

Klassische Texte der Wissenschaft

Uwe Busch *Hrsg.*

Wilhelm
Conrad Röntgen
Ein leuchtendes
Leben für
die Wissenschaft



Springer Spektrum

Klassische Texte der Wissenschaft

Begründet von

Olaf Breidbach

Jürgen Jost

Herausgegeben von

Jürgen Jost

Armin Stock

Die Reihe bietet zentrale Publikationen der Wissenschaftsentwicklung der Mathematik, Naturwissenschaften, Psychologie und Medizin in sorgfältig edierten, detailliert kommentierten und kompetent interpretierten Neuausgaben. In informativer und leicht lesbarer Form erschließen die von renommierten WissenschaftlerInnen stammenden Kommentare den historischen und wissenschaftlichen Hintergrund der Werke und schaffen so eine verlässliche Grundlage für Seminare an Universitäten, Fachhochschulen und Schulen wie auch zu einer ersten Orientierung für am Thema Interessierte.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/11468>

Uwe Busch
(Hrsg.)

Wilhelm Conrad Röntgen

Ein leuchtendes Leben für die
Wissenschaft

Hrsg.
Uwe Busch
Deutsches Röntgen Museum
Remscheid, Nordrhein-Westfalen, Deutschland

ISSN 2522-865X ISSN 2522-8668 (electronic)
Klassische Texte der Wissenschaft
ISBN 978-3-662-61349-8 ISBN 978-3-662-61350-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61350-4>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Annika Denkert

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany



„Nobelpreisurkunde für Wilhelm Conrad Röntgen aus dem Jahr 1901.“ (Quelle: Original ist im Universitätsarchiv Würzburg)

Vorwort des Herausgebers

Der Name Wilhelm Conrad Röntgen steht für Superlative wie „genial“, „einmalig“, „wegweisend“, „revolutionär“ und vieles mehr. Sein Name ist weltweit ebenso bekannt wie die weltumspannende Bedeutung der von ihm entdeckten neuen Art von Strahlen. Der besondere Stellenwert der später nach ihm benannten Röntgenstrahlen für die Medizin und die wissenschaftliche Forschung wurde dabei bereits in zahlreichen Biographien hervorgehoben.

Die besondere Fokussierung auf die Entdeckung der Röntgenstrahlen wird jedoch dem Wirken und dem Werk von Wilhelm Conrad Röntgen nicht gerecht. Röntgen war auf dem Gebiet der Experimentalphysik ein exzellenter und wissenschaftlich höchst anerkannter Wissenschaftler seiner Zeit. Dies spiegelt sich z. B. in den Berufungslisten der zu seiner Zeit vakanten physikalischen Lehrstühle wider.

Der gelernte Maschinenbauingenieur Röntgen hat sich Zeit seines universitären Lebens dem Gebiet der Präzisionsphysik verschrieben. Dem Credo eines klassischen Naturforschers folgend, war er ein Verfechter der genauesten Beobachtung der Natur und der sich daraus ihm aufdrängenden Beantwortung von Fragen zur Ergründung ihrer Geheimnisse. Im Rahmen seines wissenschaftlichen Wirkens hat er hierzu sowohl klassische Grundlagenforschung als auch ganz konkrete angewandte Forschung insbesondere zur Verbesserung der physikalischen Messtechnik und der zur Verfügung stehenden Messmethoden betrieben.

Als Prototyp des modernen, disziplinübergreifenden und kreativen naturwissenschaftlichen Denkers wurde Röntgen deshalb Gütesiegel und Markenzeichen für (natur) wissenschaftliche Höchst- und Spitzenleistungen der Forschung und Entwicklung in Deutschland um 1900: Röntgen hat mit seinem Werk den Nimbus „Made in Germany“ der Ingenieurkunst, Technologie, Wissenschaft und Forschung hierzulande wesentlich mit begründet. Als erster Nobelpreis überhaupt, hat die Auszeichnung Röntgens hohe Standards gesetzt und entsprechende Ansprüche und Anforderungen für die Verleihung der Nobelpreise begründet.

In diesem Buch wird der Versuch unternommen, den Naturforscher und Physiker Röntgen und seinen Forschungsgeist anhand ausgewählter Forschungsarbeiten im

Sinne einer Opera Selecta näher zu charakterisieren. Zudem werden hier erstmals Originalphotographien aus seinem Nachlass veröffentlicht. Röntgen hatte als einer der wenigen Wissenschaftler zur damaligen Zeit seine große Leidenschaft zur Photographie dazu benutzt, seine experimentellen Ergebnisse zu dokumentieren. Die im Archiv des Deutschen Röntgen-Museums befindlichen Bilddokumente konnten dabei einzelnen Paragraphen seiner berühmten ersten Veröffentlichung über Röntgenstrahlen zugeordnet werden. Ihre genaue Analyse bleibt allerdings schwierig, da sein Laborbuch mit genauen Angaben über sein experimentelles Vorgehen leider nicht mehr vorhanden ist.

In unserer heutigen von Medien und Informationen überfluteten Gesellschaft kann Röntgens universelle Botschaft „Halt doch einmal inne und schaue genauer hin!“ neben einer generellen neuen Orientierung auch einen besonderen Erlebnis- und Erkenntnisgewinn geben. Diesem Grundsatz folgen auch heute noch zahlreiche (Natur-)Wissenschaftler. Röntgen ist somit Vorbild gleichsam für Forscher, aber auch für junge Menschen, die es einmal werden wollen. Mit ihren im Epilog zu findenden Statements machen moderne Röntgenforscher eines sehr deutlich: Röntgen hat Zukunft.

Mein herzlicher Dank geht an alle Autoren für ihre Beiträge.

Herrn Prof. Dr. Ulrich Mödder, Düsseldorf, und Herrn Gerhard Kütterer, Erlangen, danke ich herzlich für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Bei Frau Christina Falkenberg vom Deutschen Röntgen-Museum bedanke ich mich herzlich für die Unterstützung bei der Auswahl und der Bearbeitung der Dokumente- und Bilddateien.

Herrn Professor Armin Stock und dem Springer Verlag danke ich für die bereitwillige Aufnahme des Buches in die Buchreihe „Klassische Texte der Wissenschaft“. Frau Dr. Annika Denkert und Frau Bettina Saglio danke ich für stets freundliche und hilfsbereite Betreuung seitens des Verlages und Frau Regine Zimmerschied für das gekonnte Lektorat.

Ich wünsche allen Leserinnen und Lesern spannende neue Einblicke in Leben und Werk eines faszinierenden Naturwissenschaftlers.

Uwe Busch
Deutsches Röntgen-Museum, Remscheid

Inhaltsverzeichnis

1	Grußworte	1
	Burkhard Mast-Weisz, Christian Schuchardt und Gerald Antoch	
2	Einleitung	7
	Helmut Dosch, Gerhard Adam, Anca-Ligia Grosu und Matthias Purschke	
3	Wilhelm Conrad Röntgen – Forscher und Mensch	37
	Uwe Busch	
4	Eine neue Sorte von Strahlen – Die Entdeckung und Erforschung der X-Strahlen	75
	Uwe Busch	
5	Fortschritte der physikalischen Röntgenforschung bis 1915	109
	Uwe Busch	
6	Das Werk Röntgens in ausgewählten Beispielen	133
	Uwe Busch	
7	Epilog. Die Zukunft der Röntgenstrahlen	215
	Uwe Busch	
8	Besondere Orte	233
	Uwe Busch, Hans-Georg Stavginski und Roland Weigand	
9	Daten und Fakten	257
	Uwe Busch	

Herausgeber- und Autorenverzeichnis

Grußworte



Burkhard Mast-Weisz Oberbürgermeister der Stadt Remscheid



Dr. Christian Schuchardt Oberbürgermeister der Stadt Würzburg



Prof. Dr. Gerald Antoch Präsident der Deutschen Röntgen-
gesellschaft

Autorenbeiträge



Prof. Dr. Helmut Dosch Vorsitzender des DESY
Direktoriums, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY,
Hamburg, Deutschland



Prof. Dr. Gerhard Adam Zentrum für Radiologie und
Endoskopie, Klinik und Poliklinik für Diagnostische und
Interventionelle Radiologie und Nuklearmedizin, Uni-
versitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE), Hamburg,
Deutschland



Univ. Prof. Dr. Anca-Ligia Grosu Ärztliche Direktorin, Universität Freiburg Klinik für Strahlenheilkunde, Freiburg, Deutschland



Dr.-Ing. Matthias Purschke Geschäftsführendes Vorstandsmitglied, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) e. V., Berlin, Deutschland



Dr. Uwe Busch Museumsdirektor, Deutsches Röntgen-Museum, Remscheid, Deutschland



Dr. Hans-Georg Stavginski Deutsche Röntengesellschaft e. V., Berlin, Deutschland



Roland Weigand Mitglied im Vorstand Röntgen-Kuratorium e. V., Würzburg, Deutschland

Statements

Stefan Eisebitt, Professor für Experimentalphysik, Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, Berlin, Deutschland

David Attwood, Professor em. Applied Physics University of California, Berkeley, USA

Bernd Hamm, Professor für Radiologie, Charité – Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland

Peter Vock, Professor em. für Radiologie, Universität Bern, Bern, Schweiz

Rene Van Tiggelen, Curator Belgian Museum for Radiology, Brüssel, Belgien

Sigurd Hofmann, Professor für Physik, GSI, Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt, Deutschland

Frans W. Zonneveld, Professor em. of Medical Imaging Technology, University of Utrecht, Utrecht, Niederlande

Randolf Hanke, Professor für Physik, Fraunhofer Institute für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken, Deutschland

Franz Pfeiffer, Professor for Biophysics, Chair for Biomedical Physics, Faculty of Physics & Medicine, Munich School of BioEngineering, Technical University Munich (TUM), Deutschland

Francesco Sette, Professor for Physics, Director General, European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, Frankreich

Michael Baumann, Professor für Radioonkologie, Vorstandsvorsitzender und wissenschaftlicher Vorstand Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg, Deutschland

Dierk Vorwerk, Professor für Radiologie, Direktor des Instituts für Radiologie, Klinikum Ingolstadt, Ingolstadt, Deutschland

Ada Yonath, Professor for Biochemistry, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel; Chemie-Nobelpreis 2009

Martin Meedom Nielsen, Professor for Physics, DTU PHYSICS, Department of Physics, Technical University of Denmark, Fysikvej, Dänemark

Sunil K. Sinha, Professor for Physics, Dept. of Physics, University of California San Diego, San Diego, USA

Florian Grüner, Professor für Physik, Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland

Ohtsura Niwa, Professor em. for Radiation Biology, Kyoto University Radiation Biology Center, Kyoto, Japan

Wolfgang-Ulrich Müller, Professor em. für Biophysik, Universität Essen, Deutschland; ehemaliger Vorsitzender der Strahlenschutzkommission und des SSK-Krisenstabes

Adrian M. K. Thomas, Visiting Professor, Canterbury Christ Church University, Canterbury, England

Andreas Bockisch, Professor em. für Nuklearmedizin, Universitätskrankenhaus Essen, Essen, Deutschland

Joachim E. Wildberger, Professor for Radiology, Maastricht University Medical Center, Maastricht, Niederlande

Valentin Sinitsyn, Professor of Radiology, University Hospital, Lomonosov Moscow State University, Moskau, Russland

Christian Streffer, Professor em. für Strahlenbiologie, Medizinische Fakultät, Universitätsmedizin Essen, Essen, Deutschland

Werner Becker, Professor für Astrophysik, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik/Ludwig-Maximilians-Universität München, Garching, Deutschland

Peter Bannas, Privatdozent für Radiologie, Klinik und Poliklinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie und Nuklearmedizin UKE, Hamburg, Deutschland

Cornelius Borck, Professor für Medizingeschichte, Institut für Medizingeschichte und Wissenschaftsforschung, Universität zu Lübeck, Deutschland

Felix Nensa, Privatdozent für Radiologie, Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie und Neuroradiologie, Universitätsklinikum Essen, Essen, Deutschland

Metin Tolan, Professor für Physik, Technische Universität Dortmund, Dortmund, Deutschland

Burkhard Mast-Weisz, Christian Schuchardt und Gerald Antoch

Röntgen – Ein weltweit bekannter Forscher aus dem bergischen Land

Burkhard Mast-Weisz, Oberbürgermeister der Stadt Remscheid



Burkhard Mast-Weisz. (© Stadt Remscheid. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

B. Mast-Weisz (✉)

Stadt Remscheid, Oberbürgermeister, Remscheid, Deutschland

E-Mail: [remscheid@remscheid.de](mailto:info@remscheid.de)

C. Schuchardt

Stadt Würzburg, Oberbürgermeister, Würzburg, Deutschland

E-Mail: info@stadt.wuerzburg.de

G. Antoch

Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie Universitätsklinikum Düsseldorf

AÖR, Präsident der Deutschen Röntgengesellschaft, Düsseldorf, Deutschland

E-Mail: antoch@med.uni-duesseldorf.de

Am 27. März 2020 würde der weltbekannte Wissenschaftler und erste Nobelpreisträger für Physik Wilhelm Conrad Röntgen seinen 175. Geburtstag feiern. Röntgen wurde am 27. März 1845 nachmittags um vier Uhr in dem Haus des Lenneper Kaufmanns und Tuchfabrikanten Friedrich Conrad Röntgen und seiner Frau Charlotte Constanze, geborene Frohwein, an der alten Poststraße 287, heute Gänsemarkt 1, in Remscheid-Lennep geboren. Ihr Sohn wurde durch seine Entdeckung der Röntgenstrahlen weltberühmt.

Seine Heimatstadt Lennep hat Röntgen bereits am 15. Juni 1896, nur wenige Monate nach seiner Entdeckung, zum Ehrenbürger ernannt. Im Juni 1920 wurde auf Veranlassung der Lenneper Stadtverordnetenversammlung an seinem Geburtshaus eine Gedenktafel angebracht, die dort heute in der Publikumsausstellung im Erdgeschoss zu sehen ist.

Wilhelm Conrad Röntgen stammt aus dem Bergischen Land, einer Mittelgebirgsregion in Nordrhein-Westfalen. Seine familiären Wurzeln sind im heutigen Wermelskirchen zu finden. Er entstammt einer Familie mit einem gewissen Bildungshintergrund, die um 1721 nach Lennep einwanderte. Das Bergische Land ist aus dem historischen Herzogtum Berg hervorgegangen. Den früheren Landesherren, den Grafen (und späteren Herzogen) von Berg, hat die Region ihren Namen zu verdanken. Bedeutende Orte im Herzogtum waren u. a. Elberfeld, Solingen, Lennep, Radevormwald, Wipperfürth, Bensberg und Siegburg, die überwiegend ab dem 13. Jahrhundert Stadtrechte erhielten. 1815 wurde das Großherzogtum Berg aufgelöst und 1822 der preußischen Rheinprovinz zugeschlagen, mit deren nördlichem Teil das Bergische Land nach dem Zweiten Weltkrieg als Teil des Rheinlandes zu Nordrhein-Westfalen ging. Als Mitglied der Hanse und preußische Kreisstadt war Lennep lange Zeit eine der wichtigsten Städte des Bergischen Landes. Heute noch besitzt Lennep eine in der Grundstruktur mittelalterliche Altstadt, die zu den ausgewählten 35 historischen Stadtkernen Nordrhein-Westfalens zählt. Bis 1929 war Lennep Sitz des gleichnamigen preußischen Landkreises. Im Jahr 1929 erfolgte die Eingemeindung in die Stadt Remscheid. Remscheid ist eine kreisfreie Großstadt im nordrhein-westfälischen Regierungsbezirk Düsseldorf. Sie ist nach Wuppertal und Solingen die drittgrößte Stadt des Bergischen Landes.

Es ist einem glücklichen Umstand zu verdanken, dass die Deutsche Röntgengesellschaft e. V. Röntgens Geburtshaus am 5. Mai 2011 für den symbolischen Kaufpreis von 1 EUR von der Stadt Remscheid erwarb. Dabei hat es sich die Deutsche Röntgengesellschaft e. V. zur Aufgabe gemacht, das Geburtshaus des weltberühmten Wissenschaftlers umfassend zu sanieren und so zu gestalten, dass es als ein lebendiges Denkmal und inspirierender Ort regional, national und international genutzt und erlebt werden kann. Zu Röntgens 174. Geburtstag konnte die Ausstellung in seinem Geburtshaus der Öffentlichkeit präsentiert werden. Ein Abschluss der gesamten Maßnahme ist für seinen 175. Geburtstag vorgesehen.

Die Stadt Remscheid blickt mit Stolz auf ihren berühmten Sohn. Das zu Röntgens Ehren 1932 auf Veranlassung der Stadt Remscheid gegründete Deutsche Röntgen-Museum gibt Zeugnis von der vielfältigen vergangen, gegenwärtigen und

zukünftigen Anwendung seiner Entdeckung der Röntgenstrahlen in zahlreichen Fachgebieten vom Mikro- bis zum Makrokosmos. Sowohl die Entdeckung selbst und ihre Anwendungsmöglichkeiten als auch das Wirken von Röntgen als Person und seine Einstellung zu Wissenschaft und Forschung haben auch nach 125 Jahren nichts an Modernität verloren. Durch seinen besonderen Blick für das Unerforschte und seine Lust am Experimentieren ist Wilhelm Conrad Röntgen Vorbild für gegenwärtige und zukünftige Generationen.

Mit dem hier vorliegenden Buch wird Röntgens großartige Leistung als bedeutender Wissenschaftler und Naturforscher und auch als Wissenschaftsinnovator Rechnung getragen. Es zeigt sein vielfältiges Interesse, durch geschickte Fragen und Instrumente Lösungsansätze zu finden, die helfen können, der Natur ihre Geheimnisse zu entlocken und damit für Fortschritt im wissenschaftlichen und auch gesellschaftlichen Sinn beizutragen.

Diese Röntgens Denken und Handeln immanente universelle Botschaft sollte uns zum Innehalten, Nachfragen und Nachdenken animieren – eine gerade in unserer heutigen flüchtigen Welt verschüttete Einstellung. Die Welt ist spannend, viel spannender, als sie uns erscheint, und es gibt noch viele Fragen für unsere Zukunft zu klären. Nicht die Verhinderer, sondern die Erfinder im Sinne eines Wilhelm Conrad Röntgen können unsere Gesellschaft ökologisch und ökonomisch voranbringen.

Durch den Aufbau des International Roentgen Training and Testing Center für die Weiter- und Ausbildung von Fachleuten und der Gründung einer Wilhelm Conrad Röntgen Juniorakademie für die Motivierung unseres wissenschaftlichen Nachwuchses wird im Geburtshaus Röntgens versucht, gesellschaftliche Impulse zu setzen und den Namen Röntgen weiter in die Welt zu tragen.

Würzburg feiert eine Jahrtausendentdeckung für die Welt

Christian Schuchardt, Oberbürgermeister der Stadt Würzburg



Christian Schuchardt. (© Stadt Würzburg. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

Würzburg als Ort einer Jahrtausendentdeckung

Prof. Dr. Wilhelm Conrad Röntgen zählt zweifelsohne zu den international bekanntesten Würzburger Persönlichkeiten. Im ehemaligen Physikalischen Institut der Universität Würzburg entdeckte er am 8. November 1895 die X-Strahlen, die später nach ihm benannt wurden.

Am Ort der Entdeckung unterhält das Röntgen-Kuratorium Würzburg e. V. die Röntgen-Gedächtnisstätte. Die anlässlich des Jubiläums „120 Jahre Entdeckung der Röntgenstrahlen“ im Jahr 2015 umfassend renovierten und modernisierten Räume gewähren einen Einblick in die experimentelle Physik des ausgehenden 19. Jahrhunderts. Zu sehen sind u. a. die Entdeckungsapparatur und der historische Hörsaal Röntgens. Das Ausstellungskonzept lässt außerdem die Person des Forschers spürbar werden.

Ein Meilenstein der Medizin

Der Zufallsfund des von seinen Fachkollegen hochgeschätzten Experimentalphysikers gilt als Meilenstein in der Medizin. Was mit dem ersten Röntgenbild eines menschlichen Körperteils, der Aufnahme der Hand von Röntgens Ehefrau Anna Bertha, begann, ist heute längst Hochtechnologie. Beispielsweise verfügt das Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie des Universitätsklinikums Würzburg über Hochleistungs-Computertomographen der internationalen Spitzenklasse. Basierend auf Röntgenstrahlen können die CT-Geräte innerhalb von wenigen Sekunden den ganzen Körper durchleuchten. Dabei werden eine Vielzahl von hochaufgelösten Schnittbildern erzeugt, die per Computer in nahezu Echtzeit zu einem 3D-Modell zusammengesetzt werden.

In der Materialforschung unverzichtbar

Mit einer Röntgenaufnahme seines Jagdgewehrs begründete Wilhelm Conrad Röntgen zudem die zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung als weiteres wichtiges Anwendungsfeld seiner Entdeckung. Materialforschung ohne Röntgenstrahlung ist heute nicht mehr vorstellbar. Am Lehrstuhl für Röntgenmikroskopie der Universität Würzburg wird beispielsweise an Methoden der Phasenkontrastbildgebung geforscht, und es wurde ein Nano-Computertomograph entwickelt, mit dem im Labor Details von unter 100 nm erkannt werden können. Solche Röntgenmikroskope dienen u. a. zur Untersuchung von Halbleiter- und elektronischen Mikrostruktursystemen oder von modernen Biomaterialien.

Der erste Würzburger Nobelpreisträger

Die X-Strahlen erfuhren sofort höchste öffentliche Aufmerksamkeit und Anerkennung. Unter anderem erhielt Röntgen im Jahr 1901 den erstmals vergebenen Physik-Nobelpreis. Er war damit auch der erste von bis heute insgesamt 14 Nobelpreisträgern, die an der Würzburger Universität – zumindest zeitweise – forschten und lehrten.

Insgesamt sind wir höchst dankbar, dass Wilhelm Conrad Röntgen unsere Stadt als Ort einer Jahrtausendentdeckung fest in die Menschheitsgeschichte eingeschrieben hat. Gleichzeitig sind wir stolz auf seine „geistigen Nachfahren“, die in Würzburg als Anwender und Forscher die Möglichkeiten der Röntgentechnologie nutzen, ausloten und weiterentwickeln.

Der Gründungsvater der Radiologie

Prof. Dr. med Gerald Antoch, Präsident der Deutschen Röntgengesellschaft



Gerald Antoch. (© Universitätsklinikum Düsseldorf. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

Die Entdeckung der X-Strahlen durch Wilhelm Conrad Röntgen am 8. November 1895 gehört ohne Zweifel zu den wichtigsten Entdeckungen der Medizin. Auf der Anwendung dieser X- oder Röntgenstrahlen beruhende Untersuchungsverfahren wie das konventionelle Röntgenbild, die Durchleuchtung oder die Computertomographie bilden heute einen festen Bestandteil der diagnostischen Basis fast aller Erkrankungen. Über interventionelle, röntgenbasierte Verfahren ist die Radiologie heute zusätzlich integraler Bestandteil nicht nur der Diagnostik sondern auch der Therapie. Dabei unterliegt die Röntgentechnik einem kontinuierlichen Wandel durch wissenschaftliche und technische Innovation. So ist es in den mehr als 120 Jahren seit Entdeckung der X-Strahlen durch Wilhelm Conrad Röntgen gelungen, neue röntgenbasierte Untersuchungsverfahren zu

entwickeln und die Röntgentechnik sowohl im Hinblick auf die Auflösung und Detailgenauigkeit als auch im Hinblick auf die Strahlenexposition der Patienten entscheidend zu verbessern. Neue Entwicklungen wie automatische Dosismodulation und spezielle Rekonstruktionsalgorithmen erlauben es heute, eine Untersuchung mit einer nur noch sehr geringen Dosis durchzuführen. Durch hoch spezialisierte Software können Röntgenbilder in unterschiedlichen Ebenen, Rekonstruktionen und mehrdimensionalen Darstellungen betrachtet und so die diagnostische Genauigkeit weiter erhöht werden. Inzwischen werden computerbasierte Techniken nicht mehr nur für die Anfertigung der Röntgenuntersuchungen und die Bilddarstellung eingesetzt, sondern zunehmend auch zur Auswertung der Röntgenbilder. In der Zukunft ist zu erwarten, dass Radiologen bei der Beurteilung der Röntgenuntersuchungen durch Methoden der künstlichen Intelligenz unterstützt werden. Diese neuen computerbasierten Auswerteverfahren werden es ermöglichen, zusätzliche, bislang nicht zu erhebende Informationen den Röntgenbildern zu entnehmen. Die wissenschaftliche Tätigkeit der in der Deutschen Röntgengesellschaft e. V. organisierten Radiologinnen und Radiologen trägt zu dieser kontinuierlichen Innovation entscheidend bei und ermöglicht so die stetige Weiterentwicklung der durch Wilhelm Conrad Röntgen geschaffenen „leuchtenden“ Möglichkeiten. Zum 175. Geburtstag des Wilhelm Conrad Röntgen gilt es aber auch, Vergangenes zu erhalten. Das Röntgengeburtshaus in Remscheid-Lennep ist hierfür das zentrale Beispiel. Nachdem die Deutsche Röntgengesellschaft e. V. das Haus 2011 erworben hat, wird es 2020 zum 175-jährigen Geburtstag von Wilhelm Conrad Röntgen im sanierten Zustand wiedereröffnet. Eine Kombination aus Ausstellungsfläche und Tagungsräumen wird das „leuchtende Leben“ des Herrn Röntgen interaktiv vermitteln und Platz für wissenschaftlichen Austausch schaffen.

Ein leuchtendes Leben für die Wissenschaft gibt Ihnen einen Einblick in das Leben und das wissenschaftliche Arbeiten des Wilhelm Conrad Röntgen. Vor allem jedoch befasst sich dieses Buch mit dem Einfluss der durch ihn entdeckten X-Strahlen auf die Medizin, die Physik und andere Bereiche des täglichen Lebens. Die Lektüre dieses Buches ist daher für Mediziner wie Nichtmediziner und Physiker wie Nichtphysiker gleichermaßen interessant, informativ und unterhaltsam.

Helmut Dosch, Gerhard Adam, Anca-Ligia Grosu und Matthias Purschke

Die Bedeutung der Röntgenstrahlen für die Naturwissenschaft

Helmut Dosch, DESY Hamburg



Helmut Dosch, Vorsitzender des DESY-Direktoriums. (© DESY. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

H. Dosch (✉)

Vorsitzender des DESY Direktoriums, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Deutschland

E-Mail: dosch-office@desy.de

G. Adam

Zentrum für Radiologie und Endoskopie, Klinik und Poliklinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie und Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE), Hamburg, Deutschland

E-Mail: g.adam@uke.uni-hamburg.de

In unserem Alltag bedienen wir uns rund um die Uhr Spitzenprodukten aus den Denkstuben der Materialwissenschaftler: maßgeschneiderten Materialien, die elektrische, magnetische, optische und mechanische sowie biokompatible Eigenschaften besitzen. Ohne Hightech-Materialien geht heute und in Zukunft schon lange nichts mehr; sie sind die Grundbausteine für alle modernen Technologien, angefangen von Information und Kommunikation über Medizin, Energie und Umwelt bis hin zu Verkehr und Transport.

Manchmal lohnt ein Blick zurück, um zu begreifen, in welcher hochtechnisierten Welt wir leben und welche stürmische Entwicklung wir hinter uns haben.

Wir schreiben das Jahr 1895. Die vorherrschende Technik ist vom Elektromagnetismus bestimmt, wir haben Elektromotoren, die uns im Alltag helfen, und wir nutzen eine Vielzahl von Metallen und Metalllegierungen wegen ihrer stromleitenden und vorteilhaften mechanischen Eigenschaften. In der Medizin sieht es noch finster aus: Die Existenz von Viren ist unbekannt.

Dann kommen im Jahresabstand wissenschaftliche Paukenschläge:

- 1895: Wilhelm Conrad Röntgen entdeckt seine unbekanntenen Strahlen – eine wissenschaftliche Sensation, die die Welt buchstäblich auf den Kopf stellt und Röntgen zum ersten Weltstar der Physik macht. Röntgens neue Strahlen können plötzlich ins Innere von festen Stoffen blicken und bislang unsichtbare Strukturen sichtbar machen. Für die breite Bevölkerung schier unfassbar.
- 1897: Joseph John Thomson und Emil Wiechert entdecken fast zeitgleich die Elektronen, die, wie sich später herausstellt, die Quelle von Röntgens unbekannter Strahlung und zugleich Vermittler aller oben genannten Materialeigenschaften sind.
- 1900: Max Planck entdeckt die Quantelung der Energie – ein Affront!
- 1905: Einstein erklärt den mysteriösen Photoeffekt als ein Quantenphänomen (nebenbei stellt er noch unser kosmologisches Weltbild auf den Kopf).

Innerhalb von nur zehn Jahren hat sich unser physikalisches Weltbild also dramatisch verändert – eine Wissensexplosion, die aber noch nicht erkennen ließ, welche Konsequenzen daraus für unsere Gesellschaft erwachsen würden. Das Nanozeitalter beginnt in den Physiklabors und wird in den kommenden Jahrzehnten die Industrie und die Gesellschaft revolutionieren. Wilhelm Conrad Röntgen hat mit seiner Jahrtausentdeckung das Tor in diese fremde unsichtbare Nanowelt aufgestoßen.

A.-L. Grosu

Ärztliche Direktion, Universität Freiburg Klinik für Strahlenheilkunde, Freiburg, Deutschland
E-Mail: anca.grosu@uniklinik-freiburg.de

M. Purschke

Geschäftsführendes Vorstandsmitglied, DGZfP e. V., Berlin, Deutschland
E-Mail: pm@dgzfp.de

Ich werde in diesem Beitrag die medizinische Revolution, die die Entdeckung der Röntgenstrahlen ausgelöst hat, weitestgehend aussparen und mich im Wesentlichen auf die ebenso spektakulären Auswirkungen auf die Materialforschung konzentrieren.

Hier war das Jahr 1912 entscheidend: Max von Laue entdeckt in München (motiviert durch Ewalds Doktorarbeit), dass Röntgenstrahlen beim Durchgang durch Kristalle von der regelmäßigen Anordnung der Atome abgelenkt werden und ein charakteristisches Interferenzmuster auf dem Bildschirm erzeugen, das erstmals direkte Rückschlüsse auf die atomare Struktur des Materials ermöglichte: die Geburtsstunde der Kristallographie. In den kommenden Jahrzehnten wird die Röntgenkristallographie alle existierenden Materialien atomar entschlüsseln und den Weg für wissensbasiertes Materialdesign ebnen. Die heutigen Hochleistungsmagneten, hochintegrierte Bauelemente, supraleitende Materialien und Superlegierungen für extreme Bedingungen (z. B. in Flugzeugturbinen) wären ohne Röntgens Entdeckung nicht denkbar.

Die für die breitere Öffentlichkeit Aufsehen erregenderen Strukturen lieferten Röntgeninterferenzen von biologischen Substanzen. Röntgenstrahlen ließen uns in den molekularen Maschinenraum des Lebens blicken. 1957 konnten James Watson und Francis Crick die Struktur der DNS, des Trägers der Erbsubstanz, entschlüsseln und den molekularen Ursprung der Vererbung in der Doppelhelix erkennen. Die berühmte Röntgenaufnahme („Photo 51“) einer DNS-Struktur sehen Sie in Abb. 5.11. Im Jahr 2009 wurden Ada Yonath, Thomas Seitz und Venkatraman Ramakrishnan mit dem Chemie-Nobelpreis für die Entschlüsselung des Ribosoms geehrt, des aus Millionen Atomen zusammengesetzten Nanoroboters, der in unseren Zellen den Gencode abliest und daraus Eiweißmoleküle synthetisiert. Röntgenstrahlen haben eines der größten Rätsel der Natur aufgeklärt.

Damit sind wir in unserer Zeitreise wieder in der Moderne angelangt. Die Röntgenanalyse von Materialien hat sich mittlerweile zu einem mächtigen wissenschaftlichen Forschungszweig entwickelt. Die modernsten Röntgenanlagen finden wir heute an Großforschungszentren, die hochkollimierte intensive Röntgenstrahlung und dedizierte Messstationen zur Verfügung stellen, welche hochpräzise Einblicke in die Nanowelt möglich machen. Diese Röntgengroßlabore verwenden das brillante Röntgenlicht, das von Elektronenspeicherringen stammt, den etwas sperrigen Namen Synchrotronstrahlung trägt und ursprünglich ein Abfallprodukt der Teilchenphysik war. In den Ringanlagen der Teilchenphysik verlieren die kreisenden Elektronen enorm viel Energie durch eine vorwärtsgerichtete Abstrahlung von intensivem Röntgenlicht. Bereits in den 1960er Jahren haben Physiker am Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY) mit Synchrotronstrahlung experimentiert und deren Nutzen für die Festkörperforschung erkundet.

Synchrotron-Röntgenstrahlen haben enorme Vorteile gegenüber Laborquellen: Sie haben eine um viele Größenordnungen höhere Intensität, und ihre Wellenlänge kann kontinuierlich – auch während eines Experiments – eingestellt werden. Die Forschergruppen, die an den heutigen Großforschungsanlagen Messungen durchführen, können einen Röntgenstrahl mit beliebiger Energie, Polarisation, Fokussierung und Zeitstruktur „bestellen“. Die ausgefuchsten computergesteuerten Messstationen liefern hochpräzise



Abb. 2.1 Europäische Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble. (© ESRF. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

Informationen über die atomare, chemische, elektronische und magnetische Struktur von Materialien (Abb. 2.1).

Ein Paradebeispiel ist die 1988 in Betrieb genommene Europäische Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble, eine Kooperation vieler europäischer Länder und internationaler Partner. Die ESRF betreibt über 40 Messstationen, versorgt jedes Jahr mehr als 3000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit maßgeschneiderter Röntgenanalytik und produziert jährlich über 1200 Publikationen in den renommiertesten Journalen.

Die Röntgenanwendungen in diesen Großlabors gehen heute längst über von Laues Interferenzexperimente hinaus: Röntgendiffraktion, Röntgenspektroskopie, Röntgentomographie und abbildende Röntgenmethoden werden in vielen Varianten angeboten, alles unter umwelt- und industrierelevanten Messumgebungen. Selbst die extreme Umgebung in unserem Erdinnern oder auf anderen Planeten kann für Geo- und Astrophysiker im Labormaßstab erzeugt und mit feinst fokussiertem Röntgenlicht präzise erkundet werden.

Bei Kunsthistorikern ist vor allem die Röntgenmikrofluoreszenz-Tomographie beliebt, mit der sie beispielsweise bei wertvollen Gemälden zerstörungsfrei mikroskopische Details entschlüsseln können. An der Synchrotronstrahlungsquelle DORIS III bei DESY konnte mit dieser Röntgenmethode 2008 ein Selbstporträt hinter einem



Abb. 2.2 a Experimentierstation P11 bei PETRA III. (© DESY. Abdruck mit freundlicher Genehmigung) b Vincent van Gogh, Patch of Grass. Painted over one of the 50 farmer's heads: Head of a woman. (© Nuenen Collection Kröller-Müller Museum, Otterlo, the Netherlands. Abdruck mit freundlicher Genehmigung) c The colored central part was reconstructed using synchrotron XRF scans, the b/w outer part by means of MA_XRF in situ. This visualization of the painted-away first painting became possible thanks to the University of Antwerp, TU Delft, DESY and the Kröller-Müller Museum. (© Nuenen Collection Kröller-Müller Museum, Otterlo, und University of Antwerp, TU Delft, the Netherlands. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

Gemälde van Goghs („Grasgrund“, 1887) sichtbar gemacht werden (Abb. 2.2). Uwe Bergmann vom Großforschungslabor National Accelerator Laboratory (SLAC) in Stanford gelang vor einigen Jahren die Entdeckung der Originalhandschrift des antiken Mathematikgenies Archimedes, welche auf sog. Palimpsests aus dem 12. Jahrhundert verborgen war.

Synchrotronstrahlung erwies sich in den letzten Jahrzehnten als eine wahre Goldgrube in der Erforschung neuer Festkörpereigenschaften, in der Entwicklung neuer Materialien und in der Strukturbiologie. Man könnte zur Ansicht neigen, dass damit der Wissensdurst im Verständnis der Nanowelt gestillt sei.

Nun, es gab da immer schon einen Heiligen Gral der Nanowissenschaftler, nämlich die Vision, dass man die Bewegung von Atomen und Elektronen in Materialien während einer chemischen Reaktion oder eines biologischen Prozesses in Realzeit, also innerhalb weniger Billionstel Sekunden, verfolgen könne. Damit könnte man gewissermaßen der Natur direkt bei der Arbeit zuschauen und auf diese Weise einige hartnäckige Rätsel der Natur lösen.

Eine Billionstel Sekunde, der Zeittakt im Nanokosmos, das sind gerade mal 0,000.000.000.000.001 s. Atome führen also eine Billion Bewegungsschritte in der Sekunde durch. Würde ein solcher atomarer Schritt eine Sekunde dauern, dann würde man für diese eine Billion Bewegungsschritte mehr als 30 Mio. Jahre benötigen! Diese ultrakurze Zeitspanne – die Physiker sprechen von einer Femtosekunde – scheint auf den ersten Blick unerreichbar für eine Kurzzeit-Strukturaufklärung.

Das zweite hartnäckige Problem ist nämlich, dass man einen hochintensiven Röntgenlaser bräuchte, um verwertbare Informationen von solchen Nanoprozessen in dieser kurzen Zeit zu bekommen. Ein derartiger femtosekundengepulster Röntgenlaser war selbst für die Optimisten unter den Physikern lange Jahre mehr als ein Heiliger Gral, eher eine futuristische Traumvorstellung, bis Evgeny Saldin, ein DESY-Wissenschaftler russischer Herkunft, 1984 eine theoretische Arbeit publizierte, die zeigte, dass es dennoch möglich sein sollte.

Die Theorie ist kompliziert, deshalb wollen wir darauf hier nicht näher eingehen. Für die technische Realisierung benötigt man winzige wohlgeformte Bündel von Elektronen, die auf sehr hohe Energie im Milliardenvoltbereich beschleunigt werden. Diese ultrarelativistischen Elektronenbündel schießt man durch eine mehrere 100 m lange Magnetfeldanordnung, die die Laserabstrahlung im Röntgenbereich laut Saldins Theorie bewirken: Das ist das Prinzip des Freien-Elektronen-Lasers.

Die Testanlage FLASH (Free-Electron Laser) in Hamburg wurde am DESY zur Experimentell-Erprobung der Saldin'schen Theorie Ende der 1990er Jahre in einer internationalen Kollaboration aufgebaut. Kernstück war ein 200 m langer supraleitender Linearbeschleuniger, dessen Technologie bei DESY entwickelt wurde und Elektronen auf zunächst 500 meV Energie beschleunigte. Am 22. Februar 2000 konnte der Durchbruch verkündet werden: „first lasing“. Etwas mehr als 100 Jahre nach Röntgens Entdeckung hatte man erstmals Laserlicht im weichen Röntgenbereich erzeugt – eine Pionierleistung der Beschleunigerphysiker.

Die Hamburger Test-Facility ist seit vielen Jahren ein begehrtes Forschungs Großgerät, an dem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt experimentieren. Der Erfolg von FLASH hat die Agenda der Wissenschaft weltweit verändert:

Heute sind weltweit bereits mehrere Freie-Elektronen-Röntgenlaser in Betrieb, und viele befinden sich gerade im Bau. Der amerikanische Laser LCLS ist seit 2009 in Betrieb, danach kam der japanische Laser SACLA. Unter den europäischen Röntgen-

lasern ist insbesondere der Europäische Röntgenlaser European XFEL in Hamburg zu nennen, der 2017 in Betrieb ging und der bislang leistungsstärkste Laser seiner Art ist.

Synchrotronstrahlungsquellen sind, wie bereits erwähnt, äußerst intensitätsstarke Röntgenquellen. Eine Röntgenaufnahme dauert heute weniger als 1 s. Bei Freie-Elektronen-Lasern sieht das nochmal ganz anders aus. Saldins Laserprozess sagt voraus, dass alle Elektronen in einem Bündel, ca. 10 Mrd. Stück (das ist ein Nano-Coulomb an Ladung), im Gleichtakt Röntgenlicht abstrahlen. Dies führt zu einer Erhöhung der Röntgenintensität jedes Elektronenbündels um das Zehnmilliardenfache! In einem nur wenige Femtosekunden kurzen Röntgenlaserblitz steckt die gleiche Intensität wie in einer konventionellen Ein-Sekunden-Röntgenaufnahme am Synchrotron. Freie-Elektronen-Laser ermöglichen somit Strukturanalysen im Zeittakt der Molekülbewegungen. Wenn man viele solcher Einzelbilder aneinanderreihen könnte, würde man die Strukturveränderungen eines Moleküls bei einer chemischen Reaktion sehen: Das Quantenkino ist in greifbare Nähe gerückt.

Die Anwendungsfelder für Freie-Elektronen-Laser sind heute noch nicht voll ausgelotet. Man steht hier am Anfang, so wie einst 1912, als von Laue die ersten Signale aus dem Nanokosmos sah und vermutlich nicht darauf gewettet hätte, dass man damit 45 Jahre später die atomare Struktur der DNS lösen würde. An und mit Freie-Elektronen-Lasern wird seit etwa zehn Jahren intensiv experimentiert. Viele neue Phänomene wurden entdeckt und revolutionär neue Röntgenkonzepte entwickelt. Derzeit arbeitet man fieberhaft daran, die Abläufe in der Photosynthese minutiös, besser femtosekundengenau, zu verfolgen. Hier könnten wir von der Natur lernen, wie man umweltfreundlich Wasser spaltet, damit Wasserstoff als Energieträger gewinnt und gleichzeitig die Umwelt von CO₂ reinigt. Ein weiteres wichtiges Thema ist das genaue Verständnis der atomaren Prozesse bei der Katalyse. Man vermutet heute, dass es bei diesen katalytischen Prozessen sog. kurzlebige transiente Zustände gibt, die den katalytischen Ablauf entscheidend beeinflussen. Mit den Röntgenlasern hätte man nun erstmals den experimentellen Zugang zu diesen Nichtgleichgewichtszuständen.

Experimente am Freie-Elektronen-Laser haben nichts mehr gemein mit den Messkonzepten an konventionellen Röntgenquellen, Synchrotronstrahlungsquellen eingeschlossen. Ein Röntgenblitz produziert eine Aufnahme und das im Hochfrequenztakt. Die Proben befinden sich nicht mehr auf Probenhaltern und werden nicht mehr mit Goniometern im Strahl bewegt, sondern mit einer Mikrodüse in die Wechselwirkungszone geschossen und von einem einzigen Röntgenlaserblitz abgetastet. Großflächige Röntgendetektoren produzieren Gigabytes an Daten im Minutentakt, die mit neuen Algorithmen ausgewertet werden (Abb. 2.3).

Was wird uns die Zukunft auf dem Gebiet der Röntgenanalyse bringen? Nun, zum einen werden wir sehen, welches Neuland die Freie-Elektronen-Röntgenlaser entdecken und erkunden. Die Synchrotronstrahlungsquellen werden derzeit auf eine neue Speicherringtechnologie umgerüstet, welche die Qualität der Röntgenstrahlung

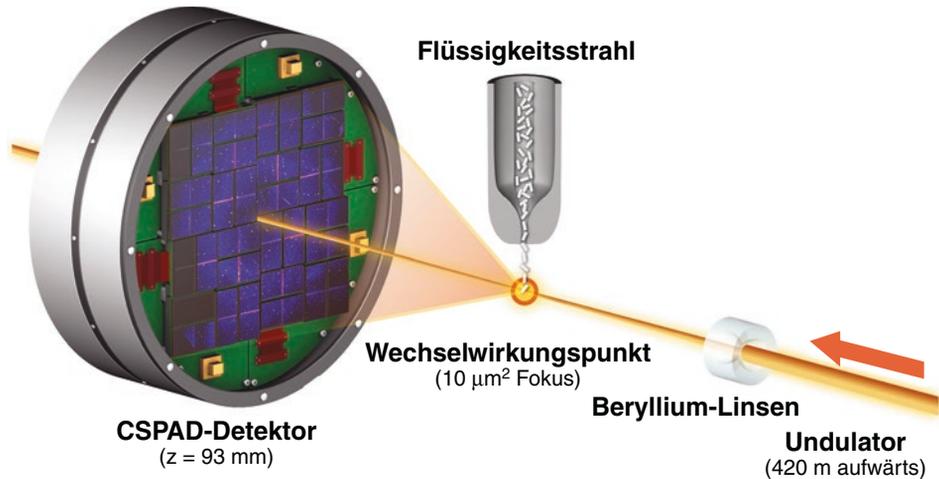


Abb. 2.3 Prinzip eines Röntgenexperiments an einem Freie-Elektronen-Laser-Bild. (© DESY. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

nochmals um zwei bis drei Größenordnungen erhöht. Die Zukunft ist hier, Röntgen-diffraktion und Röntgenspektroskopie in den Abbildungsmodus zu schalten. Wir bekommen dann mikroskopisch aufgelöste Bilder von beliebigen Materialeigenschaften. Alle 19 Betreiber von europäischen Synchrotronstrahlungs- und Röntgen-laserquellen haben sich im Herbst 2017 zu einem neuen europäischen Konsortium mit dem Namen League of European Accelerator-based Photon Sources (LEAPS) zusammengeschlossen, mit dem Ziel, noch effizienter zusammenzuarbeiten, um besser abgestimmte Software, Probenumgebungen und Datenformate für die akademische Forschung und für die Industrie bereitzustellen.

Die Röntgenanlagen sind in den letzten Jahrzehnten immer größer geworden, bis hin zu großen Speicherringen und kilometerlangen Linearbeschleunigern. Derzeit arbeiten die Beschleunigerphysiker daran, diesen Trend umzukehren. Sie zählen dabei auf eine neue Art der Elektronenbeschleunigung, die in geladenen Plasmen abläuft und Beschleunigungsspannungen ermöglichen, welche die heutigen um einen Faktor 1000 (!) übertreffen. Wenn solche Plasmabeschleuniger Wirklichkeit werden, dann schrumpfen solche Anlagen wieder auf Labormaßstab. Krankenhäuser könnten dann solche Anlagen im Keller stehen haben für hochaufgelöste Röntgenbildgebung an Patienten mit weit weniger Strahlenbelastung als heute.

Wir stellen uns vor, Wilhelm Conrad Röntgen sitzt auf einer Wolke und beobachtet das alles. Er wäre sehr stolz auf seine Erben ...

Die Zukunft der Radiologie

Gerhard Adam, UKE Hamburg



Gerhard Adam. (© UKE Hamburg. Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

Die Revolution in den Naturwissenschaften und der Medizin, die durch die Entdeckung der Röntgenstrahlen ausgelöst wurden, sind allgegenwärtig und bekannt. Naturwissenschaften und Medizin wurden transparent, bisher Verborgenes und Undurchsichtiges sichtbar, Grenzen der Naturwissenschaften neu definiert, überschritten und neu bemessen. Der hierdurch eingeleitete Epochenwandel durch die Entdeckung des Jahres 1895 ist in der Medizin nur noch mit der von James Watson und Francis Crick (1), die erstmals die Struktur der DNS beschrieben, vergleichbar.

Wie wird sich diese bahnbrechende Entdeckung in der Zukunft entwickeln? Wie wird Radiologie die Medizin der Zukunft beeinflussen? Wie wird die Medizin die Radiologie beeinflussen? Wie wird sich die Medizin des Jahres 2050 von der des Jahres 2020 unterscheiden?

Während in den Industrieländern die Medizin durch Alterung und demographischen Wandel am stärksten beeinflusst wird, werden in den nichtindustrialisierten Ländern das Bevölkerungswachstum mit seinen Folgen für Ernährung und Hygiene die bestimmenden Merkmale sein.

Alternde Bevölkerungen bedeuten für die Medizin eine immer komplexere Versorgung von Tumor- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen, neurodegenerativen Erkrankungen und degenerativen Erkrankungen des Haltungs- und Bewegungsapparates. Wachsende junge Bevölkerungen stellen die Medizin vor andere Herausforderungen: Die ausreichende Versorgung mit Nahrungsmitteln, sauberem (Trink-)Wasser und die Sicherstellung von Hygienestandards und Infektionsmedizin stellen vermutlich die großen Herausforderungen dar. Somit wird die medizinische Versorgung der Weltbevölkerung von komplexester hochtechnisierter Medizin sowie Hygiene- und Infektionsmedizin geprägt sein.

Die Radiologie wird sich den Erfordernissen der patienten- und krankheitszentrierten Versorgung anpassen und wandeln. Radiologische Verfahren werden stärker als bisher