

Strahlenfeste Flachdetektoren für industrielle Anwendungen

W.Niemann, YXLON International X-Ray, Hamburg

Flachdetektoren auf Basis von a-Si werden seit einigen Jahren in der ZfP mit großem Erfolg eingesetzt. Der nutzbare hohe Grauwertebereich (bis zu 16 bit) kombiniert mit einer ausreichend schnellen Bildübertragungsrate lässt diese Detektoren prädestiniert für solche Anwendungen erscheinen, bei denen die Prüfgeschwindigkeit allerhöchste Priorität hat. Aus diesem Grunde sind vollautomatische Anlagen für Gussteilprüfung oft mit a-Si Detektoren bestückt.

Der bisher bestehende Nachteil der Detektor-Alterung bei a-Si Detektoren wird bei der neuen Generation strahlenfester Detektoren durch verbesserte Herstellungsverfahren weitestgehend beseitigt. Mit einem speziellen Software-Tool, mit dem die verschiedenen Alterungserscheinungen messbar gemacht werden, konnte dieser Fortschritt in monatelangen Bestrahlungstests unter extremen Bedingungen im Hause YXLON nachgewiesen werden. Dies wird dargestellt anhand der sehr geringen Änderungen nach langer Bestrahlungszeit, z. B. des Dunkelstroms bzw. des Lag (Nachleuchten). Es wird auch gezeigt, dass die niederenergetische Strahlung einen stärkeren Einfluss auf die Alterung hat als die harte Strahlung.

- a) Strahlenfeste Detektoren der neuen Bauart stehen mit Pixelgrößen von 400 μm bei nutzbaren Flächen von 8" und 16" seit Anfang 2005 zur Verfügung; Detektoren mit 200 μm Pixelgröße sind in Planung. Damit werden sowohl für die vollautomatische Gussteilprüfung als auch für Applikationen unter dem Titel „Film Replacement“ neue Maßstäbe für Lebensdauer, Bildqualität und Durchsatz gesetzt.

Alterung von Röntgenbildverstärkern

Bevor auf das eigentliche Thema der Haltbarkeit von Flachdetektoren eingegangen wird, soll das Alterungsverhalten der Röntgenbildverstärker behandelt werden. Diese sind in einigen wichtigen ZfP-Bereichen über Jahrzehnte die dominierenden Detektoren gewesen und haben heute trotz einer Vielfalt von Digitaldetektoren noch immer einen sehr hohen Marktanteil.

Röntgenbildverstärker werden in großem Maße zum Beispiel bei der automatischen Röntgenprüfung von gegossenen Felgen eingesetzt. Ein wesentlicher Grund für die Verwendung von Bildverstärkern ist deren Fähigkeit, Röntgenbilder von schnell bewegten Objekten (rotierende Felgen) mit ausreichender Bildqualität darzustellen. Die für diesen Zweck konzipierten Röntgenprüfsysteme müssen in der Lage sein, im Dreischichtbetrieb über 365 Tage im Jahr betrieben zu werden. Eine übliche Variante besteht darin, Röntgenstrahler und Bildverstärker an einem C-Arm zu montieren, so dass ein bewegtes Rad aus verschiedenen Projektionswinkeln betrachtet werden kann.

Die Räderprüfanlagen sind optimiert für den Durchsatz. Es werden vorwiegend Bildverstärker mit Analogkameras verwendet, die neben einer automatischen Prüfung bei Bedarf auch eine manuelle Prüfung mit Livebildern ermöglichen.

Bei der Prüfung sehr komplexen Gussteile ist der Dynamikbereich der Bildverstärkersignale oft nicht ausreichend, um alle Wandstärken bei vorgegebener Projektionsrichtung abzubilden, so dass mehrere Aufnahmen bei verschiedenen Spannungen und zugeordneten optimalen Vorfiltern notwendig werden, z.B. mit 50 kV / 2,5 mm Al Filter und 120 kV / 0,5 mm Cu Filter. Im Vergleich zu Detektoren mit höherer Dynamik ist diese Arbeitsweise bezüglich des Alterungsverhaltens sicher kein Nachteil.

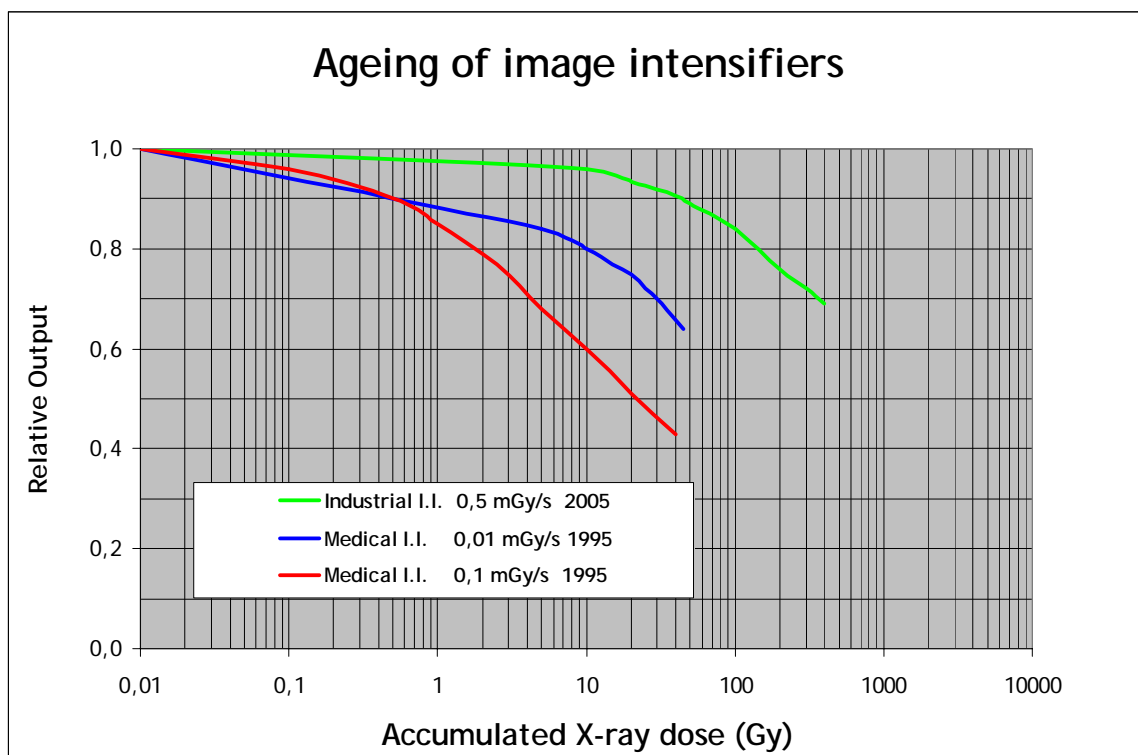


Abbildung 1 Typische Alterung von Röntgenbildverstärkern

Die Fortschritte der Bildverstärkertechnologie in bezug auf ihr Alterungsverhalten sind in Abbildung 1 ersichtlich. Dort ist das relative Ausgangssignal als Funktion der akkumulierten Dosis dargestellt. Während handelsübliche medizinische Bildverstärker aus den 80er oder 90er Jahren bei moderaten industriellen Strahlungsbelastungen schon relativ frühzeitig, d.h. nach einigen 100 Gray, auf 10% des Anfangssignalwertes abgesunken waren, sind aktuell verwendete Röntgenbildverstärker industrietauglich und können einige 1000 Gray als Lebensdosis vertragen.

Die aus langer Erfahrung gewonnenen Alterungserscheinungen von Röntgenbildverstärkern lassen sich folgendermaßen zusammenfassen :

- a) Das Alterungsverhalten ist stark abhängig von den verwendeten Röntgenparametern Spannung, Strom und der Vorfilterung, von den Strahlungspausen und der Komplexität des Prüfteils.
- b) Es gibt einen schnellen Initialabfall des Konversionsfaktors, der von einem langsameren Abfall abgelöst wird. Nach und nach erscheinen Einbrandstrukturen, die mit geometrischen Strukturen des Prüfteils korreliert sind. Der dominierende Alterungseffekt ist die Bräunung des Ausgangsglases.
- c) Mögliche Erholungseffekte durch Strahlungspausen gehen nach kurzer Zeit wieder verloren.
- d) Im Dauerbetrieb (z.B. bei Vollautomaten, bei denen die Höhe des Bildsignales in geeigneter Weise ausgewertet wird), muss die Bildhelligkeit regelmäßig nachgeregelt werden, z.B. durch Nachführung von U und I an der Röntgenröhre. Die Lebensdauer der Bildverstärker unter diesen industriellen Bedingungen beträgt typisch ca. 2-3 Jahre. In dieser Zeit ist durch die Dauerbestrahlung der Konversionsfaktor der Bildverstärker auf einen Bruchteil des ursprünglichen Wertes abgefallen.

Der bei YXLON praktizierte Lösungsansatz zur Erreichung möglichst langer Lebenszeiten der Bildverstärker basiert auf vier Kernpunkten :

- i) Es werden industrielle, strahlenharte Bildverstärker mit non-browning Ausgangsglas eingesetzt.
- ii) In die Bildverstärker ist eine Dosisleistungskontrolle mit automatischer Abschaltung bei Überstrahlung integriert.
- iii) Wo immer möglich, werden adäquate Strahlenfilter eingesetzt, und
- iv) Jede unnötige Strahlenexposition wird vermieden.

Anforderungen bei ADR Systemen mit a-Si Detektoren

Vollautomatische Röntgenprüfsysteme mit ADR (Automatic Defect Recognition) wie z.B. die MU-59 von YXLON verwenden zur Optimierung des Prüfdurchsatzes Flachdetektoren mit hoher Dynamik und moderatem Pitch.

Bei dieser Röntgenprüfung sind folgende Aspekte besonders hervorzuheben :

- a) Durch Verwendung von 16 bit Detektoren kann die Röhrenspannung so auf die maximale Wandstärke eingestellt werden, dass trotzdem noch die dünnen Wandbereiche vernünftig abgebildet sind.
- b) Bei 1,0 mm Fokusgröße werden Röhrenleistungen im Bereich von 640 bis 1000 W gefordert.
- c) Die am Detektor gemessene durchschnittliche Dosisleistung beträgt typisch ca. 0,4 Gy/h, was einer Jahresbelastung von 3000-4000 Gy entspricht.
- d) Dank schneller Fördertechnik (z.B. mit einem Doppelrobotersystem) werden minimierte Taktzeiten (z.B. 16 s / Prüfteil) und kurze Pausenzeiten erreicht (typ. 4 % ; beim Teilewechsel) .

Ein Röntgenprüfsystem mit Doppelroboter wird in Abbildung 2 gezeigt.

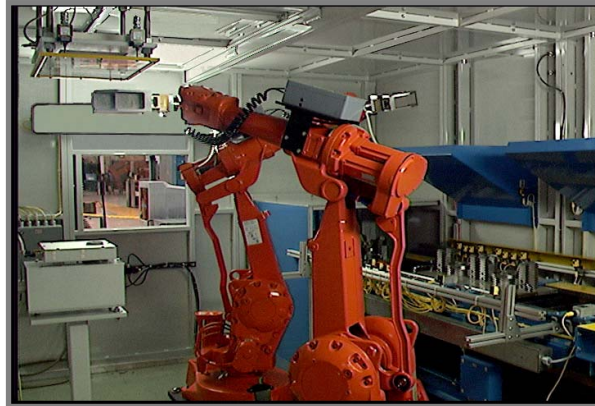


Abbildung 2 Innenansicht eines MU-59 Automaten

Die von Anfang an für diese Prüfaufgabe eingesetzten a-Si Digitaldetektoren der 1. Generation zeigen Alterungseffekte, die sich von denen der Bildverstärker teilweise stark unterscheiden. Auch bei diesen Flachdetektoren muss erwähnt werden, dass eine ursprünglich für den (wesentlich größeren) Medical Markt entwickelte Technologie in den Industriebereich übertragen wurde und dann an die dort herrschenden stärkeren Anforderungen angepasst werden muss.

An typische Alterungserscheinungen der Generation-1 Detektortypen sei folgendes aufgeführt :

- 1) Alterungserscheinungen traten hauptsächlich in Vollautomaten auf, d.h. bei Röntgen-Prüfsystemen mit höchster Dosisbelastung
- 2) Es wurde ein schneller Anstieg des Dunkelstromes beobachtet, der mit Veränderungen des Entladeverhaltens der TFT´s durch die Dauerbestrahlung erklärt werden kann
- 3) Durch Dauerbestrahlung kommt es zu Ausfällen von kompletten Zeilen oder Spalten; die Bestrahlung zerstört die COB´s (Chip On Board)
- 4) Die a priori vorhandenen Pixel- und Clusterfehler steigen an
- 5) Der Lag steigt an, was mit dem geänderten Entladeverhalten erklärbar ist.

Der Detektorhersteller und YXLON haben die Probleme der Generation-1 Detektoren erkannt und entsprechende Korrekturmaßnahmen durchgeführt. Diese bestehen in einer kompletten Überarbeitung des Detektorkopfes und einer nachfolgenden Absicherung der Detektoreigenschaften mit Hilfe eines Langzeittests.

Über die Ergebnisse des Langzeittests dieser Generation-2 Detektoren wird im folgenden Kapitel berichtet.

Dauertest: Ergebnisse mit Detektoren der 2. Generation

Strahlenharte 16-bit Detektoren der 2. Generation mit einer Pixelgröße von 400 µm stehen in den Varianten XRD-1640IND und XRD-0840IND zur Verfügung. Die Detektor-Eingangfläche beträgt 410 * 410 mm bzw. 205 * 205 mm bei einer Pixelzahl von 1024 * 1024 bzw. 512*512 (siehe auch Abbildung 3).



Abbildung 3 Strahlenharte Detektoren XRD-1640IND und XRD-0840IND

Um innerhalb einer angemessenen Zeitdauer aussagekräftige Resultate in bezug auf die Alterungserscheinungen zu bekommen, wurde eine Dosisleistung ausgewählt, die um ein Vielfaches höher ist als in den kommerziellen Vollautomaten. Bei 160 kV / 10 mA wurde eine Dosisleistung von 0,7 mGy/s erreicht, was einer im Kalenderjahr akkumulierten Dosis von 20.000 Gray entspricht.

Es wurde ein sehr hoher Testaufwand betrieben : über einen Zeitraum von 1,5 Jahren wurden 17 Flachdetektoren dauerhaft bestrahlt, wobei bis zu 4 Detektoren gleichzeitig im Einsatz waren. Durch Anbringen von Vorfiltern und Prüfkörpern unterschiedlicher Materialart und -dicke wurden von der

Strahlenqualität abhängige Alterungseffekte erzeugt. Ein typisches Röntgenbild mit einem Stufenkeil wird in Abbildung 4 gezeigt.

Anmerkungen zur Konstanz der Dosisleistung :

Zur Sicherstellung, dass gemessene Änderungen der Detektorsignale keine andere Ursache als die Detektoralterung selbst haben, wurde permanent die Dosisleistung der MG165 Röntgenanlage überwacht. Über einen Zeitraum von 18 Monaten bei Dauerbetrieb mit 100 % Duty Cycle konnte im Rahmen der Genauigkeit des Messgerätes (1%) keine Abweichung der Dosisleistung vom Anfangswert festgestellt werden. Dies spricht eindeutig für die Konstanz der Parameter der Röntgenanlage (U,I) und die Konstanz der Qualität des Röhrentargets.



Abbildung 4 Testbild mit Stufenkeil

Für die neuen strahlenharten Detektoren der 2. Generation (XRD-1640 und XRD-0840) lieferte der Dauertest folgende Erfahrungen :

1. Es gibt keine Frühausfälle durch Bestrahlung
2. Die Alterungserscheinungen sind sehr stark reduziert.
3. Der Offset (Dunkelstrom) steigt mit der Bestrahlungsdosis; die niedrigen Energien bewirken die stärkeren Alterungseffekte.
4. Der Lag steigt linear mit der Bestrahlungsdosis.
5. Durch applikationsgerechte Vorfilterung und Bestrahlungspausen kann die Lebensdauer erheblich erhöht werden.
6. Die außen liegende Elektronik der Detektoren muss unbedingt geschützt werden.

Einige Teilergebnisse des Lebensdauertests sollen im folgenden erläutert werden.

Dunkelstrom: Der Anstieg des Dunkelstromes (Offset) nach einer akkumulierten Bestrahlungsdosis von 10.000 Gray als Funktion der Vorfilterung wird in Abbildung 5 dargestellt. Der Initialwert des Dunkelstroms (Auslieferungszustand) liegt typischerweise bei ca. 2000 ADU. Es ist klar zu erkennen, dass bei den geringen Al-Dicken ein starker Offset-Anstieg zu verzeichnen ist, während größere Al-Dicken (z.B. 5 cm) fast keine Schädigung erkennen lassen.

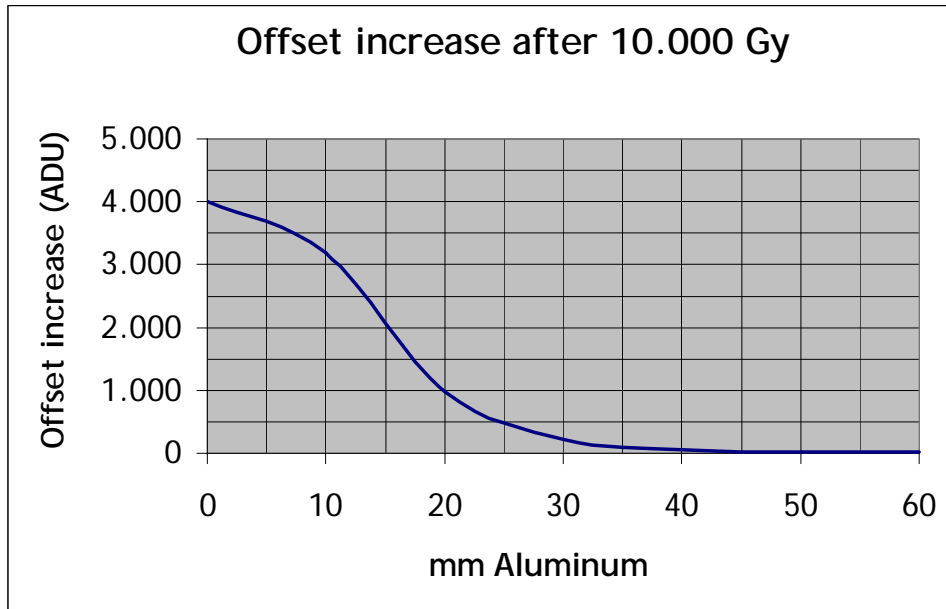


Abbildung 5 Dunkelstrom als Funktion der Vorfilterung nach 10.000 Gray

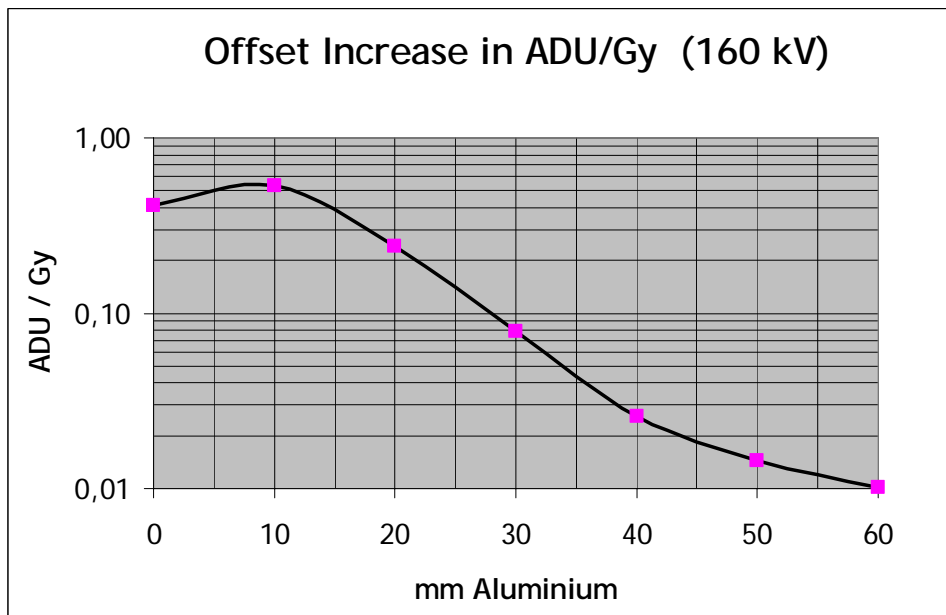


Abbildung 6 Dunkelstrom als Funktion der tatsächlichen Dosis

Dies führt zur Vermutung, dass die Strahlenschäden (in diesem Fall der Anstieg des Dunkelstromes) im wesentlichen durch niederenergetische Quanten verursacht werden. Diese Aussage wird erhärtet, wenn die tatsächlich hinter dem Al-Filter auf den Detektor wirkende Dosis mit einbezogen wird. Es ergibt sich gemäß Abbildung 6 eine Darstellung des Dunkelstromes in ADU/Gray als Funktion der Vorfilterung bzw. Strahlenqualität, die eindeutig auf eine starke Wirkung der niederenergetischen Strahlung hinweist.

Lag: Eine weitere wichtige Kenngröße der Digitaldetektoren ist der Lag, also die in einem Röntgenbild verborgene Restinformation aus dem vorherigen Bild. Wie aus Abbildung 7 klar erkennbar, steigt der Lag linear mit der akkumulierten Dosis. Im ungeschützten Bereich (0 mm Al Filter) können Werte bis zu 30 % im 1. Frame nach 10.000 Gray erreicht werden; bei vorhandener Filterung (shielded) ist der Anstieg sehr viel niedriger. Der kritische Fall ist also das 1. Frame im ungeschützten Bereich. Wenn eine lange Nutzungsdauer mit sehr hoher Detailerkennbarkeit avisiert ist, muss unbedingt mit Vorfiltern gearbeitet werden.

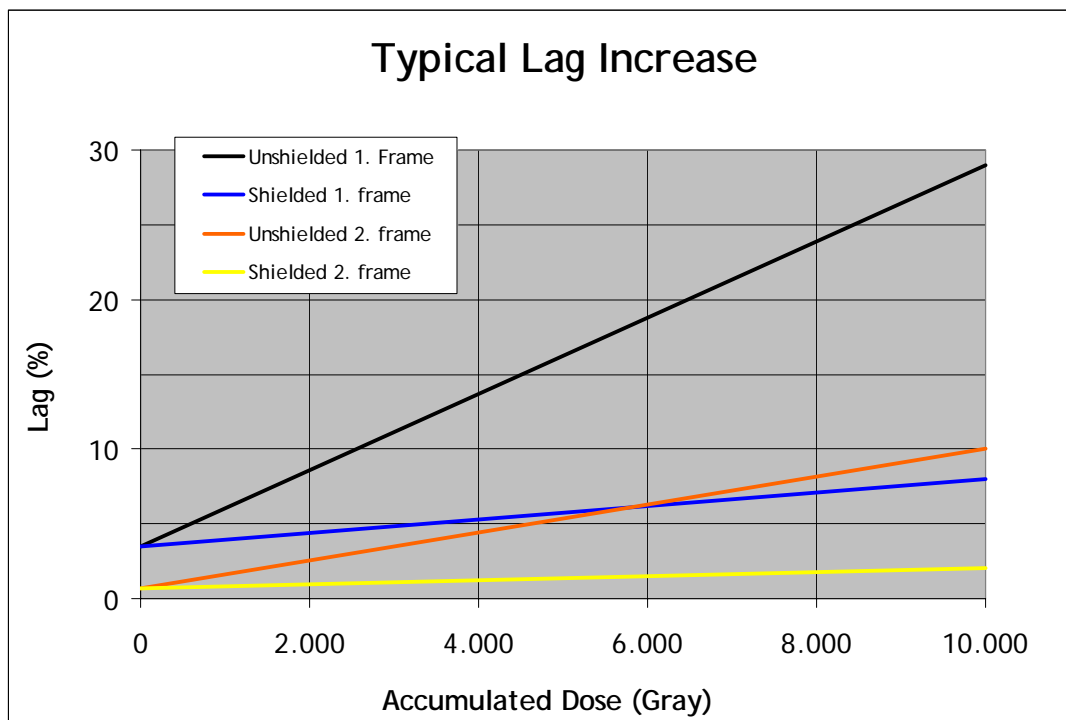


Abbildung 7 Lag als Funktion der akkumulierten Dosis

Zusammenfassung

Aus den bisherigen Erkenntnissen der bei YXLON durchgeführten Dauerläufe wird eine typische Lebensdauer der Detektoren XRD-0840IND und XRD-1640IND beim Endkunden von ca. 10.000 Gray erwartet. Als Kriterium sei genannt, dass bei dieser Dosis der Dunkelstrom auf max. ca. 10.000 ADU steigt bzw. der Lag im 2. Frame bei allen Vorfilterungen < 10% ist, was für die üblichen Applikationen als vertretbar erscheint.

Bei schneller Gussteilprüfung beträgt die über die Zeit gemittelte Dosisleistung am Detektoreingang typischerweise ca. 0,1 mGy/s, d.h. ca. 3000 bis 4000 Gy/a. Rein rechnerisch darf bei diesen Bedingungen eine Lebensdauer von ca. 2 Jahren erwartet werden. Bei geringeren Strahlenbelastungen steigt die erwartete Lebensdauer entsprechend.

Eine Voraussetzung dafür, dass die erwartete Lebensdauer auch tatsächlich eintritt, ist das Anbringen der vom Hersteller vorgeschriebenen Schutzmaßnahmen für die Detektor-Elektronik.

Obwohl die Detektoren mit 200 µm Pixelgröße (z.B. XRD-1620IND) nicht in gleicher Ausführlichkeit getestet werden konnten wie die 400 µm Detektoren, wird auf Grund des gleichen Aufbaus des Messkopfes dieselbe erreichbare Lebensdauer von 10.000 Gray angenommen.

YXLON wird auch in Zukunft durch umfangreiche Testverfahren die industrielle Tauglichkeit der verwendeten Schlüsselkomponenten nachweisen.