlich gegenüber nichtbildzeichnender Streustrahlung. Daher sind dickere Bleifolien zur Streustrahlungsfiltration als beim Film erforderlich. Bei Prüfung von Stahlteilen benötigen CR-Folien ca. die 3-fache Bleifoliendicke im Vergleich zum Film (siehe prEN 14784-2). Da der Streustrahlanteil schwer vorherzusagen ist, und weitere Effekte zu eingeschränkter Bildgüte führen können, ist auch bei digitalen Systemen mit IQIs zu arbeiten. Es wird empfohlen generell mit einem IQI für den Kontrast (Drahtsteg nach EN 462-1 oder Stufe-Loch-Körper nach EN 462-2, ASTM E 1025) und dem Doppeldrahtsteg (EN 462-5, E 2002) zu arbeiten. Eine kostenlose Demo-Software zur Bestimmung von Unschärfewerten und SNR-Werten steht unter [www.kb.bam.de/~alex/ic.html](http://www.kb.bam.de/~alex/ic.html) zur Verfügung.

### Beispiel: Digital Detector Arrays:

Flachdetektoren, auch Digital Detektor Arrays (DDA) genannt, sind eine Alternative für CR- und Filmanwendungen sowie für radioskopische Systeme wie Fluoroskope und Bildverstärkersysteme. Die Mehrzahl der Systeme besteht aus einer Photodiodenmatrix die über TFTs (Dünnschichttransistoren)



ausgelesen wird. Diese DDA's basieren auf amorphen Siliziumstrukturen, die röntgenhart sind. Fig. 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau [1]. Es gibt auch direkt konvertierende Systeme, die anstatt der Fluoreszenzfolie Halbleiterschichten aus amorphem Selen oder CdTe verwenden und Mikroelektroden anstatt der Photodioden besitzen.

Beide Systeme können als Matrixdetektoren betrachtet werden, die parallel in einer Vielzahl von Detektorelementen die Bild-

information sammeln. Da alle Detektorelemente eine leicht unterschiedliche Kennlinie besitzen, müssen diese Kennlinien ausgeglichen werden. Dieser Prozess wird Shadingkorrektur oder Kalibrierung genannt. Die einfachste Kalibrierung basiert auf der Annahme, dass alle Detektorelemente linear zur Dosis arbeiten, aber unterschiedlich empfindlich sind. Zur Kalibrierung wird ein Dunkel- und Hellbild aufgenommen. Mit dem Dunkelbild wird eine Offset-Korrektur ausgeführt und das Hellbild wird nach Offset-Korrektur zum Ausgleich der Empfindlichkeit der Detektorelemente verwendet. Diese Zweipunktkorrektur ist schnell und genügend genau für viele Anwendungen. Wird eine hohe Kontrastempfindlichkeit benötigt, kann eine Mehrpunktkalibrierung verwendet werden, die auch Nichtlinearitäten der Kennlinien der Detektoren korrigieren kann. In Kombination mit der Integration über viele Einzel-

bilder des gleichen Objektes können hier wesentlich höhere Kontrastempfindlichkeiten erreicht werden als mit den besten Industrieröntgenfilmen. Dabei kann durchaus auch mit längeren Belichtungszeiten, als für die Filmbelichtung üblich, gearbeitet werden. Figur 6 zeigt eine Aufnahme der Schweißnaht BAM 5, die verschiedene Fehler enthält. Die Aufnahme erfolgte mit einem C3-Filmsystem und einem Flachdetektor der Fa. Hamamatsu mit 50µm Pixelgröße und ähnlichen Bedingungen. Der Film wurde zum Vergleich mit einem Scanner der Klasse DS 10 (Archivierungsklasse) mit 50 µm Pixelgröße eingescannt. Beide Bilder sehen ähnlich aus. Erst eine Hochpassfilterung, die das Rauschen sichtbar macht, gestattet den visuellen Vergleich. Die digitale Radiographie mit dem Flachdetektor zeigt hier schon eine etwas bessere Bildqualität. Figur 7 zeigt den Vergleich bei 8-facher Belichtungsgröße (mAs) des Flachdetektors. Die Verbesserung der Kontrastauflösung ist mit bloßem Auge erkennbar. Die Vergrößerung des oberen Randes zeigt, dass in der Aufnahme des Flachdetektors noch Mikroporen erkannt werden können, die in der Filmaufnahme im Rauschen verschwinden. Es wird in der Zukunft darüber nachzudenken sein, inwieweit diese Technologie neue ZfP-Anwendungen erschließt, die bisher nicht zugänglich waren.

### **Schlussfolgerung:**

Die Eigenschaften von ZfP-Röntgenfilmen sind in verschiedenen Standards beschrieben. Die Basisparameter sind das normierte  $SNR_N$  und die Basisortsauflösung  $SR_b$ .  $SNR_N$  Grenzwerte für die Klassifizierung können den Standards EN 584-1, E 1815, JIS 7627 and ISO 11699-1 entnommen werden und sind in Tab. 1 aufgelistet. Digitale Detektoren sollten das gleiche oder ein besseres  $SNR_N$  als das zu ersetzende Filmsystem haben. Die minimal zu fordernde  $SR_b$  kann aus den erforderlichen geometrischen Unschärfen ( $u_g$ ) berechnet werden. Diese sind in den folgenden Standards spezifiziert: EN 444, EN 1435, ISO 5579, E 1032 und E1742. Der empfohlene  $SR_b$ -Wert ist  $\frac{1}{2}$  der  $u_g$ -Anforderung, die von der Materialdicke abhängt.

Es wird damit gerechnet, dass die oben beschriebene Prozedur zur Klassifizierung von digitalen Detektoren zum Filmersatz ab Ende 2005 standardisiert zur Verfügung steht. Aufgrund der grundsätzlichen Unterschiede zur Filmradiographie und des Umfangs der zu veröffentlichenden Standards wird der eine oder andere Nutzer ggf. vor den schwer lesbaren Dokumenten zurückschrecken. Es sollte hier vermittelt werden, dass anstatt der Messung der optischen Dichte (Schwärzung) in der Digitaltechnik die Messung des  $SNR$  erfolgen sollte. Ist der Wert der Spezifikation erreicht, kann die Aufnahme akzeptiert werden. Diese Messung ist das Analogon zur Schwärzungsmessung (opt. Dichte) bei der Filmradiographie. Zusätzlich sollte die Unschärfe gemessen werden. Sind dann alle geforderten Drahtstege oder Stufe-Loch-Testkörper zu erkennen, ist die Bildqualität in Ordnung. In einer nächsten Revision der vorliegenden Standards muss über Vereinfachungen nachgedacht werden. Das Konzept erscheint tauglich für die ZfP. Es kann also festgestellt werden:

- Ein Äquivalentwert zur opt. Dichte = 2 von Filmen kann für digitale Detektoren bestimmt werden.
- Er hängt von der Dosis, dem Grauwert, der Scanner- bzw. Detektor-Verstärkung, der Detektorempfindlichkeit und der Ortsauflösung ab.
- Der Äquivalentwert soll dem  $SNR$ -Wert des spezifizierten Filmsystems entsprechen mit dem verglichen wird.

Es gibt keinen allgemeingültigen Wert für die Reduktion der Belichtungszeit beim Übergang von Film- zu digitaler Radiographie, da dieser Wert vom DR-System, seiner Parametereinstellung und der Filmsystemklasse, die ersetzt werden soll, abhängt. Aufgrund der unterschiedlichen spektralen Eigenschaften der Digitaldetektoren und ihrer im Allgemeinen höheren Unschärfe im Vergleich zu ZfP-Filmen, kann das Kontrast/Rauschverhältnis kleiner sein als in der Filmradiographie. Daher sind optimierte Filterfolien zu verwenden.



**Referenz:**

- [1] Ewert, U., Zscherpel, U., Proceedings of the NAARRI International Conference on Applications of Radioisotopes and Radiation Technology in the 21<sup>st</sup> Century, pp. 1-17, Bombay, India, 12.-14.12.2001.

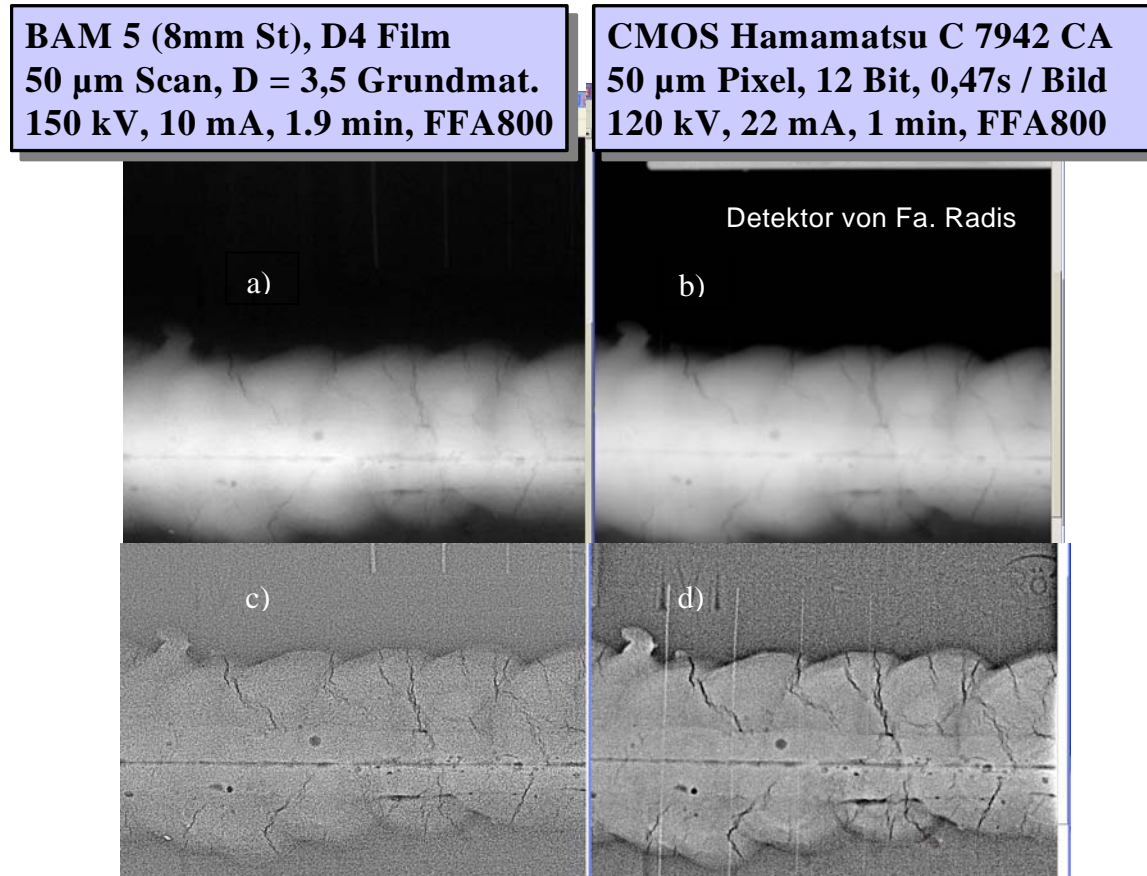


Fig. 6: Vergleich der Durchstrahlungsbilder der Schweißnaht BAM 5, aufgenommen mit  
a) digitalisiertem Film der Klasse C3 und  
b) einem Flachdetektors unter ähnlichen Aufnahmebedingungen.  
c) d) Hochpassgefilterte Darstellung von a) und b).

**BAM 5 (8mm St), D4 Film  
50 µm Scan, D = 3,5 Grundmat.  
150 kV, 10 mA, 1,9 min, FFA800**

**CMOS Hamamatsu C 7942 CA  
50 µm Pixel, 12 Bit, 0,47s / Bild  
160 kV, 6,3 mA, **8 min**, FFA800**

Detektor von Fa. Radis  
Software von Yxlon

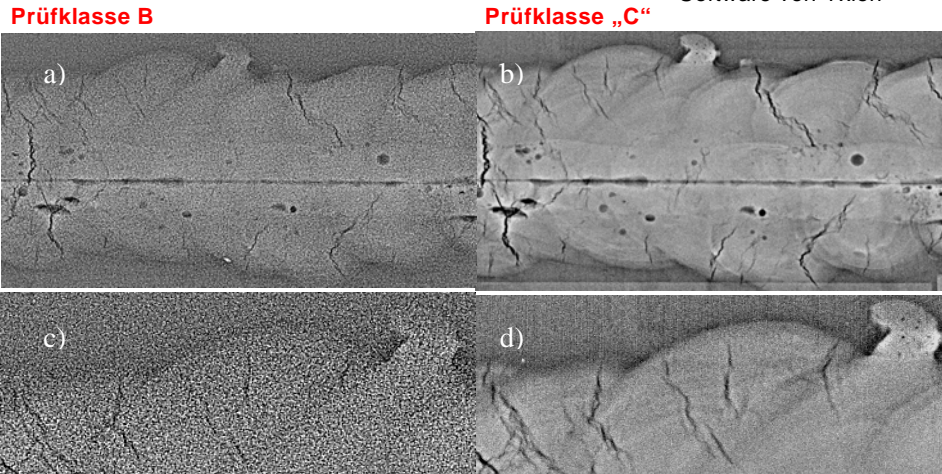


Fig. 7: Vergleich hochpassgefilterter Durchstrahlungsbilder der Schweißnaht BAM 5, aufgenommen mit  
a) digitalisiertem Film der Klasse C3 und  
b) einem Flachdetektor bei höherer Belichtungszeit.  
c) d) Vergrößerung von a) und b).