

Skript für DA-Berufsschulen: Röntgen

Dr. med. dent. Carla Mosele
Dr. med. dent. Urs Häfeli

Impressum

Realisation

Presse- und Informationsdienst SSO
Felix Adank

Autor

Dr. med. dent. Carla Mosele
Dr. med. dent. Urs Häfeli

Lektorat

PD Dr. med. dent. Karl Dula
Denise Mussato

Verlag / Copyright

SSO/SVDA

Gestaltung

Atelier Bundi AG, Boll

Druck

Jordi AG, Belp

Auflage

1000 Ex., 1. Auflage 2013

Artikelnummer

2081

Bestelladresse

SSO-Shop, Postgasse 19, Postfach, 3000 Bern 8
Fax 031 310 20 82, info@sso.ch

Aus Gründen der Lesbarkeit wird in diesem Skript für Dentalassistentinnen nur die weibliche, für andere Berufsangehörige abwechselnd die männliche oder die weibliche Form verwendet. Alle Berufe eignen sich für Frauen und Männer gleichermaßen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort von PD Dr. med. dent. Karl Dula	6
1. Historisches	1
2. Strahlenphysik	9
2.1 Materie	9
2.2 Das Atom	9
2.3 Ionen	12
2.4 Moleküle	12
2.5 Chemische Bindungsarten	12
2.5.1 Molekulare Verbindung (Atombindung)	13
2.5.2 Ionenbindung (Salze)	13
2.6 Ionisation	15
2.6.1 Anregung	15
2.7 Strahlung	16
2.7.1 Physikalische Grundbegriffe zu den Strahlen	16
2.7.2 Teilchenstrahlung	16
2.7.3 Photonenstrahlung	16
3. Der zahnärztliche Röntgenapparat	20
3.1 Aufbau des Röntgenapparates	20
3.2 Die Röntgenröhre	21
3.2.1 So wird ein Röntgenstrahl erzeugt	22
3.3 Voreinstellungen des Röntgenapparates	23
3.3.1 Belichtungszeit (s)	23
3.3.2 Kathodenheizung (mA)	23
3.3.3 Röhrenspannung (kV)	23
3.4 Strahlenqualität	24
3.4.1 Durchdringungsfähigkeit	24
3.5 Der Brennfleck (Fokus)	24
3.6 Abstandsgesetz	25
3.7 Wechselwirkungen zwischen ionisierenden Strahlen und Materie	25
3.8 Streustrahlung	26
3.9 Ionisation und Anregung	26
4. Strahlenbiologie	28
4.1 Schädigende Wirkung von Röntgenstrahlen (Strahlenschäden)	29
4.1.1 Direkte Wirkung	29
4.1.2 Indirekte Wirkung	30
4.2 Repetition Zellbiologie	31
4.2.1 Die Zelle	31
4.2.2 Wirkung von Röntgenstrahlen auf den Zellkern sowie auf die Zellteilung	31
4.2.3 Veränderung der Erbinformation (Genmutation)	32
4.2.4 Strahlenempfindlichkeit verschiedener Gewebe	32
4.3 Einteilung der Strahlenschäden	33
4.3.1 Örtliche Folgen	33
4.3.2 Allgemeine Folgen	33
4.4 Deterministische Schäden	33
4.5 Stochastische Schäden	34

4.6	Einteilung nach dem Schadenwirkungsort	34
4.6.1	Somatische Schäden	34
4.6.2	Teratogene Schäden	34
4.6.3	Genetische Schäden	35
5.	Strahlenschutz	36
5.1	BAG-Vorschriften für die Verwendung von Röntgen- apparaten bis 70 kV in der Zahnheilkunde	36
5.2	Qualitätskontrolle und Konstanzprüfung der Röntgenanlagen	37
5.2.1	Konstanzprüfung der Filmverarbeitung	37
5.2.2	Konstanzprüfung des Röntgenapparates	37
5.2.3	Konstanzprüfung digitaler Bildplatten	38
5.2.4	Zustandsprüfung für die digitale Bildwiedergabe (PC-Bildschirm)	38
5.2.5	Zustandsprüfung für das Bildwiedergabe- Gerät (PC-Bildschirm)	38
5.3	Röntgenstrahlen in der Medizin	41
5.3.1	Diagnostik	41
5.3.2	Röntgentherapie	41
5.4	Dosimetrie	41
5.4.1	Strahlenenergie-Dosis	41
5.4.2	Äquivalent-Dosis	41
5.4.3	Effektive Dosis	42
5.5	Das Thermolumineszenz-Dosimeter	42
5.5.1	Regeln zum Tragen des Dosimeters	43
5.5.2	Aufbau und Funktion des Thermolumineszenz-Dosimeters TLD	43
5.5.3	Die strahlenmedizinische Kontrolluntersuchung	45
5.6	Bauliche Vorschriften für Röntgengeräte bis 70 kV	45
5.7	Unterschiede der Strahlenbelastung durch analoge und digitale Röntgengeräte	46
5.8	Natürliche und künstliche Strahlenbelastung	47
5.8.1	Kosmische Strahlung	47
5.8.2	Terrestrische Strahlung	47
5.8.3	Endogene (interne) Strahlung	48
5.9	Strahlendosis-Grenzwerte	49
5.9.1	Strahlenschutzmassnahmen für den Patienten	49
5.9.2	Strahlenschutzmassnahmen für das Personal	50
6.	Der zahnärztliche Röntgenfilm	51
6.1	Aufbau des Röntgenfilms	51
6.2	Verpackung	51
6.3	Filmformate	52
6.3.1	Intraorale Filme	52
6.3.2	Extraorale Filme	54
6.4	Fotochemie und Filmverarbeitung	56
6.4.1	Belichten	56
6.4.2	Entwickeln	57
6.4.3	Fixieren	57
6.4.4	Wässern	57
6.4.5	Trocknen	57

6.5	Methoden der Filmentwicklung / Filmverarbeitung	59
6.5.1	Handentwicklung	59
6.5.2	Halbautomaten	60
6.5.3	Vollautomaten	61
6.6	Dunkelkammer	61
6.7	Der richtige Umgang mit Filmen und Röntgenchemikalien	62
6.8	Digitales Röntgen	63
6.8.1	Digitale Bildplatten (Speicherfolien)	63
6.8.2	CCD/CMOS Sensoren	64
6.9	Archivierung von Röntgenbildern	65
6.9.1	Röntgenjournal	66
6.10	Belichtungs- und Filmverarbeitungsfehler	66
7.	Einstelltechnik	69
7.1	Projektionslehre	69
7.1.1	Brennfleck (Fokus)	69
7.1.2	Zentralstrahl	69
7.1.3	Objekt	69
7.2	Vergrößerung	70
7.3	Verzerrung	71
7.4	Die vier Faustregeln der Einstellung	71
7.5	Die Röntgen-Ebenen	72
7.6	Die Aufnahmetechniken	72
7.6.1	Die Halbwinkeltechnik	72
7.6.2	Die Rechtwinkeltechnik	76
7.7	Grundregeln zum Positionieren der Filme	77
7.7.1	Exzentrische Einstellungen	78
7.7.2	Das Freiprojizieren	79
7.7.3	Die Mi-Hi-Regel	79
7.8	Projektionsfehler	80
7.9	Selbstkontrolle der vertikalen Einstellung	81
7.10	Selbstkontrolle der horizontalen Einstellung	82
7.11	Intraorale Aufnahmen	83
7.11.1	Statusaufnahmen	83
7.11.2	Bissflügel-Aufnahme (Bitewings)	85
7.11.3	Vorbereitungen zum «scharfen Schuss»	90
7.12	Extraorale Aufnahmen	92
7.12.1	Fernröntgenaufnahme	92
7.12.2	Orthopantomogramm (Panoramaschichtaufnahme)	92
8.	Quellenangaben	95
9.	Glossar	96

Vorwort von PD Dr. med. dent. Karl Dula

(BiPla 8.1.2) Sehr geehrte Dentalassistentin in Ausbildung

In Ihrem Berufsleben werden Sie schnell feststellen, dass die Radiologie in allen Fachgebieten der Zahnmedizin die Basis der zahnärztlichen Diagnostik ist, nur einige Patienten mit Schleimhauterkrankungen benötigen zur Diagnostik keine Radiologie. Auch in der Betreuungsphase nach abgeschlossener Behandlung spielt die Radiologie eine tragende Rolle. Da nur eine korrekte Diagnostik die richtige Behandlung ermöglicht, ist die Bildgebung somit auch Basis für das Wohlergehen der Patienten jener Praxis, in der Sie in Zukunft arbeiten werden und mit der Sie sich identifizieren sollten.

Durch Ihre Ausbildung werden Sie dazu befähigt, Röntgenaufnahmen im Auftrag Ihres/Ihrer Vorgesetzten selbstständig zu erstellen. Dies müssen Sie mit grosser Sorgfalt und in dem Bewusstsein machen, dass Sie Strahlen auf den Patienten richten, die einerseits zu seiner Gesundheit durch eine korrekte Diagnose beitragen, zugleich aber ein gewisses Risiko für ihn bedeuten. Aus diesem Grund erwächst Ihnen eine grosse Verantwortung, und diese Verantwortung müssen Sie bereit sein zu tragen, wenn Sie röntgen wollen. Das können Sie am besten, indem Sie dieses Skript nicht nur lesen und lernen, um durch Ihre Prüfung zu kommen. Sie müssen es vielmehr in seiner Gesamtheit begreifen, um die Inhalte zum Wohle der Patienten richtig umzusetzen. Indem Sie die Patienten röntgen und Verantwortung für sie übernehmen, werden sie auch zu Ihren Patienten. Bedingung ist jedoch, dass Sie Ihre Röntgenaufträge auf Basis eines guten Wissens erledigen, das Ihnen Sicherheit bei Ihren Handlungen gibt.

Diese Gedanken waren auch Motivation für die Autoren, die dieses Skript in Ihrer Freizeit für Sie geschrieben haben. Sie finden somit eine hervorragende Unterlage, die Ihnen das Wissen vermittelt, das Sie zum Verständnis Ihrer Tätigkeit im Bereich der Radiologie benötigen.

Ich wünsche Ihnen für Ihren beruflichen Weg Befriedigung und Erfüllung.

PD Dr. Karl Dula

1. Historisches

Wilhelm Conrad Röntgen

(BiPla 8.1.1)



Abb. 1:
Wilhelm Conrad Röntgen

Am 8. November 1895 entdeckte der damals 50-jährige deutsche Physiker Wilhelm Conrad Röntgen in einem Laboratorium der Universität Würzburg eine neue Art von Strahlen, die er *x-Strahlen* nannte, da dieser Buchstabe in der Physik für «Unbekannte» steht. Im englischsprachigen Raum werden Röntgenstrahlen noch heute als «x-rays» bezeichnet. (engl. ray = Strahl)

Diese Strahlen waren unsichtbar, durchdrangen fast alles, was in den Strahlengang gehalten wurde, und brachten gewisse Stoffe zum Fluoreszieren.

Am 28. Dezember 1895 fertigte Wilhelm Conrad Röntgen während einer Vorlesung über «eine neue Art von Strahlen» das erste Röntgenbild an einem Menschen an, die Hand eines Schweizer Anatomieprofessors. Diese Entdeckung löste weltweit grosse Begeisterung aus und revolutionierte die Medizin.

1901 erhielt Wilhelm Conrad Röntgen für seine Leistung den *ersten Nobelpreis für Physik*. Zu seinen Ehren wurden die Strahlen nach ihrem Entdecker benannt: *Röntgenstrahlen*.

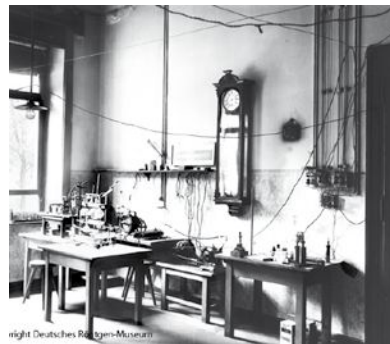


Abb. 2: Arbeitszimmer von Röntgen



Abb. 3: Erstes Röntgenbild,
Hand der Anna Bertha Röntgen-Ludwig

Pioniere

Kurz nach Röntgens Entdeckung fertigte Dr. Otto Walkhoff, ein Zahnarzt aus Braunschweig, zusammen mit dem Physiker Prof. Friedrich Giesel das *erste zahnärztliche Röntgenbild* an. Eine fotografisch beschichtete Glasplatte wurde mit schwarzem Papier umhüllt und in Kofferdam eingepackt. So geschützt vor Speichel und Nässe wurde die Glasplatte im Mund während 25 Minuten bestrahlt.

Diese Begebenheit zeigt, wie unvorsichtig die Pioniere mit den unbekanntem Strahlen umgingen. Dies änderte sich jedoch schnell, denn bereits 1896 häuften sich die Berichte, dass nach längeren Bestrahlungen Hautrötungen – wie bei Sonnenbrand – oder Haarausfall beobachtet wurden. So wurde Ende 1896 empfohlen, einen Mindestabstand von der Strahlenquelle einzuhalten. Bald folgten weitere Empfehlungen zu Schutzmassnahmen wie das Verwenden von Schutzeinrichtungen aus schweren Metallen (Blei) oder das Bündeln und Filtern des Zentralstrahles.



Abb. 4: Erster Versuch einer intraoralen Zahnaufnahme

Heutige Anwendung von Röntgenstrahlen in der Medizin

- Diagnostik: Zur Anfertigung von Röntgenbildern
- Therapie: Zur Bestrahlung von Tumoren

Im Computerzeitalter ist es heute möglich, neben den herkömmlichen zweidimensionalen Bildern auch fast beliebige Schichtaufnahmen («Schnittbilder» des Menschen) und dreidimensionale, also räumliche Darstellungen von Körperteilen anzufertigen (Digitale Volumentomografie, abgekürzt DVT).

Die Bestrahlung von Tumoren gelingt heute dank der modernen Technik sehr zielgenau, was die unerwünschte Schädigung von gesundem Gewebe gegenüber früher erheblich begrenzt.

Selbstevaluationsfragen Kapitel 1

Nennen Sie den Namen des Entdeckers der Röntgenstrahlen, die wichtigen Jahreszahlen und die Ehrung für die Entdeckung.

Erklären Sie den Begriff «Rx»: was bedeuten «R» und «x»?

2. Strahlenphysik

Physikalische Grundlagen der Röntgentechnik

Vergleiche hierzu Chemie und Physik aus dem Fach Naturwissenschaftliche Grundlagen, 1. Lehrjahr.

2.1 Materie

Als Materie bezeichnet man sämtliche Substanzen, die uns umgeben oder aus denen wir bestehen. Lediglich das Vakuum ist nahezu frei von Materie. Die Bausteine der Materie sind die Atome, Ionen und Moleküle.

2.2 Atom (von griechisch *átomos* = unteilbar)

Das Atom ist die kleinste Einheit eines chemischen Elementes. Es ist mit chemischen Mitteln nicht weiter zerlegbar.

Die Röntgenstrahlen besitzen aber die Eigenschaft, die Materie und somit auch die Atome zu durchdringen.

(BiPla 8.2.5)

Sämtliche Vorgänge in der Röntgentechnik spielen sich auf der Ebene der Atome ab, sowohl bei der Entstehung der Röntgenstrahlen, als auch bei ihren biologischen Auswirkungen im durchstrahlten Gewebe und ebenso beim Entstehen des Bildes auf dem Röntgenfilm.

Der Aufbau der Atome wird anhand verschiedener Modelle beschrieben, wovon das «Bohr'sche Atommodell» sicherlich das bekannteste ist. Der dänische Physiker Niels Bohr entwickelte bereits 1913 ein dreidimensionales Bild eines Atoms und erhielt später für seine Forschungsergebnisse den Nobelpreis.

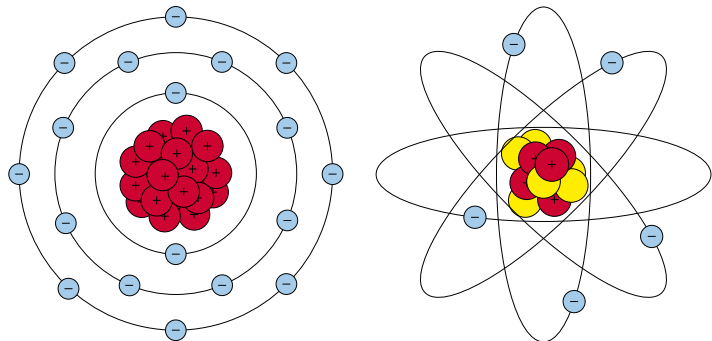


Abb. 5a, b: Das Bohr'sche Atommodell:

links ein Magnesium-Atom zweidimensional und rechts räumlich dargestellt

Der Atomkern besteht aus Protonen (+) und Neutronen

Die Atomhülle besteht aus Elektronen (–)

Abb. 5a zeigt das Magnesium-Atom, vereinfacht gezeichnet nach dem Schalen-Modell. Die Vereinfachung besteht darin, dass die Schalen eigentlich nicht kreisförmig sind, sondern kugelförmig, also dreidimensional, wie in Abb. 5b zu sehen. Man sieht den Atomkern (die Neutronen wurden nicht eingezeichnet) und drei Schalen mit Elektronen.

Die Elektronen kreisen innerhalb der Atomhülle auf bestimmten Bahnen, welche auch Schalen genannt werden, um den Atomkern.

Protonen, Elektronen und Neutronen bezeichnet man auch als Elementarteilchen.

Das Atom ist elektrisch neutral, da gleich viele Protonen im Kern wie Elektronen in der Hülle vorhanden sind.

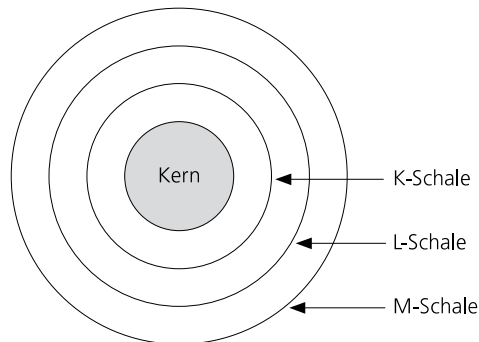


Abb. 6: Elektronen-Schalen des Bohr'schen Atommodells

Zur einfacheren Darstellung können wir uns an einem zweidimensionalen Atommodell orientieren.

In der Atomhülle kreisen die Elektronen auf Bahnen, den so genannten Schalen, um den Atomkern. Die Atomhülle kann maximal sieben Schalen besitzen, welche von innen nach aussen mit den Buchstaben K, L, M, N, O, P, Q gekennzeichnet sind.

Die 1. Schale (K-Schale) nimmt 2 Elektronen auf.

Die 2. und 3. Schale (L und M) nehmen je 8 Elektronen auf.

Die 4. und 5. Schale (N und O) nehmen je 18 Elektronen auf.

Die 6. und 7. Schale (P und Q) nehmen je 32 Elektronen auf.

Zum besseren Verständnis hier zwei Beispiele bekannter Atome:

- Das Wasserstoffatom (H) hat ein Proton im Atomkern und ein Elektron in der Atomhülle.
- Das Sauerstoffatom (O) hat 8 Protonen im Atomkern und folglich auch 8 Elektronen in der Hülle.

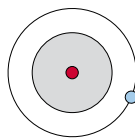


Abb. 7: Das Wasserstoffatom (H)

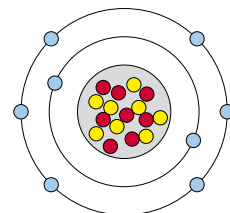


Abb. 8: Das Sauerstoffatom (O)

Ob ein Atom die Eigenschaft eines Wasserstoffatoms, eines Sauerstoffatoms, eines Eisen-, Silber- oder eines anderen Atoms hat, hängt von der Anzahl der Protonen im Atomkern ab. Die Anzahl Protonen eines Atoms wird auch Ordnungszahl genannt. Wird diese Zahl verändert, entsteht ein neues Element.

Gegenwärtig gibt es mehr als 110 bekannte Elemente, davon kommen aber nur 90 natürlich vor. Die übrigen kommen in der Natur nicht vor, sondern wurden in Experimenten erzeugt.

Die Elemente sind nach ihrer Kernladungszahl (= Ordnungszahl) und der Elektronenkonfiguration ihrer Atome im Periodensystem der Elemente (PSE) in Gruppen und Perioden angeordnet. Siehe Abb. 9 weiter unten.

Einige Erklärungen zum Periodensystem:

Die Atome der ersten Periode sind die kleinsten. Ihre Atomhülle besitzt nur eine Schale. Nur zwei Elemente, nämlich Wasserstoff [H] und Helium [He] befinden sich in dieser Periode.

Wasserstoff hat die Ordnungszahl 1 und besitzt ein Proton im Atomkern und ein Elektron in der K-Schale.

Helium hat die Ordnungszahl 2 und besitzt 2 Protonen im Atomkern und 2 Elektronen in der K-Schale.

In den Kästchen der verschiedenen Elemente sind weitere Angaben aufgeführt, die das Element näher beschreiben.

- Ordnungszahl
- Atomgewicht

I																	VIII
1.01 H 1																	4.00 He 2
6.94 Li 3	9.01 Be 4											10.81 B 5	12.01 C 6	14.01 N 7	16.00 O 8	19.00 F 9	20.18 Ne 10
22.99 Na 11	24.31 Mg 12											26.98 Al 13	28.09 Si 14	30.97 P 15	32.06 S 16	35.45 Cl 17	39.95 Ar 18
39.10 K 19	40.08 Ca 20	44.96 Sc 21	47.87 Ti 22	50.94 V 23	52.00 Cr 24	54.94 Mn 25	55.85 Fe 26	58.93 Co 27	58.69 Ni 28	63.55 Cu 29	65.39 Zn 30	69.72 Ga 31	72.61 Ge 32	74.92 As 33	78.96 Se 34	79.90 Br 35	83.8 Kr 36
85.47 Rb 37	87.62 Sr 38	88.91 Y 39	91.22 Zr 40	92.91 Nb 41	95.94 Mo 42	97.91 Tc 43	101.0 Ru 44	102.9 Rh 45	106.4 Pd 46	107.9 Ag 47	112.4 Cd 48	114.8 In 49	118.7 Sn 50	121.8 Sb 51	127.6 Te 52	126.9 I 53	131.3 Xe 54
132.9 Cs 55	137.3 Ba 56	175.0 Lu 71	178.5 Hf 72	180.9 Ta 73	183.8 W 74	186.2 Re 75	190.2 Os 76	192.2 Ir 77	195.1 Pt 78	197.0 Au 79	200.6 Hg 80	204.4 Tl 81	207.2 Pb 82	209.0 Bi 83	209.0 Po 84	210.0 At 85	222.0 Rn 86
223.0 Fr 87	226.0 Ra 88	262.0 Lr 103	261.1 Rf 104	262.1 Db 105	266.1 Sg 106	264.1 Bh 107	269.1 Hs 108	268.1 Mt 109	273.1 Ds 110	272.1 Rg 111							

Atommasse in u (molare Masse)

26.98

Al — Elementsymbol

13 — Ordnungszahl

Wasserstoff (blau)

radioaktiv (rosa)

Erdalkalim (gelb)

Metalle (grau)

Halbmetalle (dunkelgrau)

Edelgase (hellblau)

Nichtmetalle (hellgrün)

Alkalimetalle (dunkelgrün)

Abb. 9: Das Periodensystem der Elemente

2.3 Ionen

In der äussersten Schale eines Atoms kann sich die Zahl der Elektronen verändern. Dadurch wird das Ladungsverhältnis innerhalb des Atoms verändert und aus dem Atom wird ein Ion.

Wenn ein Elektron aus der äussersten Schale entfernt wird, entsteht ein positiv geladenes Ion = *Kation*

Wird der äussersten Schale ein Elektron hinzugefügt, entsteht ein negativ geladenes Ion = *Anion*

Der Vorgang der Ionenbildung wird Ionisation genannt. Die chemischen Eigenschaften ändern durch eine Ionisation grundlegend. Ein Beispiel: Fluor ist ein Gas und als solches giftig. Wird dem Fluor-Atom ein zusätzliches Elektron hinzugefügt, entsteht daraus das Fluorid-Ion, welches aus der Kariesprophylaxe bestens bekannt ist.

Röntgenstrahlen können Elektronen aus den Atomen «herausschiessen» und somit Ionen bilden. Röntgenstrahlen haben also eine ionisierende Wirkung, sie gehören zu den ionisierenden Strahlenarten.

2.4 Moleküle

Moleküle. bestehen aus mindestens zwei gleichen oder unterschiedlichen Atomen. Sie sind elektrisch neutral. Beispiele: H_2 , O_2 , O_3 , Cl_2/H_2O , CO_2 , CH_4 . Die genannten sind allesamt kleine Moleküle, Wasserstoff ist gar das kleinstmögliche Molekül. Fette, Proteine und Kohlenhydrate können hingegen aus Riesenmolekülen mit unzähligen Atomen bestehen.

2.5 Chemische Bindungsarten

Atome bewegen sich nicht frei in der Materie, sondern gehen mit andern Elementen Verbindungen ein. Es entstehen Moleküle, ionische oder metallische Verbindungen. Die zwei erstgenannten sind hier von Interesse, denn diese Verbindungen können durch die Röntgenstrahlen beeinflusst werden.

2.5.1 Molekulare Verbindung (Atombindung)

Molekulare Verbindungen werden aus Nichtmetall-Atomen gebildet. Hier gehen zwei elektrisch neutrale Atome eine Bindung ein. Die Bindung kommt zustande, indem die freien Elektronenplätze auf der äussersten Schale (Valenzelektronen) besetzt werden.

Als Beispiel dient uns hier das Wassermolekül H_2O . Das Molekül wird aus zwei Wasserstoffatomen (H) und einem Sauerstoffatom (O) gebildet.

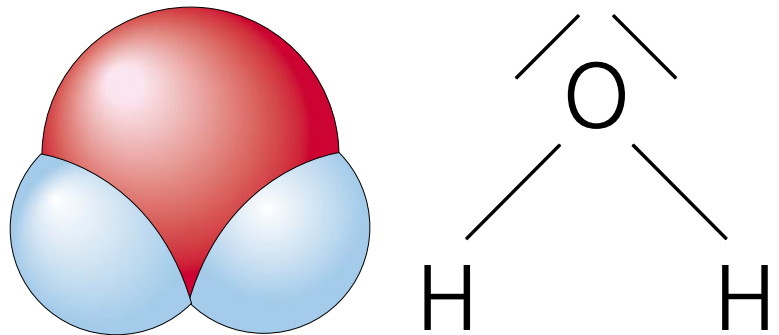


Abb. 10a, b: molekulare Verbindung von zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom ergibt die Verbindung «Wasser»

Jedes dieser Atome ist elektrisch neutral. Beim Sauerstoffatom befinden sich in der L-Schale 6 Elektronen. Da diese Schale aber bis zu 8 Elektronen aufnehmen kann, werden die freien Plätze durch jeweils ein Elektron des Wasserstoffatoms besetzt, und es entsteht das stabile Wassermolekül, wobei nun jedes der drei Atome die äusserste Schale maximal besetzt hat.

2.5.2 Ionenbindung (Salze)

Ionische Verbindungen entstehen aus Metallionen (pos. Ladung, Kation) und Nichtmetallionen (neg. Ladung, Anion). Zwei elektrisch entgegengesetzt geladene Ionen ziehen sich an, vergleichbar mit Magneten.

Ein allen bekanntes Beispiel ist das Natriumchlorid, besser bekannt als Kochsalz. Bei starker Vergrösserung werden die einzelnen Kochsalzkristalle sichtbar.



Abb. 11a, b: Kochsalzkristalle (Urheber: Christian Thiele)

Diese Kristalle haben ihre Form von ihrer Molekülstruktur, die wie folgt entsteht:

Dem Natrium (Na^+) fehlt ein Elektron (Kation), und das Chlorid (Cl^-) hat ein zusätzliches Elektron (Anion). Somit ziehen sie sich an.

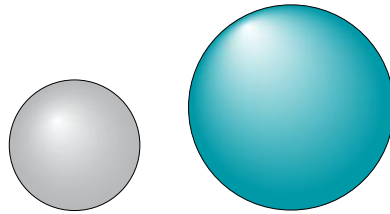


Abb. 12: Natrium-Ion und Chlorid-Ion

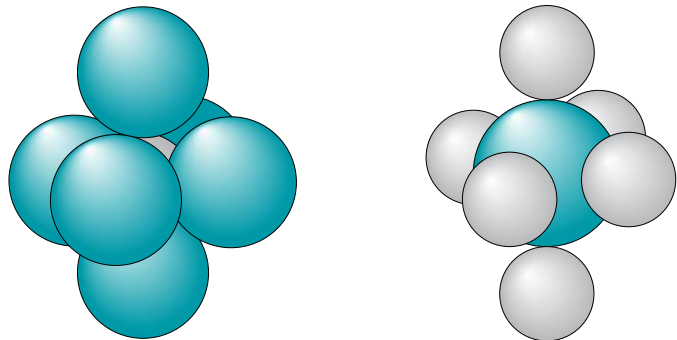


Abb. 13a, b: Ausschnitte aus dem Kochsalz-Ionengitter

Das Na^+ -Ion (im Zentrum) ist von mehreren Cl^- -Ionen umgeben

Das Cl^- -Ion ist von mehreren Na^+ -Ionen umgeben

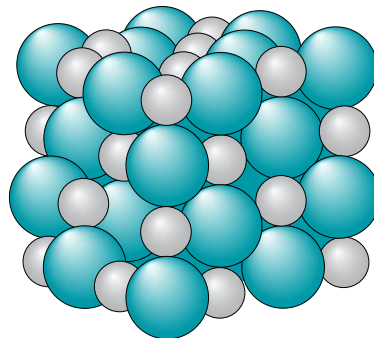


Abb. 14: Kochsalz-Ionengitter

Zusammen ergibt sich das Natriumchlorid-Ionengitter, das eine viereckige Struktur hat.

Somit können wir uns die Makrostruktur aus der Mikrostruktur, die durch Ionenbindung ihre Form annimmt, bestens erklären:

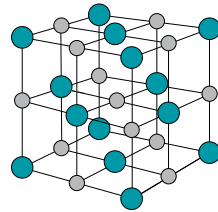


Abb. 15a–c: Kochsalzionengitter und Kochsalzkristalle

(BiPla 8.2.20, 8.2.21)

2.6 Ionisation

Wie oben erwähnt, können Röntgenstrahlen dank ihrer hohen Energie Elektronen aus dem Atomgefüge «herausschiessen» und Atome in Ionen umwandeln. Wegen dieser Eigenschaft heissen sie ionisierende Strahlen.

Andere Atome können diese herausgeschossenen Elektronen binden und werden somit selber zum Ion.

Alle Vorgänge, welche in einem Atom oder Molekül die Zahl der Elektronen verändern, werden Ionisation genannt. Durch die Ionisation entsteht eine Ladungsdifferenz zwischen Atomkern und der Atomhülle.

2.6.1 Anregung

Es kommt aber auch vor, dass die Elektronen innerhalb des Atoms von einer Elektronenschale auf eine andere «verschoben» werden, was als Anregung bezeichnet wird. Durch diese Elektronensprünge wird Energie freigesetzt.

Ionen und angeregte Atome verhalten sich im Gewebe anders als elektrisch neutrale Atome, insbesondere im Molekülverband. Daher reagieren bestrahlte Moleküle chemisch anders als nicht bestrahlte. Dies ist insbesondere wichtig bei den Molekülen der Erbinformation, die in jedem Zellkern unseres Körpers gespeichert ist. Träger der Erbinformation ist die DNS (englisch DNA). Werden Moleküle der DNS durch Röntgenstrahlen ionisiert, kann es zu Veränderungen der Erbinformation kommen. Solche Veränderungen können zur Entstehung von Krebszellen führen. Siehe hierzu auch Kapitel 4, Strahlenbiologie.

Merke

Röntgenstrahlen können wegen ihrer ionisierenden Wirkung die DNS in den Zellkernen verändern. Für gesundes Gewebe ist Ionisation eine schädigende Wirkung der Röntgenstrahlen.

2.7 Strahlung

2.7.1 Physikalische Grundbegriffe zu den Strahlen

Unter Strahlung versteht man den Transport von Energie in Form von Teilchen oder Wellen. Im Alltag benutzen wir täglich Gegenstände, die ohne Strahlung nicht funktionieren würden, wie z. B. das Handy, die Mikrowelle, Radio und Fernsehen oder Kunstlicht.

(BiPla 8.2.9) Die in der Strahlenphysik häufig benutzte Masseinheit der Energie ist das Elektronenvolt (eV)

Merke

Strahlung ist die Ausbreitung von Energie oder Materie.

Wir unterscheiden zwei Hauptgruppen von Strahlungen:

- Teilchenstrahlung: Korpuskuläre Strahlung
- Photonenstrahlung: Elektromagnetische Strahlung

(BiPla 8.2.5, 8.2.6)

2.7.2 Teilchenstrahlung

Sie transportiert Energie durch die Bewegung von geladenen und ungeladenen Teilchen, die Energie steckt in der Bewegung der transportierten Masse. Es handelt sich also um kinetische Energie. Die Masse ist dabei eigentlich sehr klein. Die Teilchenstrahlung ist eine ionisierende Strahlung und findet in der medizinischen Röntgentechnik keine Anwendung.

Die Teilchenstrahlung wird nach den Bestandteilen des Atoms benannt:

- Atomkerne: Alpha-Strahlen
- Protonen: Protonen-Strahlung
- Neutronen: Neutronen Strahlung
- Elektronen: Beta-Strahlen

2.7.3 Photonenstrahlung

Diese Strahlung nennt man auch elektromagnetische Strahlung. Sie hat im Gegensatz zur Teilchenstrahlung keine Masse.

Photonenstrahlung ist ein Energietransport in Form einer Welle aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern. Deshalb wird dieser Energietransport auch elektromagnetische Strahlung genannt. Die elektromagnetische Welle, auch Photonenstrahl genannt, breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Wie man sich eine solche «Doppelwelle» vorstellen kann, zeigt die folgende Abbildung:

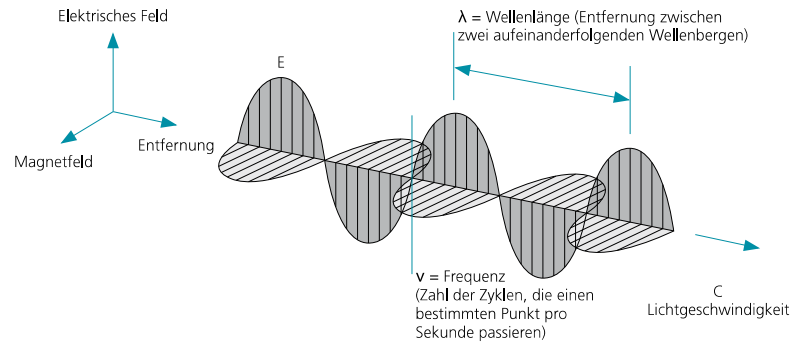


Abb. 16: Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Die Photonenstrahlen unterscheiden sich durch ihre Wellenlänge. Die Wellen haben Wellenberge und Wellentäler. Als messbare Grössen gelten die Höhe der Wellenberge und Wellentäler und der Abstand der Wellenberg-Spitzen.

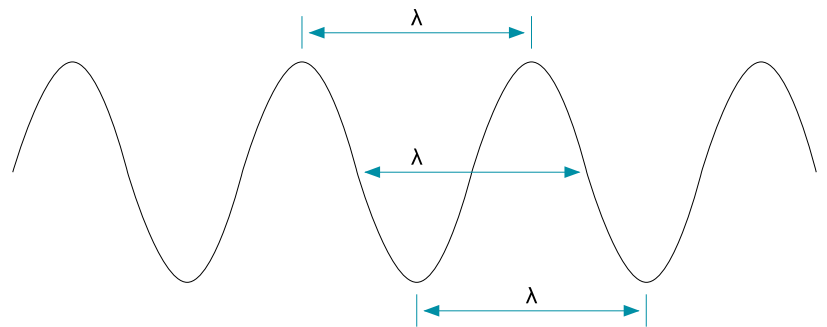


Abb. 17: Wellenlänge

Den Abstand der Wellenberge bezeichnet man als Frequenz. Je kleiner der Abstand der Wellenberge, desto mehr Wellenberge gibt es pro Zeiteinheit; je grösser der Abstand der Wellenberge, desto weniger Wellenberge gibt es pro Zeiteinheit. Dieser Abstand der Wellenberge wirkt sich auf die Energie der elektromagnetischen Welle aus. Schön erklärt finden Sie die elektromagnetische Welle im Teil Strahlenbiologie. Als wichtigste Punkte müssen aber die folgenden Zusammenhänge in Erinnerung gehalten werden:

Je kleiner die Wellenlänge

- desto grösser die transportierte Energie
- desto grösser die Durchdringungsfähigkeit
- desto härter die Strahlung

Je grösser die Wellenlänge

- desto geringer die transportierte Energie
- desto geringer die Durchdringungsfähigkeit
- desto weicher die Strahlung

Einteilung der Photonenstrahlung

Radiowellen	Langwellen, Kurzwellen, Mittelwellen, Funkwellen beim Handy
Radarwellen	Weterradar, Polizeiradar, Flugsicherung
Infrarot	Infrarotgrill, sichtbares Licht, Sonnenlicht, Regenbogen
UV-Licht	Hautbräune
Röntgenstrahlen	Röntgen
Kosmische Strahlen	Ultraharte Gammastrahlen (keine Anwendung!)

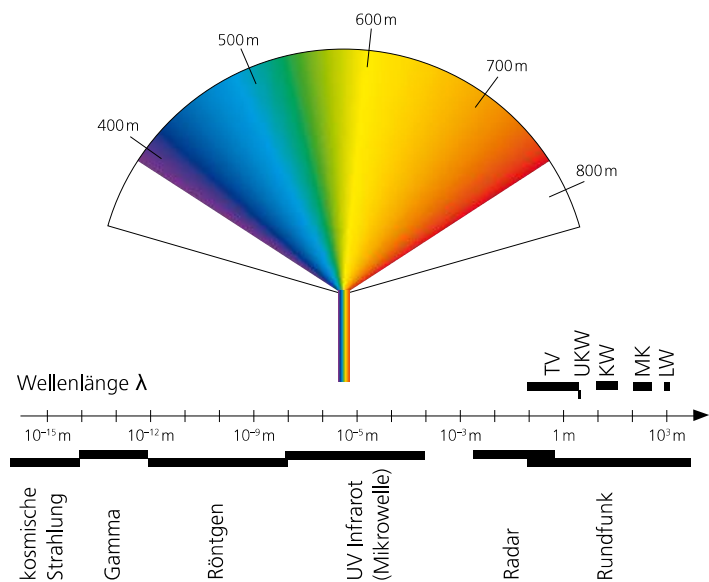


Abb. 18: Wellenlängen der Strahlen und Farbspektrum des sichtbaren Lichts

(BiPla 8.2.9)

Merke

Photonenstrahlen mit der Wellenlänge der UV-Strahlen oder kürzeren Wellenlängen sind ionisierend.

Selbstevaluationsfragen Kapitel 2

Erklären sie den Aufbau eines Atoms.

Was ist der Unterschied zwischen Atom und Ion?

Wie unterscheiden sich Kation und Anion?

Was passiert bei der Ionisation?

Definieren Sie den Begriff «Strahlung».

Nennen sie die beiden Strahlengruppen mit den entsprechenden Beispielen.

Was ist die Wellenlänge?

Erklären sie das Spektrum der elektromagnetischen Wellen.

Erklären sie den Unterschied zwischen ionisierenden und nicht ionisierenden Strahlen.

3. Der zahnärztliche Röntgenapparat

Mit dem Röntgenapparat bestrahlen wir unsere Zahnröntgenfilme ähnlich wie wir Filme beim Fotografieren belichten. Während beim Fotografieren Lichtstrahlen eingesetzt werden, benötigen wir zum Röntgen Röntgenstrahlen.

Wegen der Analogie zum Fotografieren hat sich die Redensart des «Belichtens» hartnäckig gehalten, obschon ja Röntgenbilder in Wirklichkeit keinesfalls belichtet, also Lichtstrahlen ausgesetzt werden dürfen. Auch in diesem Lehrmittel wird die Rede von «belichten» und von «Belichtungszeit» sein. Korrekt wäre, exponieren und Expositionszeit zu verwenden. Weitere Anmerkungen zu diesem Widerspruch im Kapitel 6.

Der Röntgenapparat beziehungsweise die Röntgenröhre stellt die notwendige Strahlung bereit.

3.1 Aufbau des Röntgenapparates

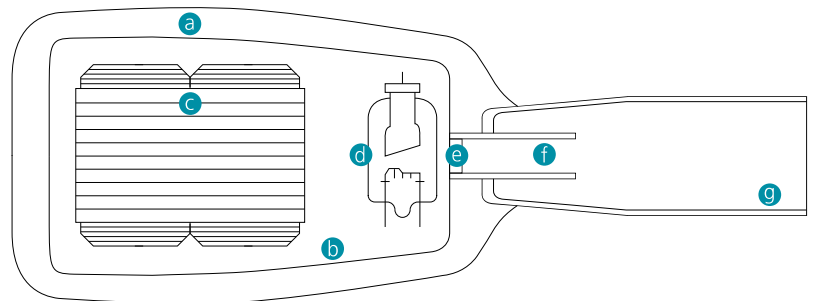


Abb. 19: Der Aufbau des Röntgenapparates

- a Schutzgehäuse
- b Ölbad
- c Transformator
- d Röntgenröhre
- e Aluminiumfilter
- f Bleiblende
- g Abstandstabus

Der Röntgenapparat besteht aus:

dem Schutzgehäuse

Das Schutzgehäuse besteht aus strahlendichtem Material. Die Strahlen können nur durch das Strahlenaustrittsfenster austreten und werden hier Nutzstrahlen genannt.

dem Transformator

Der Strom aus der Steckdose (220 Volt) wird in die notwendige elektrische Spannung umgewandelt (bis 100 kV).

dem Ölbad

Es dient zur elektrischen und thermischen Isolation. Beim Erzeugen der Röntgenstrahlen entsteht sehr viel Wärme, welche abgeleitet werden muss, sonst würde die Röntgenröhre schmelzen.

der Röntgenröhre

Eine Hochvakuumröhre, in der Röntgenstrahlen erzeugt werden.

dem Aluminiumfilter

Er ist am Strahlenaustrittsfenster montiert und filtert die weichen, langwelligeren Photonenstrahlen heraus. Die Röntgenröhre erzeugt ein breites Spektrum an Strahlen, bestehend aus kurzwelligeren bis langwelligeren Röntgenstrahlen.

Nur die kurzwelligeren, energiereicheren (härteren) Röntgenstrahlen durchdringen das Gewebe und treffen auf den Röntgenfilm, wo sie das Bild erzeugen. Die langwelligeren, energieärmeren (weicheren) Röntgenstrahlen erreichen den Röntgenfilm meistens nicht, da sie im Gewebe absorbiert (abgefangen) werden. Da sie somit den Röntgenfilm nicht belichten können, sind sie zur Bildgebung vollkommen unnützlich! Im Gewebe jedoch können sie Schäden verursachen. Daher müssen diese weichen, nicht bildwirksamen Strahlen abgefangen werden. Der Aluminiumfilter erfüllt diese Aufgabe.

der Bleiblende

Die röhrenförmige Bleiblende fokussiert den Nutzstrahl und bündelt diesen auf maximal 6 cm am Tubusende.

dem Abstandstubus

Der Abstandstubus stellt die richtige Distanz zum Patienten her. Die neuen Modelle besitzen einen Langtubus mit aufgesetzten Rahmenöffnungen in den Dimensionen der Röntgenfilme (siehe Kapitel «Strahlenschutz»).

3.2 Die Röntgenröhre

Die Röntgenröhre besteht aus einem geschlossenen Glaszylinder, in dem ein Hochvakuum produziert worden ist. In den Glaszylinder eingelassen sind ein dünner Glühdraht (Heizspirale, Kathode) und ein Anodenblock. Der Glühdraht wird am Strom angeschlossen, wodurch es zum Stromfluss im Glühdraht kommt. Stromfluss heisst aber nichts anderes als der Fluss von Elektronen. Je mehr der Strom nun aufgedreht wird, desto mehr Elektronen müssen durch den Glühdraht fließen. Je mehr Elektronen fließen, desto weniger Platz steht ihnen in dem dünnen Glühdraht zur Verfügung. Sie fangen an wie eine dichtgedrängte Menschenmenge an, sich gegenseitig zu bewegen und wegzustossen, wodurch sehr viel Energie (Kraft) entsteht. Diese Energie bringt den Draht dann zum Glühen. Im Glühdraht entsteht so viel Platzmangel für die Elektronen, dass einige von ihnen aus dem Glühdraht herausgespickt werden, um aber sogleich durch sehr starke physikalische Kräfte wieder in ihn zurückgezogen zu werden.

(BiPla 8.2.7, 8.2.8,
8.2.12)

Zwischen dem Glühdraht, der durch die Elektronen negativ geladen ist, und der Anode wird nun eine Hochspannung angelegt (Röhrenspannung), welche die Anode positiv auflädt. Je höher nun die Hochspannung zwischen Kathode (–) und Anode (+) wird, desto mehr wirkt eine (positive) Anziehungskraft auf (die negativen,) aus dem Glühdraht herausgestossenen Elektronen. Wenn diese Kraft (Hochspannung) grösser wird als jene, welche die Elektronen wieder in den Glühdraht zurückziehen will, werden sie vom Glühdraht weg in Richtung der Anode gerissen und bis auf 100 000 km/s beschleunigt. Mit dieser Geschwindigkeit prallen die Elektronen auf den Anodenteller, wo sie massiv abgebremst werden. Je grösser die Röhrenspannung, umso höher die Geschwindigkeit der Elektronen. Je höher die Geschwindigkeit der Elektronen, umso mehr Energie wird beim Aufprall auf den Anodenteller freigesetzt. Durch Wechselwirkungen mit den Wolframatomen des Anodentellers entstehen dann Röntgenstrahlen.

(BiPla 8.2.10)

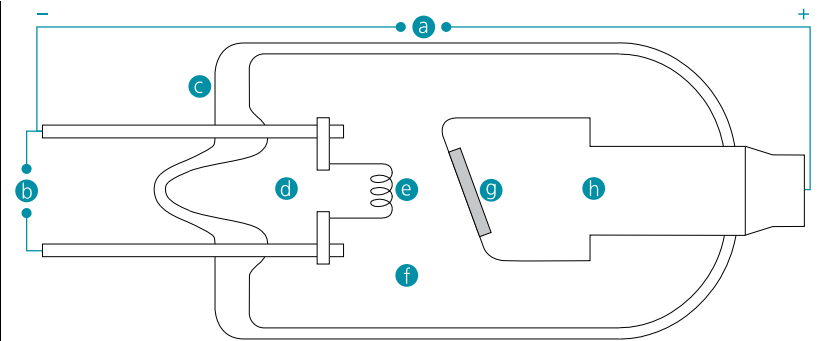


Abb. 20: Die Röntgenröhre

- a Röhrensorgung z. B. 70 kV
- b Heizspannung z. B. 15 V
- c Glaskolben
- d Kathode –
- e Heizspirale
- f Vakuum
- g Anodenteller (Wolframlättchen)
- h Anode + (Kupferblock)

(BiPla 8.2.12)

3.2.1 So wird ein Röntgenstrahl erzeugt

1. Schritt

Der Heizfaden der Kathode wird mit dem Heizstrom auf ca. 3000 Grad Celsius aufgeheizt und zum Glühen gebracht.

2. Schritt

Die Elektronen im Glühdraht bewegen sich heftig und verlassen die Drahtoberfläche, es entsteht eine Elektronenwolke.

3. Schritt

Zwischen Kathode (Minus-Pol) und Anode (Plus-Pol) wird die sehr hohe Röhrensorgung (Anodensorgung) angelegt.

4. Schritt

Die positiv geladene Anode zieht die negativ geladenen Elektronen mit grosser Kraft an. Die Elektronen prallen mit 100 000 km/s auf den Anodenteller auf.

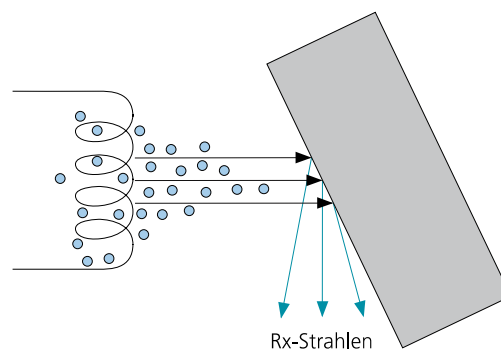


Abb. 21: Elektronen schiessen von der Kathode auf die Anode zu

5. Schritt

Beim Aufprall auf die Anode werden die Elektronen abrupt gebremst, und die hohe Bewegungsenergie wandelt sich in Wärme (99 %) und Röntgenstrahlen (1 %) um.

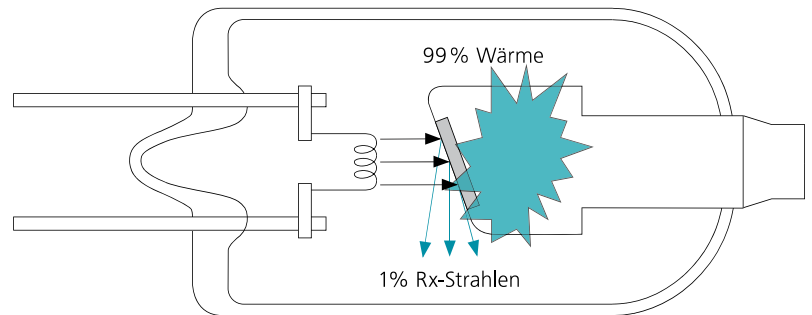


Abb. 22: Wirkungsgrad der Röntgenröhre

3.3 Voreinstellungen des Röntgenapparates

Um Zahnröntgenbilder, Fernröntgenaufnahmen und Orthopantomogramme in optimaler Qualität erzeugen zu können, müssen die Belichtungszeiten, die Kathodenheizung und die Röhrenspannung richtig eingestellt werden. Meist werden diese automatisch durch ein Auswahlmenü getätigt.

3.3.1 Belichtungszeit (s)

Je länger man belichtet, umso mehr Strahlen werden in der Röntgenröhre erzeugt. Wenn mehr Strahlen auf den Patienten und den Film treffen, wird auch der Film schwärzer. Also: Je länger die Belichtungszeit, umso dunkler wird das Bild. Je kürzer die Belichtungszeit, umso heller wird das Bild. *Durch Verändern der Belichtungszeit wird die Strahlenqualität nicht beeinflusst.*

3.3.2 Kathodenheizung (mA)

Je grösser der Heizstrom für die Kathodenheizung ist, umso mehr freie Elektronen werden bewegt. Somit werden mehr Strahlen in der Röntgenröhre erzeugt. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Elektronen zur Anode hin bewegen, wird durch den Heizstrom nicht verändert. Somit nimmt die Strahlendosis durch Erhöhen des Heizstromes zu, *die Strahlenqualität bleibt davon aber unbeeinflusst.*

3.3.3 Röhrenspannung (kV)

(BiPla 8.2.8., 8.2.13)

Wenn die Röhrenspannung, also die Spannung zwischen Anode und Kathode erhöht wird, werden mehr Elektronen vom Glühdraht weggerissen, die zudem mit grösserer Geschwindigkeit und folglich mit höherer Energie auf das Wolframplättchen der Anode aufprallen. Es entstehen dadurch mehr Röntgenstrahlen, die zudem energiereicher (kurzwelliger) und darum durchdringungsfähiger sind. Erhöhen der Röhrenspannung erhöht folglich nicht nur die Dosis, sondern beeinflusst auch die Strahlenqualität, indem die Röntgenstrahlhärte ebenfalls zunimmt.

3.4 Strahlenqualität

Bei der Strahlenqualität wird von harter und weicher Strahlung gesprochen. Dabei wird die Menge der Energie bewertet, welche transportiert wird. Folgende Abhängigkeiten sind wertend dabei:

Harte Strahlung

- energiereicher
- kurzwelliger
- durchdringungsfähiger

Weiche Strahlung

- energieärmer
- langwelliger
- weniger durchdringungsfähig

3.4.1 Durchdringungsfähigkeit

Die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen hängt von deren Wellenlänge und von der Beschaffenheit des durchstrahlten Gewebes ab.

(BiPla 8.2.13, 8.2.14)

Dabei sind die Schleimhaut, das Fettgewebe und die Gingiva sehr durchlässig, während es die Strahlen bei Knochen und Dentin schon schwerer haben. Noch schwerer durchdringen lässt sich der Zahnschmelz. Am wenigsten von Röntgenstrahlen durchdringbar sind Metalle. Gold, Amalgam, Stahl und Titan sind sehr häufig in der Mundhöhle vorkommende zahnärztliche Werkstoffe und erschweren die Röntgendiagnostik.

(BiPla 8.2.15, 8.2.16)

3.5 Der Brennfleck (Fokus)

Jene Stelle auf dem Anodenteller wo die Elektronen aufprallen, wird Brennfleck oder Fokus genannt. Durch die Abschrägung des Anodentellers wird der Brennfleck optisch verkleinert, was zur Verbesserung der Bildqualität dient. Vom Fokus breiten sich die dort erzeugten Röntgenstrahlen aus. Genau genommen ist der Fokus nur der Mittelpunkt des Brennflecks, also der Brennpunkt. Beide Begriffe werden einander aber der Einfachheit halber häufig gleich gesetzt. Siehe auch Kapitel 7 Einstelltechnik.

(BiPla 8.2.17) **3.6 Abstands-Quadratgesetz**

Mit zunehmender Entfernung wird die Strahlenmenge pro Flächeneinheit immer kleiner.

Wird der Abstand von der Strahlenquelle verdoppelt, verringert sich die Strahlenintensität auf einen Viertel. Je näher das Objekt und der Röntgenfilm an der Strahlenquelle platziert werden, umso grösser ist die Strahlenintensität, die auf sie einwirkt. Diese Gesetzmässigkeit wird Abstands-Quadratgesetz genannt.

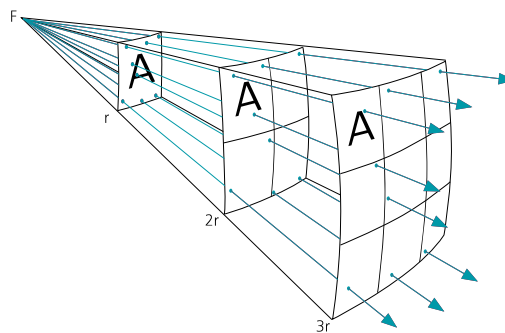


Abb. 23: Abstands-Quadratgesetz: Die Strahlenintensität nimmt mit dem Quadrat der Entfernung von der Strahlenquelle ab.

(BiPla 8.2.18) **3.7 Wechselwirkungen zwischen ionisierenden Strahlen und Materie**

Als kurzwellige Photonenstrahlen besitzen Röntgenstrahlen eine hohe Energie. Beim Durchdringen der Materie gibt es drei Möglichkeiten der Wechselwirkung zwischen den Röntgenstrahlen und der Materie. Dies geschieht stets auf der Ebene der Atome:

Transmission

Das Röntgenphoton rast ohne Kollision, d. h. ohne Ablenkung zwischen den einzelnen Elektronenschalen durch die Materie. Dabei findet keine Wechselwirkung statt. Es ist sozusagen «ein glatter Durchschuss».

Absorption

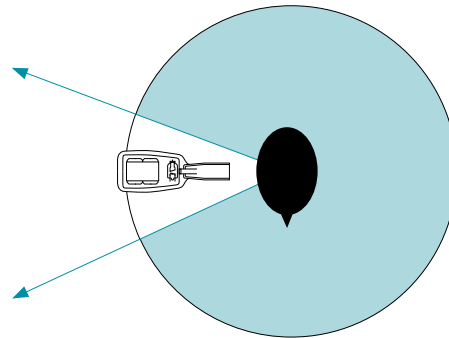
Das Röntgenphoton kollidiert mit Atomen der jeweiligen Materie. Dabei gibt es seine gesamte Energie in der Materie ab. Der Röntgenstrahl «bleibt stecken».

Streuung

Röntgenphotonen streifen Atome der jeweiligen Materie, so dass die Strahlenrichtung der Photonen verändert wird. Dadurch werden sie mehr oder weniger gestreut.

3.8 Streustrahlung

Bei einer Röntgenaufnahme am Menschen prallt ein Teil der Röntgenstrahlen im Gewebe ab und wird gestreut. Die Strahlen werden kegel-mantelförmig vom Patienten gestreut, wobei sich in einem Winkel von 45 Grad hinter dem Röntgenapparat keine Streustrahlen befinden. In diesem Winkel sollten Sie sich in einem Mindestabstand von 2 m befinden, wenn Sie den Raum nicht verlassen können.



ca. 97 % der Strahlen
werden im Gewebe
absorbiert
ca. 1 % wird gestreut
ca. 2 % zeichnen das Bild

Abb. 24: Streustrahlung, «toter Winkel» hinter Röntgenapparat

3.9 Ionisation und Anregung

Der Röntgenstrahl kann mit seiner hohen Energie ein Elektron aus einem Atomverband herausschiessen. Dabei wird das Atom zum Ion verändert und bringt dabei das gesamte chemische Gefüge der durchstrahlten Materie durcheinander. Die Folgen davon sind in Kapitel 2 und 4 beschrieben.

Selbstevaluationsfragen Kapitel 3

Benennen sie auf einer Schnittzeichnung den Aufbau des Röntgenapparates und die Funktion der einzelnen Teile.

Beschreiben sie die Bauteile der Röntgenröhre.

Wie entstehen Röntgenstrahlen? Beschreiben sie die einzelnen Vorgänge.

Was ist der Fokus und aus was besteht seine Aufgabe?

Wie breiten sich Röntgenstrahlen aus?

Wie kann beim zahnärztlichen Röntgenapparat die Strahlendosis verändert werden?

Wie kann beim zahnärztlichen Röntgenapparat die Strahlenqualität verändert werden?

Womit wird die Ausbreitungsrichtung der Röntgenstrahlen beeinflusst?

Beschreiben Sie die möglichen Wechselwirkungen zwischen Röntgenstrahlen und Gewebe.

Nennen sie den Winkel der Streurichtung von Röntgenstrahlen.

Wenn die Strahlenintensität in zwei Metern Abstand von der Strahlenquelle = x ist, wie viel beträgt sie in einem Meter, wie viel in vier Metern Abstand?

4. Strahlenbiologie

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen. Wir können sie mit keinem unserer Sinne wahrnehmen. Obwohl wir sie weder sehen, hören oder fühlen können, sind Kenntnisse über die Wirkung der Energie, welche sie transportieren, für uns von grosser Bedeutung. Diese Kenntnisse erlauben es, Röntgenstrahlung sinnvoll zu nutzen. Sie bewahren uns vor möglichen Strahlenschäden.

Die Strahlungsenergie ändert sich mit der Länge der elektromagnetischen Welle – je länger die Welle ist, desto geringer ist ihre Energie und je kürzer die Welle, desto höher ihre Energie. Dies lässt sich durchaus mit dem Beispiel einer Wasserwelle verdeutlichen, auch wenn dies nicht ganz das Gleiche ist. Eine am Strand badende Person empfindet die Energie einer seichten Welle anders als die Energie einer vom Sturm aufgepeitschten Meereswelle.

Damit wird sofort verständlich, dass sich auch die Eigenschaft, welche die Welle einer bestimmten Energie besitzt, ändert. Wir machen davon im Alltag regen Gebrauch: Wir können mit Langwellen, Mittelwellen und Kurzwellen Radio hören, wir können mit Mikrowellen kochen, wir können durch elektromagnetische Wellen sehen. In diesem Energiebereich sind elektromagnetische Wellen somit angenehm und nutzbringend.

Ab einer bestimmten Energie beginnen sie jedoch, für uns gefährlich zu werden. Wir kennen das schmerzlich vom Sonnenbrand, den wir durch UV-Strahlen erleiden.

Röntgenstrahlen sind Wellen hoher Energie, die jenseits der Energie der Wellen des sichtbaren Lichtes sind. Sie sind so stark, dass sie in Körpergewebe eindringen und/oder Körpergewebe durchdringen können, wobei es möglich ist, dass sie im Körper biologische Schäden verursachen.

Die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen haben wir zur Erstellung von Röntgenaufnahmen zu nutzen gelernt. Es wird aber bereits jetzt klar, dass wegen der Ionisation Röntgenaufnahmen nicht beliebig, sondern stets erst nach strenger Nutzen/Risiko-Analyse angefertigt werden dürfen. Grosse Bedeutung hat die Anwendung von Röntgenstrahlen auch bei der Therapie von Tumoren. Ausserdem werden sie auch zur Sterilisation von medizinischen Einwegartikeln verwendet (z. B. OP-Handschuhen).

(BiPla 8.2.19) Strahlendurchlässigkeit der Gewebe und zahnärztlichen Werkstoffe:

Gewebe / Werkstoff	Strahlendurchlässigkeit
Knochen	gering
Weichteile, Hohlorgane	hoch
Metalle	sehr gering
Keramik, Kunststoff	mittel bis hoch, abhängig von chemischer Zusammensetzung

(BiPla 8.2.22)

4.1 Schädigende Wirkung von Röntgenstrahlen (Strahlenschäden)

(Siehe auch BiPla 2.4.2 Ursache von Krankheiten)

Durch ihre hohe Energie sind Röntgenstrahlen *biologisch aktiv*, d. h., sie haben eine schädigende Wirkung auf lebende Organismen.

Diese Wirkung beruht auf zwei Mechanismen:

1. *direkte Wirkung* durch Ionisation oder Anregung von Atomen in der genetischen Erbsubstanz
2. *indirekte Wirkung* durch die Ionisation und Spaltung von Wasser sowie Bildung aggressiver chemischer Verbindungen, den *Peroxiden*

4.1.1 Direkte Wirkung

(BiPla 8.2.20, 8.2.21)

Trifft ionisierende Strahlung auf die Zellen eines Organismus, können Veränderungen (Mutationen) der Erbinformation (DNA) in den Zellkernen auftreten. Normalerweise werden diese Mutationen durch spezialisierte Mechanismen in den Zellkernen repariert. Findet eine falsche oder keine Reparatur statt, kommt es zu fatalen Konsequenzen.

Mögliche Folgen für bestrahlte Zellen sind:

- *Zelltod*: Die Zelle verliert ihre Teilungsfähigkeit und stirbt.
- *Zellveränderung*: Die Zelle teilt sich, vererbt aber die veränderte Erbinformation (DNS) an die Tochterzellen weiter.

4.1.2 Indirekte Wirkung

Das Wasser (H_2O) in Zell- und Gewebsflüssigkeit wird durch die Ionisation gespalten (OH und H), wodurch aggressive chemische Verbindungen, die *Peroxide* entstehen. Diese lösen chemische Reaktionen aus, welche Zellen oder Zellorganellen beschädigen und so *indirekt* zum Funktionsverlust der Zelle oder ganzer Zellverbände führen.

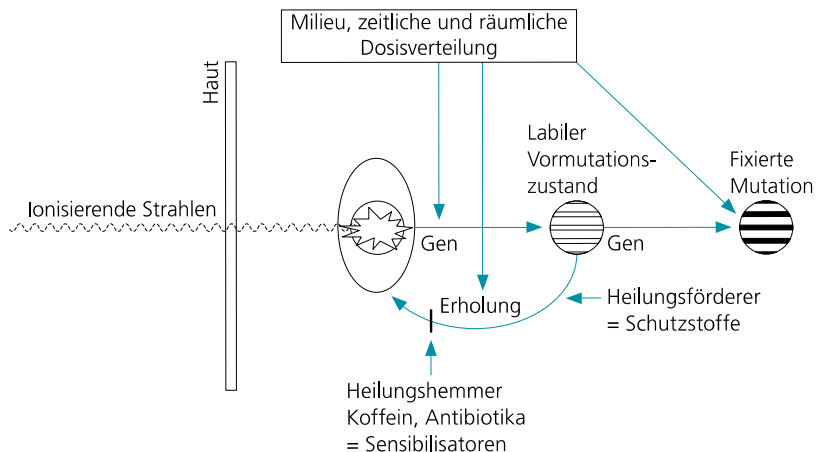


Abb. 25: Direkte Treffer

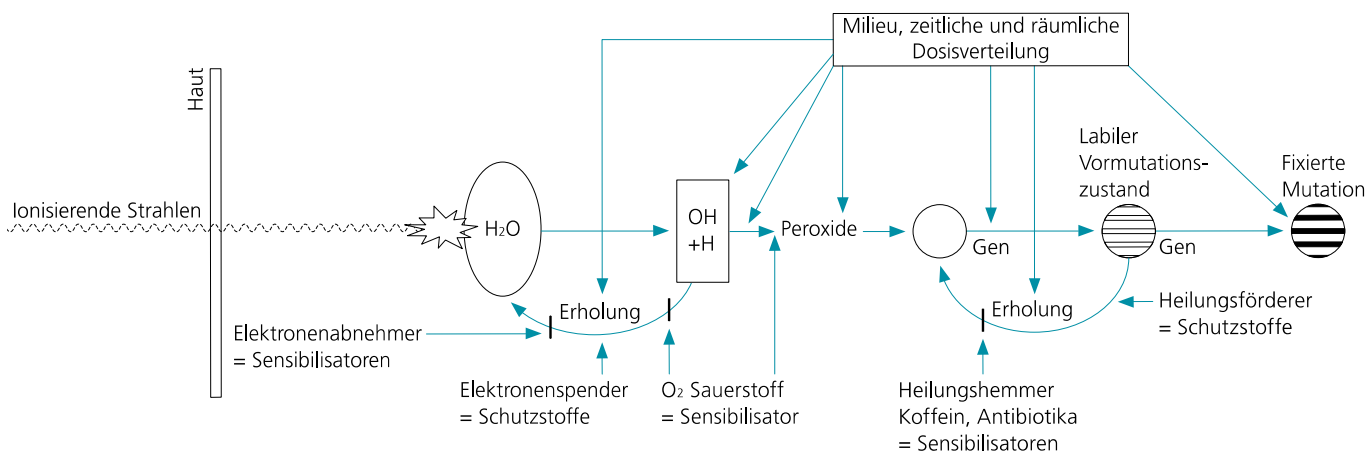


Abb. 26: Peroxidbildung

4.2 Repetition Zellbiologie

4.2.1 Die Zelle

Die Zelle ist die kleinste lebende Einheit aller Organismen und hat ein hochdifferenziertes Innenleben.

Sie besteht aus einem Zellkörper mit einer Zellmembran. Im Zellkörper befinden sich die Zellflüssigkeit mit den Zellorganellen und ein Zellkern, der von einer Kernmembran umhüllt ist.

Zellen differenzieren sich in einem Reifungsprozess zu verschiedenen Zelltypen (Muskel-, Fett-, Haut-, Blut-, Samenzellen, usw.)

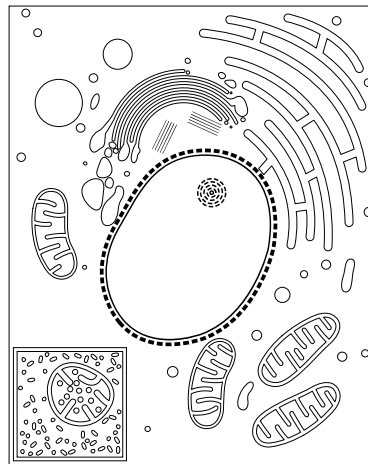


Abb. 27: Beispiel einer menschlichen Zelle

4.2.2 Wirkung von Röntgenstrahlen auf den Zellkern sowie auf die Zellteilung

Zellkern

Im Zellkern befinden sich die *Erbinformationen*. Es sind dies die «Baupläne» der Zelle und damit des Lebens. Bei der Zellteilung werden diese Baupläne kopiert. So wird gewährleistet, dass zwei neue Zellen mit den gleichen Funktionen und Erbinformationen entstehen. Diese Erbinformation ist auf langen Nukleinsäureketten, der *DNS* (*Desoxyribonukleinsäure*) gespeichert.

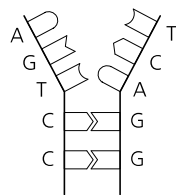


Abb. 28: DNS

Zellteilung

Bei der Zellteilung teilt sich auch der Zellkern und die darin enthaltenen Nukleinsäureketten brechen geordnet auseinander, wie bei einem Reissverschluss (siehe Darstellung). Die freien Enden werden sofort wieder mit den richtigen Nukleinsäuren besetzt. Mit diesem Prinzip verdoppeln sich die Erbinformationen im Normalfall fehlerfrei. Die Zelle beherrscht Reparaturmechanismen (Enzyme), welche bei einem Fehler in den Nukleinsäureketten gewährleisten, dass der Fehler korrigiert wird.

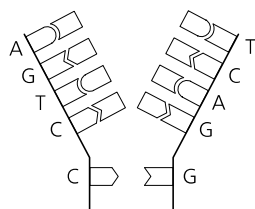


Abb. 29: DNS bei Zellteilung

4.2.3 Veränderung der Erbinformation (Genmutation)

(BiPla 8.2.21) Bei einem direkten Treffer durch Röntgenstrahlen können ganze Teile der Nukleinsäurenketten durch Ionisation beschädigt werden (Genschaden). Die Zelle besitzt nun keine korrekten Baupläne mehr. Die Reparatur kann nicht mehr korrekt erfolgen, und die Zelle gibt die falsche Erbinformation an ihre Tochterzellen weiter.

Beispiele von Folgen der Genmutation in verschiedenen Geweben:

- Hautzellen → Mutation → Hautkrebs
- Knochenmarkszellen → Mutation → Leukämie
- Eizelle/Spermazelle → Mutation → Fehlbildungen beim Embryo

(BiPla 8.2.24) *Im Moment der Zellteilung ist eine Zelle gegenüber ionisierender Strahlung besonders empfindlich. Gewebe mit einer hohen Zellteilungsrate sind also besonders strahlenempfindlich und anfällig auf Strahlenschäden!*

Je jünger und undifferenzierter das Gewebe ist, und je mehr teilungsfähige Zellen es hat, umso strahlenempfindlicher ist es!

(BiPla 8.2.23) 4.2.4 Strahlenempfindlichkeit verschiedener Gewebe

Strahlensensibel	Blutbildende Systeme (Knochenmark) Lymphatisches System (Milz, Thymus) Schilddrüse Embryo Darmschleimhaut Gonaden Augenlinse
------------------	--

Mässig sensibel	Lunge Auge (ausser Linse)
-----------------	------------------------------

Mässig resistent	Haut Leber Niere
------------------	------------------------

Sehr strahlenresistent	Herz, Muskulatur Nerven, inkl. adultes Gehirn Binde- und Stützgewebe
------------------------	--

4.3 Einteilung der Strahlenschäden

Wird ein Organismus von Strahlung getroffen, so ist er der Strahlung ausgesetzt (exponiert). Strahlenexpositionen werden nach *örtlichen Folgen* an einem Organ oder *allgemeinen Folgen* am gesamten Organismus unterschieden.

4.3.1 Örtliche Folgen

Akute Überexposition

- Röntgenverbrennung (Rötung bis Blasen)
- Missbildungen am Embryo
- Mutationen

Chronische Überexposition

- Röntgengeschwür (Ulkus), Röntgenkrebs der Haut

4.3.2 Allgemeine Folgen

Akute Überexposition

- Akute Strahlenkrankheit (Übelkeit, Schwindel, Haarausfall, Fieber, Diarrhoe)
- Strahlentod
- Mutationen
- Leukämie (Blutkrebs)

Chronische Überexposition

- Leukämie

(BiPla 8.2.26)

Gewisse Schäden treten nach einer bestimmten Strahlenbelastung «mit Sicherheit» auf (z. B. Strahlenkater).

Mit steigender Strahlendosis erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass Schäden auftreten (z. B. Leukämie, Mutationen).

Diese Eigenschaften werden mit den Begriffen *deterministische* und *stochastische* Strahlenschäden beschrieben.

4.4 Deterministische Schäden

Bei diesen Schäden ist der Schweregrad der Schädigung direkt von der Strahlendosis abhängig, d. h. *je höher die Dosis, desto grösser der Schaden*.

Dabei lassen sich Schwellenwerte festlegen, unterhalb derer keine Schäden auftreten.

Beispiel

Wird ein Hals-Nasen-Ohren-Tumor mit 50 Gy bestrahlt, nehmen die Speicheldrüsen irreparablen Schaden, und es kommt zu einer lebenslangen Xerostomie (Mundtrockenheit). Wird der Tumor nur mit 20 Gy bestrahlt, bleiben die Speicheldrüsen intakt.

4.5 Stochastische Schäden

Mit zunehmender Strahlendosis steigt die *Wahrscheinlichkeit*, dass ein Zufallstreffer das Gewebe ionisiert. Die Stochastik (Wahrscheinlichkeitsrechnung) berechnet dabei die Wahrscheinlichkeit der schädlichen Treffer, die bei einer gewissen Dosis auftreten. *Es gibt dabei keinen Schwellenwert!* Entweder es erfolgt ein Schaden oder nicht. Mit steigender Dosis nimmt auch die Wahrscheinlichkeit eines Schadens zu.

Beispiel

In der Schweiz ist nach dem Atomunfall von Tschernobyl das Risiko, an Krebs zu erkranken, um 0,002–0,01 % des Normalwertes gestiegen.

Exponieren Sie sich und Ihre Patienten niemals unnötigerweise der Röntgenstrahlung – auch kleinste Strahlenmengen summieren sich im Laufe des Lebens (chronische Überexposition).

Es gilt das so genannte ALARA-Prinzip! «As Low As Reasonably Achievable» (englisch für «so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar»).

4.6 Einteilung nach dem Schadenswirkungsort

Hier unterscheidet man grundsätzlich drei Arten von Strahlenschäden, die *somatischen*, die *teratogenen* und die *genetischen* Schäden.

4.6.1 Somatische Schäden

(BiPla 8.2.25)

Dies sind Schäden am Organismus (griech. Soma = Körper) des bestrahlten Menschen, z. B. Leukämie, Trübung der Augenlinse, u. a.

4.6.2 Teratogene Schäden

Dies ist ein Spezialfall der somatischen Strahlenschäden: Wird eine schwangere Frau bestrahlt, so können Schäden am ungeborenen Kind auftreten. Die Zellen des Embryos befinden sich in ständiger Teilung. In den drei Hauptphasen der embryonalen Entwicklung gelten folgende Regeln:

- *0.–9. Tag:* eine Dosis von über 100 mSv bewirkt einen *Spontanabort*. Die Strahlenempfindlichkeit in dieser Phase ist sehr hoch. Der Organismus wehrt sich mit einem Alles-oder-nichts-Prinzip.
- *10.–60. Tag:* es kommt zu Organmissbildungen.
- *61. Tag bis Geburt:* die wesentlichen Differenzierungsvorgänge sind abgeschlossen. Es besteht die Möglichkeit, dass z. B. eine frühkindliche Leukämie ausgelöst wird.

Cave!

- Eine schwangere Frau darf nicht geröntgt werden, wenn keine lebensbedrohende Situation vorliegt.
- Jede Frau im gebärfähigen Alter muss *vor der Röntgenaufnahme* nach einer bestehenden Schwangerschaft gefragt werden!
- Bei Unsicherheit wird nicht geröntgt!

(BiPla 8.2.25, 8.2.26,
8.2.27)

4.6.3 Genetische Schäden

Genetische Schäden sind Veränderungen an der Erbsubstanz der Keimzellen. Sie werden auch als Genmutationen bezeichnet. Sie wirken sich – unter Umständen erst nach Generationen – auf die Nachkommen aus.

Zur Erinnerung: nicht jede Veränderung am Erbmateriale führt zu einer Mutation. Die Reparaturmechanismen der Zellen reparieren Millionen von Zellsträngen.

Selbstevaluationsfragen Kapitel 4

Erklären Sie, weshalb Röntgenstrahlen gefährlich sind.

Welche Wirkung haben Röntgenstrahlen auf lebendes Gewebe?

Nennen Sie mögliche Strahlenschäden.

Beschreiben Sie die direkte und indirekte Strahlenwirkung auf die DNS.

Erklären Sie den Unterschied zwischen Strahlendurchlässigkeit und Strahlenempfindlichkeit von Geweben.

Ordnen Sie die verschiedenen Zellarten bzw. Gewebe nach ihrer Strahlenempfindlichkeit ein.

Ordnen Sie die möglichen Strahlenschäden nach der Art ihres Auftretens zu (stochastisch und deterministisch).

Erläutern Sie die Grundregeln zum Verhindern von teratogenen Schäden.

Nennen Sie mögliche Strahlenschäden einer Dentalassistentin bei unsachgemäßem Umgang mit Röntgenstrahlung.

Ordnen Sie die möglichen Strahlenschäden nach ihrem Wirkungsort zu.

5. Strahlenschutz

(BiPla 8.2.1) In der Schweiz liegt die Verantwortung für den Strahlenschutz beim Bund. Zuständig ist das Departement des Innern (EDI), Bewilligungs- und Aufsichtsbehörde für den Bereich Medizin ist das *Bundesamt für Gesundheit* (BAG).

Als Rechtsgrundlage dient das *Strahlenschutzgesetz* (StSG), welches jegliche Röntgentätigkeit regelt.

Das Strahlenschutzgesetz basiert auf den *drei Grundsätzen*:

- *Rechtfertigung*: jede Strahlenexposition soll durch einen gezielten Nutzen gerechtfertigt sein (richtige Indikationsstellung).
- *Optimierung*: jede gerechtfertigte Strahlenexposition soll so niedrig wie möglich gehalten werden (ALARA-Prinzip: «As Low As Reasonably Achievable»).
- *Dosisgrenzwerte*: für einzelne Personengruppen wurden Dosisgrenzwerte festgelegt, welche nicht überschritten werden dürfen.

Für den Umgang mit ionisierender Strahlung braucht es eine Bewilligung des BAG. Der Gesuchsteller (z.B. Zahnarzt) muss das nötige Sachverständnis nachweisen können. Er muss dafür eine vom BAG anerkannte Ausbildung als Strahlenschutz-Sachverständiger absolvieren. Ist die Bewilligung erteilt, prüft die Aufsichtsbehörde durch regelmässige Kontrollen, ob der Inhaber der Bewilligung seinen Pflichten nachkommt.

(BiPla 8.2.2, 8.2.4)

5.1 BAG-Vorschriften für die Verwendung von Röntgenapparaten bis 70 kV in der Zahnheilkunde

(Röntgenverordnung vom 20.1.1998, EDI)

1. Röntgenanlagen dürfen in der Zahnheilkunde nur für Aufnahmen im Bereiche der Kiefer verwendet werden.
2. Drittpersonen haben sich während der Aufnahme nicht in unmittelbarer Nähe des Patienten aufzuhalten, wenn dies nicht aus zwingenden Gründen notwendig ist (siehe 4.).
3. Die den Apparat bedienenden Personen sollen sich bei allen Aufnahmen ausserhalb der Nutzstrahlrichtung in einer Entfernung von mindestens 2 Metern von Röhre und Patient aufhalten.
4. Wenn ein Zahnfilm ohne Halter verwendet wird, soll der Patient den Film selber im Mund festhalten. Ausnahmsweise erlaubt ist, dass Drittpersonen (z. B. Eltern) den Film halten, dabei müssen sie eine geeignete Schutzschürze tragen.
5. Bei Aufnahmen muss der Patient mit einer Schutzschürze, Umhang oder Schutzschild (Bleiäquivalent 2,5 mm) zum Schutz der vorderen Körperpartien (Schilddrüsen, Gonaden) tragen, der Halsansatz der Schürze muss anpassbar sein.

Der grösste Anteil der Strahlung ausserhalb des Nutzstrahlenfeldes stammt allerdings aus Streustrahlung, welche im Körper selbst entsteht. Aus diesem Grund wird die Wirkung der Bleischürze oft überschätzt.
6. Alle Bilder müssen mit dem durch einen geeigneten Tubus gegebenen Abstand zwischen Haut und Fokus aufgenommen werden: bis 60 kV, 10 cm, ab 60 kV, 20 cm
7. Der Zahnarzt oder der Leiter der zahnärztlichen Institution ist verpflichtet, seine Mitarbeiter über die Gefahren, welche mit einer zu grossen Strahlenexposition verbunden sind, aufzuklären. Er ist für das Befolgen der Vorschriften verantwortlich.

8. Bei den zahnärztlichen Kleinröntgenanlagen bis zu 70 kV ist das Protokollieren von Expositionsdaten freiwillig.

(BiPla 8.2.3) *Zulässige Röntgentätigkeiten für die Dentalassistentin*

Zulässig ist die Bedienung zahnmedizinischer Röntgenanlagen unter der Leitung eines sachverständigen Zahnarztes. Es sind nur Aufnahmen im Bereich des Gesichtsschädels erlaubt.

(BiPla 8.2.2) **5.2 Qualitätskontrolle und Konstanzprüfung der Röntgenanlagen**

Vor Inbetriebnahme einer Röntgenanlage erfolgt eine Abnahmeprüfung durch eine Röntgenfirma. Danach gelten gemäss Strahlenschutzverordnung folgende Bestimmungen für die Qualitätskontrolle:

Alle 6 Jahre muss an sämtlichen zahnärztlichen Röntgengeräten eine Zustandsprüfung durch eine konzessionierte Röntgenfirma durchgeführt werden.

Alle 10 Jahre wird die Bewilligung für die gesamte Röntgenanlage vom BAG erneuert, falls keine Beanstandungen bestehen.

5.2.1 Konstanzprüfung der Filmverarbeitung

(BiPla 8.2.45, 8.1.16)

Der Betreiber einer konventionellen Entwicklereinrichtung ist verpflichtet, *wöchentlich* mit stets der gleichen Röntgenanlage, den gleichen Einstellungen und dem gleichen Prüfkörper (siehe weiter unten) eine *Kontrollaufnahme* anzufertigen, um die Filmverarbeitung der Entwicklereinrichtung zu prüfen. Das Kontrollbild wird anschliessend archiviert.

Treten Abweichungen zum Urbild auf, müssen verschiedene Faktoren überprüft werden (Filmlagerung, Entwickler, Entwicklertemperatur, Dunkelkammerbeleuchtung, Tageslichtvorsatz, Lichteinfall).

Lassen sich die Abweichungen nicht korrigieren, so muss eine Röntgenfirma die Entwicklereinheit kontrollieren.

Sind mehrere Entwicklereinheiten in Betrieb, muss jede einzeln überprüft werden.

Werden einzelne oder alle Produkte (Röntgenfilm, Entwickler, Fixierer) ausgetauscht, so muss grundsätzlich ein neues Urbild der Anlage angefertigt werden.

5.2.2 Konstanzprüfung der Röntgenapparate

Alle in der Praxis vorkommenden Röntgengeräte sind jährlich mit Hilfe eines Prüfkörpers zu kontrollieren. Bei dieser Kontrolle wird auch das Nutzstrahlenbündel kontrolliert (Breite des Halbmondes auf dem Film).

Treten Abweichungen zum Urbild auf, müssen wie bei der Filmverarbeitung verschiedene Faktoren überprüft werden (Expositionszeit, Strahlendosis). Lassen sich die Abweichungen nicht korrigieren, muss eine Röntgenfirma zur Kontrolle beigezogen werden.

Werden einzelne Teile der Anlage ersetzt, muss eine neue Abnahmeprüfung der Anlage erfolgen.

Sind mehrere Anlagen in Betrieb, muss jedes Gerät einzeln geprüft werden.

(BiPla 8.2.40) Für jedes Gerät wird ein *Anlagenbuch* geführt, das folgende Unterlagen enthält:

- Bewilligungsgesuch
- Bewilligung des BAG
- Ergebnisse der Zustandskontrollen
- Protokolle der Abnahme-, Konstanz-, Wartungs- und Zustandsprüfungen sowie der Strahlenschutz-Nachkontrollen

5.2.3 Konstanzprüfung digitaler Bildplatten

Der Betreiber eines digitalen Bildsystems ist verpflichtet, alle *drei Monate* mit stets der gleichen Röntgenanlage, den gleichen Einstellungen und dem entsprechenden Prüfkörper eine Kontrollaufnahme anzufertigen, um die genaue Wiedergabe der Kontrastbohrungen und Linienpaaren auf dem Prüfbild auf ihre Erkennbarkeit und Vollständigkeit zu überprüfen (siehe weiter unten).

5.2.4 Zustandsprüfung für die digitale Bildwiedergabe (PC-Bildschirm)

Seit Mai 1994 muss mindestens ein vom Betreiber bezeichnetes und als Befundungsmonitor verwendetes Bildwiedergabegerät (PC-Bildschirm) einer Abnahmeprüfung unterzogen werden (maximale Leuchtdichte, Maximalkontrast, Matrix, Grauwertwiedergabe, sichtbare diagonale Abweichung der Leuchtdichte).

Alle weiteren Bildschirme, welche nur als Betrachtungsmonitore dienen, werden nicht überprüft.

Diese Zustandsprüfung erfolgt zusammen mit den wiederkehrenden Zustandsprüfungen der Röntgenapparate.

5.2.5 Konstanzprüfung für das Bildwiedergabegerät (PC-Bildschirm)

Bei der Konstanzprüfung sind dieselben Prüfmittel und Prüfmethoden wie bei der Abnahmeprüfung zu verwenden. Grundsätzlich kann die Geometrie und die Grauwertwiedergabe von Auge mit einem SMPTE-Testbild verglichen und überprüft werden.

Anbieter von digitalen Bildsystemen bieten heute bereits produktespezifische Software an, die diese Konstanzprüfung automatisiert durchführt und die *wöchentlichen Testergebnisse* speichert. Bei Abweichungen wird eine Fehlermeldung erzeugt.



Abb. 30: Testbild (Bild: Rich Franzen)

Für die Kontrollaufnahme müssen die gleichen Bedingungen herrschen wie bei der Abnahmeprüfung der Geräte. Diese können dem Abnahmeprotokoll entnommen werden. Es ist die gleiche Filmsorte zu verwenden, und die Entwickler Temperatur darf maximal 0,5°C vom protokollierten Wert abweichen.

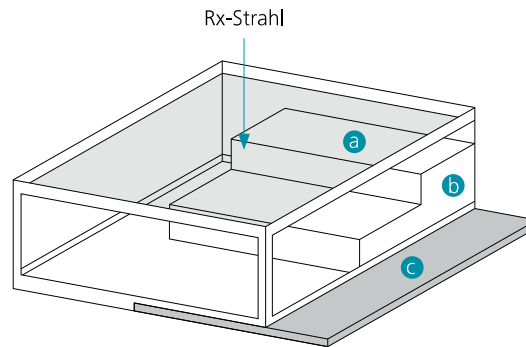


Abb. 31a, b: Konstanzprüfkörper für konventionelle Filme

- a Kupferplatte
- b Polytetrafluorethylen-Stufen
- c Film

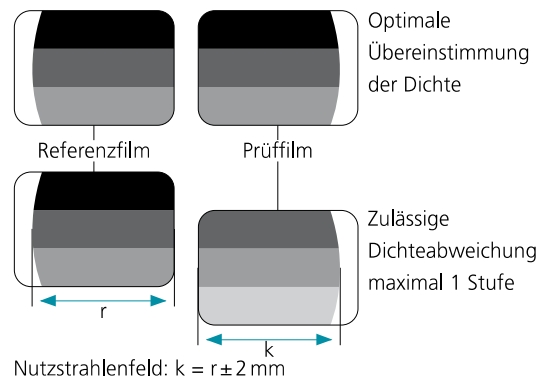


Abb. 32: Vergleich der Dichteabweichung und des Nutzstrahlenfeldes

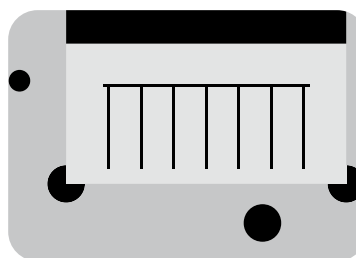


Abb. 33: Konstanzprüfkörper für digitale Bildplatten

Checkliste zur Kontrolle der Bildbearbeitung und der Röntgengeräte:

Kontrollen in der Praxis

Wie oft	Konventionell	Fehlerquellen
wöchentlich	Konstanzprüfung der Filmverarbeitung <ul style="list-style-type: none"> • Vergleichen mit dem Urbild • Mit Datum beschriften • Im Anlagebuch ablegen 	Entwickler Fixierer Lichteinfall
jährlich	Konstanzprüfung aller Röntgengeräte <ul style="list-style-type: none"> • Vergleichen mit dem Urbild • Mit Datum beschriften • Im Anlagebuch ablegen 	Röntgengerät

Digital

wöchentlich	Konstanzprüfung des Bildwiedergabegerätes <ul style="list-style-type: none"> • Vergleichen mit dem SMPTE-Testbild 	Bildschirm
jährlich	Konstanzprüfung der digitalen Bildwiedergabe <ul style="list-style-type: none"> • Vergleichen mit dem Urbild • Mit Datum im Datenspeicher ablegen • Bild ausdrucken und archivieren 	Röntgengerät Scanner Bildschirm
jährlich	Konstanzprüfung aller Röntgengeräte <ul style="list-style-type: none"> • Vergleichen mit dem Urbild • Mit Datum beschriften • Im Anlagebuch ablegen 	Röntgengerät

Wartung und gesetzliche Zustandsprüfung durch Fachfirma, mit Meldung an das BAG

Vor 1. Anwendung	Abnahmeprüfung
Jedes Jahr	Konventionelle Bildverarbeitungsgeräte für extraorale Röntgenaufnahmen
Alle 3 Jahre	Befundmonitore (Bildschirme)
Alle 6 Jahre*	Intraorale Röntgenanlagen, Panorama-, Fernröntgen- und DVT-Anlagen, Filmverarbeitungsgeräte für intraorale Aufnahmen, CCD-Sensoren und Speicherfolienscanner

* Die Medizinprodukteverordnung schreibt *zusätzlich* vor, dass medizinische Anlagen gemäss Angaben der Hersteller gewartet werden müssen. Nahezu alle Hersteller von Panorama-, Fernröntgen- und Schädelröntgenanlagen verlangen eine *jährliche* Wartung der Anlagen.

Gemäss Strahlenschutzverordnung liegt die Entscheidung und somit die Verantwortung für die Wartung der Röntgenanlagen beim Betreiber!

Auszüge aus der Röntgenverordnung AS 1988 und die Richtlinien für die Qualitäts- und Konstanzprüfung sind zu finden unter www.admin.ch.

5.3 Röntgenstrahlen in der Medizin

Röntgenbilder werden in der Medizin zur Abklärung (Diagnostik) und zur Behandlung (Therapie) verwendet.

5.3.1 Diagnostik

Stehendes Bild: Das Röntgenbild erlaubt die Darstellung verschiedener Gewebetypen. Es ist immer ein Zustandsbild. Es wird die Eigenschaft des Röntgenstrahls genutzt, den Röntgenfilm zu «belichten» (siehe Kapitel 6 «Röntgenfilm»).

Videobild: Beim Durchleuchten können bewegte Bilder beobachtet werden. Hier wird die Eigenschaft genutzt, dass Röntgenstrahlen Fluoreszenz erzeugen. *In der zahnmedizinischen Anwendung ist das Durchleuchten nicht erlaubt!*

5.3.2 Röntgentherapie

Die Röntgentherapie (Radiotherapie) nutzt die biologische Wirksamkeit der Photonenstrahlung. Bekanntlich sind alle Zellen im Stadium der Zellteilung besonders strahlenempfindlich – gerade das teilungsfreudige Tumorgewebe ist daher anfällig für Photonenstrahlung.

Das erkrankte Gewebe wird örtlich bestrahlt und zerstört. Selbstverständlich kann ein bestrahlter Patient unter den Folgen dieser Strahlenbelastung leiden. Nutzen und Schaden einer Radiotherapie müssen immer sorgfältig gegeneinander abgewogen werden.

5.4 Dosimetrie

Die Dosimetrie ist eine Methode zur Überwachung der Strahlenbelastung: Sie misst die Strahlung, die auf den Körper trifft.

Wie wir wissen, ist *Strahlung = Ausbreitung von Energie*. Wenn man also wissen will, wie viel Strahlung ein Körper aufgenommen hat, genügt es, die aufgenommene Energie zu messen.

Dafür gelten die folgenden Dosisbegriffe:

(BiPla 8.2.30) 5.4.1 Strahlenenergie-Dosis

Gray ($Gy = 1 \text{ Joule/kg}$) ist die Masseinheit für die pro Masse des Körpers aufgenommene Energie (absorbierte Dosis). Ein Tausendstel Gray ist das *Milligray* (*mGy*).

(BiPla 8.2.31) 5.4.2 Äquivalentdosis

Sievert ($Sv = 1 \text{ Joule/kg}$). Nicht alle ionisierenden Strahlen haben die gleiche biologische Wirkung. Deshalb wird jeder Art von Strahlung ein Qualitätsfaktor (Faktor der relativen biologischen Wirksamkeit: RBW) oder Wichtungsfaktor zugeordnet, welcher die Gefährlichkeit der Strahlung berücksichtigt.

Die Masseinheit der Äquivalentdosis ist das Sievert oder *Millisievert* (*mSv*).

Es gilt die folgende mathematische Gleichung:

$$\text{Äquivalentdosis (Sv)} = \text{Energiedosis (Gy)} \times \text{Qualitätsfaktor (RBW)}$$

oder $Sv = Gy \times QF$

Da der *Qualitätsfaktor der Röntgenstrahlung = 1* ist, gilt $1Sv = 1 Gy$, was die Berechnung erheblich vereinfacht.

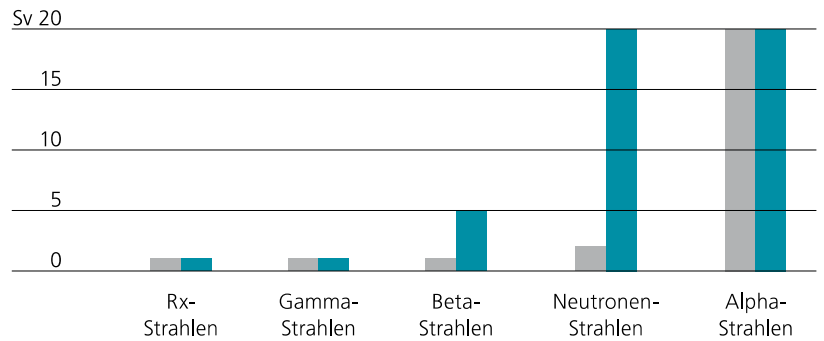


Abb. 34: Qualitätsfaktoren (RBW) verschiedener Strahlentypen

■ von Wert
■ bis Wert

(BiPla 8.2.32)

5.4.3 Effektive Dosis

(Sv) ist ein Mass für die Strahlenexposition des Menschen. Sie berücksichtigt zusätzlich noch die unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeiten der Organe. Die Haut ist z. B. weniger empfindlich als verschiedene innere Organe. Jedem Organ wird ein Gewebe-Wichtungsfaktor zugeordnet.

Die effektive Dosis errechnet sich aus der Multiplikation der Organdosis mit dem Organ-Wichtungsfaktor.

$$\text{Eff. Dosis} = \text{Organdosis} \times \text{Organ-Wichtungsfaktor}$$

Die Masseinheit ist ebenfalls das Sievert (Sv)

(Strahlenempfindlichkeit verschiedener Gewebe und Organe siehe Kapitel 4)

5.5 Das Thermolumineszenz-Dosimeter

(BiPla 8.2.28)

Weil der Zahnarzt und die Dentalassistentin täglich mit Röntgenstrahlen arbeiten und eine Jahresdosis von mehr als 1 mSv akkumulieren können, gelten sie als «beruflich strahlenexponiert».

(BiPla 8.2.27)

Bei unsachgemäßem Umgang mit der Röntgenstrahlung könnte es beim zahnärztlichen Personal zu somatischen (z. B. Leukämie) und genetischen (Mutationen der DNA) Strahlenschäden kommen.

(BiPla 8.2.29)

Gemäss der schweizerischen Gesetzgebung müssen sich beruflich strahlenexponierte Personen dosimetrisch überwachen lassen. Das Ziel der *Personendosimetrie* ist es, eine effektive Dosis zu bestimmen, um sicherzustellen, dass die vorgeschriebenen Dosisgrenzwerte nicht überschritten werden.

Jede beruflich strahlenexponierte Person muss also ein Dosimeter tragen!

(BiPla 8.2.34)

5.5.1 Regeln zum Tragen des Dosimeters

- Das Dosimeter wird monatlich gewechselt und zur *Dosimetriestelle* geschickt.
- Es wird auf Brusthöhe getragen (unter einer allfälligen Röntgenschürze).
- Metallgegenstände (Kugelschreiber, Schmuck) sollen nicht in der Nähe des Dosimeters getragen werden.
- Es soll keiner Wärmequelle ausgesetzt werden (Heizkörper, Waschmaschine, Sonnenlicht).
- Es muss persönlich getragen werden.
- Probebestrahlungen sind zu unterlassen. Diese werden von der Dosimetriestelle (Prüfinstanz) erkannt, und die Verantwortlichen müssen mit einer Geldstrafe rechnen!

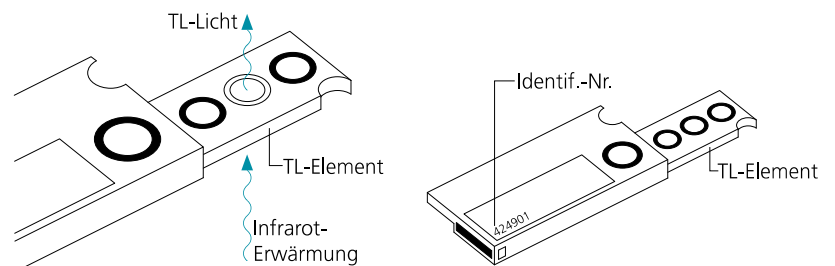


Abb. 35a–c: Dosimeter

5.5.2 Aufbau und Funktion des Thermolumineszenz-Dosimeters TLD

(BiPla 8.2.33)

Das TL-Dosimeter nutzt die Fähigkeit der Röntgenstrahlen, Atome anzuregen. In einer Schutzhülle befindet sich ein kleines Gerät aus Kunststoff, welches Lithiumfluorid enthält. Dieses speichert allfällige erhaltene Strahlung. An der Dosimetrie-Stelle wird das Lithiumfluorid erhitzt und gibt die Energie in Form von Licht ab. Das austretende Licht kann gemessen und daraus die Strahlenenergie-Dosis berechnet werden.

Die Dosimetrie-Stelle (z. B. SUVA oder COMET Technik AG) liefert jeden Monat die Auswertungen (siehe weiter unten), die jährlich akkumulierten Dosen werden immer Ende Jahr im persönlichen Strahlenpass (*schweizerisches persönliches Dosisdokument*) eingetragen. Bei Beendigung eines Arbeitsverhältnisses ist das persönliche Dosisdokument der Mitarbeiterin mitzugeben.

(BiPla 8.2.35)

Bei einem Stellenwechsel oder temporären Stellen wird ein (grünes) *temporäres persönliches Dosisdokument* abgegeben. In diesem werden die monatlichen Dosen festgehalten, bis die Jahresdosis feststeht und ins persönliche Dosisdokument eingetragen werden kann. Das grüne Dokument muss nicht aufbewahrt werden.

(BiPla 8.2.36)

5.5.3 Die strahlenmedizinische Kontrolluntersuchung

Werden die Strahlendosisgrenzwerte überschritten (siehe 5.9), sind beruflich strahlenexponierte Personen verpflichtet, sich einer vom BAG verordneten medizinischen Kontrolle zu unterziehen.

Diese umfassen:

- ein rotes und weisses Blutbild (Knochenmark, Leukämie)
- den Hautzustand der Hände (Veränderungen bis zu Röntgenkrebs z. B. durch Selberhalten des Films im Munde des Patienten)

Diese Kontrollen liegen in der Kompetenz der SUVA, strahlenmedizinische Eintrittskontrollen (vor Beginn einer beruflich strahlenexponierten Tätigkeit) und regelmässige strahlenmedizinische Nachkontrollen sind nicht vorgesehen.

Merke

Das Dosimeter schützt nur indirekt vor Strahlung, es hält sie nicht ab und meldet auch keine Strahlenexposition!

Mehrmals erhöhte Werte auf der Dosimetrie-Auswertung deuten darauf hin, dass entweder etwas mit der Praxiseinrichtung oder mit dem Strahlenschutzverhalten nicht stimmt. Solche Vorkommnisse müssen stets abgeklärt werden.

(BiPla 8.2.39)

5.6 Bauliche Vorschriften für Röntengeräte bis 70 kV

- Räume, in denen Röntgenanlagen betrieben werden, müssen durch bauliche Massnahmen gegen austretende Strahlung abgeschirmt sein. Die Röntgenverordnung schreibt vor, wie viel Strahlung in die Umgebung gelangen darf. In angrenzenden Bereichen, wo sich beruflich strahlungsexponierte Personen aufhalten und an Orten, wo sich nicht beruflich strahlungsexponierte Personen vorübergehend aufhalten (z. B. Wartezimmer, Treppenhaus, Korridor), darf die Ortsdosisleistung 0,1 mSv pro Woche nicht überschreiten. In angrenzenden Bereichen, wo sich nicht beruflich strahlenexponierte Personen dauernd aufhalten können (z. B. benachbarte Büros oder Wohnungen), beträgt die maximal zulässige Ortsdosisleistung 0,02 mSv pro Woche.

Für Geräte bis 70 kV (also zahnärztliche Kleinröntengeräte) sind in der Regel keine besonderen baulichen Massnahmen zur Abschirmung erforderlich. Für Röntgenanlagen mit Röhrenspannung über 70 kV (OPT, CT) liefert die Röntgenverordnung Grundlagen für die Berechnung der bauseitig erforderlichen Abschirmungen.

- Die Vorschrift, wonach sich die den Apparat bedienenden Personen ausserhalb der Nutzstrahlenrichtung in einer Entfernung von mindestens 2 Meter von Röhre und Patient aufhalten müssen, wird meistens erfüllt, indem sich der Auslöser des Röntengerätes ausserhalb des Raumes befindet. Die Patienten müssen aber während der Aufnahme beobachtet werden können.
- Das Verlassen des Raumes muss jederzeit möglich sein.
- Der Betriebszustand der Anlage muss durch ein akustisches oder optisches Signal angezeigt werden.

5.7 Unterschiede der Strahlenbelastung durch analoge und digitale Röntgengeräte

Die Vorteile des digitalen Röntgens liegen nicht nur im Wegfall der Dunkelkammer, in der konstanten Bildqualität und den Nachbearbeitungsmöglichkeiten, sondern vor allem auch in einer entscheidenden Dosisreduktion.

Untersuchungen haben ergeben, dass die Reduktion bei der Verwendung von digitaler Röntgentechnologie verglichen mit dem analogen, herkömmlichen Röntgen bis zu 47 % beträgt.

Strahlenexposition bei verschiedenen zahnärztlichen Röntgen-Aufnahmearten:

	analog	digital
EZR	0,004 mSv	0,003 mSv
14er-Status	0,078 mSv	0,041 mSv
OPT	0,056–0,065 mSv	0,045 mSv
DVT		0,2–0,5 mSv
CT		0,9–1,2 mSv

Durch die Einführung der digitalen Volumentomografie (DVT) hat die Zahnmedizin, insbesondere die Oralchirurgie, ein dreidimensionales Bildgebungsverfahren erhalten, das neue diagnostische Möglichkeiten eröffnet.

Die effektiven Dosen liegen je nach Gerät zwischen 13 MikroSv und 1073 MikroSv (zum Vergleich: OPT zwischen 10–20 MikroSv).

DVT-Geräte haben gegenüber dem Computertomogramm eine wesentlich reduzierte Strahlenbelastung, gegenüber dem OPT jedoch eine 3–40-fach höhere Belastung.

5.8 Natürliche und künstliche Strahlenbelastung

Neben der Strahlenbelastung im medizinaltechnischen Bereich sind verschiedenste natürliche Strahlenquellen bekannt. Zwei natürliche Strahlungsarten sind die kosmische und die terrestrische Strahlung.

5.8.1 Kosmische Strahlung

Dabei handelt es sich um Strahlung aus dem Weltall, die in unsere Atmosphäre eindringen und die Erdoberfläche erreichen kann. Ihre Intensität hängt von der Höhe über Meer, der Ozonschicht und weiteren Faktoren ab. Je höher die Lage über dem Meeresspiegel, desto höher die kosmische Strahlenbelastung. Flugzeugbesatzungen sind daher erheblicher Exposition ausgesetzt.

Für die Schweiz gilt: *durchschnittliche Belastung mit kosmischer Strahlung pro Jahr ca. 0,4 mSv.*

5.8.2 Terrestrische Strahlung

Die terrestrische Strahlung wird durch radioaktive Stoffe verursacht, die im Boden (lat. terra) vorkommen. Dies sind v.a. Uran, Thorium oder Kalium. Uranhaltig sind z.B. Gesteine wie Granit oder Gneis (Alpen), während Kalkstein (Jura) weniger radioaktive Stoffe enthält. Es gibt also bedeutende regionale Unterschiede.

In der Schweiz beträgt die durchschnittliche terrestrische Strahlenbelastung ca. 0,5 mSv pro Jahr.

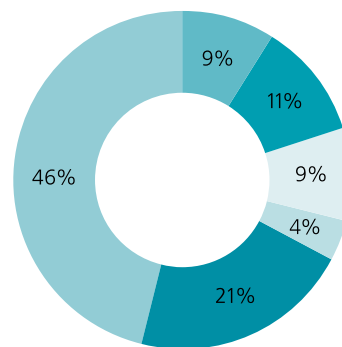


Abb. 36: Gesamtüberblick zur Strahlenbelastung in der Schweiz

endogen	0,4 mSv
terrestrisch	0,5 mSv
kosmisch	0,4 mSv
künstlich sonst.	0,2 mSv
Medizin	1,2 mSv
Radon	2,2 mSv

Radon

Radon ist ein farb- und geruchloses Edelgas, das natürlicherweise im Gestein und im Erdreich durch den Zerfall von Uran entsteht. Es diffundiert aus dem Erdboden in die Atmosphäre und ins Grundwasser oder tritt aus bestimmten Baumaterialien aus.

Das Gas ist sehr instabil und zerfällt rasch in radioaktive Substanzen. Diese können sich im Innern von gut isolierten und schlecht gelüfteten Häusern anreichern. Das daraus resultierende Gesundheitsrisiko ist schwierig zu erfassen. Für Schweizer Wohnräume gilt eine *durchschnittliche Belastung durch Radonstrahlung pro Jahr von ca. 1,6 mSv*.

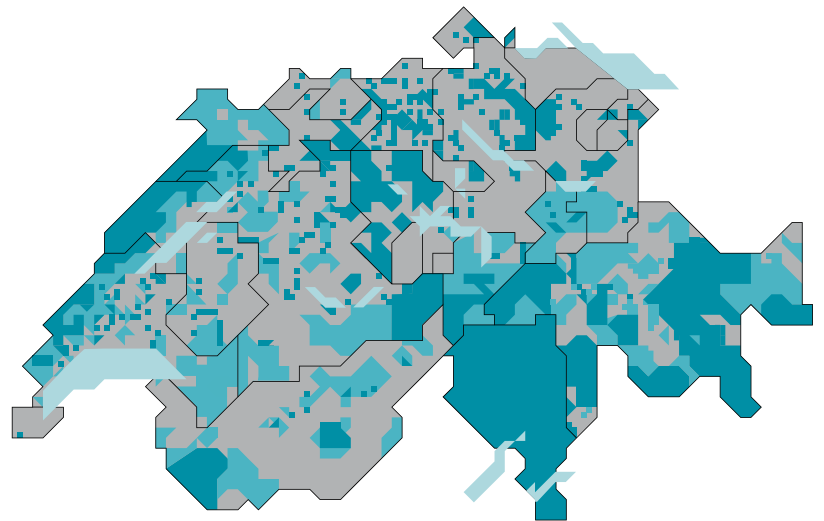


Abb. 37: Radonkarte der Schweiz (Wohn- und Aufenthaltsräume), Stand: Februar 2011
Radonrisiko (in einigen Gemeinden wird das Radonrisiko aufgrund ungenügender Messungen geschätzt):

- Gering
- Mittel
- Hoch

Quelle: GG25 © Swisstopo

5.8.3 Endogene (interne) Strahlung

Durch unsere tägliche Nahrung nehmen wir die verschiedensten radioaktiven Substanzen auf. Wichtigster Lieferant in diesem Zusammenhang ist das Kalium-40, das in Milch- und Milchprodukten vorkommt.

Der Jahresdurchschnitt der endogenen Strahlung beträgt ca. 0,4 mSv

(BiPla 8.2.38)

5.9 Strahlendosis-Grenzwerte

Grenzwerte für beruflich strahlenexponierter Personen:

- ab dem 18. Altersjahr pro Kalenderjahr max. 20 mSv
- Jugendliche zwischen 16.–18. Altersjahr max. 5 mSv
- Schwangere bis zur Geburt max. 2 mSv

Grenzwerte für nicht beruflich strahlenexponierte Personen:

- Patienten und Bevölkerung: *Jahresdosis max. 1 mSv*

Diese Grenzwerte werden ohne medizinische Strahlenbelastung als Patient und ohne natürliche Strahlung berechnet.

Beim Festsetzen der Grenzwerte wird versucht, ausreichende Sicherheit einzubauen.

Eine beruflich strahlenexponierte Person, die jedes Jahr die maximal zulässige Gesamtkörperdosis aufnimmt, geht ein ungefähr gleiches Risiko ein wie eine Person, die in einem nicht strahlenexponierten Beruf arbeitet.

Zum Vergleich noch einige weitere Werte:

- natürliche Strahlenbelastung in der Schweiz pro Person und Jahr durchschnittlich $3,53\text{ mSv}$
- Strahlenbelastung durch medizinische Anwendungen pro Person und Jahr aktuell durchschnittlich $1,2\text{ mSv}$
- der zahnmedizinische Anteil an der jährlichen Belastung beträgt durchschnittlich $0,01\text{ mSv}$
- die Gonadendosis für den mit Schutzschürze abgedeckten Patienten sollte pro Zahnrontgen $<0,001\text{ mSv}$ betragen
- radioaktive Belastung pro Person und Jahr durchschnittlich $0,2\text{ mSv}$ (der Reaktorunfall in Tschernobyl führte im folgenden Jahr zu einer Mehrbelastung von $0,2\text{ mSv}$)

(BiPla 8.2.41)

5.9.1 Strahlenschutzmassnahmen für den Patienten

Ziel ist die Erfüllung des ALARA-Prinzips

- strenge Indikationsstellung
- Anlegen einer Schutzschürze mit Bleigleichwert $0,25\text{ mm}$ bei intraoralen und $0,5\text{ mm}$ bei extraoralen Aufnahmen (OPT/FR)
- Einsatz eines leistungsfähigen Röntgengerätes
- Verwendung eines Langtubus mit einem Durchmesser von max. 6 cm um die exponierte Hautoberfläche zu minimieren
- Verwendung von hochempfindlichen Filmen bzw. Speicherplatten beim digitalen Röntgen zur Reduktion der Strahlenbelastung
- um Wiederholungen zu vermeiden, ist es unerlässlich, eine perfekte Aufnahmetechnik zu beherrschen
- bei der Filmentwicklung richtig angemischte Chemikalien verwenden, bzw. beim digitalen Röntgen die richtigen Einstellungen am Computer vornehmen
- einwandfreie Protokollierung und Archivierung der angefertigten Aufnahmen

5.9.2 Strahlenschutzmassnahmen für das Personal

- Beim Auslösen hält sich das Personal mindestens 2 m hinter der Strahlenquelle auf oder verlässt den Raum.
- Filme werden nicht durch das Personal im Munde des Patienten festgehalten.
- Tragen des Dosimeters ist Vorschrift!

Selbstevaluationsfragen Kapitel 5

Nennen Sie die BAG-Vorschriften für die Verwendung von Röntgenapparaten in der Zahnheilkunde sowie für die Qualitätskontrollen.

Zählen Sie auf, wann und von wem die Zustandsprüfungen und Qualitätskontrollen der verschiedenen Röntgengeräte und Filmverarbeitungsanlagen durchgeführt werden müssen.

Beschreiben Sie die verschiedenen Anwendungsgebiete der Röntgenstrahlen in der Medizin (Diagnostik und Therapie).

Aus welchen Strahlenarten setzt sich die natürliche Strahlenbelastung zusammen?

Nennen Sie die drei verschiedenen Dosisbegriffe mit der entsprechenden Masseinheit.

Erklären Sie die Bedeutung des Qualitätsfaktors der Röntgenstrahlung bei der Berechnung der Äquivalentdosis.

Erklären Sie den Begriff der effektiven Dosis und wie man sie berechnet.

Welche Strahlenarten gehören zur künstlichen Strahlenbelastung?

Nennen sie die Dosisgrenzwerte für die verschiedenen Personengruppen.

Zählen Sie die Massnahmen zum Strahlenschutz des Patienten und diejenigen zum Schutz des Personals auf.