

Das Auge des Computertomografen: Die Geschichte vom Sehenlernen des Unsichtbaren oder vom Fluoreszenzschirm zum photonenzählenden Detektor

The Eye of the CT Scanner: The story of learning to see the invisible or from the fluorescent screen to the photon-counting detector

Autor

Heinz-Peter Schlemmer

Institut

Abt. Radiologie, Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg, Germany

Key words

CT, digital radiography, radiations, radiography

eingereicht 09.10.2020

akzeptiert 17.01.2021

online publiziert 18.03.2021

Bibliografie

Fortschr Röntgenstr 2021; 193: 1034–1049

DOI 10.1055/a-1308-2693

ISSN 1438-9029

© 2021. Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14, 70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. med. Dipl.-Phys. Heinz-Peter Schlemmer
Abt. Radiologie, Deutsches Krebsforschungszentrum,
Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg, Germany
Tel.: +49/62 21/42 25 64
Fax: +49/62 21/42 25 67
h.schlemmer@dkfz.de

ZUSAMMENFASSUNG

Röntgens Fotografien mit der „neuen Art von Strahlen“ lösten einen weltweiten Begeisterungssturm in allen gesellschaftlichen Kreisen aus. Dabei war es ein Glücksfall, dass die ihm zu Verfügung stehenden fotografischen Trockenplatten auch für die unsichtbaren X-Strahlen empfindlich waren. Entdeckung, Erforschung und Nutzbarmachung von Röntgenstrahlen beruhen auf Methoden zur deren Sichtbarmachung, vom Fluoreszenzschirm über die Fotoplatte bis hin zum digitalen Röntgendetektor. Aus diesem Blickwinkel heraus möchte diese Arbeit die 125-jährige Erfolgsgeschichte der Röntgenbildgebung von der Entdeckung bis zur jüngsten Entwicklung photonenzählender Detektoren skizzieren. Die wissenschaftshistorische Betrachtung am Übergang des 19. zum 20. Jahrhundert offenbart eine eindrucksvolle Zeit tiefgreifender wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Umbrüche, in der

revolutionäre Entdeckungen und technologische Entwicklungen zu gewaltigen Fortschritten der Medizin führten. Die gegenseitige Befruchtung von Physik und Medizin und deren Verquickung mit Erfindergeist, Ingenieurskunst und unternehmerischem Geschick schufen die eindrucksvollen Möglichkeiten der bildgebenden Diagnostik von heute. Diese Arbeit begleitet die Röntgenvorlesung, die der Autor am 13. November 2020 im Röntgen-Geburtshaus im Rahmen von dessen Eröffnung sowie des feierlichen Abschlusses des 101. Deutschen Röntgenkongresses in Remscheid-Lennep gehalten hat.

Kernaussagen:

- Die Entwicklung der Computertomografie markiert einen Meilenstein der methodischen Weiterentwicklung der Bildgebung mit Röntgenstrahlen.
- Im Detektorpixel werden die unseren Sinnen unzugänglichen Röntgenstrahlen in digitale elektrische Impulse umgewandelt, aus denen der Computer die Bilder errechnet.
- Photonenzählende Röntgendetektoren lassen deutliche diagnostische Vorteile für klinische Anwendungen erwarten.

Zitierweise

- Schlemmer H, The Eye of the CT Scanner: The story of learning to see the invisible or from the fluorescent screen to the photon-counting detector. Fortschr Röntgenstr 2021; 193: 1034–1049

ABSTRACT

Roentgen's photographs with the "new kind of rays" triggered a worldwide storm of enthusiasm in all social circles. It was a stroke of luck that the photographic dry plates available to him were also sensitive to invisible X-rays. The discovery, research and utilization of X-rays are based on methods for making them visible, from fluorescent screens to photographic plates and digital X-ray detectors. From this point of view, this paper aims to outline the 125-year success story of X-ray imaging from its discovery to the recent development of photon-counting detectors. The scientific-historical view during the transition from the 19th to the 20th century reveals an impressive period of profound scientific and social upheaval

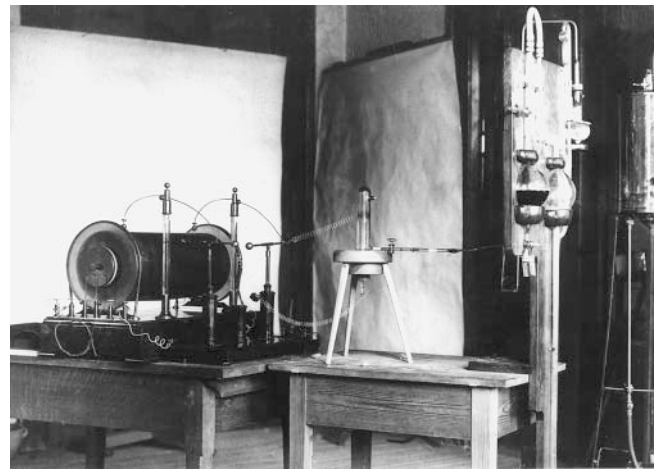
in which revolutionary discoveries and technological developments led to enormous progress in medicine. The cross-fertilization of physics and medicine and their combination with inventiveness, engineering and entrepreneurial spirit created the impressive possibilities of today's imaging diagnostics.

This contribution accompanies the Roentgen Lecture the author gave on November 13, 2020 in Roentgen's birth house as part of its inauguration and the closing ceremony of the 101st Congress of the German Roentgen Society in Remscheid-Lenep.

Es war Freitagabend, als Röntgen seine epochale Entdeckung machte, die eigentlich nur einen Wimpernschlag dauerte. Im Dunkeln leuchtete plötzlich ein Fluoreszenzschirm neben ihm hell auf. Dieser befand sich rein zufällig in der Nähe der von ihm lichtdicht eingepackten Gasentladungsröhre, mit der er gerade an diesem 8. November 1895 experimentierte (► **Abb. 1**). Der Verwunderung zum Trotz oder vermutlich gerade deswegen trieben ihn Neugierde und Forschergeist dazu an, dem unbegreiflichen Phänomen sofort nachzugehen und es nach den Regeln der wissenschaftlichen Kunst nüchtern zu untersuchen. Der Fluoreszenzschirm leuchtete immer dann auf, wenn er einen Spannungstoß durch die Gasentladungsröhre schickte. Und er leuchtete selbst dann, wenn er unterschiedlichste undurchsichtige Gegenstände davorstellte. Eigenartige Schattenwürfe vom Inneren undurchsichtiger Gegenstände waren auf fotografischen Aufnahmen zu erkennen. Er vermutete daraufhin, dass sich in seinem Zimmer eine „neue Art von Strahlen“ ausbreiten musste, die dem Auge unzugänglich ist. Doch durchaus befürchtete er dabei, dass die Leute über ihn sagen könnten: „Der Röntgen ist wohl völlig verrückt geworden“ [1]. Als er aber am Sonntag, den 22. Dezember 1895 mit dieser „neuen Art von Strahlen“ die Hand seiner Frau fotografierte, kam alles Weitere unaufhaltsam ins Rollen:

- 5. Januar 1896: Pressemitteilung „Eine sensationelle Entdeckung“ in der Morgenausgabe von „Die Presse“ in Wien. Die Neuigkeiten breiteten sich rasch in der Tagespresse aus, am 7. Januar im Londoner Standard und in Frankfurter Zeitungen, ab dem 8. Januar in amerikanischen Zeitungen und (erst) am 9. Januar im Würzburger Generalanzeiger [2].
- 9. Januar 1896: Telegrafische Gratulation von Kaiser Wilhelm II. und 3 Tage später, am 12. Januar, persönliche Vorstellung der Entdeckung von Röntgen vor dem Kaiser in Berlin.
- 23. Januar 1896: Öffentlicher (sein einziger!) Vortrag im vollbesetzten Hörsaal des Physikalischen Instituts der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft vor Zuhörern aus allen Kreisen der Wissenschaft und Gesellschaft. Mit Jubelrufen wurde der Vorschlag des Anatomen Albert Kölliker begrüßt, die „X-Strahlen“ in „Röntgen'sche Strahlen umzubenennen.
- 24. Januar 1896: Erstes Röntgenbild für eine Operation (Doppelzehe) in Wien [3].

Ärzte interessierte das Innere des Körpers, den Kaiser vermutlich eher das Innere von Waffen. Doch all das konnte Wilhelm Conrad Röntgen am Abend seiner Entdeckung, dem 8. November 1895, nicht ahnen. Auf die spätere Frage hin, was er sich denn dabei gedacht habe, sagte er: „Ich dachte nicht, ich untersuchte“ [4]. Seine Arbeitsweise war gekennzeichnet von einem hohen Maß an wissenschaftlicher Sorgfalt, Geduld und Ausdauer. Röntgens Begeis-



► **Abb. 1** Apparaturen, die Röntgen zur Entdeckung der X-Strahlen nutzte: Rap'sche Vakuumpumpe, Funkeninduktor Rühmkorff'scher Bauart und eine Hittorf'sche Gasentladungsröhre. (© Deutsches Röntgen-Museum Remscheid). [rerif]

terung für die Forschung zeigt sich daran, dass er selbst an diesem Freitagabend noch so wachsam und konzentriert war, dass er das kurzzeitige Phänomen überhaupt wahrnahm und nicht als nebensächlich abtat. Daraufhin folgte beharrliches Experimentieren, und bereits am Samstag der Weihnachtswoche, am 28. Dezember 1895, reichte er seine erste Arbeit „Über eine neue Art von Strahlen“ ein. Offensichtlich hatten ihn seine Experimente und die Fotografie der Hand seiner Frau selbst über Heiligabend am Dienstag und die beiden Weihnachtsfeiertage Mittwoch und Donnerstag sehr beschäftigt. Und schon am darauffolgenden Mittwoch, dem 1. Januar 1896, d. h. dem Neujahrstag nach der Silvesternacht, verschickte er seine erste Mitteilung an Freunde und Kollegen.

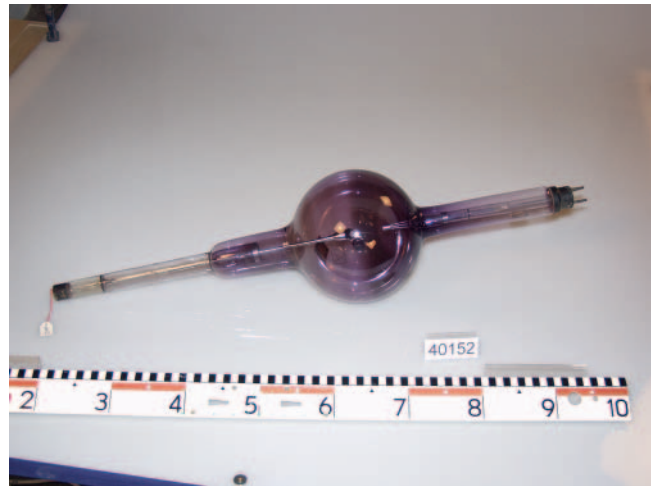
Trotz seiner offensichtlichen Begeisterung bewahrte sich Röntgen seine wissenschaftliche Nüchternheit. Er fand, dass nach seiner Entdeckung ein „erstaunlicher Rummel losbrach“ (bereits nach einem Jahr gab es mehr als 1100 Veröffentlichungen dazu, was zuvor noch nie in einem solchen Umfang gewesen war). Trotz Anfragen und Appellen verzichtete er bewusst auf Patentierungen, denn seiner Meinung nach sollten Erfindungen und Entdeckungen der Allgemeinheit gehören und nicht einzelnen Unternehmen. Das 50 000 Kronen hohe Preisgeld seines Nobelpreises im Jahr 1901, des ersten Nobelpreises für Physik überhaupt, stiftete er der Universität Würzburg zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Er ging lieber in die Berge als auf Tagungen, er liebte die Naturbeobachtung, war begeisterter Bergsteiger, Jäger und – Fotograf.

Seine X-Strahlen-Fotografien gingen rasch um die Welt und veränderten die medizinische Diagnostik so schnell, dass sich bereits 1923 der Chirurg Ferdinand Sauerbruch bei Röntgen darüber beklagte, seine Erfindung hätte die Ärzte dazu verleitet, sich zu sehr auf das neue Verfahren zu verlassen und ihre Patienten nicht mehr genau zu untersuchen. Die Röntgentechnik war kurz zuvor durch die Erfindung der Glühkathoden-Hochvakuum-Röntgenröhre von William David Coolidge (1873–1975) entscheidend verbessert worden (► **Abb. 2**). Mit der Technologie ließen sich zum ersten Mal Spannung und Strom und damit Qualität und Intensität der Röntgenstrahlen unabhängig voneinander regulieren. Nach der ersten Vorstellung im Dezember 1913 und der ersten praktischen Anwendung durch Heinrich Albers-Schönberg im Jahr 1914 (1865–1921) in Hamburg war der Weg eröffnet zu einer reproduzierbaren medizinischen Bildgebung mit Röntgenstrahlen. Coolidge hatte Röntgen persönlich in Leipzig kennengelernt („Zwar sieht er gar nicht so freundlich aus, dafür erscheint er sehr gewandt“) [5]. 1928 entwickelten die deutschen Physiker Hans Geiger (1882–1945) und Walther Müller (1905–1979) das nach ihnen benannte Zählrohr, mit dem sich Partikelstrahlen und auch Röntgenstrahlen nachweisen ließen. Ausgerüstet mit den richtigen Messinstrumenten zur Detektion der unsichtbaren Strahlen konnte sich auch die Forschung der Strahlenanwendungen in der Medizin weiterentwickeln. Die Erfolgsgeschichte der sich entfaltenden medizinischen „Strahlenfächer“ Radiologie, Nuklearmedizin und Strahlentherapie nahm ihren Lauf.

Ein Meilenstein der methodischen Weiterentwicklung der Bildgebung mit den neuen Röntgenstrahlen markiert zweifelsohne die Entwicklung der Computertomografie (CT) von Godfrey Newbold Hounsfield (1919–2004) in den 1970er-Jahren. Es war die überhaupt allererste Methode zur Erzeugung von Schnittbildern, die damit überlagerungsfreie Einblicke in das Körperinnere ermöglichten, ohne diesen auch nur zu berühren. Und die Methode hat bis heute eine weitere imposante Entwicklung durchgemacht. Konturschärfe, Bildkontrast und räumlichen Auflösung wurden bis in den isotropen Submillimeterbereich hinein gesteigert, die Aufnahmezeit pro Schicht auf ms-Zeitskala reduziert, die Scanlänge für Ganzkörperaufnahmen auf 2 Meter ausgedehnt und dabei gleichzeitig der Dosisbedarf signifikant reduziert. Die erstaunliche Steigerung der Leistungsfähigkeit der CT-Systeme wird den technologischen Fortschritten der einzelnen Komponenten zugeschrieben:

1. der Röntgenröhre, d. h. deren gesteigerter Leistung mit verbessertem Anodenmaterial, verringerter Brennfleckgröße, verbessertem Energiespektrum und verlängerter Strahlzeit,
2. der Gantry mit ihrer gesteigerten Präzision und verkürzten Rotationszeit
3. der Detektorarrays mit ihrer zunehmenden Anzahl von Zeilen sowie
4. den verbesserten Bildrekonstruktionsverfahren, wie z. B. der iterativen Rekonstruktion oder neuerdings der Deep-Learning-Rekonstruktion.

Ein Schattendasein führt hingegen die kleinste, aber mitunter wichtigste und physikalisch wie technologisch höchst faszinierende Komponente der Bilderzeugung, nämlich



► **Abb. 2** Nach ersten erfolgreichen Praxistests im Juli 1914 übernahm die AEG in Berlin die Produktion der neuen Coolidge-Röntgenröhre in Deutschland. (© Deutsches Röntgen-Museum Remscheid). [rerif]

5. der Detektorpixel, der eigentliche Sensor für die Röntgenstrahlen. In diesen kleinen, wenige Millimeter bis Submillimeter großen Elementen findet der entscheidende Prozess der Umwandlung von den dem Auge unzugänglichen Röntgenstrahlen in messbare elektrische Impulse statt, aus denen das für das Auge sichtbare Bild errechnet wird. Was die Netzhaut für das Auge, das ist der Detektorarray für den Computertomografen. Und so wie sich unser Gehirn aus den Primärdaten der Stäbchen und Zapfen ein informatives Bild der Welt im Licht der Regenbogen-Wellenlängen der Sonne (380–780 nm) erzeugt, so errechnet der Bildprozessor aus den Rohdaten der Detektorpixel ein informatives Bild von Gegenständen im Licht der Wellenlängen einer Röntgenröhre (ca. 0,01–0,1 nm).

Ärzte erkannten in der „X-Strahlen-Fotografie“ einer Hand sofort ein großes diagnostisches Potenzial für die gesamte Medizin. Die rasante Entwicklung von verbesserten Methoden zur Sichtbarmachung der Röntgenstrahlen, vom Fluoreszenzschirm über die Fotoplatte bis zum digitalen Röntgendetektor, war dabei von grundlegender Bedeutung für die weitere Erfolgsgeschichte der medizinischen Röntgenbildgebung. Denn erst diese Methoden ermöglichten die weitere Erforschung und Nutzbarmachung dieser „neuen Art von Strahlen“. „Die Retina des Auges ist für unsere Strahlen unempfindlich“, betonte Röntgen bereits in seiner ersten Mitteilung [6].

Die vorliegende Abhandlung möchte die Erfolgsgeschichte der Röntgenbildgebung aus diesem Blickwinkel heraus nachzeichnen, d. h. vom Standpunkt der Detektion von Röntgenstrahlen. Begeht man dabei den wissenschaftshistorischen Weg, so offenbart sich eine Zeit tiefgreifender wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Umbrüche. Am Übergang des 19. zum 20. Jahrhundert ereigneten sich in Physik und Medizin revolutionäre Entdeckungen, deren gegenseitige Befruchtung und Verquickung mit Erfindergeist, Ingenieurskunst und unternehmerischem Geschick zu den erstaunlichen Fortschritten der bildgebenden Diagnostik in der

Medizin führten. Ein Anspruch auf Vollständigkeit kann und will auch nicht erhoben werden. Der Autor ist Radiologe und Physiker, aber kein Historiker. Geschichtliche Details finden sich bereits mannigfach in der Literatur, z. B. in 2 hervorragenden Büchern, die zum 100-jährigen Jubiläum der Entdeckung der Röntgenstrahlen erschienen sind [7, 8].

Im Auge wird unser sichtbares Licht von einem dünnen Sensor detektiert, der ca. 200µm dicken und im Durchmesser ca. 22 mm großen Retina. Hierbei handelt es sich um eine Matrix aus ca. 120 Millionen Pixeln bzw. Fotorezeptoren, die aus den Stäbchen und Zapfen mit einem Durchmesser von jeweils etwa 2µm bestehen. Diese Zellen enthalten große Mengen dicht gestapeltes Rhodopsin, ein Protein, das elektromagnetische Strahlen mit Wellenlängen von 380–780 nm absorbiert. Die Absorption löst bei dem Protein eine 3-dimensionale Konformationsänderung aus, die zu einer enzymatischen Kaskadenreaktion führt, die wiederum eine Schließung der Na⁺-Kanäle der Zellmembran mit konsekutiv schlagartig verändertem Membranpotenzial verursacht. Die hierdurch ausgelösten Aktionspotenziale leiten eine Kette von (digitalisierten) Nervenimpulsen zu den zentralen Sehzentren des Gehirns weiter, wo letztlich das Bild unserer Umwelt entsteht. Ebenso bestehen die CT-Detektoren und die Flachbilddetektoren digitaler Röntgeneinrichtungen aus einer Matrix von Pixeln, etwa 200µm bis 1 mm groß, in denen ebenso eine Absorption einfallender elektromagnetischer Wellen stattfindet, nur eben einer anderen Wellenlänge. Im Gegensatz zu sichtbarem Licht führen Röntgenstrahlen aufgrund ihrer viel höheren Energie zu ionisierenden Effekten, d. h. sie lösen Elektronen vorwiegend aus den inneren Schalen um den Atomkern heraus, und eine Kaskade weiterer Ionisationen führt daraufhin zur Freisetzung von Elektronen aus zunehmend weiter außen gelegenen Schalen. Hierdurch hervorgerufen werden elektrische und chemische Reaktionen, die messbare Effekte auslösen, wie Lumineszenz von Leuchtschirmen, Schwärzung fotografischer Filme, Lichtblitze in Szintillatoren und elektrische Strom- und Spannungsveränderungen in Halbleiterfotodioden. In modernen Halbleiterdetektoren werden die freigesetzten Elektronenkaskaden direkt zu einer Anode hin abgezogen und ohne Umwege als digitalisierter Strompuls zum zentralen Bildrechner weitergeleitet, wo das Bild des durchleuchteten Körpers entsteht. Jede Methode zur Sichtbarmachung von hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung beruht primär auf der Wechselwirkung mit Elektronen, ob in einem organischen Protein oder in einem anorganischen Festkörper.

Zur Zeit Röntgens war allerdings der atomare Aufbau von Materie noch unbekannt. 1895 lebte Röntgen im vertrauten mechanistischen Weltbild, dem sogenannten Newton'schen, im Nachhinein auch als „klassisch“ bezeichneten Weltbild. Auf dem Boden scheinbar unerschütterlicher Glaubenssätze an eine mechanistische Ordnung wurden physikalische Vorgänge verstanden wie Uhrwerke, die im absoluten Raum und in einer allgegenwärtig dahinfließenden Zeit tickten und deren Teile nur nach und nach aufgefunden und katalogisiert werden mussten. Max Planck (1858–1947), einem der späteren Revolutionäre der Physik, war 1874 sogar abgeraten worden, überhaupt noch Physik zu studieren, da „in dieser Wissenschaft schon fast alles erforscht“ sei [9]. Doch gegen Ende des 19. Jahrhunderts häuften sich merkwürdige Beobachtungen, die die alten Überzeugungen unaufhaltsam ins

Wanken brachten. Neben der Erforschung der sichtbaren Spektralfarben war es vor allem die Entdeckung unsichtbarer „Strahlen“, wie „kalorische Strahlen“, „deoxygenierende Strahlen“, „Funkwellen“, „X-Strahlen“ und „Radioaktivität“, die das mechanistische Weltbild erschütterte und zu bizarren Vorstellungen wie gekrümmten Raumzeiten, schwarzen Löchern, spukhaften Fernwirkungen, Materialisierung von Energiewellen oder zufallsgeleiteten Ereignissen führte. Albert Einstein (1879–1955) publizierte seine aufsehenerregende spezielle und allgemeine Relativitätstheorie 1905 bzw. 1915, und Werner Heisenberg (1901–1976), Erwin Schrödinger (1887–1961) und Max Born (1882–1970) formulierten ihre teils grotesk anmutende Quantenmechanik 1925 und 1926. Innerhalb von nur etwa 30 Jahren hatte sich das lang vertraute physikalische Weltbild radikal gewandelt. Und auch wenn bis heute noch teils verzweifelt um das Verstehen dieser teils absurd anmutenden Vorstellungen gerungen wird, so sind die Theorien dennoch die erfolgreichsten in der Geschichte der Physik. In den Industriestaaten haben viele auf Relativitätstheorie und Quantenphysik beruhenden Entwicklungen zu mittlerweile weltweit alltäglichen Nutzenanwendungen geführt, wie z. B. die gesamte digitale Telekommunikation, die GPS-Ortung der Navigationssysteme, der Laser mit seinen vielfältigen Verwendungen in Technik und Medizin und natürlich die Röntgenbildgebung mit hochempfindlichen Flachbilddetektoren und photonenzählenden Detektoren, die MR-Tomografie mit Supraleitung und Radiowellen bis hin zu neuen, futuristisch klingenden Technologien wie Quantenkryptografie und Quantencomputer. Röntgen hatte diese Umwälzungen mit seiner Entdeckung wesentlich angestoßen, wenn auch ohne es zu ahnen (vermutlich auch zu wollen). Erst in der Folge entstanden völlig neue Begriffe, wie z. B. Bremsstrahlung, K-Schale, Quantensprung, Compton-Effekt, Paarbildung etc.

Am Ende des 19. Jahrhunderts, dem Ausklang des Zeitalters der industriellen Revolution, war das wirtschaftliche Potenzial von Elektrizität erkannt, und demzufolge wurde intensiv an technologischen Anwendungen gearbeitet. Insbesondere war es möglich geworden, mit Elektrizität künstliches Licht zu erzeugen, was einen gewaltigen nutzbringenden Fortschritt mit zudem großem Marktpotenzial darstellte. Damit galt es, immer leistungsfähigere Technologien mit hoher Leuchtstärke und geringem Wärmeverlust zu entwickeln. Zur Zeit Röntgens war die Erforschung der visuellen Leuchterscheinungen von Gasentladungsröhren, sogenannten Kathodenstrahlröhren, „in Mode“. Bei den sogenannten Gasentladungsröhren handelt es sich um gasgefüllte und unterschiedlich stark evakuierte Glasröhren von unterschiedlicher Bauart, die nach ihren jeweiligen Konstrukteuren benannt wurden, wie Geißler-, Hittdorf-, Crook- oder Lenard-Röhre. Wie viele seiner Kollegen benutzte auch Röntgen eine solche Gasentladungsröhre für seine Forschung (► **Abb. 3**).

In diesen Niederdruckröhren eingeschmolzen waren 2 Metall Elektroden, zwischen denen bei Anlegen einer genügend hohen Spannung elektrische Entladungen mit eindrucksvollen Leuchterscheinungen hervorgerufen werden konnten. Die faszinierenden Leuchterscheinungen entstanden dabei am hellsten nahe der negativ geladenen Elektrode, der Kathode, weshalb man sie „Kathodenstrahlen“ nannte. Das Anlegen der erforderlichen hohen elektrischen Spannung war nur möglich wegen einer bahn-



▶ **Abb. 3** Birnenförmige Gasentladungsröhre nach Hittorf und Crookes. (© Deutsches Röntgen-Museum Remscheid). [rerif]

brechenden, einstweilen leider etwas in Vergessenheit geratenen Erfindung von Heinrich Daniel Rühmkorff (1803–1877). Er hatte das entscheidend wichtige Instrument entwickelt, mit dem sich aus niedriger Gleichspannung von wenigen Volt pulsierende Hochspannungen von mehreren Hunderttausend Volt erzeugen ließen. Erst damit konnte die Entladung zwischen den beiden Elektroden ausgelöst werden. Zweifelsohne musste bei solchen Experimenten auch laufend diese unsichtbare „neue Art von Strahlung“ erzeugt worden sein. Bereits 1879 hatte sich William Crookes (1832–1919) bei den Experimenten mit Kathodenstrahlröhren darüber geäußert, dass in der Nähe liegende Fotoplatten Schleier aufwiesen, und selbst der spätere Nobelpreisträger J. J. Thomson (1856–1940), der 1897 in den Kathodenstrahlen das Elektron entdeckte, hatte hindeutende Erscheinungen nur als zufällig und nebensächlich abgetan [10, 11]. Rückblickend war sogar schon am 22. Februar 1890 völlig unwissentlich eine erste „Röntgenaufnahme“ angefertigt worden. An der Universität von Pennsylvania hatten der Physiker Arthur Goodspeed (1860–1943) und der Fotograf William N. Jennings (1860–1946) Fotografien von Hochspannungsentladungen angefertigt. Danach experimentierten sie noch mit Crook'schen Entladungsröhren, wo zufälligerweise Fotoplatten in der Nähe lagen. Die Entwicklung dieser Fotoplatten brachte unerklärliche rundliche Schatten zutage, was jedoch nicht weiterverfolgt wurde. Nach der Veröffentlichung von Röntgen wurde Goodspeed dann sofort bewusst, dass es sich bei den rundlichen Strukturen auf den Fotografien um X-Strahlenbilder von Münzen gehandelt haben musste, die zufälligerweise auf der Platte lagen. Das Ergebnis konnte er daraufhin auch sofort reproduzieren [12].

Röntgen widmete sich also ebenfalls der Erforschung dieser Kathodenstrahlen. Sein spezielles Interesse galt dem Versuch, den Kathodenstrahl direkt außerhalb in der Niederdruckröhre, d. h. in freier Luft, zu untersuchen [13]. Der Heidelberger Physiker Philipp Lenard (1862–1964) hatte hierfür bereits eine spezielle Gasentladungsröhre mit einer dünnen Aluminiumfolie entwickelt, durch die der Kathodenstrahl nach außen dringen konnte, das sogenannte „Lenard-Fenster“. Röntgen ging hingegen in seinen

Würzburger Experimenten der Frage nach, ob der Kathodenstrahl möglicherweise auch die Glaswand selbst direkt durchdringen kann. Zum Aufspüren eines sehr schwach erwarteten Strahls außerhalb der Röhre arbeitete er in völliger Dunkelheit und schirmte hierfür die hell leuchtende Röhre mit schwarzem Karton ab. Doch bei einem seiner Experimente passierte dann plötzlich etwas sehr Merkwürdiges: „... (man sieht einen) mit Bariumplatinzyanür angestrichenen Papierschild bei jeder Entladung hell aufleuchten, fluorescieren, ...“ [14]. Dieser hatte sich zufällig in der Nähe der Gasentladungsröhre befunden und leuchtete wie von Geisterhand auf. Denn die Fluoreszenz hervorrufen hätte nur das sichtbare Leuchten des Kathodenstrahls in der Gasentladungsröhre können, was er doch durch den schwarzen Karton völlig unterdrückt hatte. Daraufhin ließ Röntgen offensichtlich von seinem ursprünglichen Plan des Auffindens von Kathodenstrahlen hinter der Glaswand der Röhre ab, und wandte sich mit voller Konzentration dem unerklärlichen Phänomen zu. Vermutlich entfachte gerade das Unerklärliche daran die fieberhafte Neugier des Wissenschaftlers in ihm. Ein außerordentliches Maß an Entschlossenheit, Beharrlichkeit, Beobachtungsgabe und Urteilsvermögen trieb ihn an, dem entdeckten Phänomen mit vielen weiteren Experimenten in kurzer Zeit auf den Grund zu gehen. Die Durchdringungsfähigkeit der neuen „Strahlen“ durch lichtdichte Materialien, wie insbesondere auch der menschlichen Hand, war außergewöhnlich beeindruckend. Schon 7 Wochen nach seiner Entdeckung hatte er seine epochale Arbeit „Über eine neue Art von Strahlen (Vorläufige Mitteilung)“ fertiggestellt, sodass er sie noch kurz vor der Jahreswende am 28. Dezember 1895 dem Sekretär der Physikalisch-medicinischen Gesellschaft zu Würzburg zur Publikation in den Sitzungsberichten der Gesellschaft übergeben konnte.

Zudem stieß er übrigens mit seiner Arbeit eine weitere epochale Entdeckung an, die nicht nur für die weitere Entwicklung der Strahlenmedizin, sondern in der Folge auch von größter weltpolitischer Bedeutung werden sollte. Von den Mitteilungen Röntgens hatte nur 4 Wochen später, am 20. Januar 1896, Henri Becquerel (1852–1908) erfahren. Er experimentierte mit Uransalzen, die durch Sonnenlicht zum Fluoreszieren gebracht werden konnten. Er untersuchte daraufhin, ob diese Fluoreszenz möglicherweise auch mit der Aussendung von solchen unsichtbaren X-Strahlen verbunden sein könnte. Und er fand seine Vermutung bestätigt, als er beobachtete, dass Fotoplatten selbst dann geschwärzt wurden, wenn er die fluoreszierenden Uransalze vorher lichtdicht eingepackt hatte (ähnlich wie Röntgen seine Röhre). Doch wenig später und durch Zufall beobachtete er dann zu seiner Verwunderung, dass diese Schwärzung selbst dann erfolgte, wenn die Uransalze nicht vorher durch Sonnenlicht zur Fluoreszenz angeregt worden waren. Offensichtlich vermochten die Uransalze auch spontan, d. h. ganz von allein, unsichtbare Strahlen auszusenden. Der Erforschung dieser „Becquerel'schen Strahlung“ widmeten sich ab Ende 1898 Marie (1867–1934) und Pierre Curie (1859–1906), und sie machten dabei sensationelle Entdeckungen. Marie Curie prägte den Begriff „Radioaktivität“ und erhielt für ihre bahnbrechenden Forschungen gleich 2 Nobelpreise, den für Physik 1903 und den für Chemie 1911. Den ersten Preis teilte sie sich mit ihrem Mann Pierre und Henri Becquerel.

Es ist wichtig sich zu vergegenwärtigen, dass zu jener Zeit der Aufbau des Atoms nicht einmal ansatzweise bekannt war, ja sogar die Existenz von Atomen überhaupt noch kontrovers diskutiert wurde. Das Elektron wurde erst 2 Jahre nach Röntgens X-Strahlen entdeckt, und zwar 1897 von Joseph John Thomson (1856–1940), ebenfalls in den Kathodenstrahlen. Sechzehn Jahre später, 1911, entdeckte Ernst Rutherford (1871–1937) bei seinen Streuexperimenten mit diesen Elektronen die Existenz des Atomkerns. Und erst im Jahr 1913, d. h. knapp 20 Jahre nach der Entdeckung Röntgens, entwickelte Niels Bohr (1885–1962) das uns vertraute Atommodell, nach dem Elektronen auf ganz bestimmten Schalen den Atomkern umgeben. Als Röntgen das mysteriöse Aufleuchten seines Fluoreszenzschirms beobachtete, war keinem Physiker dieser atomare Aufbau der Materie bekannt.

Der von Röntgen verwendete Fluoreszenzschirm bestand aus Karton mit darauf aufgetragenen, feingepulverten, grüngelben Kristallen des Bariumplatincyanürs, überzogen mit schwarzem Papier. Dass nicht nur Licht, sondern auch X-Strahlen dieses Material zum Fluoreszieren bringen, war eigentlich purer Zufall. Allerdings war die Leuchtkraft dieser kurzlebigen Fluoreszenzerscheinungen so gering, dass es für Röntgen schwer möglich war, das Durchdringungsvermögen dieser unbekanntes X-Strahlen genauer zu beobachten und vor allem die Abhängigkeit von Material und Distanz exakt zu untersuchen. Doch als begeisterter Amateurfotograf entdeckte Röntgen schnell, dass auch „fotografische Trockenplatten sich als empfindlich für die X-Strahlen erwiesen haben“. „Man ist imstande, manche Erscheinung zu fixieren, wodurch Täuschungen leichter ausgeschlossen werden; und ich habe, wo es irgend anging, jede wichtigere Beobachtung, die ich mit dem Auge am Fluoreszenzschirm machte, durch eine photographische Aufnahme kontrolliert“ [6].

Dass Röntgen zu jener Zeit lagerbare fotografische Trockenplatten mit gesteigerter Lichtempfindlichkeit zur Verfügung standen, war auch ein Glücksfall. Die Methode der Fotografie („Licht-Zeichnung“) war im Laufe des 19. Jahrhunderts entwickelt und zu einer immer größeren Reife verbessert worden. Im Jahr 1888 hatte bereits die Industrialisierung der Fotografie eingesetzt, und eine erste Rollfilmkamera wurde in größerem Umfang gefertigt, die Kodak N. 1 [15]. Röntgen bot sich damit die Möglichkeit, die Strahlendurchlässigkeit verschiedener Objekte zu fotografieren und damit zu dokumentieren und wissenschaftlich genau zu untersuchen. Hinzu kam, dass die von den X-Strahlen erzeugten Schattenfotografien einen ganz besonderen ästhetischen Reiz hatten, der nicht nur Wissenschaftler und Mediziner, sondern auch die allgemeine Öffentlichkeit in hohem Maße beeindruckte. Eines der am meisten aufsehenerregenden ersten Bilder Röntgens war sicherlich das der Hand seiner Frau Bertha, aufgenommen am 22. Dezember 1895 (► **Abb. 4**).

Die Entdeckung der Röntgenstrahlen brachte auch die Fotografie in eine neue Dimension. Das Unsichtbare, die inneren Strukturen von Gegenständen und Materialien konnten sichtbar gemacht und zeitlich fixiert abgebildet werden. Die neuen Fotografien lieferten damit Einblicke in eine bis dahin völlig unzugängliche Welt (► **Abb. 5**). Dabei glichen die neuen Röntgenbilder in ihrem Erscheinungsbild und der Art ihrer Belichtung den Fotografien aus der Frühzeit der Fotografie. Es ist nicht verwunderlich, dass damit auch Fotografen zur Ausweitung ihrer künstleri-

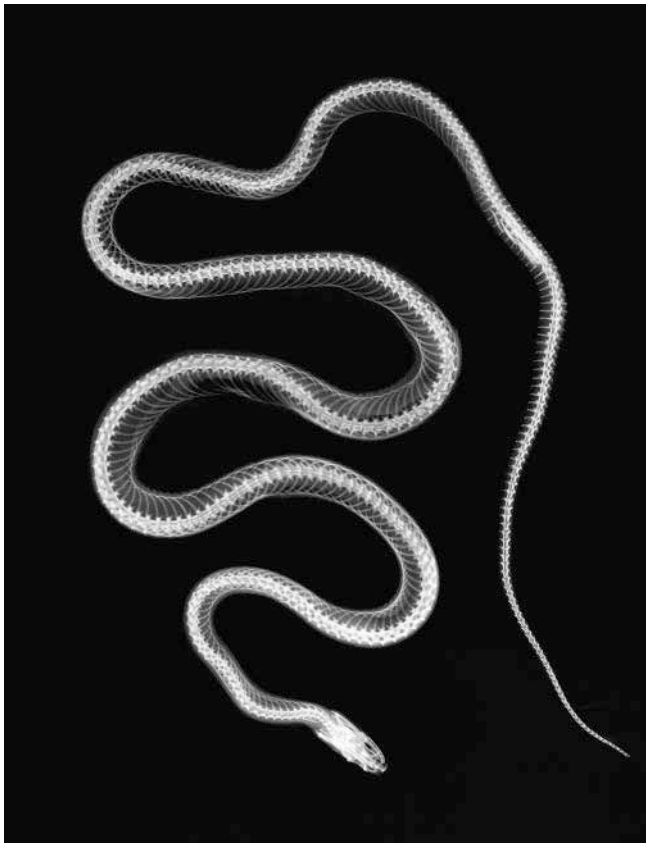


► **Abb. 4** Radiografie der Hand von Anna Bertha Röntgen (1839–1919). (© Deutsches Röntgen-Museum Remscheid). [rerif]

schen Tätigkeit neue Möglichkeiten erspähten. Unter den ersten Publikationen im Jahr 1896 fand sich auch eine Arbeit im *British Journal of Photography* [16]. Selbst in medizinischen Kreisen wurden auf der Suche nach einer Bezeichnung für die „neue Art von Fotografie“ mit X-Strahlen verschiedene Fachbegriffe diskutiert, darunter „X-Strahlen-Fotografie“ oder einfach „Neue Fotografie“ [17]. Die neckische Berufsbezeichnung „Fotograf“ verfolgt Radiologen bis heute.

Röntgen führte das Aufleuchten des Fluoreszenzschirms darauf zurück, dass es von unbekanntes Strahlen ausgelöst werden musste, die von der Gasentladungsröhre ausgingen. Als Ursprungsort dieser mutmaßlichen Strahlen, die er selbst „X-Strahlen“ taufte, vermutete er rasch die schwach leuchtende Innenwand der Glasröhre, an der die Kathodenstrahlen auf das Glas auftrafen und dort eine schwach sichtbare Fluoreszenz hervorriefen. Diesem Ort hatte zudem auch seine besondere Aufmerksamkeit gegolten, da er dort die Durchdringung der Kathodenstrahlen durch die Glaswand vermutete. „Die X-Strahlen gehen somit von der Stelle aus, wo nach den Angaben verschiedener Forscher die Kathodenstrahlen die Wand treffen“ [18].

Die physikalische Natur dieser „neuen Art von Strahlen“ war ihm aber völlig unklar. Ausgehend von der Vermutung, dass die



► **Abb. 5** Radiografie einer Schlange. Aus: Eder JM, Valenta E. Versuche über Fotografie mittelst der Röntgen'schen Strahlen. Herausgegeben mit Genehmigung des K. K. Ministeriums für Cultur und Unterricht von der K. K. Lehr- und Versuchsanstalt für Photographie und Reproductions-Verfahren in Wien, Wien, R. Lechner & Halle, Wilhelm Knapp, 1896. (© Archiv Deutsches Röntgen-Museum Remscheid). [rerif]

X-Strahlen von der Stelle der Glaswand der Röhre ausgingen, wo die Kathodenstrahlen auf diese auftreffen und diese zum Fluoreszieren bringen, erwog Röntgen anfänglich, dass es sich dabei um unsichtbare Lichtstrahlen handeln könnte. Die Existenz unsichtbarer Lichtanteile im Sonnenlicht war seinerzeit schon bekannt. Bereits 1800 hatte William Herschel (1738–1822) jenseits des roten Endes des Regenbogenspektrums eine besondere Erwärmung eines Thermometers beobachtet, was ihn auf die Existenz „kalorischer Strahlen“ im Sonnenlicht schließen ließ (heute: Infrarotstrahlen). Ein Jahr später beobachtete Johann Wilhelm Ritter (1776–1810) bei seinen Experimenten, dass die Schwärzung von Silberchloridpapier besonders effektiv ebenso außerhalb des sichtbaren Regenbogenspektrums stattfand, und zwar jenseits von dessen anderem, violettem Ende. Auch er schloss daraufhin auf die Existenz von dem Auge unzugänglichen Strahlen im Sonnenlicht und nannte diese „deoxidierende Strahlen“, später umbenannt in „chemische Strahlen“ (heute: Ultraviolettstrahlen). Das die Erdoberfläche erreichende Sonnenlicht besteht aus ca. 50 % infrarotem, 40 % sichtbarem und 5 % ultraviolettem Licht. Röntgen war also früh auf der richtigen Spur gewesen, als er vermutete, dass es sich bei den X-Strahlen um eine Form chemischer Strahlen handeln könnte (nur etwa 1 Größenordnung trennt den

Wellenlängenbereich von UV-Strahlen mit 380–100 nm von dem der Röntgenstrahlen mit 10nm–1pm). Doch er sah sich gezwungen, seine anfängliche Vermutung wieder fallen zu lassen, da er keine für Wellen typischen Effekte von Brechung, Reflexion oder Polarisation nachweisen konnte („Insofern stößt man doch sofort auf schwerwiegende Bedenken“, [19]). Die Hypothese, dass es sich bei X-Strahlen um hochenergetische Kathodenstrahlung handeln könnte, schloss er durch Versuche mit Ablenkmagneten aus. Er vermutete daraufhin, dass es sich bei den X-Strahlen um longitudinale Ätherschwingungen handeln könnte, „...wiewohl ich mir sehr wohl bewusst bin, dass die gegebene Erklärung einer weiteren Begründung noch bedarf“ [19]. Hieran zeigt sich die exzellente, konsequent wissenschaftliche Arbeitsweise Röntgens, der Behauptungen nur auf Grundlage reproduzierbarer Beobachtungsdaten aufstellte.

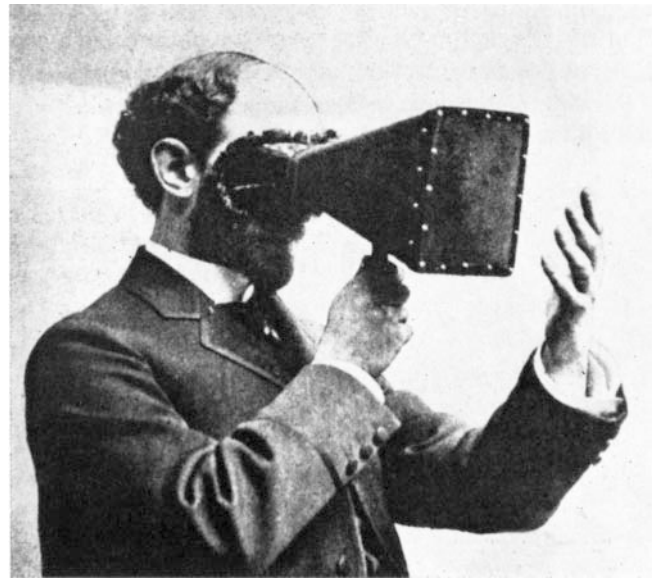
Elektromagnetische Wellen waren erst 9 Jahre vor Röntgens Experiment im Jahr 1886 von Heinrich Hertz (1857–1894) in Karlsruhe nachgewiesen worden (obwohl schon 1864 von James Clerk Maxwell (1831–1879) vorhergesagt). Zwischen zwei nahe beieinanderstehenden Metallkugeln erzeugte Hertz durch Anlegen hoher elektrischer Spannungen hochenergetische Funken sprünge in der Luft, übrigens ebenfalls mithilfe eines Rühmkorff-Funkeninduktors, mit dem auch später Röntgen seine X-Strahlen entdecken sollte. Mit seinem experimentellen Aufbau konnte er nachweisen, dass diese Funken es vermochten, zwischen einem entfernten Paar von Metallkugeln vergleichbare Funken sprünge auszulösen. Daraus zog er den Schluss, dass sich vom ersten Funken freigesetzte Strahlen durch den Raum ausbreiten mussten, die, am Ort des entfernten Kugelpaars angekommen, dort einen entsprechenden Funken sprung auslösten. Den Wellencharakter dieser Strahlen konnte er mit speziellen Experimenten nachweisen, die deren wellentypische Eigenschaften wie Reflexion und Beugung aufdeckten. Daraufhin nannte er diese Strahlen „Funkwellen“ (und läutete damit den „Rundfunk“ ein). Heinrich Hertz hatte übrigens auch mit Kathodenstrahlröhren experimentiert und dabei entdeckt, dass diese eine dünne Metallfolie durchdringen konnten. Sein Schüler Philipp Lenard entwickelte seine Experimente weiter und entwickelte entsprechende Gasentladungsröhren mit seinem „Lenard-Fenster“ [20].

Nach Röntgens Entdeckung suchten viele Physiker nach Effekten von Reflexion, Brechung, Beugung und Polarisation der X-Strahlen, um deren möglichen Wellencharakter nachzuweisen, doch zunächst ebenfalls vergeblich. Das ist im Rückblick auch verständlich, da die Röntgenstrahlen eine sehr kurze Wellenlänge $< 10 \text{ nm}$ besitzen, und sich damit Welleneffekte nur auf atomarer Größenordnung abspielen, was höchst anspruchsvolle Experimente zu deren Nachweis erfordert. Heinrich Hertz konnte der Nachweis des Wellencharakters seiner erzeugten „Funkwellen“ nur deshalb gelingen, weil deren Wellenlänge mit ca. 50 cm um etwa 7 Größenordnungen länger war als die der X-Strahlen. Erst 1912 legte Max von Laue (1879–1960) Beugungsbilder von Kristallen vor und erbrachte damit den Beweis, dass es sich bei den X-Strahlen tatsächlich um elektromagnetische Wellen mit sehr kurzer Wellenlänge handelt. „Ihr Experiment gehört zu dem Schönsten, was die Physik erlebt hat“, schrieb Einstein an ihn. Für seine Entdeckung erhielt Max von Laue neben dem Physik-Nobelpreis im Jahr 1914 viele weitere Ehrungen, darunter 1952 die Röntgen-Plakette

in Remscheid, der Geburtsstadt Röntgens. Zur Anwendungsreife kam die Methode durch die grundlegende Idee von Lawrence Bragg (1890–1971) zur Reflexion von Röntgenstrahlen an Netzebenen („Bragg-Gleichung“) zusammen mit der Spektrometer-Entwicklung seines Vaters William (1862–1942). Die beiden haben damit die Methode zu einem der bedeutsamsten Standardverfahren zur Aufklärung der atomaren Struktur kristalliner Materialien gemacht. Vater und Sohn erhielten dafür 1915 gemeinsam den Nobelpreis für Physik. In der Folge führte die Röntgenbeugung zu teils bahnbrechenden Entdeckungen. So konnte auf Grundlage der Röntgenbeugungsdiagramme der Biochemikerin Rosalind Elsie Franklin (1920–1958) die Doppelhelix-Struktur der DNA von James Watson (*1928) und Francis Crick (1916–2004) 1953 entschlüsselt werden (wegen ihres tragischen frühen Todes ging der Nobelpreis leider an ihr vorbei und allein an Watson und Crick). Ada Yonath (*1939) gelang mit der Methode die Entschlüsselung der molekularen Struktur des Ribosoms, der grundlegend wichtigen Proteinfabrik der Zelle. Auch diese Entdeckung war so bahnbrechend, dass die Forscherin den Nobelpreis dafür erhielt.

Doch gehen wir nochmal einen Schritt in der geschichtlichen Entwicklung der Röntgendetektoren zurück. Von den Fotografien Röntgens beeindruckt begann man sich früh Gedanken darüber zu machen, wie die Empfindlichkeit der fotografischen Filme gegenüber den X-Strahlen verstärkt werden könnte. Auf der Suche nach neuen Geschäftsfeldern suchte auch Thomas Edison, allseits bekannt als „Erfinder“ der Kohlefaden-Lampe (Glühbirne) mit seinem Patent aus dem Jahr 1880, nach Materialien zur empfindlicheren Sichtbarmachung von Röntgenstrahlen. 1896 gelang es ihm nachzuweisen, dass Kalziumwolframat bei Bestrahlung mit X-Strahlen 6-mal heller leuchtete als Bariumplatincyanür. Die daraufhin auch von ihm entwickelten „Fluoroskope“ ermöglichten die eindrucksvolle Betrachtung der Schattenbilder von Knochen mit dem bloßen Auge. Auf Jahrmärkten konnte sich damit ein großes Publikum dieser Spektakel erfreuen, und die Methode fand eine weite Verbreitung [21] (► **Abb. 6**).

Doch Fotografien der Schattenbilder boten der Erforschung und medizinischen Anwendung zweifelsohne große Vorteile. Die dauerhaften Bilder ließen sich dokumentieren, weiterverbreiten und damit kommunizieren. Allerdings betrug die Aufnahmezeit für Röntgenbilder anfänglich bis zu 2 Stunden. Doch bereits im Februar 1896 konnte Michael Pupin (1858–1935) hervorragende Röntgenfotografien selbst mit kurzen Belichtungszeiten von wenigen Sekunden anfertigen, indem er einen Bariumplatincyanür-Fluoreszenzschirm auf die Innenseite der fotografischen Platte legte. Die fotografische Wirkung von Röntgenstrahlen konnte also gesteigert werden durch Ausnutzung des Lumineszenzlichts von Leuchtstoffen, die von den X-Strahlen angeregt im sichtbaren Licht leuchteten und damit die fotografische Platte zusätzlich belichteten. Als phosphoreszierende Leuchtstoffe wurden bereits zur selben Zeit Zinksulfid von Charles Henry (1859–1926) und, wie oben erwähnt, Kalziumwolframat von Thomas Edison identifiziert. Der Ingenieur Max Levy (1869–1932) steigerte die Empfindlichkeit der Röntgenfotografien weiter, indem er eine beidseits beschichtete Fotoplatte zwischen 2 Leuchtschirme brachte. Weiter verbesserte Verstärkerfolien mit z. B. Zinksilikat wurden bis in die 60er-Jahre als Röntgenleuchtstoffe verwendet.



► **Abb. 6** Frühes Fluoroskop nach Edison.
(© Deutsches Röntgen-Museum Remscheid). [rerif]

Bei der Röntgenfotografie werden Silberhalogenide (v. a. Silberbromid, Silberchlorid) auf Platten oder Kunststofffilme aufgetragen. Röntgenstrahlen lösen aus dieser lichtempfindlichen Schicht beim Auftreffen metallisches, schwarzes Silber heraus. Die Röntgenstrahlen übergeben einem Elektron des Halogenids (z. B. Brom, Chlor) Energie und übertragen es damit auf das positiv geladene Silberion, das dadurch zu einem neutralen, metallischen Silberatom reduziert wird. Die darauffolgende „Entwicklung“ und „Fixierung“ mit chemischen Agenzien wandeln das zunächst unsichtbare „Latentbild“ in ein permanentes Bild um, indem der Ort der Silberentstehung vergrößert und deren Umgebung lichtunempfindlich gemacht wird. Die Einführung der Seltener-Erde-Leuchtstoffe im Jahr 1970 steigerte die Röntgenabsorption und Lichtausbeute weiter. Mit dem blau-emittierenden Yttrium-Oxisulfid (Y₂O₂S [Tb]) wurde ein Leuchtstoff gefunden, der gegenüber den herkömmlichen Kalziumwolframat-Folien ein um 2 Linienpaare pro Millimeter (Lp/mm) höheres Auflösungsvermögen besaß bzw. bei gleicher Auflösung einen halb so großen Dosisbedarf erforderte. Neben der höheren räumlichen Auflösung waren auch kürzere Belichtungszeiten möglich, womit bei gleicher Zeichenschärfe der Dosisbedarf um die Hälfte reduziert werden konnte [22]. In der Folge wurden Auflösung, Kontrast und Dosisbedarf von Röntgenfilmen und Durchleuchtungsschirmen immer weiter gesteigert mit neuen Leuchtstoffen und Trägermaterialien, neuen Film-Folien-Kombinationen, verbesserten Röntgenröhren sowie ausgefeilten Belichtungstechniken.

Der Dynamikbereich konventioneller Röntgenfilme ist allerdings gering, was leicht zu Fehlbelichtungen und unnötiger Strahlenbelastungen führt. Der Dynamikbereich konnte mit der Entwicklung von Speicherleuchtstoff-Bildplatten entscheidend erhöht werden. Die Technologie hat zu einer Verbesserung von Auflösung, Kontrast bei gleichzeitig vermindertem Dosisbedarf und erhöhter Robustheit gegenüber Fehlbelichtungen geführt. In

den Speicherleuchtstoff-Bildkassetten befindet sich eine Kunststoffträgerfolie mit darauf aufgetragener, ca. 1–2 mm dünner Leuchtstoffschicht aus dotiertem Bariumfluorid. Röntgenstrahlen verschieben bei ihrer Energieabgabe in der Leuchtstoffschicht dauerhaft Elektronen und prägen ihr damit ein „latentes“ Bild ihre Intensität auf. Das eigentliche und sichtbare Bild wird später durch pixelweise Abtastung mit einem Laser mit 500–700 nm Wellenlänge „ausgelesen“, indem Fotolumineszenz induziert und mittels eines Fotomultipliers gemessen und digital gespeichert wird. Der Auslesevorgang bietet im Vergleich zur chemischen Entwicklung konventioneller Filme den Vorteil, dass er deutlich kürzer und leichter zu bewerkstelligen ist. Zudem kann die Speicherfolie nach Löschung durch Licht noch mehrere tausend Male wiederverwendet werden. Von Vorteil ist auch, dass die Speicherfolien in einer Kassettenbauweise mit den gleichen Maßen konventioneller Röntgenfilme verbaut werden, sodass sie bei konventionellen Röntengeräten ohne Umbau genutzt werden können.

Die Lumineszenz von Leuchtschirmen wird dadurch hervorgerufen, dass Elektronen durch Absorption der Energie einfallender Röntgenstrahlen vorübergehend auf höhere Energieniveaus gehoben werden und beim Zurückfallen in ihren Ruhezustand diese Energie wieder als Licht abgeben. Je nach Material kommt es dabei entweder zu einem nur sehr kurzen Nachleuchten (Fluoreszenz) oder zu einem verzögerten, längeren Nachleuchten (Phosphoreszenz). Die Röntgenuntersuchung mit Durchleuchtungsgeräten wurde in den 1960er-Jahren mit der Entwicklung von Röntgenbildverstärkern und Bildwandlern wesentlich verbessert. Das primär erzeugte Licht des Szintillator-Eingangsschirms trifft dabei auf eine dünne Fotokathode und setzt dort Elektronen frei, die wiederum zu einer Anode hin beschleunigt werden. Dort werden die Elektronen auf einen Szintillator-Ausgangsschirm hin fokussiert und wiederum in Licht umgewandelt, das visuell beobachtet werden kann.

Die weitere Entwicklung von Röntgendetektoren ganz wesentlich beeinflussen sollte ein weiteres, bis dahin allerdings unverständenes Phänomen. 1887 hatte Heinrich Wilhelm Hallwachs (1859–1922), ein Assistent von Heinrich Hertz, bei seinen Funkenexperimenten mit einer Lichtbogenlampe entdeckt, dass Licht (UV-Strahlen) die Metalloberfläche einer Elektrode elektrisch aufladen konnte. Der Effekt wurde zuerst Hallwachs-Effekt und später (äußerer) fotoelektrischer Effekt genannt. Im März 1896 teilte Röntgen mit, dass er ein ähnliches Phänomen bereits zur Zeit seiner ersten Publikation beobachtet hatte, nämlich die Entladung elektrischer Körper durch X-Strahlen. Doch die Erklärung des Phänomens musste im Dunklen bleiben, da, wie bereits erwähnt, zu seiner Zeit weder Elektronen noch der atomare Aufbau der Materie bekannt waren. Zehn Jahre später, im Jahr 1905, erklärte Albert Einstein (1879–1955) den Fotoeffekt damit, dass Licht bzw. elektromagnetische Wellen aus kleinen Teilchen (Partikeln) bestünden, sogenannten „Lichtquanten“, die Elektronen aus der Oberfläche eines Metalls heraus schlagen können. Elektromagnetische Wellen waren bis dahin, wie der Name es sagt, als räumlich ausgedehnte Wellen angesehen worden, ähnlich Wasser- oder Schallwellen. Max Planck hatte sich zwar schon 1900 gezwungen gesehen, elektromagnetische Wellen in Energiequanten zu zerstückeln, um damit die bis dahin unverständenen Phänomene der Strahlungsemission heißer Körper (Hohlraumstrahlung)

erklären zu können, doch er war davon ausgegangen, dass es sich nur um ein theoretisches Konstrukt handelte, das er bald wieder aufgeben könnte, sobald er nur tiefer die wahren Zusammenhänge verstanden hätte. Doch die Entdeckung des fotoelektrischen Effekts und dessen kausale Erklärung durch Albert Einstein festigte diese Vorstellung einer Quantelung der elektromagnetischen Strahlung. Einstein ging damit als Gründer der Quantentheorie der Strahlung in die Geschichte ein und erhielt 1921 den Nobelpreis für Physik für „seine Verdienste um die theoretische Physik, besonders für seine Entdeckung des Gesetzes des fotoelektrischen Effekts“. Das Verständnis des fotoelektrischen Effekts und die gezielte Entwicklung spezieller Materialien, in empfindlich für Röntgenstrahlen, d. h. elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen zwischen 1 pm und 10 nm sind, sind grundlegend für die Entwicklung immer empfindlicherer Detektoren bis hin zum photonenzählenden Detektor.

Ein weiterer wichtiger physikalischer Effekt, der die Detektion von Röntgenstrahlen und die Qualität medizinischer Bilder wesentlich beeinflusst, wurde noch später entdeckt. 1922 entdeckte dann der amerikanische Physiker Arthur Compton (1892–1962) ein ähnliches und zunächst unerklärliches Phänomen bei seinen Streuexperimenten von Röntgenstrahlung an Graphitkristallen. Er entdeckte, dass die Wellenlänge der gestreuten länger war als die der einfallenden Röntgenstrahlen. Dies bedeutet, dass die gestreuten Röntgenstrahlen energieärmer waren als die einfallenden (die Energie elektromagnetischer Strahlen ist umgekehrt proportional zu deren Wellenlänge). Wenn aber die aus dem Graphitkristall emittierten Röntgenstrahlen eine geringere Energie besaßen als die eingestrahlenen, dann mussten sie bei ihrer Streuung Energie verloren bzw. diese an irgendetwas im Kristall abgegeben haben. Compton postulierte daraufhin, ähnlich wie zuvor Albert Einstein, dass Röntgenstrahlung aus teilchenartigen „Röntgenphotonen“ bestünden und der Prozess der Streuung im Kristall mit dem klassischen Stoß zweier Billardkugeln vergleichbar wäre: Das einfallende Teilchen (Röntgenphoton) trifft auf ein ruhendes Teilchen des Kristalls (Elektron) und stößt dieses durch Energieübertragung weg. Der Energiegewinn des Elektrons manifestiert sich in dessen Beschleunigung und der Energieverlust des Röntgenphotons in dessen Wellenlängenverlängerung. Und tatsächlich gelang es wenig später Charles Wilson (1869–1959) mithilfe einer von ihm entwickelten Nebelkammer die von Röntgenstrahlen weggestoßenen Elektronen nachzuweisen. Jetzt war auch die Quantennatur der Röntgenstrahlung belegt und beide erhielten 1927 den Nobelpreis für Physik für diese Entdeckung.

Doch trotz aller medizinischen Erfolge sah man sich aus ärztlicher Perspektive einer scheinbar unüberwindbaren Limitation gegenüber: die Röntgenfotografie ist ein reines Projektionsverfahren, d. h. auf dem Weg des Röntgenstrahls durch den Körper summieren sich die Schatten aller im Strahlengang befindlichen anatomischen Strukturen zu einem einzigen Überlagerungsbild. Zur Überwindung dieser Limitation entwickelte Alessandro Vallebona (1899–1987) im Jahr 1930 ein Verfahren zur Aufnahme von Schnittbildern, sogenannten Tomogrammen. Bei dem einstweilen als „klassische Röntgentomografie“ bezeichneten Verfahren werden Röntgenröhre und Film während der Aufnahme gegeneinander verschoben, womit ein scharfes Bild nur von den in einer bestimmten Tiefe gelegenen Strukturen entsteht. Alle darüber und

darunter gelegenen Strukturen werden verschmiert abgebildet und tragen im Bild lediglich in Form eines strukturlosen Schleiers bei. Damit ließen sich erstmals Schichtbilder aus dem Körperinneren gewinnen, d. h. es konnten Strukturen in der Tiefe des Körpers überlagerungsfrei dargestellt werden.

In den 1970er-Jahren kam es dann zu einem bahnbrechenden Erfolg. Der bei EMI angestellte britische Elektroingenieur Godfrey Newbold Hounsfield hatte ein neues Verfahren der Bildgebung mit Röntgenstrahlen unter Zuhilfenahme der theoretischen Vorarbeiten des amerikanischen Physikers Allan Cormack (1924–1998) aus den Jahren 1963/64 entwickelt. Cormack war ein Krankenhausphysiker am Groote-Schuur-Krankenhaus in Kapstadt, der an einer Methode zur Verbesserung der Strahlentherapieplanung arbeitete. Hierfür führte er quantitative Transmissionsmessungen in schmalen Querschnittsvolumina durch, um Absorptionskoeffizienten quantitativ zu messen [23]. Hounsfield hatte seine wichtigsten Ideen über einen Scanner in den Jahren 1967/68, aber erst 1972 wurde sein Durchbruch veröffentlicht. Er begann auch mit Transmissionsmessungen, wofür er Radioisotope als Strahlenquellen nutzte. Er führte eine Vielzahl von solchen Messungen aus verschiedenen Raumrichtungen aus vollen 180 Grad durch und errechnete aus der Gesamtheit der Messwerte mithilfe eines Computers überlagerungsfreie Schnittbilder bzw. Tomogramme. Anfangs dauerte es 9 Tage, um die Daten zu erfassen (etwa 28 000 Messungen) und 2,5 Stunden Rechenzeit, um das Bild zu rekonstruieren. Seine Methode wurde folgerichtig „Computertomografie“ getauft. Ganz im Vordergrund der Namensgebung stand damit der Computer, mit dem sich unter Zuhilfenahme bestimmter Rechenalgorithmen aus den Daten der verschiedenen Raumrichtungen Tomogramme berechnen bzw. rekonstruieren ließen. Das ist auch deshalb verständlich, da sich die faszinierende Entwicklung der Computer damals noch in Aufbruchstimmung befand. Erst kurz zuvor, im Jahr 1965, hatte die Firma Olivetti den weltweit ersten frei programmierbaren Tischcomputer der Welt auf den Markt gebracht, den „Programma 101“ [24]. Hounsfield war bereits 1958 an der Entwicklung des ersten in Großbritannien gebauten Volltransistor-Computers, dem EMIDEC 1100, beteiligt. Seine besonderen Interessen und Fähigkeiten in der Informatik waren eine wichtige Grundlage für die Entwicklung des CT. Die erste Anwendung der neuen Computertechnologie für die Medizin war zweifelsohne bahnbrechend.

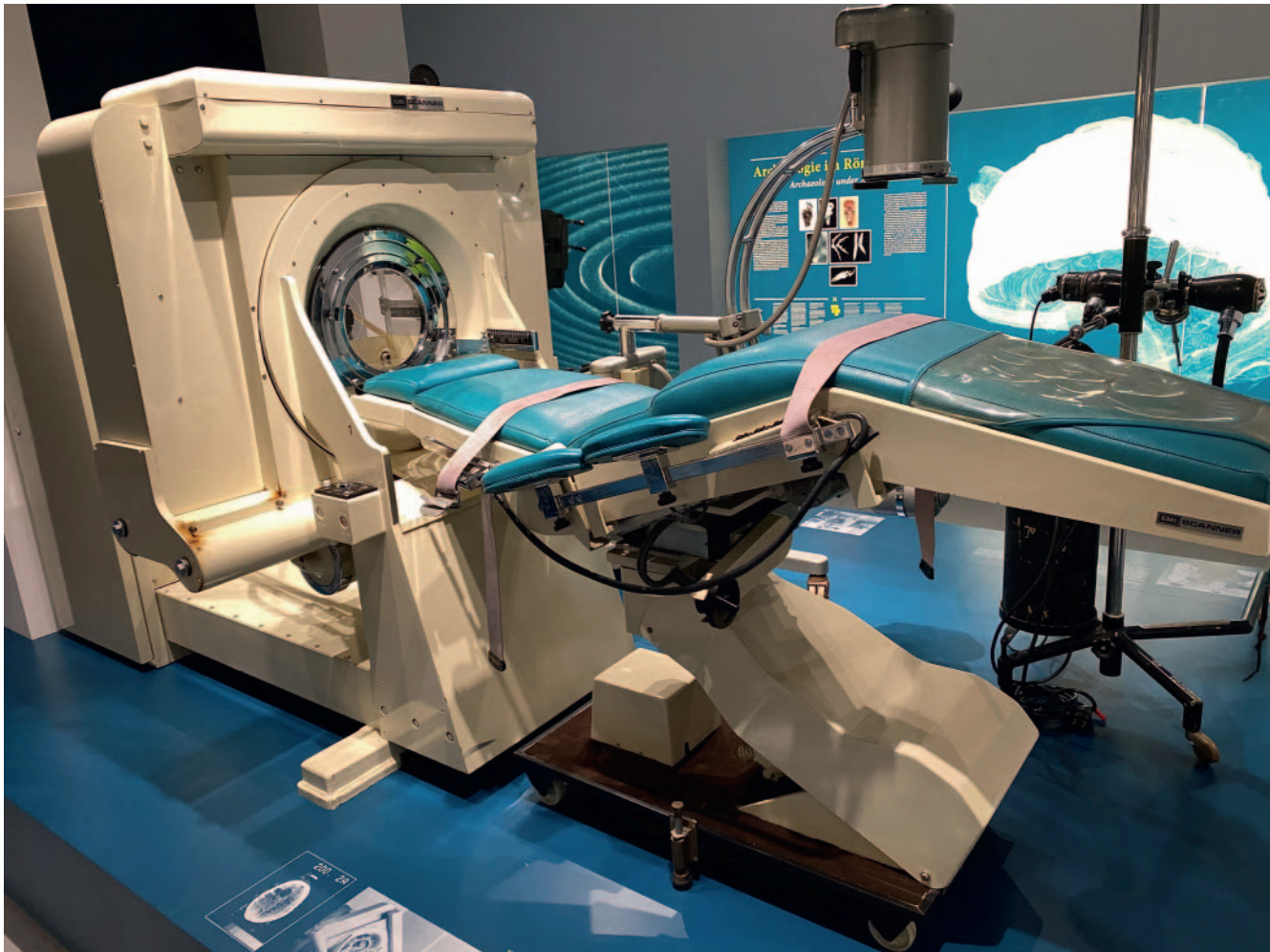
Mit der Namensgebung wurde allerdings die andere, aber ganz entscheidende Innovation des neuen Verfahrens in den Schatten gestellt: Die Sichtbarmachung der Röntgenstrahlen erfolgte nicht mehr visuell durch Schwärzung eines Röntgenfilms, sondern rein elektronisch durch Umwandlung der Röntgenstrahlung in Elektrizität, die quantitativ registriert den digitalen numerischen Input für den Computer lieferte. Mittels elektrisch arbeitender Detektoren wurde damit die Absorption der Röntgenstrahlen nicht mehr nur qualitativ abgebildet, sondern darüber hinaus quantitativ gemessen. Die Entwicklung der CT markierte damit auch den Übergang von der filmbasierten analogen zur detektorbasierten digitalen „Röntgenfotografie“. Im ersten EMI-Brain-Scanner (EMI Mark 1) waren der Röntgenröhre gegenüber 2 nebeneinander angeordnete Detektoren bzw. Pixel mit 5x13 mm montiert, um 2 Schichten gleichzeitig aufzuzeichnen, d. h. 1 Pixel pro Schicht (damit handelte es sich zugleich um das erste Mehr-

schicht-CT) (► **Abb. 7**). Das Detektormaterial bestand aus einem Natriumiodid-Szintillationskristall, in dem die einfallende Röntgenstrahlung durch Absorption sichtbares Licht erzeugte, das wiederum in einem nachgeschalteten Fotomultiplier in einen elektrischen Strom umgewandelt, registriert und digital transformiert wurde. Die Messzeiten lagen anfangs bei etwa 9 Tagen, die er dann mit Einsatz leistungsstarker Röntgenröhren auf 9 Stunden verkürzen konnte. Die erste CT-Aufnahme eines Menschen vom 1. Oktober 1971 markiert damit einen Meilenstein der medizinischen Bildgebung mit Röntgenstrahlen mit bahnbrechendem Einfluss auf die medizinische Diagnostik. Das erste klinisch eingesetzte CT-System wurde 1971 im Atkinson Morley's Hospital in London installiert. Damit konnten mit ca. 5 Minuten Messzeit pro Schicht überlagerungsfreie Schnittbildaufnahmen des Gehirns einer Frau mit einer eingebluteten Raumforderung aufgenommen werden [25, 26]. Die Vorstellung der Technologie führte zu gewaltiger Begeisterung in der medizinischen Fachwelt. Hounsfield und Cormack erhielten für diese Erfindung 1979 gemeinsam den Nobelpreis für Medizin.

Für die CT-Technologie wurde anfänglich der Festkörperszintillator NaI eingesetzt. Bald aber wurde eine zunehmende Anzahl von Detektoren benötigt, um bessere und Artefakt-freie Bilder zu erzeugen sowie die Röntgenröhre zu entlasten. Anfänglich wurden auch Gasdetektoren eingesetzt, die bei ausreichender Größe und ausreichendem Gasdruck (bis ca. 20 bar) eine hohe Empfindlichkeit und Stabilität aufwiesen. Hierbei handelte es sich um mit dem Edelgas Xenon gefüllte Ionisationskammern, in denen eindringende Röntgenstrahlen die Edelgasatome ionisierten und deren freigesetzte Elektronen als Strom registriert werden konnten [27]. Diese Technologie wurde aber Anfang der 1980er-Jahre wieder verlassen, da sich mit verbesserten Festkörperdetektoren und Fotomultipliern eine höhere Empfindlichkeit und Auflösung erzielen ließen.

Als die analoge Schwärzung von Röntgenfilmen durch die digitale Messung von Strömen ersetzt wurde, war die Tür zur neuen Welt der digitalen Röntgenbildgebung aufgestoßen. Damit waren Radiologen auch Pioniere der Digitalisierung der Medizin, und das bereits 50 Jahre bevor die gegenwärtige rasante Entwicklung eingesetzt hat. Das erste Patent für eine konventionelle digitale Röntgenbildgebung wurde 1973 von Eastman Kodak angemeldet. Das digitale „Picture Archiving and Communicating System“ (PACS) wurde in den 1970er-Jahren entwickelt, und Röntgenbilder konnten damit raumsparend archiviert und effektiv verwaltet werden. Sukzessive wurden die großen Bildarchive mit ihren Unmengen an teils prall gefüllten Bildtüten geleert (und durch große klimatisierte Räume mit Unmengen von Computer-Racks ersetzt). Die schier unbegrenzten Möglichkeiten der digitalen Bildvisualisierung und Bildnachverarbeitung wurden der Radiologie zugänglich, wie z. B. zur Berechnung quantitativer Bildparameter aus einzelnen Bildern oder Bildstapeln bis hin zu heutzutage modernster „Big Data“ Radiomics-Analysen und Anwendungen von künstlicher Intelligenz (KI). Und ganz selbstverständlich ist heutzutage die globale Kommunikation von Bildern mittels Teleradiologie, mit der selbst umfangreiche Datenmengen über große Distanzen in kürzester Zeit übertragen werden.

Und wieder war die Entwicklung der medizinischen Bildgebung mit Röntgenstrahlen eng verbunden mit der Entwicklung der



► **Abb. 7** EMI Mark I. Der erste klinisch einsetzbare und kommerziell erhältliche Computertomograf wurde 1971 im Atkinson Morley's Hospital in London installiert. (© Deutsches Röntgen-Museum Remscheid). [rerif]

Fotografie. Denn auch die gewohnten „Filmkameras“ wurden innerhalb kürzester Zeit völlig von „digitalen“ Kameras abgelöst. Diese neue Art der Fotografie hat den großen Vorteil, dass unmittelbar sichtbare Bilder entstehen, ohne dass zuvor ein langwieriger chemischer Entwicklungsprozess vonnöten wäre. Die Bilder können höchst effizient digital gespeichert, verwaltet und versendet werden. Außerdem steht die ganze Fülle der Möglichkeiten der digitalen Bildnachverarbeitung zur Verfügung, neuerdings auch KI-basiert, wie z. B. Gesichtserkennung. Digitale Fotografie und digitale Röntgenbildgebung beruhen auf dem Einsatz flacher Detektoren, in denen die einfallende elektromagnetische Strahlung Elektronen freisetzt, die in einem elektrischen Feld abfließen und anschließend registriert werden. Aus physikalisch-technischen Gründen werden für die digitale Fotografie CCD-Detektoren (Charged Couple Device) verwendet und für die digitale Röntgenbildgebung vorrangig sogenannte CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) oder aSi-TFT (amorphous Silicon-Thin Film Transistor) -Detektoren. Interessant ist dabei, dass der Übergang von der analogen zur digitalen Röntgenbildgebung in der radiologischen Praxis früher stattgefunden hat als der der Fotografie. Auch wenn die Entwicklung der digitalen Fotografie

in etwa zeitgleich stattfand, so wurde doch erst 1991 die erste Digitalkamera mit CCD-Sensoren auf der CeBIT vorgestellt (Model 1 der Firma Dycan WIKI Digitalfotografie). Einstweilen sind selbst flache Mobiltelefone mit hochauflösenden Kameras ausgestattet, deren Detektoren oder „Sensoren“ auf einer Fläche von nur etwa 25–50 mm² bis zu 100 Millionen etwa 1 µm große Pixel (100 Megapixel) enthalten.

Was die Kamerasensoren für die digitale Fotografie, das sind die Flachbilddetektoren für die digitale Röntgenbildgebung. Digitale Röntgenstrahlendetektoren für medizinische Anwendungen funktionieren nach einem ähnlichen Prinzip, müssen allerdings aufgrund der höheren Energie der Röntgenstrahlen andere Materialien verwenden. Die etwa 45 cm großen Flachbilddetektoren der konventionellen Röntgenbildgebung enthalten etwa zwischen 2000 × 2000 und 3000 × 3000 Pixel von jeweils ca. 140–200 µm Größe. Die digitale Datenakquisition ermöglicht es zudem, sequenzielle Bildserien mit um den Patienten rotierenden Flachbilddetektoren aufzunehmen und daraus mittels Bildrekonstruktionsverfahren der Computertomografie Schnittbilder zu berechnen. Das Verfahren wurde „Cone-Beam-CT“ getauft, auch wenn die den Flachbilddetektor beleuchtenden Strahlenfächer konkret

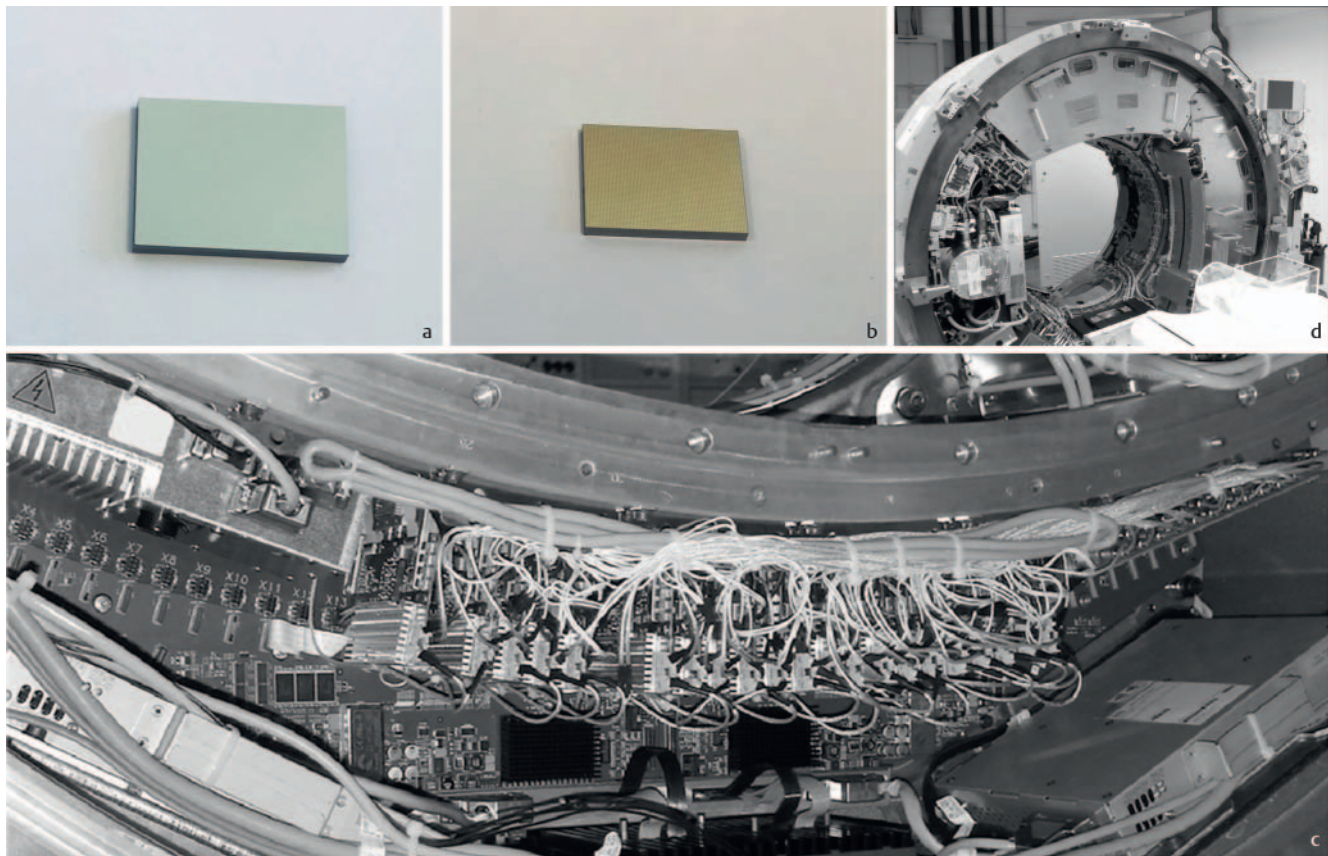
eher eine Pyramidenform besitzen (die Zeilen des Computertomografen werden von einem strichförmig eingeblendeten Strahl getroffen). Die Cone-Beam-CT hat heute in der interventionellen Radiologie und der Strahlentherapie bedeutende klinische Anwendungen. Einen sehr guten Einblick in die Entwicklung der digitalen Radiografie findet sich bei [28].

Klinische CT-Systeme verwenden sogenannte indirekte Detektoren [29, 30]. Diese Detektoren werden auch als energieintegrierende Detektoren (Energy Integrating Detectors, EID) oder ladungsintegrierende Detektoren (Charge Integrating Pixel Array) bezeichnet. Hierbei besteht jedes Pixelelement aus einer flachen Schichtung von Szintillator-Material (im CT meistens Gadoliniumoxysulfid, Gd_2O_2S), Fotodiode und je nach Bauweise auch integrierter Elektronik. Die einfallenden Röntgenstrahlen erzeugen im Szintillator-Material sichtbares Licht, das in der darunterliegenden Fotodiode Elektronen aktiviert, die wiederum von der darunterliegenden Elektronik als Strom registriert werden. Grund für die Namensgebung „energieintegrierend“ ist, dass die von den Röntgenphotonen in den Fotodioden induzierten Ströme eine relativ lange Halbwertsbreite aufweisen. Der von einem Röntgenphoton erzeugte Elektronenschauer induziert in der Elektronik nämlich kein instantanes, sondern ein zeitlich ausgedehntes, sich glockenförmig entwickelndes Stromstärke-signal. Die Zeitspanne auf halber Höhe von dessen Maximum wird als Halbwertsbreite bezeichnet. Lange Halbwertsbreiten bedeuten demnach zeitlich längere Signalverläufe, was unweigerlich zur Folge hat, dass sich die Signale kurz nacheinander eintreffender Röntgenphotonen überlappen und damit im Detektor aufsummieren. Das gemessene Detektorsignal repräsentiert damit nicht die Energie einzelner, sondern die integrierte Energie mehrerer, kurz nacheinander eintreffender Röntgenphotonen. Aber EID sind nichtsdestotrotz extrem leistungsfähig und werden derzeit in allen klinischen Spiral-CT-Systemen verwendet. Mit EID kann ein Low-Dose-CT der Lunge einstweilen mit nur ca. 0,1–0,2 mSv angefertigt werden, was in der Größenordnung der Dosis einer konventionellen Röntgen-Thorax-Aufnahme in 2 Ebenen liegt. Eine 3D-Untersuchung des gesamten Herzens lässt sich mit einer Dosis von weniger als 0,5 mSv durchführen. Auch sind klinische CT-Systeme mit höherer Auflösung von bis zu 0,15 mm kommerziell verfügbar (Canon/Toshiba Medical Systems). Prinzipiell lassen sich mit EID noch höhere Auflösungen erzielen, und Kleintier-CTs mit EID erreichen eine Auflösung bis in den μm Bereich. EID sind aber indirekte Detektoren, und Empfindlichkeit, Bildauflösung und Bildschärfe werden durch die Streuung des von den Röntgenphotonen erzeugten Szintillator-Lichts limitiert. Die Unschärfe kann zwar mit einer dünneren Szintillator-Schicht verringert werden, doch weniger Szintillator-Material bedeutet auch weniger Szintillator-Licht, was wiederum die Empfindlichkeit der Detektoren verringert und folglich den Dosisbedarf erhöht. Mit KI-basierten Bildrekonstruktionsmethoden kann das höhere Bildrauschen teilweise kontrolliert werden, womit sich für die Diagnostik wertvolle höhere räumliche Auflösungen erzielen lassen, insbesondere bei Hochkontrastobjekten, wie z. B. der Lunge, dem Knochen oder kontrastmittelgefüllten Gefäßen. Grenzen setzt allerdings das Maximum des Strahlenschutzes, das ALARA-Prinzip („As Low As Reasonably Achievable“), das der medizinischen Anwendung ionisierender Strahlung immer eine kritische Abwägung von verabreich-

ter Strahlendosis und tatsächlichem medizinischem Nutzen abverlangt.

Mit EID erfolgte in den 1980er-Jahren auch ein erster Schritt hin zum „Farbsehen“, d. h. zur impliziten Erfassung unterschiedlicher Röntgenenergien zur Differenzierung unterschiedlicher Materialien, z. B. verschiedener Nierensteine, oder der Trennung von Knochen und jodhaltigem Kontrastmittel. Von den Geräteherstellern wurden hierfür unterschiedliche Techniken entwickelt, um selbst mit den nicht energieselektiven energieintegrierenden Detektoren dennoch das energieabhängige Absorptionsverhalten erfassen zu können. Dies wurde zumindest bei 2 unterschiedlichen Energien realisiert, man spricht dann von „Dual-Energy-CT“ [31]:

- Bereits in den 1980er-Jahren wurde von Siemens das schnelle Umschalten der Röntgenspannung implementiert, sodass während eines Umlaufs des CT-Systems die Spannung mehrere hundert Male von einem niedrigen auf einen hohen Spannungswert wechselte, d. h. im Millisekundentakt. Aufgrund der damals noch recht geringen Röhrenleistung setzte sich das Konzept jedoch nicht durch. Vor etwa 10 Jahren realisierte General Electrics dieses Verfahren mit rascher Wechselschaltung zwischen einer hohen (140 kV) und einer tiefen (80 kV) Röhrenspannung für klinische CT-Systeme („Rapid kV Switching“).
- Vor etwa 15 Jahren wurde von Siemens eine 2-Spektren-CT mit einem „Dual-Source Dual-Energy“-System verwirklicht. Die Datenakquisition erfolgt simultan mit 2 in einem Winkel von 90° versetzt angeordneten Röntgenröhren („Dual-Source“), die mit 2 unterschiedlichen Röhrenspannungen („Dual-Energy“) betrieben werden, einer hohen (z. B. 140 kV) und einer niedrigen (z. B. 80 kV). Die 2-Röhren-Technologie wurde primär entwickelt, um die Zeitauflösung für Kardio-CT-Aufnahmen auf ein Viertel der Rotationszeit der Gantry zu reduzieren; die simultane Betreibung beider Röntgenröhren bei unterschiedlichen Spannungen ermöglicht aber zudem die Akquisition energieselektiver Datensätze.
- Die dritte Entwicklung einer 2-Spektren-CT wurde von Philips realisiert und besteht aus einer Röntgenröhre und einem 2-schichtigen, sogenannten Sandwichdetektor („Dual Layer Scintillating Detector“), bei dem jeder Pixel aus je 2 übereinander montierten energieintegrierenden Detektorpixeln zusammengesetzt ist. Hierbei bestimmt nicht die Röhrenspannung, sondern die Detektorabsorption die Energieselektivität: Der obere Detektorpixel absorbiert vorrangig niederenergetische Photonen und ist dementsprechend für den niederen Energiebereich empfindlich, wohingegen der darunterliegende Detektorpixel vorrangig höherenergetische Photonen absorbiert und für den höheren Energiebereich empfindlich ist.
- Eine weitere, kostengünstigere Realisierung der 2-Spektren-CT stellt die Split-Filter-Technologie dar, bei der sich röhrenseitig 2 unterschiedliche Vorfilter befinden, die den Röntgenstrahl in einen niedrigen und einen hohen Energieanteil auftrennen („TwinBeam“, Siemens Healthineers). Das Filtersystem ist dabei so beschaffen, dass der erste Vorfilter die erste Hälfte der Detektorzeilen vorfiltert und der zweite Vorfilter die zweite Hälfte, womit die erste Hälfte der Zeilen ein niederenergeti-



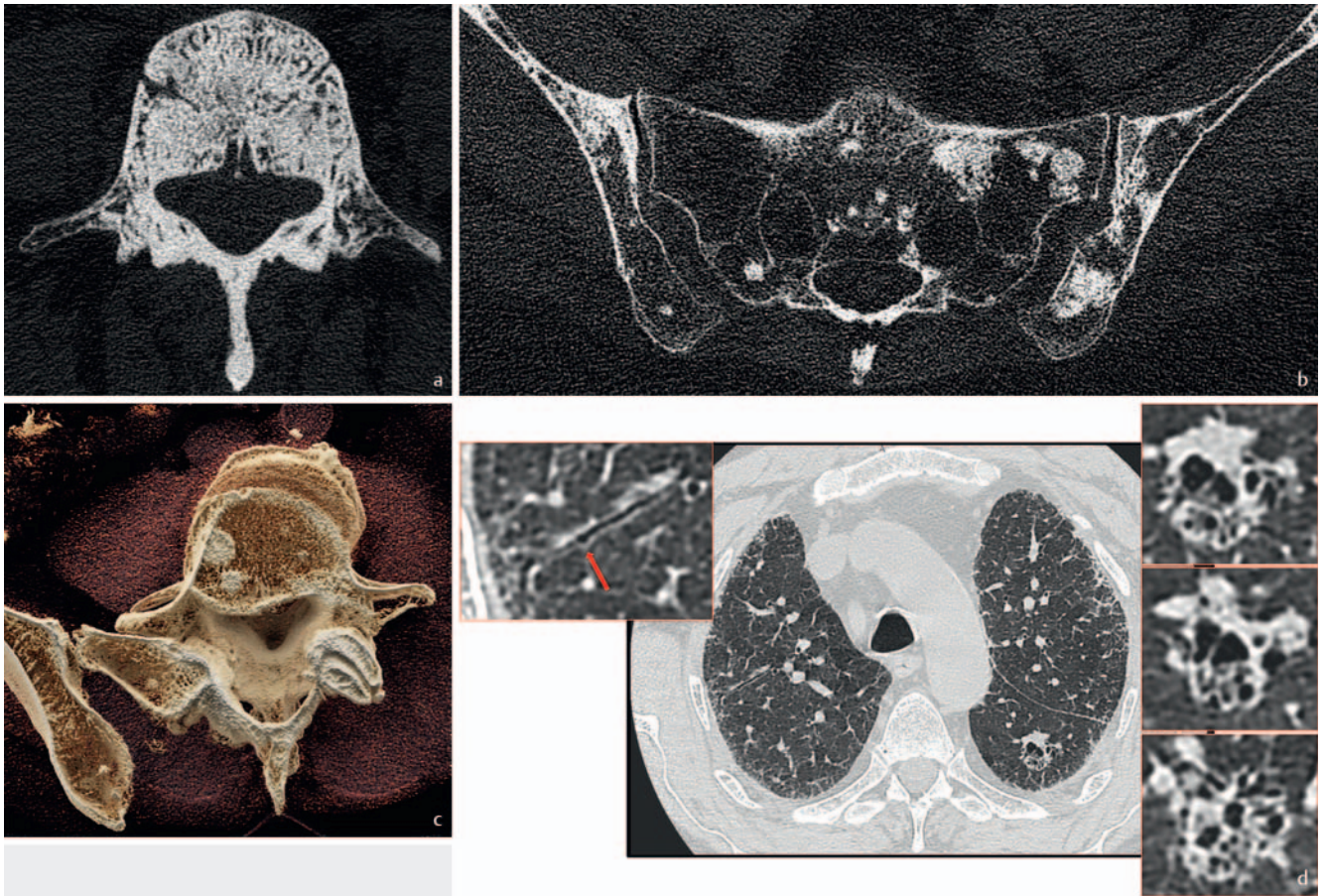
► **Abb. 8** Komponenten eines Photon-Counting Detektors (courtesy of Kurt Stadlhanner und Thomas Flohr, Siemens Healthineers). **a**, **b** 18×15 mm großer CdTe-Sensor mit **a** blanker Oberseite, auf der die Röntgenstrahlen auftreffen, und **b** 64×64 pixellierter Unterseite. Die einzelnen der insgesamt 4096 Detektorelemente registrieren die im GdTe entstandenen Elektronenkaskaden, deren Weg durch ein starkes elektrisches Feld zwischen Kathode auf der Oberseite und den pixellierten Anoden auf der Unterseite definiert wird. **c** Sensorboard mit Elektronik mit 2×30 Sensoren, entsprechend $128 \times 1920 = 245\,760$ Subpixeln (die Retina des Auges besitzt ca. 120 Millionen „Pixel“, d. h. etwa 500-mal so viele). Das Messfeld des Detektors beträgt 22 cm im Isozentrum. **d** Detektorarrays in der Gantry eines prototypischen Dual-Source-CT-Scanners. Das Detektorarray oben im Bild ist ein Photon-Counting-Kadmiumtellurid (CdTe) -Detektor (siehe **a**, **b**), das Detektorarray rechts im Bild ist ein konventioneller energieintegrierender Gadoliniumoxysulfid ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$)-Detektor.

sches und die zweite Hälfte ein höherenergetisches Röntgenspektrum aufnimmt.

- Die Technologie von Toshiba/Canon Medical Systems verzichtet auf spezielle Hardware des CT-Systems. Ein großvolumiger Untersuchungsbereich wird kurz nacheinander 2-mal mittels aufeinanderfolgender Rotationen bei unterschiedlicher Röhrenspannung (135 kV und 80 kV) untersucht. Die kurze Zeitdifferenz der Scans entspricht der Dauer einer Gantry-Rotation, was mögliche Artefakte durch Patientenbewegung und unterschiedliche Kontrastmittelverteilungen limitiert.

Die Weiterentwicklung der Röntgendetektoren gipfelte letztlich in den photonenzählenden Röntgendetektoren (Photon Counting Detectors, PCD), die – wie der Name es sagt – einzelne Röntgenphotonen getrennt registrieren und darüber hinaus noch deren jeweilige Energie bestimmten Teilbereichen zuordnen können. Die Technologie kam aus der großexperimentellen Forschung der Teilchenphysik der 1980er-Jahre, die zur Steigerung

der räumlichen Auflösung und Energieauflösung von Strahlen immer größere Detektoren mit kleineren Pixeln, empfindlicheren Detektormaterialien und gesteigerter Integrationsdichte der Mikroelektronik benötigte. PCD-Pixel besitzen einen 2-schichtigen Aufbau mit einem dem Röntgenstrahl zugewandten Detektormaterial (im CT meist Cadmium-(Zink)-Tellurid), in dem die einfallenden Röntgenphotonen ionisieren, d. h. Elektronen freisetzen, sowie der angrenzenden Mikroelektronik, die diese Elektronen registriert. Jedes einzelne Röntgenphoton erzeugt dabei eine seiner Energie proportional große Elektronenwolke, die entlang eines Hochspannungsfeldes zur Anode hingelenkt und dort als ein Ereignis mit einer bestimmten Ladungsmenge registriert wird. Die quantitative Messung der Ladungsmengen und damit der Energie der jeweiligen Röntgenphotonen erfolgt stufenweise anhand mehrerer Energieschwellen, sogenannter „Energie-Bins“ (eine kontinuierliche Messung würde die Zeitauflösung stören). Mit PCD können demnach Röntgenphotonen gezählt und deren Energie in Relation zu vordefinierten Schwellwerten bestimmt werden. Gegenüber den EID besitzen die PCD mehrere Vorteile:



► **Abb. 9** Photon-Counting-CT (DKFZ [38, 39], Prototyp CT System „SOMATOM Count“, Siemens Healthineers, Forchheim), 120 kV, 300 mAs, CTDI_{vol} 24 mGy, **a–c** Darstellung des Knochens mit UHR U70F, $0,27 \times 0,27 \times 0,25 \text{ mm}^3$. **a** Osteoblastische Metastase eines Patienten mit Prostatakarzinom; **b** Osteolysen und endostales Scalloping eines Patienten mit Myelom. Im rechten Os ileum ist zudem der Stanzkanal der diagnostischen Knochenmarkstanze zu erkennen; **c** osteoblastische Metastasen einer Patientin mit Mammakarzinom, Cinematic Rendering (Syngo.via[®], Siemens) aus UHR U70F, $0,27 \times 0,27 \times 3,0 \text{ mm}^3$; **d** Patient mit pulmonaler Fibrose und fraglicher Lungenmetastase eines Sigmakarzinoms, UHR I70F, $0,27 \times 0,27 \times 1,0 \text{ mm}^3$. Die hochauflösende Darstellung zeigt in der rechten Lunge subtile Wandveränderungen einer Traktionsbronchiektase als Ausdruck fibrotischer Vorgänge (Vergrößerung links). In der linken Lunge zeigen sich umschriebene zystisch-tubuläre Architekturstörungen ohne soliden Anteil, die gegen das Vorliegen einer Lungenmetastase sprechen (Vergrößerungen rechts), was bei der Verlaufskontrolle durch deren Größengredienz bestätigt wurde.

1. PCD erzielen eine höhere Energieausbeute als EID. Die von den Röntgenstrahlen freigesetzten Elektronen werden ohne Umwege direkt von der Anode registriert, wohingegen das in den EID induzierte Szintillator-Licht noch vor der Registrierung durch die Fotodiode durch Streuung teilweise verloren geht.
2. PCD besitzen kein elektronisches Rauschen, da die niedrigste Messschwelle zur Registrierung über die Signalstärke des elektronischen Rauschens gelegt wird. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) der PCD ist damit höher als das der EID.
3. Mit höherer Energieausbeute und besserem SNR besitzen PCD eine verbesserte Dosiseffizienz, womit Dosis eingespart werden kann.
4. Mit PCD lässt sich eine höhere räumliche Auflösung erzielen. Die Pixelfläche der PCD muss sogar im Vergleich zu den EID kleiner sein, um einzelne Röntgenphotonen getrennt registrieren zu können (die Kantenlänge beträgt ca. $225 \mu\text{m}$). Auf größere Pixelflächen würden bei den üblichen Flussraten klinischer CT-Systeme zu viele Röntgenphotonen pro Zeit auftref-

fen. Zu kurz nacheinander eintreffende Signale wären dann nicht mehr separierbar und würden sich aufsummieren (sogenanntes „Pile-up“). Die hohe Dosiseffizienz der PCD ermöglicht es aber, selbst die kleineren Pixel für die Bildgebung zu nutzen („Small Pixel Effectiveness“) [32, 33].

5. PCD liefern eine spektrale Auflösung. Die Information kann für unterschiedliche Zwecke genutzt werden, um z. B. Strahlauflösungsartefakte zu reduzieren [34], den Weichteilkontrast im niedrigen kV-Bereich zu erhöhen und den Kontrast nach Applikation jodhaltiger Kontrastmittel zu steigern. Die Messung im Energiebereich der K-Kante verschiedener Atome ermöglicht den Einsatz und die spezifische Separierung neuer Kontrastmittel, wie z. B. auf Basis von Wismut (Bi) oder Gold (Au) [35, 36].

Der CT-Detektor, die „Netzhaut“ des CT, setzt sich aus ca. einer viertel Million Pixeln mit jeweils ca. $0,05 \text{ mm}^2$ Fläche zusammen, die jeweils aus hochempfindlichem Detektormaterial und schneller Elektronik bestehenden (128×1920 Pixel à $2256 \mu\text{m}$ Kantenlänge)

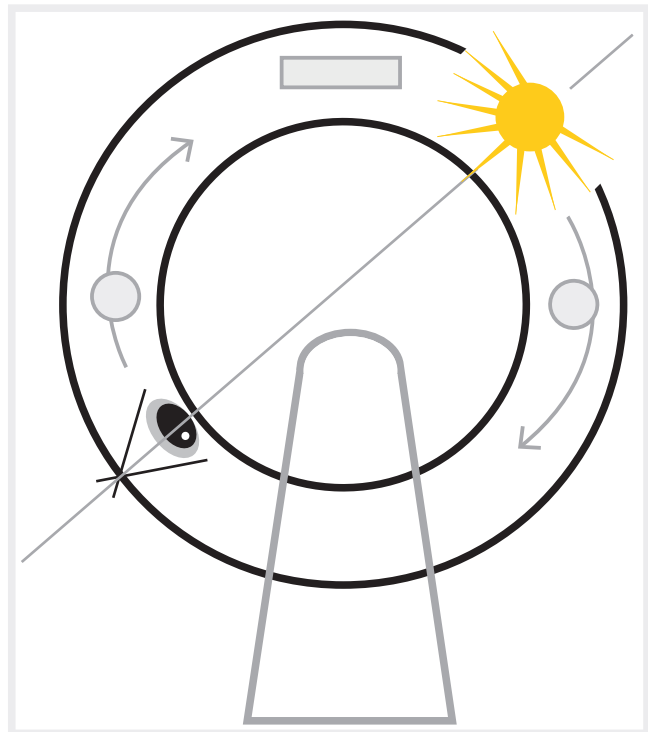
(► **Abb. 8a–d**). Die Leistungsfähigkeit der Technologie wird deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass auf einen Quadratmillimeter des Detektormaterials pro Sekunde etwa 1 Milliarde Röntgenphotonen auftreffen, oder entsprechend ca. 50 Millionen auf einen Pixel. Die zeitliche Auflösung zur Registrierung einzelner Röntgenquanten liegt damit in der Größenordnung von 50 Nanosekunden (50×10^{-9} s). Die Trennung einzelner Photonen kann aber nur dann gelingen, wenn das von einem Photon im Detektor ausgelöste Signal so schnell wieder abgeklungen ist, dass es nicht zu einem Pile-up mit den nachfolgenden Signalen kommt. Dies gelingt durch den Einsatz hochempfindlicher Halbleiter mit extrem kurzer Totzeit. Zusätzlich notwendig ist eine schnelle Elektronik, die den raschen Abtransport der erzeugten Ladungen und damit auch deren getrennte Registrierung ermöglicht. Erforderlich sind eine hohe Geschwindigkeit der Datenauslese von ca. 4–8 kHz und eine entsprechend hohe Datenübertragungsrate vom Detektor auf den Computer, d. h. sehr schnelle Datenakquisitionssysteme (DAS). Der Datenfluss kann bis etwa das 45 000-Fache eines Fernsehers betragen. Dahingestellt seien die hohen Leistungsanforderungen an die nachgeschaltete Computertechnologie, die aus den umfangreichen Datenmengen die für uns wahrnehmbaren Bilder in Echtzeit rekonstruieren soll.

PCD wurden bislang vor allem wegen hoher Kosten und anspruchsvoller Elektronik nicht für klinische CT-Scanner eingesetzt. Doch die oben beschriebenen Vorteile lassen klinische Anwendungen erwarten:

- Die höhere Dosiseffizienz ermöglicht die Einsparung von Dosis und eröffnet damit ein breites klinisches Anwendungsfeld, u. a. ganz allgemein bei Kindern und adipösen Patienten oder bei speziellen Anwendungen, wie z. B. der Kardio-CT, bei sequenziellen onkologischen Ganzkörper-CTs oder beim Lungenkrebs-Screening.
- Die spektrale Auflösung kann für unterschiedliche Zwecke genutzt werden, um z. B. Hochkontrastartefakte zu reduzieren, den Weichteilkontrast zu verbessern und den Kontrast nach Gabe jodhaltiger Kontrastmittel zu verstärken. Auch eine Reduzierung der erforderlichen Kontrastmittelmenge wäre damit möglich.
- Die höhere räumliche Auflösung ermöglicht eine detailliertere visuelle Beurteilung morphologischer Veränderungen, z. B. von der Lunge, des Knochens oder von Gefäßen.
- Bei niedrigen Energien ist der Weichteilkontrast erhöht, was für eine verbesserte Gewebedifferenzierung von Vorteil sein kann.
- Der höhere Informationsgehalt lässt generell eine Verbesserung der computerunterstützten Form- und Texturanalysen erwarten (Radiomics, Deep Learning/KI).

Erste klinische Untersuchungen an Experimentalsystemen demonstrierten vielversprechende Ergebnisse. (► **Abb. 9a–d**) [37–43].

Die Erfolgsgeschichte der Bildgebung mit Röntgenstrahlen ist Folge der wechselseitigen Bereicherung von Physik, Medizin, Mathematik, Informatik Ingenieurskunst und unternehmerischem Geschick. Die fortlaufende Erforschung und Entwicklung präziser Methoden zur Detektion von Röntgenstrahlen hat mit der visuellen Betrachtung leuchtender Fluoreszenzschirme und Fotoplatten begonnen und in wenig mehr als 100 Jahren zur computerunterstützten quantitativen Analyse einzeln registrierter Röntgenphotonen



► **Abb. 10** „Das Auge des Computertomografen“.

geführt. Der Detektorarray des Computertomografen ist wie die Netzhaut des Auges (► **Abb. 10**). Der immer weiter verfeinerte nichtinvasive Einblick in den Körper ist bahnbrechend für die Entwicklung der Medizin. Aber was uns heutzutage selbstverständlich erscheint, wäre Ende des 19. Jahrhunderts noch als Spinnerei abgetan worden.

„Methodik ist alles“ (Otto Warburg, 1923) [44].

Interessenkonflikt

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Danksagung

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts sowie für die freundliche Überlassung der Abbildungen aus dem Archiv des Deutschen Röntgenmuseums danke ich ganz herzlich Dr. Uwe Busch, Leiter des Deutschen Röntgen-Museums in Remscheid. Mein besonderer Dank geht auch Prof. Marc Kachelrieß, Leiter der Abt. Röntgenbildgebung und Computertomografie des Deutschen Krebsforschungszentrums für seine fachkundige Durchsicht und seine vielen wertvollen Ratschläge. Danken möchte ich weiterhin einem mir unbekanntem Reviewer für die hilfreichen Hinweise, die zur Verbesserung und Abrundung insbesondere des letzten Teils der Arbeit beigetragen haben.

Literatur

- [1] Ludwig Zehnder (Hrsg). Briefe an L. Zehnder, Rascher & Cie A.G. Zürich, 1935: 39
- [2] Glasser O. Röntgens Entdeckung in der Tagespresse und in populären Zeitschriften. Röntgenstrahlen und Stein der Weisen, Vivisektion, Temperenz-

- bewegung, Spiritismus, Seelenphotografie, Wahrsagerei und Telepathie. In: Wilhelm Conrad Röntgen und die Geschichte der Röntgenstrahlen Berlin, Heidelberg: Springer; 1995. doi:10.1007/978-3-642-79312-7_6
- [3] Walter K. Pioniere und Opfer der Röntgenstrahlen. Zum Gedenken an Gustav Kaiser. In: Röntgen- und Laboratoriumspraxis 10 1957: 35ff
- [4] Beneke K. Wilhelm Conrad Röntgen und die Entdeckung der Röntgenstrahlen. In: Beiträge zur Geschichte der Kolloidwissenschaften, VII. Mitteilungen der Kolloid-Gesellschaft Nehnten: Verlag Reinhard Knof ISBN: 3-9804010-9-X
- [5] Briefdokument Coolidge WD an seine Mutter, Leipzig 26.11.1898. Archiv Deutsches Röntgen-Museum
- [6] Röntgen WC. Über eine neue Art von Strahlen; Vorläufige Mitteilung; 1895: Aussage 6
- [7] Schedel A, Keil R. Der Blick in den Menschen: Wilhelm Conrad Röntgen und seine Zeit. München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg; 1995. ISBN: 3-541-19501-0
- [8] Heuck FHW, Macherauch E Hrsg Forschung mit Röntgenstrahlen. Bilanz eines Jahrhunderts. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest: Springer; 1995. ISBN: 3-540-57718-1
- [9] Kumar M. Quanten. Berlin: Berlin Verlag GmbH; 2009: 25
- [10] Die Ära der Röntgenstrahlen. 9 Spektrum der Wissenschaft; 1995: 88 <https://www.spektrum.de/magazin/die-aera-der-roentgenstrahlen/822531>
- [11] Simonyi K. Kulturgeschichte der Physik. 3. Aufl. Verlag Harri Deutsch; 2001: 381ff
- [12] Busch U. Erster Strahlenunfall: Verpasste Lorbeeren oder der erste Strahlenunfall der Geschichte. Website der Deutsche Röntgengesellschaft. <https://www.drg.de/de-DE/2365/erster-strahlenunfall/>
- [13] Schedel A, Keil R a.a.O.: 11ff
- [14] Röntgen WC a.a.O.: Aussage 1
- [15] Osterhammel J. Die Verwandlung der Welt. Eine Geschichte des 19. Jahrhunderts. C. H. Beck. 2 Aufl. der Sonderausgabe 2016. ISBN: 978-3-406-61481-1S. 77
- [16] Brit J Photography 1896; 43: 26
- [17] Schedel A, Keil R a.a.O.: 134
- [18] Röntgen WC a.a.O.: Aussage 2
- [19] Ebda. Aussage 17.
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Hertz
- [21] Schedel A, Keil R a.a.O.: 137ff
- [22] Degenhardt H. Zur Verwendung von Seltene-Erden Leuchtstoffen in fezeichnenden Verstärkerfolien. Elektromedica 1980; 48: 76–79
- [23] Cormack AM. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications, J. Appl Physics 1963; 34: 2722
- [24] Dette K. Olivetti Personal Computer für Lehre und Forschung. Springer, 1989; Brennan, AnnMarie: Olivetti: A work of art in the age of immaterial labour. Journal of Design History 2015; 28: 235–253; Tischcomputer. In: kuno.de
- [25] Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography) – Part I. Description of the system. Br J Radiol 1973; 46: 1016–1022
- [26] Bates S, Beckmann L, Thomas A. Godfrey Hounsfield: Intuitive Genius of CT (Englisch) Gebundene Ausgabe – 26. April 2012.
- [27] Goldman LW. Principles of CT and CT technology. J Nucl Med Technol 2007; 35: 115–128
- [28] Heuser L. Digitale Radiografie – Geräte und Methoden. In: Kramme R, (Hrsg) Medizintechnik. Springer Reference Technik. Berlin, Heidelberg: Springer; 2015. doi:10.1007/978-3-662-45538-8_17-1
- [29] Panetta D. Advances in X-ray detectors for clinical and preclinical Computed Tomography. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2016; 809: 2–12
- [30] Lell MM, Kachelrieß M. Recent and Upcoming Technological Developments in Computed Tomography: High Speed, Low Dose, Deep Learning, Multienergy. Invest Radiol 2020; 55: 8–19
- [31] McCollough CH, Leng S, Yu L et al. Dual- and Multi-Energy CT: Principles, Technical Approaches, and Clinical Applications. Radiology 2015; 276: 637–653. doi:10.1148/radiol.2015142631
- [32] Kachelrieß M, Kalender W. Medical Physics 2005; 32: 1321–1334
- [33] Klein L, Dorn S, Amato C et al. Effects of Detector Sampling on Noise Reduction in Clinical Photon-Counting Whole-Body Computed Tomography. Invest Radiol 2020; 55 (2): 111–119. doi:10.1097/RLI.0000000000000616
- [34] Byl A, Klein L, Sawall S et al. Photon Counting Normalized Metal Artifact Reduction in 1 Diagnostic CT Submitted to Medical Physics, under review.
- [35] Sawall S, Klein L, Amato C et al. Iodine contrast-to-noise ratio improvement at unit dose and contrast media volume reduction in whole-body photon counting CT. Eur J Radiol 2020; 126: 108909. doi:10.1016/j.ejrad.2020.108909
- [36] Amato C, Klein L, Wehrse E et al. Potential of contrast agents based on high-Z elements for contrast-enhanced photon-counting computed tomography. Med Phys 2020. doi:10.1002/mp.14519. Online ahead of print. Med Phys. 2020. PMID: 33011992
- [37] Flohr T, Ulzheimer S, Petersilka M et al. Basic principles and clinical potential of photon-counting detector CT. Chin J of Acad Radiol 2020; 3: 19–34
- [38] Leng S, Bruesewitz M, Tao S et al. Photon-counting Detector CT: System Design and Clinical Applications of an Emerging Technology. Radiographics 2019; 39: 729–743
- [39] Willemink MJ, Persson M, Pourmorteza A et al. Photon-counting CT: Technical Principles and Clinical Prospects. Radiology 2018; 289: 293–312
- [40] Pourmorteza A, Symons R, Henning A et al. Dose Efficiency of Quarter-Millimeter Photon-Counting Computed Tomography: First-in-Human Results. Invest Radiol 2018; 53: 365–372
- [41] Klein L, Dorn S, Amato C et al. Effects of Detector Sampling on Noise Reduction in Clinical Photon-Counting Whole-Body Computed Tomography. Invest Radiol 2020; 55: 111–119
- [42] Wehrse E, Klein L, Rotkopf L et al. Photon-Counting Detectors in CT: From Quantum Physics to Clinical Practice. Der Radiologe 2021; Online First. doi:10.1007/s00117-021-00812-8
- [43] Wehrse E, Sawall S, Klein L et al. Potential of Ultra-High-Resolution Photon-Counting CT of Bone Metastases: Initial experiences in Breast Cancer Patients. npj Breast Cancer 2021; 7 (1): 3. doi: 10.1038/s41523-020-00207-3
- [44] Warburg O. Versuche an überlebendem Carcinomgewebe: Methoden II: Die Herstellung der Gewebeschnitte. Biochem Z 1923; 42: 317–333