

# Die vollautomatische Röntgenprüfanlage zur zerstörungsfreien Prüfung von Gußteilen

Domingo Mery, Thomas Jaeger und Dieter Filbert

19. Juli 2001

## Zusammenfassung

In der Automobilindustrie gibt es Leichtmetallgußteile, die als sicherheitsrelevant gelten. Die Qualitätskontrolle von Gußteilen erfolgt mit Hilfe der Röntgendurchleuchtungsprüfung. Ihre Aufgabe ist die Untersuchung auf Gußfehler, die sich im Innern des Teiles befinden und somit von außen visuell nicht zu erfassen sind. Seit einigen Jahren werden automatische Röntgenprüfanlagen in der Automobilindustrie eingesetzt. In diesem Beitrag wird der Stand der Technik der Röntgenprüfanlagen zur automatischen Gußfehlererkennung von Gußteilen präsentiert.

## Abstract

Fully automated x-ray inspection is increasingly being used as a tool for non-destructive testing in industrial applications. An example is the serial examination of cast light-alloy workpieces used in the casting industry, like aluminium wheels and steering gears. The material defects occurring in the casting process such as voids, inclusions or discontinuities must be detected to satisfy the safety requirements; consequently, it is necessary to check 100% of the parts produced. Since most defects are not visible, x-ray imaging is used for this task. In this paper we present a review of the existing automated flaw detection systems for aluminium castings.

## 1 Einleitung

Bei der Fertigung von Gußteilen treten beim Abkühlen der Metallschmelze Schrumpfprozesse auf, die zu Inhomogenitäten im Innern des Werkstückes führen können. Diese manifestieren sich beispielsweise in blasenförmigen Hohlräumen oder Rissen. Hohlräume entstehen, wenn beim Gießprozeß kein oder zu wenig flüssiges Metall nachfließt, während Risse durch mechanische Spannungen entstehen, wenn benachbarte Bereiche verschiedene Temperaturgradienten aufweisen. Dazu kommen andere Gußfehler im Gießereiprozeß, wie Einschlüsse bzw. Schlacken.

In der Automobilindustrie werden Leichtmetallgußteile wie Felgen und Lenkgetriebegehäuse produziert,

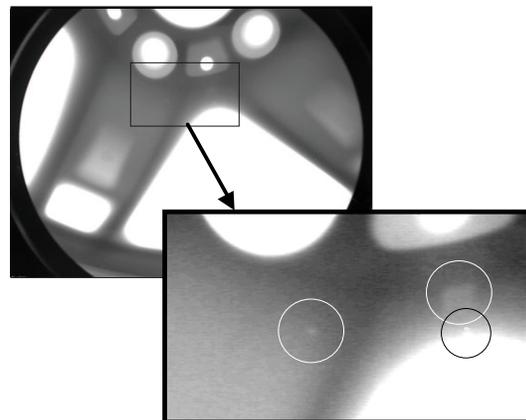


Abb. 1: Drei Hohlräume (Lunker) in einer Alufelge.

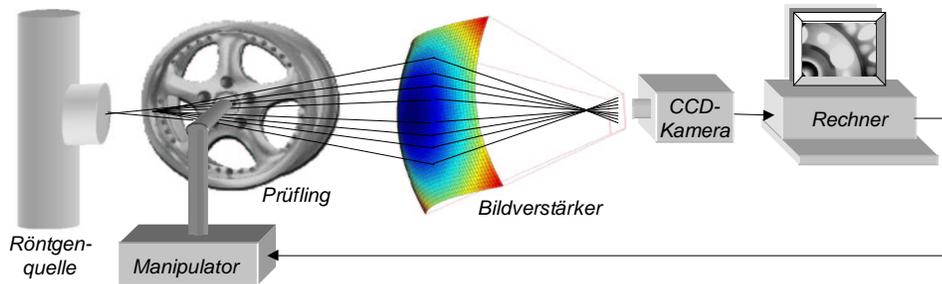


Abb. 2: Diagramm einer automatischen Röntgenprüfanlage.

die als sicherheitsrelevante Teile gelten. Um die Sicherheit ihrer Konstruktion zu gewährleisten, wird die Qualitätskontrolle für alle Teile vorgeschrieben.

Im 20. Jahrhundert hat sich die Röntgendurchleuchtungsprüfung als zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) in der Qualitätskontrolle von Gußteilen durch visuelle oder computergesteuerte Auswertung von Röntgenbildern durchgesetzt. Die Aufgabe dieser zerstörungsfreien Prüfung ist die Untersuchung auf Gußfehler, die sich im Innern des Teiles befinden, und somit von außen nicht visuell zu erfassen sind. Als Beispiel ist ein Röntgenbild eines fehlerhaften Leichtmetallrades in Abb. 1 dargestellt.

Das Prinzip einer automatischen Röntgenprüfanlage ist in Abb. 2 dargestellt. Typischerweise besteht sie aus *i*) einem *Manipulator* zur Handhabung des Prüflings, *ii*) einer *Röntgenquelle*, die den Prüfling mit einem kegelförmigen Strahlenbündel durchleuchtet und dadurch ein Röntgenbild des Prüflings via Zentralprojektion erzeugt, *iii*) einem *Bildverstärker*, der das nicht sichtbare Röntgenbild in ein sichtbares umwandelt, *iv*) einer *CCD-Kamera*, die das sichtbare Röntgenbild aufnimmt, und *v*) einem *Rechner*, dessen Aufgaben einerseits die automatische Klassifizierung des Prüflings in Gutteil oder Ausschußteil durch digitale Bildverarbeitung des Röntgenbildes und andererseits die Steuerung des Manipulators zur Bewegung des Prüfobjektes in der gewünschten Prüfposition sind<sup>1</sup>. Heutzutage werden als Bildaufnehmer

<sup>1</sup>Diese Aufgabe wird normalerweise von einer speicherpro-

Flachdetektoren aus amorphen Silizium in einigen Prüfsystemen industriell eingesetzt [19, 2]. Bei diesen Detektoren wird die Energie des Röntgenstrahls von einem Halbleiter direkt in elektrische Signale (ohne Bildverstärker) umgesetzt. Allerdings ist die ZfP mit Flachdetektoren wegen ihrer hohen Kosten (im Vergleich zum Bildverstärker) nicht immer rentabel.

In diesem Beitrag wird die zerstörungsfreie Prüfung von Gußteilen mit einer Beschreibung der Röntgenprüfanlage als Schwerpunkt erläutert. Die beschriebenen Prüfanlagen werden heutzutage in der Industrie angewendet und gelten als Stand der Technik auf diesem Gebiet.

Der vorliegende Artikel gliedert sich in folgende Kapitel: Abschnitt 2 umreißt kurz die Geschichte der ZfP von Gußteilen. Abschnitt 3 befaßt sich mit der Anwendung der Röntgenstrahlen in der ZfP. Die wesentlichen Bestandteile einer automatischen Röntgenprüfanlage werden in Abschnitt 4 beschrieben. Schließlich wird der Beitrag in Abschnitt 5 zusammengefaßt.

## 2 Historie

Die Entdeckung der *X-Strahlen* von W.C. Röntgen im November 1895 [31] bezeichnet den Anfang der zerstörungsfreien Prüfung von metallischen Teilen.

grammierbaren Steuerung (SPS) übernommen.

Ein paar Tage nach der Entdeckung der Strahlung fertigte er Röntgenaufnahmen eines Jagdgewehres und einer Gewichte-Schatulle an. Röntgen bemerkte, daß man mit Röntgenstrahlen nicht nur in das Innere des Menschen, sondern auch in metallische Gegenstände blicken kann, wenn die Härte und die Intensität der Strahlen ausreichend sind [22]. An ihre potentielle Nutzung in der Detektion verborgener Defekte an Panzerplatten und Maschinenteilen wurde schon im Jahre 1896 von der Yale University gedacht [30].

Die industrielle Anwendung der Röntgenstrahlen erfolgte in Deutschland erst zwei Jahrzehnte nach ihrer Entdeckung. Die ZfP erfolgte damals mit Hilfe der Röntgenfilme [32]. Radioskopie mit Leuchtschirmen wurde erst Ende der 30er, Anfang der 40er Jahre entwickelt. Bereits in den folgenden Jahren wurden geschlossene Kabinen zur zerstörungsfreien Prüfung von Aluminium-Gußteilen in der Automobilindustrie verwendet [29].

Im Jahre 1948 wurde der Röntgenbildverstärker entwickelt, der die durch Röntgenstrahlen gewonnene Information in ein helligkeitsverstärktes, sichtbares Bild umwandelt [36]<sup>2</sup>. Die Einführung des Bildverstärkers brachte einen großen Fortschritt in der Prüftechnik, da bisher der Prüfer das Röntgenbild auf einem Leuchtschirm betrachten mußte. Die Helligkeit des Bildes war so gering, daß die Augen eine lange Zeit zur Dunkeladaptation benötigten. Mit Hilfe einer besonderen Optik konnte der Röntgen-Prüfer das Röntgenbild im Bildverstärker stets begutachten [10]. Bildverstärker, Fernseheinrichtung und elektrisch angetriebener Manipulator wurden in den 60er Jahren als Radioskopiesysteme weiterentwickelt, die zur Gußteil- und Schweißnahtprüfung in den 70er Jahren viel verwendet wurden [30].

Ein Gerät zur Computertomographie wurde im Jahre 1972 entwickelt [6, 36]. Bei der 2D-Computertomographie werden Querschnittbilder des Objektes aus seinen Projektionen berechnet. Diese Schichtbilder, die eine Rekonstruktion der örtlichen Verteilung der Absorptionskoeffizienten des Objektes in

der durchstrahlten Ebene darstellen, werden danach verarbeitet, um Materialfehler im Gußteil zu finden. Nachteil des Verfahrens ist allerdings der hohe Zeitbedarf: Für die Rekonstruktion aussagekräftiger Schichtbilder ist sowohl eine Mindestmeßzeit pro Objektposition für ein ausreichendes Signal/Rausch-Verhältnis als auch eine Mindestanzahl von Projektionen notwendig. Aus diesem Grund beschränkt sich der Einsatz der Computertomographie in der ZfP bisher auf den Materialentwicklungs- und Forschungsbereich sowie auf die Prüfung besonders wichtiger und teurer Teile [18]<sup>3</sup>.

Ansätze zur automatischen Bildauswertung sowie Bildrestauration wurden schon in den 80er Jahren mit Hilfe der Bildverarbeitungsrechner und CCD-Kameras angewendet [29]. Die ersten vollautomatischen Röntgenprüfsysteme wurden Anfang der 90er Jahre in der Industrie installiert. Ein Beispiel ist in der Qualitätskontrolle von Aluminium-Felgen der Firma *Alumetall* in Nürnberg zu finden, bei der auch eine automatische Gußteilerkennung mittels Barcode zur Anpassung der Bildanalyse-Algorithmen an unterschiedlichen Radtypen integriert ist [30].

Ende der 90er Jahre wurden die Flachdetektoren aus amorphen Silizium in einigen Prüfsystemen industriell eingesetzt [2, 19]. Bei diesen Detektoren wird der Röntgenstrahl von einem Halbleiter direkt in elektrische Signale (ohne Bildverstärker) umgesetzt. Allerdings ist die ZfP mit Flachdetektoren wegen ihrer hohen Kosten (im Vergleich zum Bildverstärker) nicht immer rentabel.

Heutzutage werden vollautomatische Prüfsysteme verwendet (vgl. zum Beispiel ein modernes Röntgenprüfsystem in [19, 38]). Diese Systeme werden vornehmlich bei der 100%-Prüfung sicherheitsrelevanter Gußteile eingesetzt, d.h. jedes Teil der Produktion muß geprüft werden (beispielsweise in der Automobilindustrie). Hierbei sind die Steuerung der Röntgenparameter und die Manipulation des Prüflings computergestützt. Die Detektion der Materialfehler in

<sup>2</sup>Die Bildverstärkertechnik wurde als Restlichtverstärker ursprünglich für militärische Nachtsichtgeräte entwickelt [13].

<sup>3</sup>Später wurde die 3D-Computertomographie entwickelt. Hierbei werden keine Bildelemente ('Pixel') sondern Volumenelemente ('Voxel') berechnet. Der Stand der Technik der industriellen Computertomographie ist in [1, 23] zu finden.

den zu untersuchenden Objekten erfolgt mittels digitaler Bildverarbeitung vollautomatisch. Die Prüferentscheidung wird anhand gültiger Qualitätsvorschriften durch das System getroffen und die Sortierung der Prüflinge entsprechend durchgeführt.

### 3 Anwendung der Röntgenstrahlen in der ZfP

Röntgenstrahlen sind grundsätzlich von gleicher physikalischer Natur wie sichtbares Licht, Radiowellen, Mikrowellen, Ultraviolett- oder Infrarot-Strahlen. Sie alle sind elektromagnetische Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, jedoch unterschiedliche Wellenlängen aufweisen. Die Entstehung der Röntgenstrahlung geschieht in einer Röntgenröhre in fünf Schritten, wie in Abb. 3 dargestellt ist:

- i) Eine hohe Gleichspannung  $U$  wird zwischen Kathode und Anode angelegt.
- ii) Die Kathode wird durch die Spannung  $U_h$  stark erhitzt, damit die kinetische Energie der Wärme auf die in der Kathode beweglichen Elektronen übertragen wird. Die Elektronen sind dadurch in der Lage, aus der Kathode auszutreten.
- iii) Die aus der heißen Kathode austretenden Elektronen werden durch die Hochspannung  $U$  zur Anode beschleunigt.
- iv) Der Strom energiereicher Elektronen, der auch als Kathodenstrahl bezeichnet wird, trifft auf die Anode.
- v) Röntgenstrahlung entsteht, wenn Elektronen einer genügend hohen Energie auf die Anode auf treffen und plötzlich gebremst werden.

Die Röntgendurchleuchtungsprüfung als Teilgebiet der zerstörungsfreien Prüfung nutzt den Effekt der Verminderung der Intensität der Röntgenstrahlung beim Durchgang durch Materie aus. Die Abnahme der Intensität ist eine Funktion der Energie der Röntgenstrahlung und des materiellen Aufbaues des

durchstrahlten Werkstoffes (im wesentlichen Dichte und Dicke). Die Schwächung geschieht durch zwei Prozesse: *Streuung* und *Absorption*. Die Streuung erfolgt über die klassische Streuung bzw. *Rayleigh-Streuung* und den *Compton-Effekt*; und die Absorption über den *Photoeffekt*, die *Paarbildung* und teilweise über den *Compton-Effekt* [8, 9, 35].

Absorption und Streuung lassen sich durch das *Röntgen-Absorptionsgesetz* mathematisch beschreiben, das den Intensitätsverlauf von Röntgenstrahlung durch Materie charakterisiert:

$$\varphi(x) = \varphi_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

mit der einfallenden Energieflußdichte  $\varphi_0$ , dem Schwächungskoeffizient  $\mu$  und der Energieflußdichte  $\varphi$  nach Durchgang durch Materie mit der Dicke  $x$  (s. Abb. 4a). Der Schwächungskoeffizient  $\mu$  hängt von der einfallenden Photonenenergie und von der Dichte und Ordnungszahl des durchstrahlten Materials ab. Er setzt sich aus den Koeffizienten der klassischen Streuung  $\sigma_R$ , des Photoeffekts  $\tau$ , des Compton-Effekts  $\sigma_C$  und der Paarbildung  $\chi$  zusammen:

$$\mu = \sigma_R + \tau + \sigma_C + \chi \quad (2)$$

Für den Fall des Aluminiums ist der Verlauf der Schwächungskoeffizienten in Abb. 4b dargestellt.

Wegen der kontinuierlichen Verteilung der Energie der Röntgenstrahlung enthält sie auch Photonen unterschiedlicher Energien. In der Praxis kann deshalb der Verlauf der Schwächungskurve nur empirisch ermittelt werden.

In der ZfP von Gußteilen wird mittels Röntgenstrahlen versucht, die Fehler eines Teiles, wie z.B. Poren, Lunker, Einschlüsse oder Gasblasen, zu klassifizieren. Das Gußteil wird durchstrahlt, und auftretende Inhomogenitäten verändern die austretende Strahlungsintensität auf Grund des unterschiedlichen Schwächungskoeffizienten von Metall und Fehler. Die verschiedenen Intensitäten machen sich in einem Röntgenbild bemerkbar (s. Abb. 5).

Bei der Prüfung von Aluminium-Gußteilen finden Energien im Bereich zwischen 0,06MeV und 0,15MeV

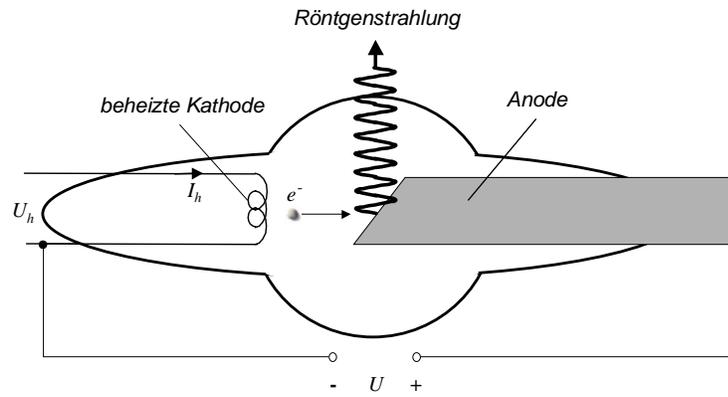
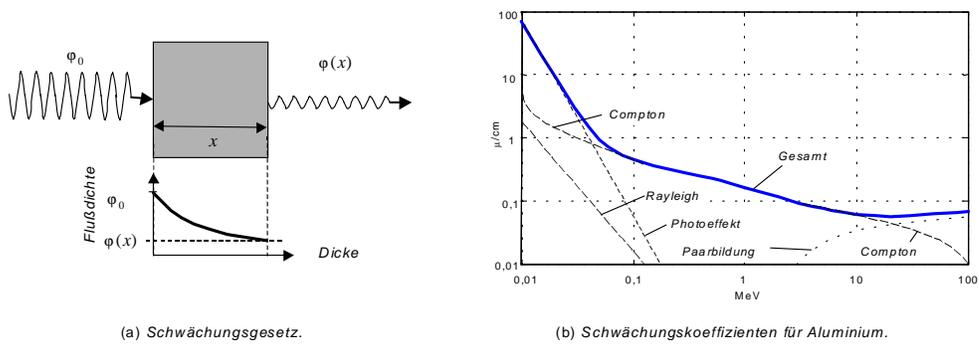


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau einer Röntgenröhre.



(a) Schwächungsgesetz.

(b) Schwächungskoeffizienten für Aluminium.

Abb. 4: Schwächung von Röntgenstrahlung in Materie [9, 12, 21].

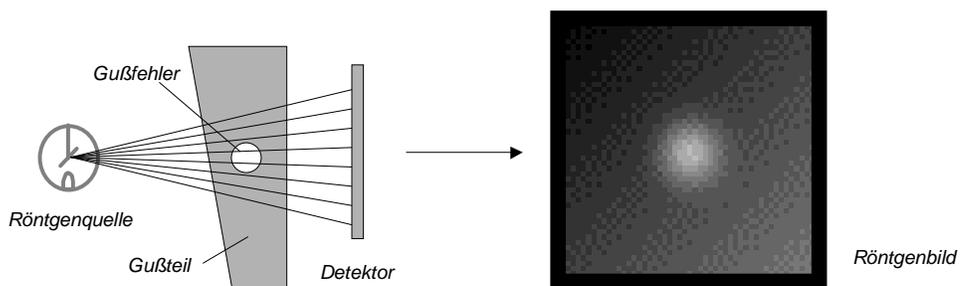


Abb. 5: Anwendung der Röntgenstrahlung in der ZfP von Gußteilen.

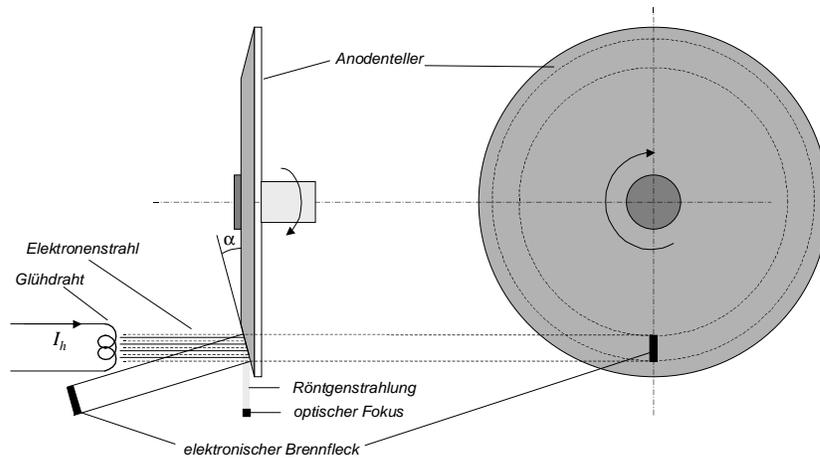


Abb. 6: Prinzipieller Aufbau einer Anode [10].

Verwendung, bei denen der Photo- und Compton-Effekt als wesentliche Wechselwirkungsprozesse auftreten (s. Abb. 4b) [12]. Die Photoabsorption ist der eigentlich gewünschte bildzeichnende Effekt, weil die Energie eines auftreffenden Röntgenphotons vollständig absorbiert wird. Die Streustrahlung des Compton-Effekts breitet sich gleichmäßig in alle Richtungen aus und ist somit in der Röntgendurchleuchtungsprüfung nicht bildzeichnend [11]. Dieser Effekt kann mit der Streuung des sichtbaren Lichts im Nebel verglichen werden, wobei das Erkennen eines Objektes sehr problematisch sein kann. Zur Verminderung der bildwirksamen Streustrahlung können die Techniken der Eingrenzung durch Bleiblende, Abstandsvariation und Kollimator (Lamellenraster) angewendet werden [15].

Der Einfluß der unterschiedlichen Energien der emittierten Strahlung auf das Durchleuchtungsergebnis (Strahlaufhärtung) wird durch Cu- oder Al-Filterbleche minimiert.

Die Eigenschaften der Röntgenstrahlung, die in der zerstörungsfreien Prüfung von Gußteilen angewendet werden, sind im folgenden zusammengefaßt:

- i)* Röntgenstrahlen können lichtundurchlässige Stoffe (wie z.B. Metall) je nach Schichtdicke

durchdringen.

- ii)* Sie können photographische Schichten schwärzen (Röntgenphotographie).
- iii)* Sie breiten sich geradlinig aus.
- iv)* Sie können viele Stoffe zur Fluoreszenz anregen (Leuchtschirmbetrachtung von Röntgenbildern).

## 4 Die automatische Röntgenprüfanlage

Die wesentlichen Bestandteile einer automatischen Röntgenprüfanlage (s. Abb. 2), wie z.B. Röntgenstrahler, Manipulator, Bildverstärker und CCD-Kamera, werden im folgenden erläutert.

### 4.1 Der Röntgenstrahler

Es gibt sieben Anforderungen an einen Röntgenstrahler [14]: *i)* ein möglichst kleiner Brennfleck; *ii)* eine einstellbare Quantenenergie; *iii)* eine möglichst große, einstellbare Dosisleistung; *iv)* eine möglichst gleichmäßige Intensität der Strahlung im Feld des zu

bestrahlenden (Teil-)Objektes;  $v$ ) eine möglichst kleine Intensität der Strahlung außerhalb des zu bestrahlenden (Teil-)Objektes;  $vi$ ) ein akzeptabler Preis; und  $vii$ ) eine lange Lebensdauer bei konstanten technischen Eigenschaften.

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Bestandteile eines Röntgenstrahlers beschrieben, die die erwähnten Bedingungen erfüllen.

**Glühkathode:** Die Kathode besteht aus Glühdraht<sup>4</sup>, aus der die Elektronen durch den thermoelektrischen Effekt in das Vakuum der Röntgenröhre austreten. Eine Beeinflussung der Dosisleistung (unabhängig der Quantenenergie der Röntgenstrahlung) wird durch Steuerung der Elektronenemission über den Heizstrom  $I_h$  (s. Abb. 3 und Abb. 6) erreicht. Die Quantenenergie wird durch die Hochspannung  $U$  zwischen Elektroden eingestellt. Mit Hilfe einer Blende, die den Glühdraht umgibt, wird ein dünner, scharf begrenzter Elektronenstrahl erzeugt.

**Anode:** An der Anodenoberfläche wird die kinetische Energie der Kathodenstrahlen zu 99% in Wärme und nur zu 1% in die gewünschte Röntgenstrahlung umgewandelt. Zur Reduzierung der geometrischen Unschärfe bei der Abbildung wird ein möglichst kleiner Brennfleck gefordert. Im Brennfleck einer Röntgenröhre entsteht jedoch so viel Wärme, daß das Anodenmaterial schmelzen kann, wenn die Wärme nicht schnell und effektiv abgeführt wird. Um die Leistung einer Röntgenröhre zu erhöhen und gleichzeitig den Brennfleck zu verkleinern, werden die Anoden folgendermaßen aufgebaut (Abb. 6):

*Anodenmaterial:* Die Oberflächenschicht sollte aus Materialien hoher Schmelztemperatur, hoher Ordnungszahl und hoher Wärmeleitfähigkeit bestehen. Das Element Wolfram (W) erfüllt am besten die drei Kriterien [8]. Zur Verminderung der Aufrauhung im Betrieb und zur Vermeidung von Rissen wird es mit Rhenium (Re) legiert.

*Strichfokus:* Zur Verkleinerung des optischen Fokus wird die Anodenfläche im Brennfleck um ca.  $\alpha = 7^\circ \sim 20^\circ$  aus der Senkrechten geneigt.

<sup>4</sup>Üblicherweise wird das Material Wolfram wegen seines hohen Schmelzpunktes (ca. 3380°C) benutzt.

*Drehanode:* Wird die Anode rotiert, kann die eingebrachte Wärme auf einen ganzen Ring verteilt werden, ohne daß der Fokus dadurch größer wird. Die Verteilung der hohen thermischen Belastung ist um so besser, je grösser der Durchmesser der Brennfleckbahn und je höher die Drehzahl ist.

*Kühlung:* Die bei der Röntgenstrahlung entstehende Hitze ist beträchtlich und muß abgeführt werden, um die Anode nicht zu zerstören. Dies geschieht am effektivsten für die in den Anwendungen der zerstörungsfreien Materialprüfung eingesetzte Strahlungsintensität durch forcierte Zirkulation von Kühlflüssigkeit an der Anode. Bevorzugtes Kühlmittel für bipolare Röhren ist Öl, da es einen guten Isolator darstellt. Bei unipolaren Röhren, deren Anode meist geerdet ist, wird in der Regel Wasser eingesetzt, da es eine höhere spezifische Wärmekapazität als Öl besitzt.

*Gehäuse:* Da zwischen den Elektroden eine Hochspannung anliegt, müssen sie voneinander elektrisch isoliert werden. Darüber hinaus bildet das Röhrengehäuse das Vakuumgefäß und die mechanische Halterung der Röhrenbauteile. Früher wurde Glas dafür verwendet. In den letzten Jahren werden Röhrengehäuse aus Metall und Keramik hergestellt, die besser für den industriellen Einsatz geeignet sind.

**Generator:** Aufgabe des Generators ist die Bereitstellung der Heizspannung  $U_h$  für die Glühkathode, die Hochspannung  $U$  für die Elektroden und ggf. des Stromes für die Drehanode im Röntgenstrahler. Das Blockdiagramm eines modernen Generators ist in Abb. 7 dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen Generator, der nach dem Prinzip des Gleichspannungswandlers arbeitet. Zuerst wird der vom Netz gelieferte Drehstrom (380V, 50Hz) mit Halbleiterdioden gleichgerichtet und mit Kondensatoren geglättet. Anschließend wird dann die so entstandene Gleichspannung mit Hilfe einer Anordnung von Halbleiterschaltenelementen (z.B. Thyristor oder IGBT) zu einer Wechselspannung hoher Frequenz (z.B. 20kHz) umgewandelt. Durch einen Transformator wird daraus die Hochspannung erzeugt, die danach gleichgerichtet wird. Darüber hinaus werden Kathodenheizung und Anodenantrieb gespeist.

Im Vergleich zu den früheren Generatoren, die nach

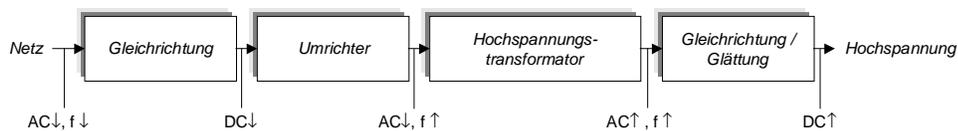


Abb. 7: Blockdiagramm eines Generators.

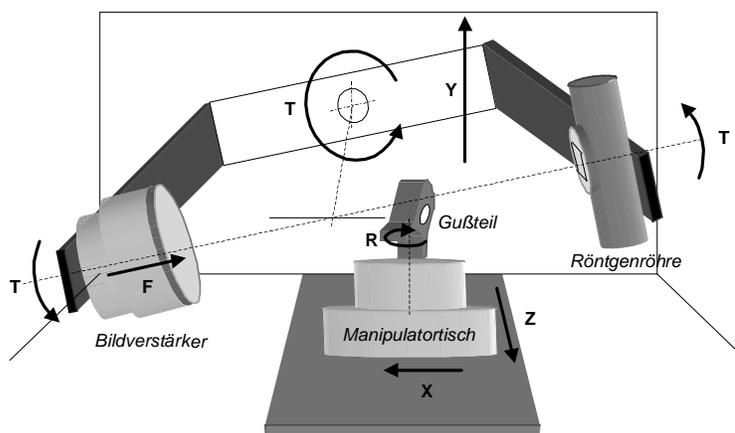


Abb. 8: Röntgenprüfanlage MU2000.

dem Prinzip des Transformators aufgebaut waren [10], liefern die neuen Konvertergeneratoren aufgrund der hohen Frequenzen drei Vorteile: *i)* Senkung des Materialaufwandes<sup>5</sup>; *ii)* vernachlässigbare Welligkeit bei Gleichrichtung und Glättung der Hochspannung; *iii)* kürzere Schaltzeiten. Dazu ermöglicht diese Technik die Anwendung der Softwaresteuerung der Konvertergeneratoren [14].

## 4.2 Der Manipulator

Ein Manipulator ist ein Gerät, mit dem Objekte in gewünschter Weise gehandhabt werden können, ohne sie mit den Händen zu berühren [34]. In einer Röntgenprüfanlage ist die Aufgabe des Manipulators die Handhabung der Prüflinge. Durch die Be-

<sup>5</sup>Die erforderliche Querschnittsfläche eines Transformator-kerns ist der Frequenz des transformierten Stroms umgekehrt proportional.

wegungsmöglichkeiten (den *Freiheitsgraden*) des Manipulators wird der Prüfling in die gewünschte Position gebracht. Bei einer manuellen Prüfung werden die Achsen eines Manipulators mit Hilfe eines oder mehrerer Joysticks bewegt. Bei einer automatischen Prüfung wird diese Aufgabe von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) übernommen.

Ein Manipulator besteht aus Schubelementen und Drehelementen, mit denen eine Translation bzw. Rotation des Prüflings durchgeführt werden kann. Früher hat der Manipulator das Prüfobjekt im Röntgenstrahl bewegt [20]. Diese Lösung führte zu einer aufwendigen mechanischen Konstruktion mit einer hohen mechanischen Belastung, Verschleiß und erhöhtem Wartungsaufwand. Heutzutage ist es möglich, die Röntgenröhre und den Detektor starr mit dem Manipulator zu verbinden und mit ihm zu bewegen. Abb. 12b zeigt einen als *C-Bogen* realisierten Manipulator, aber auch andere Konstruktio-

nen wie Rechteck-Rahmen, durch die das Förderband mit den Prüflingen geführt wird, sind gebaut worden. Diese Manipulatoren sind deutlich einfacher zu steuern, schneller und kostengünstiger [2, 19].

Als Beispiel wird der von der Firma YXLON International X-Ray GmbH entwickelte Manipulator der Röntgenprüfanlage MU2000 dargestellt. Bei der MU2000 erfolgt die Manipulation über den Manipulatortisch und über die vertikale Scan-Achse, an der Bildverstärker und Röntgenröhre angebracht sind [38]. Ein Diagramm dieser Röntgenprüfanlage ist in Abb. 8 dargestellt. Der Manipulator besitzt sechs Freiheitsgrade: Rotation der R-Achse des Manipulatortisches, Rotation der Scan-Achse T, Translation des Manipulatortisches in X- und Z-Richtung, Einstellung der Höhe Y der Scan-Achse und Einstellung des Fokus-Detektor-Abstandes F.

Kann eine kompakte Lösung nicht realisiert werden, weil z. B. die zu prüfenden Teile sehr groß sind (so existieren vollautomatische Röntgenanlagen zum Prüfen von Aluminium-Rahmen zum Einhängen ganzer Motorblöcke), werden oft Roboter als Handhabungsgeräte eingesetzt. Diese stehen dann ebenfalls in der Röntgenschutzkabine und nehmen die Prüfteile vom zuführenden Fließband auf und halten sie in programmierten Positionen in den Röntgenstrahl. Je nach Größe des zu prüfenden Werkstückes müssen die Roboter entsprechend ausgelegt werden. Wegen der benötigten Bewegungsfreiheit der Roboter muß dann als Folge auch die Bleikabine entsprechend großzügig dimensioniert werden. Steht pro Roboter jeweils eine Bildaufnahme-Einheit zur Verfügung, so werden die Prüfvorgänge unabhängig voneinander durchgeführt. Steht dagegen nur ein Quelle-Detektor-System zur Verfügung, welches von zwei Robotern bedient wird, führt das zur besseren Auslastung der Bildaufnahmeeinheit, da die Be- und Entladezeiten durch den jeweils anderen Roboter ausgenutzt werden (s. Abb. 9). Dies wird durch erhöhten Aufwand in der Steuerung erreicht, da die Roboter sich gegenseitig nicht behindern dürfen. Die Programme für die Roboterbewegungen werden in der Regel roboterspezifisch erstellt, die aber mit der Steuerung des Gesamtsystems kommunizieren müssen. Damit wird sichergestellt, daß *i*) sie Teile auf dem Fließband vorfinden,

*ii*) die zur Bildaufnahme benötigte Zeit pro Prüfposition eingehalten wird, und *iii*) sich die Roboter erst nach Freigabe des Systems in den von beiden Robotern genutzten Strahlengang bewegen. Ferner wird den Robotern durch das System das Prüfergebnis der Bildverarbeitung mitgeteilt, von dem die Weiterverarbeitung des Prüflings abhängt (Gutteil oder Ausschußteil).

### 4.3 Der Bildverstärker

Der Röntgenbildverstärker hat zwei Aufgaben: möglichst verlustfreie Umwandlung der in der Röntgenprojektion enthaltenen Information in ein sichtbares Bild und Verstärkung seiner Helligkeit [13]. Anhand des in Abb. 10 dargestellten Aufbaues eines Röntgenbildverstärkers sei die Funktionsweise erklärt. Die Röntgenstrahlung tritt durch ein Eingangsfenster in die evakuierte Aufnahmeröhre ein. Da das strahlendurchlässige Eintrittsfenster den atmosphärischen Druck aushalten muß, darf es nicht zu dünn sein. Hier werden Metalle mit niedriger Ordnungszahl aus Gründen höherer Transparenz für Röntgenstrahlung verwendet, bei denen die Absorption und Streuung relativ klein sind [10]. Danach trifft die Strahlung auf den Röntgendurchleuchtungsschirm, in dem die Umwandlung von Röntgenstrahlung in sichtbares Licht stattfindet. Die Röntgenquanten werden absorbiert und ca. 2000 Lichtquanten pro Röntgenquant werden ausgelöst [4]. Das Licht trifft die Photokathode und setzt Photoelektronen frei. Diese Elektronen, die mit ca. 25kV beschleunigt werden, werden mit einer Elektronenoptik auf einem Ausgangsleuchtschirm verkleinert abgebildet. Das Ausgangsbild des Bildverstärkers wird anschließend mit einer Kamera aufgenommen.

Nachteil des Bildverstärkers ist die geometrische Verzerrung wegen der Krümmung des Eingangsschirms. Diese wirkt sich insbesondere bei Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen wie z.B. die genaue Vermessung absoluter Wegstrecken im Röntgenbild, die Weiterverarbeitung der gewonnenen Bilder für computertomographische Rekonstruktionen oder Gußfehlererkennung durch Verfolgung hypothetischer Fehler in Röntgenbildsequenzen [26, 24] nega-



Abb. 9: Zwei Roboter in einer Prüfanlage [5].

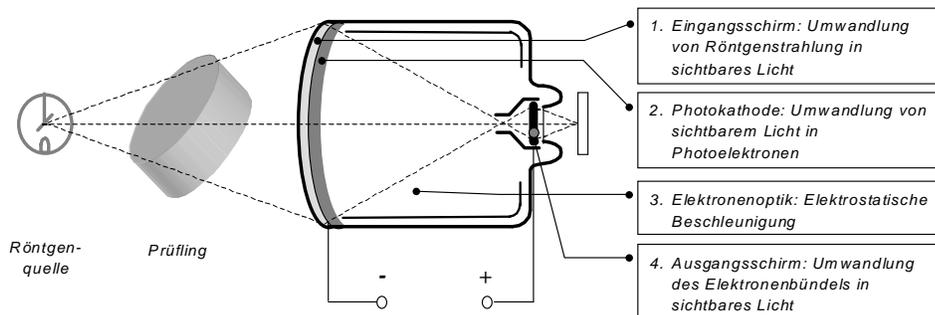


Abb. 10: Prinzipielle Darstellung der Funktionsweise eines Bildverstärkers [4].

tiv aus. In [17] wird ein elegantes Verfahren beschrieben, die integrale Verzeichnung der Röntgenaufnahmekette ohne Kenntnis der verursachenden Faktoren zu korrigieren<sup>6</sup>. In der Gußteilprüfung können die durch die Verzerrung auftretenden Ungenauigkeiten allerdings vernachlässigt werden, da die Fehlergrößenbestimmung im Bild jeweils lokal beschränkt

<sup>6</sup>Eine ausführliche Betrachtung dieser Verzerrung ist in [7, 25] zu finden.

ist und die Genauigkeitsanforderungen erfüllt werden.

#### 4.4 Die CCD Kamera

Diese Bildaufnehmer verwenden Halbleiter-Bildsensoren auf der Basis von CCD-(*charge-coupled-device*) Arrays. Hierbei wird die aktive

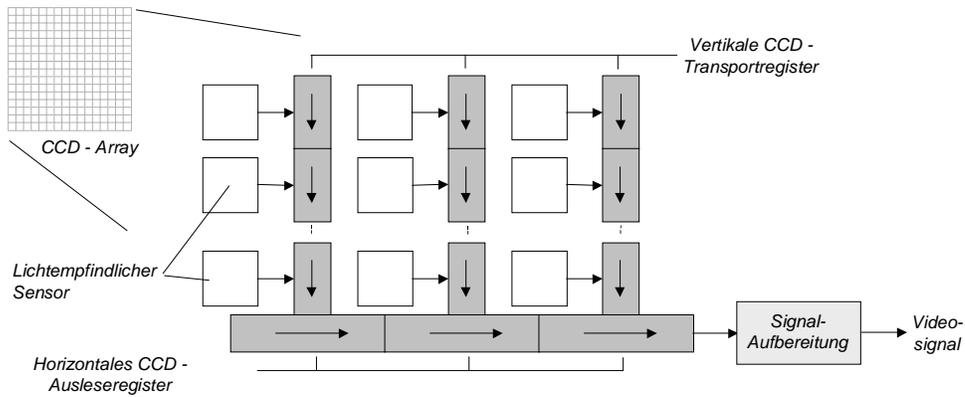


Abb. 11: Aufbau eines CCD-Arrays.

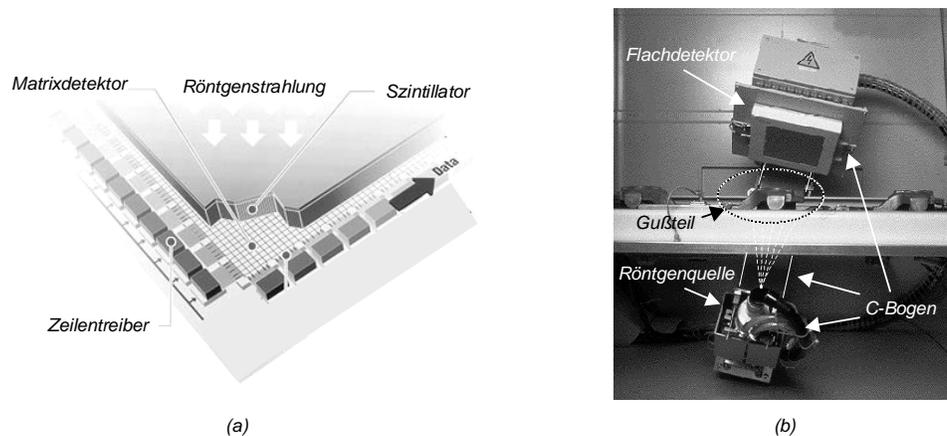


Abb. 12: Flachdetektor: (a) Prinzipieller Aufbau [16] und (b) Beispiel: Heimann RID 512-400 [19].

Empfängerfläche in einzelne Bildpunkte aufgeteilt. Im CCD-Sensor wird das einfallende Licht in elektrische Ladung umgewandelt und abtransportiert. Das Prinzip des Ladungstransportes beruht auf der Ladungsverschiebung, die in Schieberegistern stattfindet (s. Abb. 11).

Die CCD-Kameras zeichnen sich durch sehr gute Bildgeometrie, hohe Lichtempfindlichkeit und 400.000 Bildpunkte für konventionelle Kameras<sup>7</sup> aus.

Die Belichtungszeit liegt üblicherweise im Bereich zwischen 1/60s und 1/10000s [33].

Aufgrund der geringen Empfindlichkeit des CCD-Bildaufnehmers für direkte Röntgenstrahlung muß die Strahlung zuerst in sichtbares Licht umgewandelt werden [28]. Bei einer Röntgenprüfanlage mit CCD-Kamera geschieht diese Umwandlung im Bildverstärker (s. Abschnitt 4.3).

<sup>7</sup>Heutzutage gibt es HDTV-High Definition Television Ka-

meras mit bis zu 2.200.000 Bildpunkten.

## 4.5 Der Flachdetektor

Ein zweiter möglicher Bildaufnehmer ist der neuerlich entwickelte Flachdetektor auf Basis von amorphen Silicium (a-Si), bei dem der Röntgenstrahl ohne den Umweg über einen Bildverstärker mit CCD-Kamera von einem Halbleiter direkt in elektrische Signale umgesetzt wird (s. Abb. 12a). Bei dieser Technologie wird eine dünne Schicht aus a-Si auf einer Glasplatte als Träger aufgedampft. Wie bei einem CCD-Chip wird in der Siliciumschicht eine Pixelmatrix mit Schaltelementen erzeugt, damit die Ladung, die in den einzelnen Pixeln gespeichert wird, seriell elektronisch ausgelesen werden kann [8, 6, 28].

Vorteile dieses Detektors sind: größere Bildaufnahmefläche, keine geometrische Verzerrung, hohe Grauwertaufföschung (12 ~ 16 Bit/Pixel), sehr leicht und klein. Aufgrund der hohen Grauwertaufföschung und größeren Bildaufnahmefläche sind weniger Prüfpositionen bei der Inspektion von Gußteilen notwendig. Das geringe Gewicht ermöglicht eine einfachere und schnellere Mechanik [2, 19]. Ein Flachdetektor montiert an einem C-Bogen ist in Abb. 12b gezeigt.

## 4.6 Der Bildverarbeitungsrechner

In einem Bildverarbeitungsrechner wird zuerst das vom Bildaufnehmer gelieferte elektrische Signal mit einer *Frame-Grabber*-Karte digitalisiert. Danach werden die digitalisierten Röntgenbilder mit einem Bildverarbeitungsprogramm weiterverarbeitet. Bei der Inspektion von Gußteilen wird auf dem Bildverarbeitungsrechner die Entscheidung automatisch getroffen, ob es sich um ein Gutteil oder Ausschuß handelt.

Obwohl große Datenmengen durch Bilder entstehen und eine hohe Prüfgeschwindigkeit gefordert wird, sind zu diesem Zweck keine speziell konfigurierten Rechner mehr erforderlich, da handelsübliche PC's durchaus ausreichend sind. Die Aufgaben eines solchen Rechners sind: *i)* Digitalisierung des Videosignals; *ii)* Speicherung der aufgenommenen Röntgenbilder; *iii)* Verbesserung der Bildqualität (Rauschreduktion, Kontrastanhebung, Bildrestauration, usw.); *iv)* Segmentierung und Klassifizierung von Fehlern in

den Bildern; *v)* Statistische Analyse der Ergebnisse; *vi)* benutzerfreundliche Bedienung; *vii)* einfache Einstellung der Parameter für die Bildverarbeitungsalgorithmen; *viii)* Anzeige der Röntgenbilder in Echtzeit am Monitor; und *ix)* Darstellung der Ergebnisse.

Üblicherweise findet zusätzlich auf diesem Rechner die Steuerung des Röntgenstrahlers und des Manipulators statt.

Das von der Firma Microsoft entwickelte Betriebssystem Windows NT zusammen mit dem von Firma Intel entwickelten Prozessor Pentium III gilt heutzutage als Stand der Technik für Bildverarbeitungsrechner. In den 90er Jahren haben sich viele Unternehmen für die objektorientierte Programmiersprache C++ unter Windows NT entschieden, da mit ihnen eine schnelle und einfache Programmentwicklung möglich ist.

Durch die Anwendung von Parallelrechnern kann die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Programmes wesentlich beschleunigt werden [3]. Die Programme können z.B. mit Hilfe der COM/DCOM-Technologie unter Windows NT implementiert werden. In diesem Fall kann ein Programm auf beliebig vielen Rechnern innerhalb eines Netzwerkes verteilt werden (siehe z.B. [1, 37]).

Die Ansätze der Bildverarbeitung zur Gußfehlererkennung können in zwei grobe Gruppen gegliedert werden: *i)* Ansätze, bei denen eine an die Struktur angepaßte Filterung durchgeführt wird und *ii)* Ansätze, die mit Hilfe der Mustererkennung, Expertensystemen, künstlicher neuronaler Netzwerke, allgemeiner Filter oder Mehr-Bild-Analyse eine Detektion unabhängig von der Position und Struktur des Prüflings erreichen<sup>8</sup>. Eine ausführliche Beschreibung der erwähnten Ansätze ist in [27] zu finden.

---

<sup>8</sup>Eine dritte Gruppe stellt die Computertomographie dar. Der industrielle Einsatz der Computertomographie in der Gußteilprüfung für die Automobilindustrie beschränkt sich bisher auf den Materialentwicklungs- und Forschungsbereich sowie auf die Prüfung besonders wichtiger und teurer Teile [1, 18, 23]. Die Gründe dafür liegen sowohl in dem hohen Zeitbedarf der Meßwertaufnahmen als auch an den ungenügenden Ortsauflösungen wirtschaftlicher Systeme, um die geforderten Fehlergrößen zu detektieren.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vollautomatische Röntgenprüfung ist fester Bestandteil in der Produktion sicherheitsrelevanter Aluminiumgußteile für die Automobilindustrie. Die Prüfaufgabe besteht in der Detektion von Gußfehlern, die meist im Innern des Prüflings verborgen sind. Bei der Massenproduktion von Gußteilen ist das Interesse an einer Automatisierung dieser Aufgabe schon allein aus Kostengründen naheliegend. Aber auch die Objektivierung und Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse des ständig gleichen und damit monotonen Prüfablaufs sind nicht zu vernachlässigende Vorteile gegenüber der visuellen Röntgenprüfung.

Moderne Anlagen können als Teil der Produktionsstrecke in der Aluminium-Gießerei ausgeführt werden. Die Prüfergebnisse geben nicht nur Aufschluß über das individuelle inspizierte Teil, sondern können auch als Trend-Indikator für den Gießprozeß herangezogen und ausgewertet werden. Sind mehrere Anlagen miteinander vernetzt, so ist eine zentrale Auswertung aller Ergebnisse möglich. Das schließt auch eine statistische Erfassung relevanter Daten ein.

Für die Logistik des Materialflusses und die Manipulation der zu prüfenden Teile sind verschiedene Konzepte realisiert worden. Diese hängen im wesentlichen von der Form, Struktur und Masse des Prüflings ab. Die Prüfgeschwindigkeit (Prüfzykluszeit für ein Teil; Teiledurchsatz) hängt von den benötigten Prüfpositionen ab.

Aufgrund der enormen Fortschritte in der Vergangenheit im Bereich der Rechnerhardware spielt die Auswertung der erzeugten Röntgenbilder durch die Bildverarbeitungssoftware eine nur untergeordnete Rolle. Wesentliche Verbesserungen der Anlagen werden demzufolge im Bereich der Manipulation der Prüflinge zu erwarten sein, um die Zykluszeiten der Prüfung weiter zu reduzieren.

Aber auch die Anforderungen an die Bildqualität haben sich erhöht. Um eine anspruchsvolle Prüfpezifikation zu erfüllen, müssen kleine Fehler gefunden werden. Das setzt eine hohe Auflösung des bildgebenden Systems voraus. Hier erfüllte die Einführung

von Flachdetektoren gleich mehrere Anforderungen an ein modernes System: hohe Auflösung, verzerrungsfreie Bilder, hohe Grauwertdynamik bei zusätzlich kompakter Bauweise, womit neue Manipulationsmöglichkeiten erschlossen wurden. Die hohe Grauwertdynamik erlaubte auch die wesentliche Reduzierung von notwendigen Prüfpositionen für ein Teil. Allerdings liegt dafür der Preis deutlich über dem eines herkömmlichen Bildverstärker-Kamera-Systems.

Flachdetektoren eröffnen zudem die Möglichkeit der Bewegtbild-Auswertung, da das Nachleuchten des Vorgängerbildes technologiebedingt wegfällt. Damit können Bildsequenzen aufeinanderfolgender Röntgenbilder untersucht werden, deren Aufnahmezeitpunkte je nach Ausführungsform der Anlage entweder von der Auslesegeschwindigkeit der Daten aus dem Detektor abhängt, oder von der Manipulations-einheit, bis sie die nächste aufzunehmende Prüfposition des Teiles erreicht hat.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß der heutige Stand der Technik von Röntgenprüfsystemen einen vollkommen automatischen Prüfablauf inklusive Teile-Manipulation, automatischer Röntgenbildauswertung, Sortierung der Teile nach Prüfergebnis und Erfassung von statistischen Daten umfaßt. Die Vorteile eines solchen Systems liegen in den zuverlässigen und konsistenten Röntgenprüfergebnissen, Prüfzeitverkürzung, Reduzierung der Ausschußrate und somit Kostenersparnis.

## Literatur

- [1] I. Bauscher and U. Hassler. Fortschritte in der Computertomographie. In *Berichtsband der Jahrestagung der Deutschen, Österreichischen und Schweizerischen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DACH)*, Innsbruck, Austria, 29.-31. Mai 2000.
- [2] K. Bavendiek, A. Krause, and A. Beyer. Durchsatz-erhöhung in der industriellen Röntgenprüfung – Eine Kombination aus innovativem Prüfablauf und optimierter Bildauswertung. In *DGZfP Jahrestagung*, volume *Berichtsband 63.1*, pages 301–306, Bamberg, 7-9 Sept. 1998. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [3] D.P. Bertsekas and J.N. Tsitsiklis. *Parallel and Distribution Computation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1989.

- [4] H. Birken and B. van der Eijk. Der Röntgenbildverstärker. In H.-J. Maurer and E. Zieler, editors, *Physik der bildgebenden Verfahren in der Medizin*, pages 19–28, Berlin, Heidelberg, 1984. Springer.
- [5] F. Brandt. The use of x-ray inspection techniques to improve quality and reduce costs. *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, 5(5), May 2000.
- [6] J. Bunke. Computertomographie. In K. Ewen, editor, *Moderne Bildgebung: Physik, Gerätetechnik, Bildbearbeitung und -kommunikation, Strahlenschutz, Qualitätskontrolle*, pages 153–170, Stuttgart, New York, 1998. Georg Thieme Verlag.
- [7] W. Daum. *Zur objektiven Beurteilung der Bildqualität industrieller Radioskopie-Systeme*. PhD thesis, vom Fachbereich Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, 1994.
- [8] O. Dössel. *Bildgebende Verfahren in der Medizin: Von der Technik zur medizinischen Anwendung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000.
- [9] K. Ewen and U. Streubühr. Physikalische Grundlagen der Röntgentechnik. In K. Ewen, editor, *Moderne Bildgebung: Physik, Gerätetechnik, Bildbearbeitung und -kommunikation, Strahlenschutz, Qualitätskontrolle*, pages 1–23, Stuttgart, New York, 1998. Georg Thieme Verlag.
- [10] R. Felix and B. Ramm. *Das Röntgenbild*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 3 edition, 1988.
- [11] Deutsche Gessellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. *Radioskopie, Unterlagen für den Grundkurs Stufe 2*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., 1996. RS2 2.96.
- [12] H. Hecker. *Ein neues Verfahren zur robusten Röntgenbildauswertung in der automatischen Gußteilprüfung*. PhD thesis, vom Fachbereich Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, 1995.
- [13] J. Heinzerling. Bildverstärker-Fernseh-Kette. In K. Ewen, editor, *Moderne Bildgebung: Physik, Gerätetechnik, Bildbearbeitung und -kommunikation, Strahlenschutz, Qualitätskontrolle*, pages 115–126, Stuttgart, New York, 1998. Georg Thieme Verlag.
- [14] J. Heinzerling. Röntgenstrahler. In K. Ewen, editor, *Moderne Bildgebung: Physik, Gerätetechnik, Bildbearbeitung und -kommunikation, Strahlenschutz, Qualitätskontrolle*, pages 77–85, Stuttgart, New York, 1998. Georg Thieme Verlag.
- [15] J. Heinzerling. Streustrahlungsreduktion. In K. Ewen, editor, *Moderne Bildgebung: Physik, Gerätetechnik, Bildbearbeitung und -kommunikation, Strahlenschutz, Qualitätskontrolle*, pages 95–97, Stuttgart, New York, 1998. Georg Thieme Verlag.
- [16] H. Horbaschek. Technologie und Einsatz von Festkörperdetektoren in der Röntgentechnik. Vortrag der Firma Siemens Pforchheim in der 9. Sitzung des Unterausschusses Bildverarbeitung in der Durchstrahlungsprüfung (UA BDS) der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), Ahrensburg, Jun. 1998.
- [17] Th. Jaeger. Entwicklung von Verfahren zur geometrischen Entzerrung radiographischer Aufnahmen. Diplomarbeit, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Technische Universität Berlin, 1990.
- [18] Th. Jaeger. *Optimierungsansätze zur Lösung des limited data problem in der Computertomographie*. Verlag Dr. Köster, Berlin, 1997.
- [19] Th. Jaeger, U. Heike, and K. Bavendiek. Experiences with an amorphous silicon array detector in an adr application. In *International Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, DGZfP Proceedings BB 67-CD*, pages 111–114, Berlin, March 15-17 1999. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [20] J.-M. Kosanetzky and R. Krüger. Philips MU231: Räderprüfanlage. Technischer Bericht, Philips Industrial X-Ray GmbH, Hamburg, 1997.
- [21] H. Kuchling. *Taschenbuch der Physik*. Harri Deutsch, Thun-Frankfurt,Main, 12 edition, 1989.
- [22] N. Lossau. *Röntgen: Eine Entdeckung verändert unser Leben*. Köln, vgs, 1 edition, 1995.
- [23] M. Maisl, H. Reiter M. Purschke, E. Zabler, and M. Rosenberger. Industrielle 3D-Computertomographie. In *Berichtsband der Jahrestagung der Deutschen, Österreichischen und Schweizerischen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DACH)*, Innsbruck, Austria, 29.-31. Mai 2000.
- [24] D. Mery. *Automatische Gußfehlererkennung aus digitalen Röntgenbildsequenzen*. Verlag Dr. Köster, Berlin, 2001.
- [25] D. Mery and D. Filbert. Die Epipolargeometrie in der Röntgendurchleuchtungsprüfung: Grundlagen und Anwendung. *at - Automatisierungstechnik*, 48(12):588–596, 2000.
- [26] D. Mery and D. Filbert. Verfolgung von Gußfehlern in einer digitalen Röntgenbildsequenz – Eine neue Methode zur Automatisierung der Qualitätskontrolle von Gußteilen. *tm - Technisches Messen*, 67(4):160–165, 2000.
- [27] D. Mery, Th. Jaeger, and D. Filbert. Automatische Gussfehlererkennung: Stand der Technik. *tm - Technisches Messen*, 68(7-8), 2001.
- [28] U. Neitzel. Systeme für digitale Röntgenbildgebung. In *Moderne Bildgebung: Physik, Gerätetechnik, Bildbearbeitung und -kommunikation, Strahlenschutz, Qualitätskontrolle*, pages 127–136, Stuttgart, New York, 1998. Georg Thieme Verlag.
- [29] M. Purschke. Radioskopie – Die Prüftechnik der Zukunft? In *DGZfP Jahrestagung*, volume Berichtsband 68.1, pages 77–84, Celle, 10-12 Mai 1999. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.

- [30] H.-U. Richter. *Chronik der Zerstörungsfreien Materialprüfung*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, DGZfP, Verlag für Schweißen und verwandete Verfahren, DVS-Verlag GmbH, Berlin, 1 edition, 1999.
- [31] W.C. Röntgen. Eine neue Art von Strahlen: I Mitteilung. In *Sitzungsbericht der Würzburger Physikal.-Medicin. Gesellschaft*, Würzburg, Nov. 1895. Verlag und Druck der Stahel'schen K. Hof- und Universitäts- Buch- und Kunsthandlung.
- [32] M. Schaefer. 100 Jahre Röntgenprüftechnik - Prüfsysteme früher und heute. In *DGZfP Jahrestagung*, pages 13–26, Aachen, 22-24 Mai 1995. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [33] R. Schmid. *Industrielle Bildverarbeitung: Vom visuellen Empfinden zur Problemlösung*. Viewegs, Fachbücher der Technik, Braunschweig-Wiesbaden, 1995.
- [34] R. Schwieger. Stilllegung, sicherer Einschluß und Abbau kerntechnischer Anlagen. Technischer Bericht, Institut für Werkstoffkunde, Universität Hannover, 1999.
- [35] H. Vogel. *Gerthsen Physik*. Springer, Berlin, Heidelberg, 19 edition, 1997.
- [36] Völkel. *Grundlagen für den Prüfer mit Röntgen- und Gammastrahlung (Durchstrahlungsprüfung)*. Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung, Fachgebiet Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, 1989.
- [37] T. Wenzel and R. Hanke. Fast image processing on die castings. In *Anglo-German Conference on NDT Imaging and Signal Processing*, Oxford, 27-28 March 1998.
- [38] YXLON International X-Ray GmbH, Hamburg. *Technische Daten des 160kV Röntgenprüfsystems MU2000*, 1998.

Computertomographie, technische Diagnose von Elektromotoren, Expertensysteme zur Überwachung elektronischer Schaltungen. Adresse: Institut für Meß- und Automatisierungstechnik, TU-Berlin Sekr. E2, Einsteinufer 19, D-10587 Berlin. www: <http://ima.ee.tu-berlin.de>, E-Mail: [dieter.filbert@tu-berlin.de](mailto:dieter.filbert@tu-berlin.de)

**Dr.-Ing. Domingo Mery:** promovierte als Gastwissenschaftler am Institut für Meß- und Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Berlin auf dem Gebiet der automatischen Gußfehlererkennung. Seit März 2001 ist er Assistant Professor vom Fachbereich Informatik an der Universidad de Santiago de Chile. Im Bereich der industriellen Bildverarbeitung liegt sein Schwerpunkt bei der Qualitätskontrolle. Adresse: Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile, Av. Ecuador 3659, Santiago, Chile. www: <http://www.diinf.usach.cl/~dmery>, E-Mail: [dmery@ieee.org](mailto:dmery@ieee.org)

**Dr.-Ing Thomas Jaeger:** promovierte am Institut fuer Meß- und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Berlin auf dem Gebiet der industriellen Computertomographie. Anschließend hat er bei der Firma YXLON International X-Ray GmbH, Hamburg, als Software-Entwickler für vollautomatische Röntgenprüfanlagen gearbeitet. Zur Zeit ist er in Berlin im Bereich der industriellen Bildverarbeitung beschäftigt. E-Mail: [thomas.jaeger@alumni.tu-berlin.de](mailto:thomas.jaeger@alumni.tu-berlin.de)

**Prof. Dr.-Ing. Dieter Filbert:** vertritt das Fachgebiet Elektrische Meßtechnik am Institut für Meß- und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Berlin. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Bildverarbeitung in der Materialprüfung,