

Modulares Design von integrierten, zählenden Zeilensensoren zur Detektion von Röntgenstrahlung

Thomas LOHSE*, Peter KRÜGER*, Henning HEUER***, Martin OPPERMANN**, Hannes TORLEE***, Norbert MEYENDORF*

* Sensorik und Sensorsysteme, Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden (IZFP-D), Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden, Deutschland

** Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (IAVT), Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden, Deutschland

*** Sensor-Aktor-Systeme, Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS), Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden, Deutschland

Kurzfassung. Zerstörungsfreie Prüfung von elektrischen und mechanischen Baugruppen während deren Herstellung erfordert schnelle und daher besonders sensitive Röntgendetektoren. Direkt wandelnde Röntgensensoren basieren auf der Absorption von Röntgenstrahlung im Halbleiter, welche zur Generation von Elektron-Loch-Paaren führt. Bei Anlegen von hohen Gleichspannungen können die Ladungsträger getrennt und der entstehende Stromimpuls anschließend durch geeignete Elektronik ausgewertet werden. Der Röntgenabsorber selbst ist eine in Sperrrichtung gepolte Diode auf GaAs-Basis. Diese weist niedrige Dunkelströme auf und kann somit bei Zimmertemperatur betrieben werden. Der GaAs-Absorber besitzt eine strukturierte Deckelektrode, deren Design auf variables Bonden und hohe Durchschlagsfestigkeit ausgelegt ist. Der entwickelte Detektor bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Konzepten. Der Pixelabstand beträgt 100 µm, wobei jedes Sensormodul 1024 Pixel aufweist. Dadurch entstehen 102,4 mm lange Sensormodule, welche ihrerseits zu prinzipiell beliebiger Länge lückenlos aneinander reihbar sind. Weiterhin zeichnet sich die Auswerteelektronik durch totzeitfreies Messen, Energiediskriminierung durch zwei Energieschwellen mit je 20 Bit Zähltiefe und strahlenhartes Design auf Chiplevel aus. Durch konstruktive Maßnahmen kann die die Ausleselektronik treffende Dosis weiter minimiert und somit eine längere Lebensdauer erreicht werden. Es werden erste mit dem Zeilendetektor generierte Messergebnisse präsentiert und diskutiert. Die Plausibilität der Messergebnisse verdeutlicht die Tauglichkeit des vorgestellten Sensors als direktwandelnden Röntgendetektor.

1. Einführung

Der entwickelte direktkonvertierende, linienförmige Röntgendetektor weist eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Sensorkonzepten auf. Bisher basieren die meisten Detektoren auf dem Prinzip der Szintillation und nutzen dabei den Umweg der Umwandlung von Röntgenstrahlung zu sichtbarem Licht, welches anschließend durch Photodioden ausgewertet werden kann. Die Szintillation bringt jedoch verschiedene Nachteile im



Vergleich zur direkten Umwandlung mittels Halbleitern mit. Dies sind hauptsächlich das zeitliche Nachleuchten sowie das Übersprechen benachbarter Pixel. Das Prinzip der direkten Umwandlung der Röntgenphotonen mittels Halbleitern umgeht diese kritischen Nachteile. Es können elementare Halbleiter oder Verbindungshalbleiter (binär oder ternär) als Absorbermaterialien verwendet werden [1,2]. Der im Folgenden vorgestellte Prototyp nutzt GaAs als gebräuchlichen Verbindungshalbleiter. Das hohe Absorptionsvermögen von GaAs gegenüber Röntgenstrahlung sowie dessen relativ einfache Prozessierbarkeit sind ausschlaggebend für die Materialwahl. Der GaAs-Absorber wird monolithisch integriert realisiert, um hohe Zuverlässigkeit sowie betriebswirtschaftlich sinnvolle Produzierbarkeit zu gewährleisten. Photonen zählende Verfahren bewiesen sich in der Vergangenheit bereits als geeignetes Konzept, um die Sensitivität von Röntgendetektoren zu erhöhen [3]. Ein weiterer Vorteil zählender Detektoren ist die Möglichkeit, einfallende Photonen gemäß ihrer Energie zu evaluieren und somit zusätzliche Informationen bezüglich der zu untersuchenden Probe zu gewinnen.

Das Funktionsprinzip basiert auf der Absorption von Röntgenphotonen, welche durch den inneren photoelektrischen Effekt und Compton Streuung verursacht wird. Dies führt zur Generation von Ladungsträgern (Elektronen und Löcher) im Halbleiter, siehe Abbildung 1 (a). Durch das Anlegen einer hohen Spannung können die Ladungsträger getrennt werden. Dabei entstehen Spannungsimpulse, deren zugehörige Ladung proportional zur Energie der einfallenden Photonen ist. Die Evaluierung dieser Spannungsimpulse wird nachfolgend von einer Auswerteelektronik ausgeführt. Eine räumliche Auflösung des Zeilendetektors wird durch eine strukturierte Elektrode des GaAs-Absorbers realisiert.

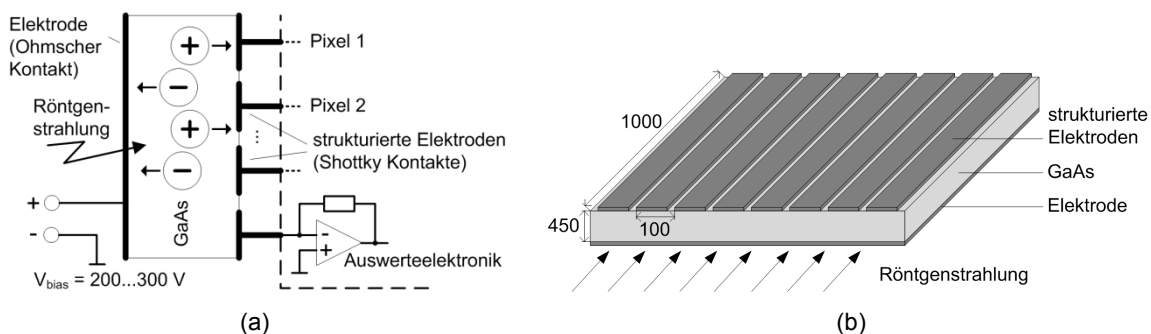


Abbildung 1. (a) Prinzip der direkt konvertierenden Röntgendetektion. (b) Grundlegendes Design des Röntgenabsorbers (Teil eines Absorbers mit 32 Pixeln, Maße in μm , Zeichnung nicht maßstäblich)

Die Intensität eines Röntgenstrahls in Abhängigkeit der Dicke des absorbierenden Materials kann durch das in Gleichung 1 dargestellte Lambert-Beersche Gesetz ausgedrückt werden (I ... Intensität des transmittierten Strahls, I_0 ... Intensität des einfallenden Strahls, μ ... Absorptionskoeffizient, d ... Dicke des absorbierenden Materials). Dabei ist der Absorptionskoeffizient μ proportional zu Z^3 , λ^3 und ρ (Z ... Ordnungszahl des absorbierenden Materials, λ ... Wellenlänge der einfallenden Röntgenstrahlung, ρ ... Dichte des absorbierenden Materials). Das Lambert-Beersche Gesetz ist jedoch nur für monochromatische Strahlung gültig, da der Absorptionskoeffizient μ wellenlängenabhängig ist.

$$I = I_0 \exp(-\mu d) \quad (1)$$

Dieses Paper stellt das verwendete Absorberdesign hinsichtlich seiner Anforderungen und Eigenschaften vor. Außerdem wird das Aufbaukonzept des strahlenfesten, direkt konvertierenden, zählenden, zeilenförmigen Röntgendetektors

präsentiert. Umsetzungen hinsichtlich des Strahlenschutzes der empfindlichen analogen Elektronik sowie lückenloser Aneinanderreihung mehrerer Sensormodule werden diskutiert. Weiterhin werden erste Messergebnisse des Zeilendetektors vorgestellt.

2. Sensordesign

Der GaAs-Absorber weist eine Pixelbreite von 100 μm auf und liegt damit unterhalb der Auflösung vieler Vergleichsprodukte. Merkmale der Auswerteelektronik sind schnelles, totzeitfreies Auslesen, Energiediskriminierung durch zwei unabhängig voneinander einstellbare Schwellen mit jeweils 20 Bit tiefen Zählregistern sowie strahlenhartes Design auf Chiplevel. Diese Eigenschaften gewährleisten einen Einsatz als schnellen und daher sensitiven Zeilendetektor für die Bildgebung. Dadurch ist der Röntgendetektor besonders für zerstörungsfreie Untersuchungen von elektronischen und mechanischen Bauteilen geeignet. Jeder Auswerteschaltkreis weist 32 Kanäle auf. Durch die Nutzung von 32 Auswerteschaltkreisen pro Sensormodul ergeben sich 1024 Pixel je Modul. Unter Beachtung der Pixelbreite von 100 μm resultiert eine Modullänge von 102,4 mm. Eine weitere Besonderheit des Detektors stellt die lückenlose Reihbarkeit mehrerer Sensormodule zur Erreichung der gewünschten Länge des Zeilendetektors dar [5-7].

Eine wesentliche Aufgabe bei der Entwicklung des Röntgendetektors besteht in der Herstellung und Charakterisierung des GaAs-Absorbers [5,6]. Der Halbleiter GaAs ist als Diode implementiert, um diese in Sperrichtung zu betreiben, wodurch niedrige Dunkelströme und somit hohe Signal-Rausch-Verhältnisse entstehen. Zum Erreichen der Diodenstruktur werden Goldkontakte auf gegenüberliegenden Seiten unterschiedlich realisiert. Abbildung 1 (b) zeigt auf der oberen Seite strukturierte Schottky-Kontakte und auf der unteren Seite einen durchgehenden, ohmschen Kontakt. Idealerweise weist der GaAs-Absorber sehr hohe Durchbruchsspannungen zwischen gegenüberliegenden Elektroden auf, ermöglicht variables Bonden und lässt sich durch eine geringe Anzahl von Masken zur Strukturierung der Kontakte kostengünstig herstellen. Abbildung 2 (a) zeigt drei entwickelte Designs des GaAs-Absorbers, wobei dessen Eigenschaften hinsichtlich der genannten Kriterien kontinuierlich verbessert wurden. Ausreichend hohe Durchbruchsspannungen wurden durch das Aufbringen einer Oberflächenpassivierung (Si_3N_4) und durch das Einfügen eines Abstands zwischen Stirnseite des Absorbers und der Metallisierung der strukturierten Elektroden erreicht. Dieser Abstand ist in Abbildung 2 (a) unter- und oberhalb der strukturierten Elektroden grau dargestellt. Diese Maßnahmen gewährleisten die gewünschten Eigenschaften des Absorbers, wie einen Dunkelstrom im Bereich von 10 nA und Durchbruchsspannungen größer gleich 300 V. Der geringe Dunkelstrom erlaubt einen Betrieb des Sensormoduls bei Zimmertemperatur, während die hohe Durchbruchsspannung ein schnelles Trennen der Ladungsträger ermöglicht. Quadratische und kreisförmige Aussparungen in der Oberflächenpassivierung gestatten variables Bonden. Quadratische Bondpads ($80 \times 80 \mu\text{m}^2$) erweisen sich als ideal für Drahtbonden, während sich kreisförmige Bondpads optimal für Flip-Chip-Bonden eignen.

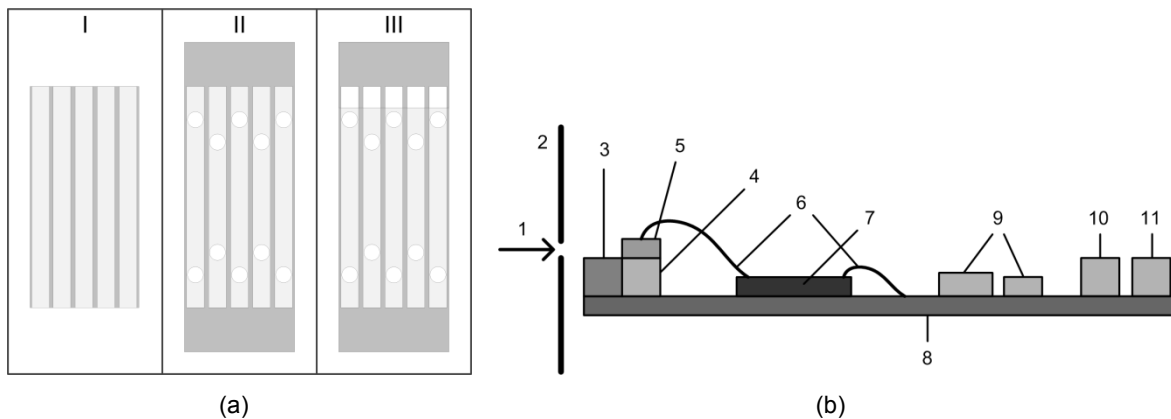


Abbildung 2. (a) Drei verschiedene Designs des GaAs-Absorbers, (b) Aufbaukonzept des Röntgensensors, Zeichnung nicht maßstäblich (1 - Röntgenstrahlung, 2 - Apertur, 3 - keramischer Absorber, 4 - Trägerkeramik, 5 - GaAs-Absorber, 6 - Bonddrähte, 7 - Auswerteelektronik, 8 - Platine, 9 - nachgelagerte Elektronik, 10 - Stecker für Datentransfer, 11 - Stecker für Hochspannungsversorgung)

3. Aufbaukonzept

Röntgenstrahlen können elektronische Baugruppen in vielerlei Hinsicht schädigen. Sowohl Halbleiterstrukturen als auch verwendete Epoxidklebstoffe können durch Röntgenstrahlen negativ beeinflusst werden, wodurch die Lebensdauer elektronischer Baugruppen reduziert werden kann. Diese Effekte müssen daher durch aktiven Strahlenschutz deutlich reduziert werden. Besonders die Auswerteschaltkreise, die auch bei Verwendung eines strahlenharten Designs geschädigt werden können, aber auch andere empfindliche Elektronik müssen vor Röntgenstrahlung geschützt werden. Eine weitere wesentliche Anforderung an das Aufbaukonzept stellt die lückenlose Reihbarkeit mehrerer Sensormodule dar. Sensormodule mit einer Länge von 102,4 mm sollen aneinander gereiht werden, um einen Zeilendetektor mit einem Vielfachen von 102,4 mm Länge zu erhalten.

Abbildung 2 (b) zeigt das entwickelte Aufbaukonzept des Röntgendetektors. Der Strahlenschutz empfindlicher Elektronik wird durch zwei Maßnahmen erreicht. Zunächst lässt die verwendete Apertur nur den Einfall der Röntgenstrahlung auf den gewünschten Bereich zu. Weiterhin trägt eine hochabsorbierende Keramik den GaAs-Absorber, wodurch hinter der Keramik im Bereich der Auswerteelektronik ein Strahlenschatten entsteht. Die hochabsorbierende Keramik reduziert die direkte Bestrahlung der Auswerteelektronik signifikant, da im Wesentlichen nur noch Streustrahlung die Auswerteelektronik erreicht. Für diesen Zweck muss die Trägerkeramik einen sehr hohen Absorptionskoeffizienten sowie einen Ausdehnungskoeffizienten zwischen denen von GaAs und FR4 (Basismaterial der Platine) aufweisen. Ein passender Ausdehnungskoeffizient dient der Reduzierung von mechanischen Verspannungen und Verbiegungen, die durch Hochtemperaturschritte bei der Fertigung des Sensormoduls entstehen können. Allerdings ist keine Keramik mit ausreichend hohem Absorptionsvermögen sowie geeignetem Ausdehnungskoeffizienten verfügbar, wodurch beide Aufgaben durch zwei verschiedene Keramiken übernommen werden. Die erste Keramik in Strahlrichtung (#3 in Abbildung 2 (b)) absorbiert die einfallende Röntgenstrahlung, während die zweite Keramik (#4) den GaAs-Absorber trägt.

Neben den Maßnahmen zum Strahlenschutz steht beim Aufbaukonzept die Reihbarkeit mehrerer Sensormodule im Vordergrund. Die Notwendigkeit lückenloser Bildaufnahme und die Reihbarkeit beliebig vieler Sensormodule erfordert eine lückenlose und präzise Montage der GaAs-Absorber bis hin zum Rand des Sensormoduls. Entsprechend den sehr kleinen Abmessungen eines GaAs-Absorbers von $3,2 \times 1 \times 0,45 \text{ mm}^3$ für einen Absorber mit 32 Pixeln, wird dessen Montage durch ein

speziell entworfenes Werkzeug für die Prototypenentwicklung des Zeilendetektors unterstützt. Ein weiteres Kriterium des Aufbaukonzepts ist das Abführen der nicht vernachlässigbaren Verlustleistung der Auswerteelektronik. Diese Aufgabe übernimmt ein Peltier-Element an der Unterseite der Sensorplatine, welches durch thermische Vias direkte Ankopplung an die zu kühlende Auswerteelektronik besitzt. Abbildung 3 zeigt ein 102,4 mm langes Sensormodul.

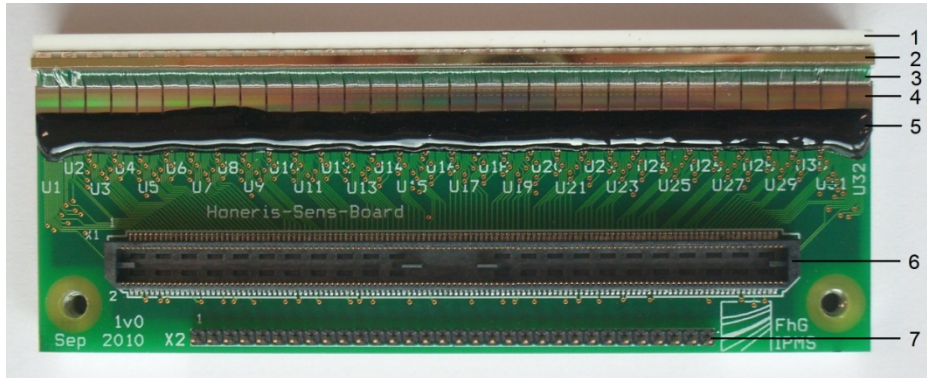


Abbildung 3. Sensormodul mit 1024 Pixeln (1 - keramischer Absorber, 2 - GaAs-Absorber, 3 - Bonddrähte, 4 - Auswerteschaltkreise, 5 - in Globtop eingebettete Bonddrähte, 6 - Stecker für Datentransfer, 7 - Stecker für Hochspannungsversorgung), nachfolgende Elektronik auf der Unterseite der Platine

4. Erste Ergebnisse

Als Nachweis der prinzipiellen Funktionstüchtigkeit wurden erste Messungen mit einem Sensormodul durchgeführt. Der in Abbildung 4 gezeigte Versuchsaufbau besteht aus einer Röntgenquelle (Yxlon FXE225 mit einem Transmissionstarget, 6 μm Wolfram-Target auf 250 μm Diamant-Substrat), einem Stufenkeil und dem beschriebenen Sensormodul. Der verwendete Stufenkeil weist neun Stahllagen auf und verhindert somit lokal die direkte Bestrahlung des Sensormoduls. Die Stahllagen haben jeweils eine Dicke von 1 mm, unterscheiden sich jedoch in deren Längen. Entsprechend Abbildung 4 führt der Aufbau der neun Stahllagen zu regelmäßigen Stufenlängen. Dieser Aufbau garantiert die Bestrahlung in Längsrichtung des Sensormoduls entsprechend des Lambert-Beerschen Gesetzes (Gleichung 1) mit verschiedenen Intensitäten. Dieser Sachverhalt sollte sich in den Zählwerten des Sensormoduls widerspiegeln. Natürlich sollten die Zählwerte von Pixeln hinter geringen Stahldicken (z.B. d_1) deutlich größer im Vergleich zu Zählwerten von Pixeln hinter großen Stahldicken (z.B. d_9) sein. So kann ein exponentieller Abfall der Zählwerte mit steigender Stahldicke für monochromatische Röntgenstrahlung erwartet werden.

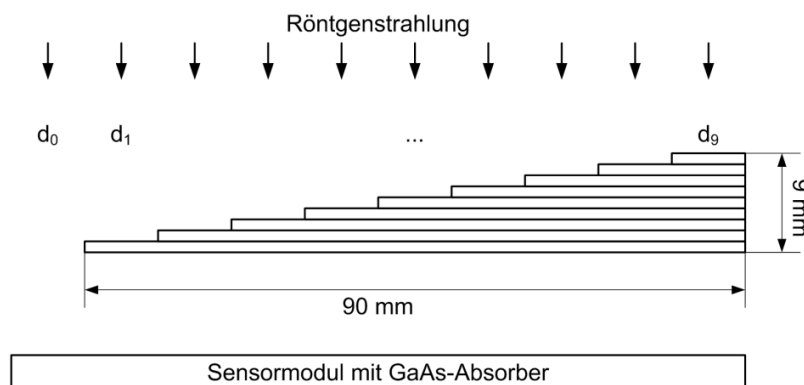


Abbildung 4. Messaufbau mit Stufenkeil und Sensormodul (Zeichnung nicht maßstäblich)

Abbildung 5 zeigt die Zählwerte des Sensormoduls mit 1024 Pixeln und dem Stufenkeil im Strahlengang für eine Anodenspannung von 150 kV und einen Anodenstrom von 100 μA (a) bzw. 150 μA (b). In beiden Spektren sind die Zählwerte für jedes sechzehnte Pixel dargestellt. Die Messwerte decken sich mit den Erwartungen hinsichtlich mehrerer Aspekte. Erstens, die Zählwerte nehmen mit wachsender Stahldicke im Strahlengang ab. Zweitens, die Zählwerte für 150 μA Anodenstrom sind signifikant höher im Vergleich zu denen für 100 μA Anodenstrom. Dieses Verhalten resultiert aus der Bildung größerer Photonenzahlen bei höheren Anodenströmen. Drittens, die Zählwerte benachbarter Pixel verdeutlichen die Form des Stufenkeils. Befinden sich die Pixel hinter der gleichen Stahldicke, weisen diese ähnliche Zählwerte auf und es kommt zur Ausbildung markanter Zählwertniveaus. Viertens, die Abweichung der Zählwertspektren von einem linearen Abfall in logarithmischer Darstellung, d.h. von einem exponentiellen Abfall in linearer Darstellung, sind offensichtlich. Diese Abweichung wird durch polychromatische Röntgenstrahlung verursacht. Photonen unterschiedlicher Energien transmittieren in verschiedenem Anteil durch die Stahllagen. So verursacht der Stufenkeil eine Strahlaufhärtung durch Absorption niederenergetischer Photonen bei gleichzeitiger Transmission höher energetischer Photonen. Damit sorgt der Stufenkeil für große Stahldicken für höhere Zählwerte im Vergleich zu den theoretischen Zählwerten für monochromatische Röntgenstrahlung.

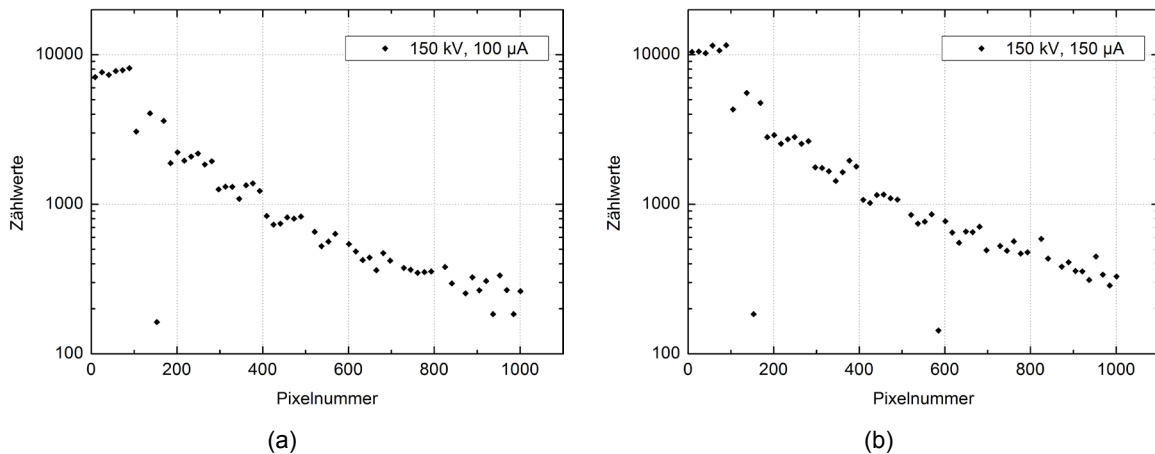


Abbildung 5. Zählwerte des Sensormoduls mit 1024 Pixeln und dem Stufenkeil im Strahlengang für 150 kV Anodenspannung und einen Anodenstrom von 100 μA (a) bzw. 150 μA (b), beide Darstellungen zeigen die Zählwerte für jedes sechzehnte Pixel des Sensormoduls

Die Zählwerte benachbarter Pixel mit identischer Stahldicke im Strahlengang können für bessere Lesbarkeit der Daten gemittelt werden. Abbildung 6 (a) zeigt die gemittelten Zählwerte des Sensormoduls und deren Standardabweichung mit dem Stufenkeil im Strahlengang für 150 kV Anodenspannung sowie für Anodenströme von 100 μA und 150 μA . Entsprechend den folgenden Aspekten sind die Resultate plausibel und verdeutlichen die Eignung des Sensormoduls als direktwandelnder Röntgendetektor. Zum Einen verläuft der Abfall beider Zählwertspektren mit zunehmender Stahldicke kontinuierlich ohne größere Ausreißer. Zum Anderen ist der Abstand beider Zählwertspektren über die Länge des GaAs-Absorbers nahezu konstant. Dieses Verhalten verdeutlicht ebenfalls Tabelle 1, die das Verhältnis der Zählwerte für beide Anodenströme auflistet.

Als Plausibilitätstest können die gemittelten Zählwerte mit den theoretischen Zählwerten, die bei Bestrahlung mit monochromatischer Röntgenstrahlung entstünden, verglichen werden. Diese theoretischen Zählwerte nach Interaktion der Röntgenphotonen

mit dem Stufenkeil können für jede Stahldicke mithilfe des Lambert-Beerschen-Gesetzes (Gleichung 1) berechnet werden. Dafür wird der Absorptionskoeffizient μ von elementarem Eisen als sehr gute Näherung genutzt, da Stahl zu 95 % aus Eisen besteht [8] und der Absorptionskoeffizient von Stahl an sich unbekannt ist. Werte für den Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ von Eisen gegenüber Röntgenstrahlung für verschiedene Photonenenergien zeigt Tabelle 2 [9,10]. Der Absorptionskoeffizient μ wird durch Multiplikation des Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ und der Dichte von Eisen berechnet ($\rho = 7,7874 \text{ g/cm}^3$). Die theoretischen Zählwerte für 60 keV, 80 keV, 100 keV und 150 keV müssen für bessere Vergleichbarkeit normalisiert werden. Dafür werden alle vier theoretischen Spektren an das Zählwertmaximum des gemessenen Spektrums für 150 kV Anodenspannung und 100 μA Anodenstrom angepasst. Abbildung 6 (b) zeigt den Vergleich von gemessenen Zählwerten für polychromatische Röntgenstrahlung und berechneten Zählwerten für monochromatische Röntgenstrahlung. Auf der einen Seite zeigen die Anstiege der Zählwertspektren für sehr geringe Stahldicken eine überwiegend existierende Photonenenergie von 60 keV. Auf der anderen Seite verdeutlichen die Anstiege der Zählwertespektren für große Stahldicken eine mit wachsender Stahldicke zunehmende Strahlaufhärtung durch die Filterung niederenergetischer Photonen. Diese führt bis hin zur vorwiegenden Existenz sehr hoch energetischer Photonen bis maximal 150 keV. Passenderweise entspricht diese Photonenenergie gerade der maximalen Photonenenergie, die bei einem polychromatischen Röntgenspektrum für eine Anodenspannung von 150 kV entsteht.

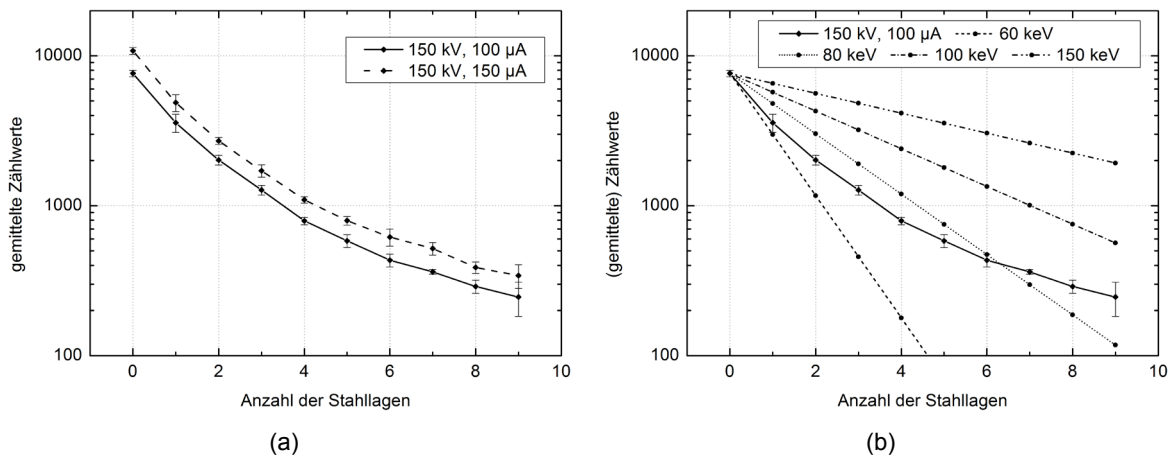


Abbildung 6. (a) Gemittelte Zählwerte und deren Standardabweichung für ein Sensormodul mit 1024 Pixeln und dem Stufenkeil im Strahlengang für 150 kV Anodenspannung und unterschiedliche Anodenströme (100 μA , 150 μA), (b) Vergleich von gemittelten Zählwerten des Sensormoduls (@150 kV, 100 μA) und theoretischen, normalisierten Zählwerten bei Verwendung monochromatischer Röntgenstrahlung verschiedener Photonenenergien

Tabelle 1. Verhältnis der gemittelten Zählwerte für Anodenströme von 150 μA und 100 μA , jeweils für 150 kV Anodenspannung sowie dem Stufenkeil im Strahlengang

Anzahl der Stahllagen	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
gemittelte Zählwerte (150 μA) / gemittelte Zählwerte (100 μA)	1,39	1,34	1,43	1,43	1,36	1,38	1,35	1,34	1,36	1,42

Tabelle 2. Massenschwächungskoeffizienten von Röntgenstrahlung verschiedener Photonenenergien für elementares Eisen [9,10]

Photonenenergie E_{ph} [keV]	Massenschwächungskoeffizient μ/ρ [cm ² /g]
60	1,958
80	1,205
100	0,5952
150	0,3717

5. Zusammenfassung

Dieses Paper beschreibt die Entwicklung eines strahlenfesten, linienförmigen Röntgendetektors. GaAs dient als sensitives Material, da sich dieses als geeigneter Absorber für direkt konvertierende Röntgendetektoren darstellt. Weiterhin wurde ein Aufbaukonzept vorgestellt, welches den Anforderungen hinsichtlich des Strahlenschutzes empfindlicher Baugruppen sowie der lückenlosen Reihbarkeit mehrerer Sensormodule genügt. Außerdem wurden erste mit dem Zeilendetektor generierte Messergebnisse präsentiert und diskutiert. Die Plausibilität der Messergebnisse verdeutlicht die Tauglichkeit des vorgestellten Sensors als direktwandelnder Röntgendetektor.

Referenzen

- [1] A. Owens, A. Peacock, M. Bavdaz, "Progress in compound semiconductors", SPIE 4851, 1059-1070 (2003).
- [2] A. Owens, A. Peacock, "Compound semiconductor radiation detectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 531(1-2), 18–37 (2004).
- [3] M. Kroening, I. Besse, T. Baumbach, A. Berthold, R. G. Melkadze, T. M. Lezhneva, L. B. Khvedelidze, G. D. Kalandadze, "Materials investigation of gallium arsenide for direct converting energy sensitive X-ray detectors", Proc. SPIE 5770, 97-104 (2005).
- [4] J. Hsieh, "Computed Tomography", SPIE - The International Society for Optical Engineering, Bellingham & Washington, 39 (2003).
- [5] T. Lohse, P. Krüger, H. Heuer, M. Oppermann, H. Torlee, T. Zerna, K.-J. Wolter, N. Meyendorf, "Development of radiation resistant, direct converting X-ray line detectors in terms of their assembly technology", Proc. 25th Eurosensors Conference, 459-462 (2011).
- [6] M. Oppermann, O. Albrecht, T. Lohse, R. Metasch, T. Zerna, K.-J. Wolter, "Packaging development for GaAs X-ray line detectors", Proc. 13th Electronics Packaging Technology Conference, (2011).
- [7] T. Lohse, P. Krüger, H. Heuer, M. Oppermann, H. Torlee, K.-J. Wolter, N. Meyendorf, "Modular design of fully integrated line detectors" Proc. 26th Eurosensors Conference, 530-533 (2012).
- [8] J. D. Verhoeven, "Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist", ASM International, Materials Park, 1 (2007).
- [9] A. Thompson, D. Attwood, E. Gullikson, M. Howells, K.J. Kim, J. Kirz, J. Kortright, I. Lindau, Y. Liu, P. Pianetta, A. Robinson, J. Scofield, J. Underwood, G. Williams, H. Winick, "X-ray data booklet", Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, 1-41 (2009).
- [10] S. Seltzer, "XrayMassCoef: Z=26 Iron," 9. Dezember 2012, <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z26.html>> (22. März 2013).