

Diplomarbeit

**Strahlenbelastung der Augenlinse und Schilddrüse in der
kieferorthopädischen Schäeldiagnostik**

eingereicht von

Julia Barbara Trautmann

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor(in) der gesamten Zahnheilkunde
(Drⁱⁿ. med. dent.)**

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt an

**der klinischen Abteilung für orale Chirurgie und Kieferorthopädie
Universitätsklinikum für Zahnmedizin und Mundgesundheit**

unter der Anleitung von

Ass.-Profⁱⁿ. Drⁱⁿ. Margit Pichelmayer

Univ.-Doz. Dr. Georg Stücklschweiger

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 30.08.2019

Julia Barbara Trautmann eh

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Fertigung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Ganz besonders möchte ich Frau Ass.-Prof. Dr. med. univ. Margit Pichelmayer danken, die mich während der gesamten Zeit betreut hat. Durch Ihre Unterstützung, Motivation und Begeisterung für das Thema war es mir möglich diese Arbeit zu umzusetzen.

Vielen Dank für die Geduld und die vielen Besprechungen, für die Sie jederzeit bereitstanden.

Ich möchte mich bei meinem Zweitbetreuer, Herrn Univ.-Doz. Dr. Georg Stücklschweiger, bedanken, der mir mit Rat und Tat während der Versuchsphase als auch bei physikalischen Fragen in dieser Diplomarbeit unterstützte.

Außerdem bedanke ich mich bei Frau Dr. med. dent. Barbara Kirnbauer, die mir bei Fragen bezüglich des DVTs motiviert zur Seite stand.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Frau DI Irene Mischak für die statistische Auswertung der gesammelten Daten.

Ein ganz besonderer Dank geht an das Institut für makroskopische und klinische Anatomie, die mir für diese Diplomarbeit einen Echtschädel zur Verfügung gestellt haben.

Bei meiner Familie bedanke ich mich für ihre Unterstützung während des Studiums – ganz besonders bei meiner lieben Mama fürs Korrekturlesen.

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, die Strahlenbelastung der Augenlinse und der Schilddrüse in der kieferorthopädischen Schäldiagnostik zu eruieren. Augenlinse und Schilddrüse sind oberflächlich liegende, strahlensensible Gebiete, die im Fernröntgen und in der digitalen Volumentomographie miterfasst werden können.

Material und Methoden : Es wurden Aufnahmen an einem Fernröntgengerät (Sirona orthophos XG 3D) und an einem DVT Gerät (Planmeca ProMax 3D Max) gemacht. Ein Phantomkopf „Alderson Rando Phantom“ aus gewebeäquivalentem Polymer wurde mit Thermolumineszenzkristallen aus Lithiumfluorid bestückt. Diese Kristalle sind in der Lage die absorbierte Energie zu speichern, welche anschließend mit Hilfe eines speziellen Auswerteverfahrens ausgelesen wurde. Für weitere Messungen wurde über die Messkristalle am Augenaußenwinkel rechts und links jeweils eine zugeschnittene Augenabdeckung „AttenuRad CT Eye Shield“ geklebt. Diese 1mm dicke, flexible Augenabdeckung aus Bismuth hält laut Herstellerangaben ca. 50% der Strahlung ab.

Ergebnisse : Die Ergebnisse im FR zeigten je nach Einstellung folgende Oberflächendosen: 1) auf dem der Strahlenquelle näherem Auge 60 – 100 μ Gy ohne Augenabdeckung und 10 – 40 μ Gy mit Augenabdeckung; 2) am rechten Auge 7 – 10 μ Gy ohne Augenabdeckung und 3 – 6 μ Gy mit Augenabdeckung; 3) an der Nase 70 – 90 μ Gy ohne Augenabdeckung und 50 – 80 μ Gy mit Augenabdeckung; 4) an der Schilddrüse 9 – 10 μ Gy ohne Augenabdeckung und 8 – 10 μ Gy mit Augenabdeckung.

Im DVT zeigten sich je nach Einstellung folgende Oberflächendosen: 1) auf dem linken Auge 1,5 – 8,6mGy ohne Augenabdeckung und 0,9 – 5,7mGy mit Augenabdeckung; 2) am rechten Auge 1,6 – 10,5mGy ohne Augenabdeckung und 1 - 5,8mGy mit Augenabdeckung; 3) an der Nase 1,7mGy – 8,3mGy ohne Augenabdeckung und 1,4 – 7,1mGy mit Augenabdeckung; 4) an der Schilddrüse 0,1 – 1mGy ohne Augenabdeckung und 0,1 – 0,8mGy mit Augenabdeckung.

Schlussfolgerung : Beim FR reduziert eine Augenabdeckung des Auges, das der Strahlenquelle näher liegt, die Dosis um 60% bis 80% und ist somit auf jeden Fall sinnvoll.

Beim DVT rotiert die Strahlenquelle zirkulär um den Schädel und die Dosisverringering beträgt insofern nur ca. 26%.

In beiden Fällen sind Augenabdeckungen sinnvoll.

Abstract

Objective :

The purpose of this study was to evaluate the radiation exposure of the lens of the eye and the thyroid in orthodontic skull diagnostics. The lens of the eye and the thyroid are superficial radiosensitized areas that are measurable and accordingly recorded in Cephalography and dental cone beam computed tomography (CBCT).

Material and methods :

Images were taken on a cephalometric X-ray device (Sirona orthophos XG 3D) and on a CBCT device (Planmeca ProMax 3DMax). A tissue-equivalent polymer phantom head "Alderson Rando Phantom" was equipped with lithium fluoride thermoluminescent crystals. These crystals can store the absorbed energy, which was subsequently read out with the help of a special evaluation method. For further measurements, a modification of an eye cover 'AttenuRad CT Eye Shield' was glued over the measuring crystals of the left and right eye. This 1mm thick, flexible bismuth eye cover holds according to the manufacturer 50% of the radiation.

Results :

The results in the Cephalography showed depending on the setting the following surface doses: 1) on the eye closest to the radiation source 60 – 100 μ Gy without eye coverage and 10 – 40mGy with eye coverage; 2) in the right eye 7 – 10 μ Gy without eye coverage and 3 – 6 μ Gy with eye coverage; 3) on the nose 70 – 90 μ Gy without eye coverage and 50 – 80 μ Gy with eye coverage; 4) at the thyroid 9 – 10 μ Gy without eye coverage and 8 – 10 μ Gy with eye coverage.

Depending on the setting the following surface doses were observed in the CBCT: 1) 1,5 – 8,6mGy without eye coverage and 0,9 – 5,7mGy with eye coverage on the left eye; 2) on the right eye 1,6 – 10,5mGy without eye coverage and 1 - 5,8mGy with eye coverage; 3) on the nose 1,7 – 8,3mGy without eye coverage and 1,4 – 7,1mGy with eye coverage; at the thyroid 0,1 - 1mGy without eye coverage and 0,1 – 0,8mGy with eye coverage.

Conclusion :

With Cephalography the eye coverage of the eye closer to the radiation source reduces the dose by 60%-80% making it useful in any case.

In CBCT the radiation source rotates circulatory around the skull and the dose reduction is only about 26%.

In both cases eye coverage is useful.

Inhaltsverzeichnis

Danksagungen	ii
Zusammenfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Glossar und Abkürzungen	ix
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xii
1 Einleitung	13
1.1. Kieferorthopädische Schäeldiagnostik	13
1.1.1. Das Fernröntgen (Kephalometrie)	13
1.1.2. Das DVT des Schädels	18
1.2. Fragestellung	23
1.3. Anatomie	24
1.3.1. Die Augenlinse	24
1.3.2. Die Schilddrüse	25
1.4. Strahlenschutz	27
1.4.1. Röntgenstrahlen	27
1.4.2. Dosisbegriffe	30
1.4.3. Strahlenexposition	31
1.4.4. Strahlungswirkung	32
1.5. Linsenschädigung und Strahlung	33
1.5.1. Warum ist die Augenlinse strahlensensibel?	33
1.5.2. Schwellendosis für Linsenschädigung	34
1.5.3. Katarakt	34
1.6. Schilddrüsenschädigung und Strahlung	35
1.6.1. Schilddrüsenmalignom	35
1.7. Zielsetzung	36
2. Material und Methoden	37
2.1. Der Versuchsaufbau	37
2.5.1. Messung ohne Augenabdeckung	37
2.5.2. Messung mit Augenabdeckung	38
2.2. Der Versuchsablauf	40

2.2.1. Fernröntgen	40
2.2.2. DVT	42
3. Ergebnisse – Resultate	46
3.1. Auswertung der Fernröntgenwerte	46
Auswertungen der DVT-Werte	50
3.1.1. Phantomkopf, mit und ohne Abdeckung	50
3.1.2. Echtschädel ohne Abdeckung:	53
3.1.3. Vergleich Echtschädel mit Phantomkopf, ohne Abdeckung	55
4. Diskussion	56
4.1. Interpretation der Ergebnisse	56
4.1.1. Dosisverringern durch die Augenabdeckung	59
4.1.2. Wie viele Fernröntgen oder DVTs braucht es theoretisch, um einen Katarakt auszulösen?	61
4.1.3. Organ-Äquivalentdosis für die Schilddrüse	63
4.1.4. Vergleich Echtschädel mit Alderson Rando phantom	64
4.1.5. Vergleich mit der Literatur	65
4.2. Zusammenfassung	69
5. Anhang	70
5.1. Strahlenwichtungsfaktor	70
5.2. Gewebewichtungsfaktor	71
5.3. Versuchsprotokoll Fernröntgen – Phantomkopf	72
5.4. Versuchsprotokoll DVT – Phantomkopf	72
5.5. Versuchsprotokoll DVT – Echtschädel	72
Literaturverzeichnis	73

Glossar und Abkürzungen

FR	Fernröntgen
FRS	Fernröntgenseitenbild
S	Sella
N	Nasion
Ar	Articulare
Pg	Pogonion
PG	Weichteil Pogonion
Gn	Gnathion
Go	Gonion
Mn	Menton
OPG	Orthopantomogramm/ Panoramaschichtaufnahme
DVT	Digitale Volumentomographie
CBCT	(dental) cone beam computed tomography
FOV	Field of View
ICRP	International Commission on Radiological Protection
Pb	Blei

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fernröntgen (Sirona, 2017)	13
Abbildung 2: Das Björk'sche Polygon, (modifiziert nach (Droschl, 1990)).....	14
Abbildung 3: Positionierung im Fernröntgen (Sirona, 2017).....	16
Abbildung 4: Strahlengang im Fernröntgen.....	16
Abbildung 5: Fernröntgen Schematisch (Sirona, 2017).....	17
Abbildung 6: Zentralstrahl und Anodenwinkel (Sirona, 2017).....	17
Abbildung 7: Positionierung im DVT (Planmeca, 2018).....	18
Abbildung 8: DVT Schema	20
Abbildung 9: Schnittbildebene: coronal, sagittal, axial, 3D (Denecke, 2019).....	21
Abbildung 10: FOV: 11x8, 11x5, 8x8, 5x5, 8x5, ganzer Schädel.....	22
Abbildung 11: Fernröntgen [modifiziert nach: (Wikipedia)]	23
Abbildung 12: Der Aufbau des Auges	24
Abbildung 13: Linse mit Zonula Abbildung 14: Polus anterior und posterior	25
Abbildung 15: Glandula thyroidea (ventral)	26
Abbildung 16: Glandula thyroidea (dorsal)	26
Abbildung 17: Elektromagnetisches Spektrum	28
Abbildung 18: Entstehung von Röntgenstrahlung (Reiser et al., 2017).....	29
Abbildung 19: Strahlenaustrittsfenster und Detektor im Fernröntgen.....	29
Abbildung 20: Katarakt (Mißfeldt, 2012-2018).....	34
Abbildung 21: Position der Messkristalle ohne Augenabdeckung	38
Abbildung 22: AttenuRad CT Eye Shield (UniversalMedical)	38
Abbildung 23: Positionierung der Augenabdeckung „AttenuRad CT Eye Shield“ am Phantomkopf	39
Abbildung 24: Versuchsablauf Fernröntgen	40
Abbildung 25: Versuchsablauf DVT.....	42
Abbildung 26: Ergebnis Fernröntgen mit und ohne Augenabdeckung (1 Aufnahme) - graphische Darstellung	48
Abbildung 27: Ergebnisse DVT, Phantomkopf, mit und ohne Augenabdeckung – graphische Darstellung.....	51
Abbildung 28: Ergebnisse DVT, Echtschädel, ohne Augenabdeckung - graphische Darstellung	54

Abbildung 29: Vergleich Phantomkopf mit Echtschädel, ohne Augenabdeckung – graphische Darstellung.....	55
Abbildung 30: Zusammenfassung der Ergebnisse im Fernröntgen (μGy).....	56
Abbildung 31: geometrische Anordnung der Messorte im Fernröntgen	57
Abbildung 32: Zusammenfassung der Ergebnisse im DVT beim Phantomkopf (mGy)	58
Abbildung 33: geometrische Anordnung der Messorte im DVT	59
Abbildung 34: Position der Schilddrüse im FR und DVT	63
Abbildung 35: Vergleich Phantomkopf: Echtschädel im DVT, ohne Augenabdeckung (mGy)	64
Abbildung 36: Strahlenwichtungsfaktoren (ICRP, 2007)	70
Abbildung 37: Gewebewichtungsfaktoren (ICRP, 2007)	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen und Einzelpersonen der Bevölkerung (mSv/Jahr) (AllgStrSchV, 2018).....	31
Tabelle 2: Versuchsablauf im Fernröntgen.....	41
Tabelle 3: Die Einstellungen im DVT (Schädelgröße M, Länge 23cm).....	42
Tabelle 4: Versuchsablauf im DVT (Phantomkopf).....	43
Tabelle 5: Die Einstellungen im DVT für den Echtschädel (Schädelgröße M, Länge 16cm)	44
Tabelle 6: Versuchsablauf im DVT (Echtschädel)	45
Tabelle 7: Ergebnisse Fernröntgen mit und ohne Augenabdeckung (20 Aufnahmen).....	46
Tabelle 8: Ergebnisse Fernröntgen mit und ohne Augenabdeckung (1 Aufnahme)	47
Tabelle 9: Ergebnisse DVT, Phantomkopf, mit und ohne Augenabdeckung	50
Tabelle 10: Ergebnisse DVT, Echtschädel, ohne Augenabdeckung	53
Tabelle 11: Legende zu Abbildung 30	56
Tabelle 12: Legende zu Abbildung 32	58
Tabelle 13: prozentuale Verringerung durch die Augenabdeckung im Fernröntgen	60
Tabelle 14: prozentuale Verringerung durch die Augenabdeckung im DVT	60
Tabelle 15: Wie viele FR/DVTs braucht es, um ein Katarakt auszulösen? – Ohne Augenabdeckung	62
Tabelle 16: Wie viele FR/DVTs braucht es, um ein Katarakt auszulösen? – Mit Augenabdeckung	62
Tabelle 17: Organäquivalentdosis in Sv für die Schilddrüse	63
Tabelle 18: Legende zu Abbildung 35	65
Tabelle 19: Vergleich der Ergebnisse von Kanzaki mit dieser Studie.....	65
Tabelle 20: Zusammenfassung der Ergebnisse von Roth 2006	67
Tabelle 21: Zusammenfassung der Ergebnisse von Qu 2012.....	67
Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse von Han 2013	68

1 Einleitung

1.1. Kieferorthopädische Schäldiagnostik

1.1.1. Das Fernröntgen (Kephalemetrie)



Abbildung 1: Fernröntgen (Sirona, 2017)

Das Fernröntgen ist neben dem Orthopantomogramm und der Modellvermessung eine der drei Säulen der kieferorthopädischen Diagnostik.

Der Schädel wird bei dieser Aufnahmetechnik von lateral erfasst. Durch einen Abstand von 1,5m zwischen Objekt und Röntgenfilm bekommt man einen nahezu parallelen Strahlengang (Droschl, 1990).

Früher wählte man einen Abstand von 4m (2-3% Vergrößerung), das entspricht fast einer Größenwiedergabe von 1:1. Heute verwendet man, vor allem aus Platzgründen, einen Film-Fokus-Abstand von 1,2-1,5m (9-10% Vergrößerung) (Ehrenfeld, 2011).

Aufgrund des Objektabstandes muss man einen gewissen Umrechnungsfaktor mit einrechnen.

Um das Fernröntgenbild zu analysieren, wird es mit dem Profil nach rechts zeigend durchgezeichnet, was sowohl manuell als auch digital erfolgen kann (Weber, 2010).

Anhand anatomischer Strukturen werden Konturen gezeichnet und Punkte markiert, die wiederum über Linien verbunden werden. Anschließend erfolgen Strecken- und Winkelmessungen, anhand derer sich ein objektiver skelettaler und dentaler Befund erstellen lässt (Schopf, 2008).

Es existieren mehrere dutzend verschiedene Durchzeichnungsmöglichkeiten, die allesamt eine numerische Beurteilung der skelettalen und dentalen Situation des entsprechenden Patienten ermöglichen, ausgehend von unterschiedlichen Referenzstrukturen. Dazu kommen noch die verschiedenen Möglichkeiten der Analyse der Weichteile, die in erster Linie zur ästhetischen Profilbeurteilung verwendet werden.

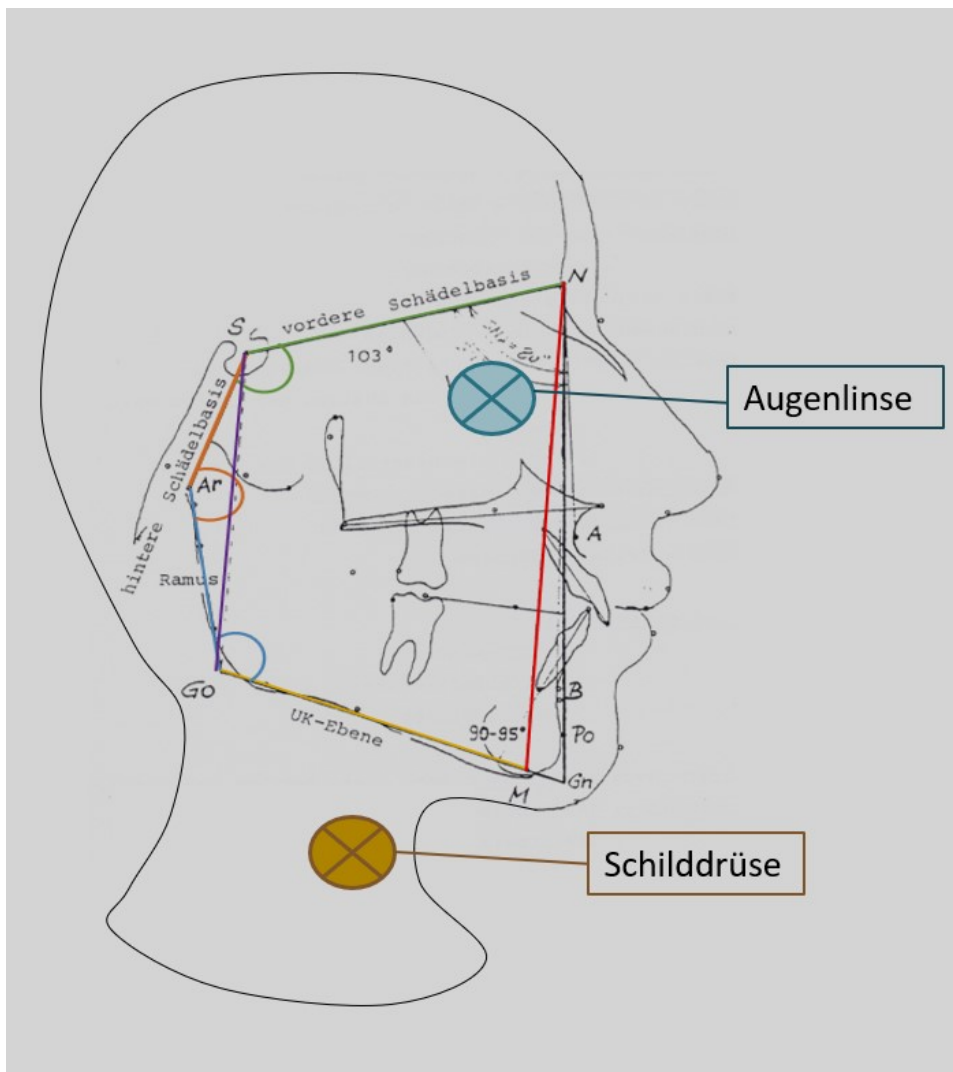


Abbildung 2: Das Björk'sche Polygon, (modifiziert nach (Droschl, 1990))

1.1.1.1. Geschichte des Fernröntgens

Der Physiker Wilhelm Conrad Röntgen experimentierte 1895 in Würzburg an der Julius-Maximilian-Universität mit Kathodenstrahlröhren und einem Papierschirm, der mit Bariumplatincyanoür bemalt war. Bei der Entladung der Kathodenröhre fluoreszierte der Schirm, selbst noch mit 2m Abstand. Röntgen nannte diese neue Art von Strahlung „X-Strahlen“.

Die ersten Zahnröntgen wurden 1896 von Walkhoff und Kells angefertigt, die Technik wurde verbessert und 1904 entstand das erste zahnärztliche Röntgengerät.

1931 konzipierten Hofrath in Düsseldorf und Broadbent in Cleveland unabhängig voneinander die Technik für das Fernröntgen.

Bis in die späten 90er Jahre des 19. Jahrhunderts erfolgten die seitlichen Schädelaufnahmen noch nach dem alten analogen Röntgenfilmverfahren.

1987 begann das digitale Zeitalter der zahnärztlichen Radiologie und Ende der 90er Jahre hielt langsam die dreidimensionale Röntgendiagnostik des Schädels Einzug in die Mund-, Zahn-, und Kieferheilkunde → CT und DVT (digitale Volumentomographie (Fuhrmann, 2013)).

1.1.1.2. Technische Grundlagen: Fernröntgen

Früher wurden Röntgenaufnahmen analog hergestellt, das heißt eine Film-Folien Kombination als Bildempfänger verwendet. Es kommt ein Röntgenfilm zum Einsatz, der beidseits mit einer photosensitiven Emulsion aus Silberbromidkristallen beschichtet wird, sowie mit einer Verstärkerfolie, dessen Fluoreszenzschicht einen Großteil der Filmschwärzung ausmacht und Dosis spart. Heute greift man auf die digitale Radiographie zurück, um einen vielfach größeren Dynamikbereich (Verringern der Fehlbelichtung), eine geringere Strahlendosis, Bildnachbearbeitung und -speicherung zu ermöglichen. Außerdem spart man sich so Zeit und Chemikalien, die bei der Filmentwicklung anfallen.

Das digitale Bild wird entweder auf einer Speicherfolie oder auf einem Flachdetektor aufgenommen, wobei die Speicherfolie zunächst ausgelesen werden muss und der Flachdetektor das Röntgenbild direkt an den Computer schickt.

Hierbei wird das Röntgenbild in Pixel, ein Raster von Bildpunkten, eingeteilt, bei dem jeder Pixel einen Zahlenwert bzw. Graustufen erhält. Je höher die Pixelanzahl, desto höher ist die Auflösung (Reiser et al., 2017).

Um ein Fernröntgen anzufertigen wird der Kopf des/der Patienten/in, meist stehend, in der Frankfurter Horizontalen ausgerichtet, die Ohroliven positioniert und die Mediansagittalebene parallel zur Ebene des Röntgenfilms mithilfe einer Nasenstütze fixiert (Sirona, 2017, Peinsipp, 2016).

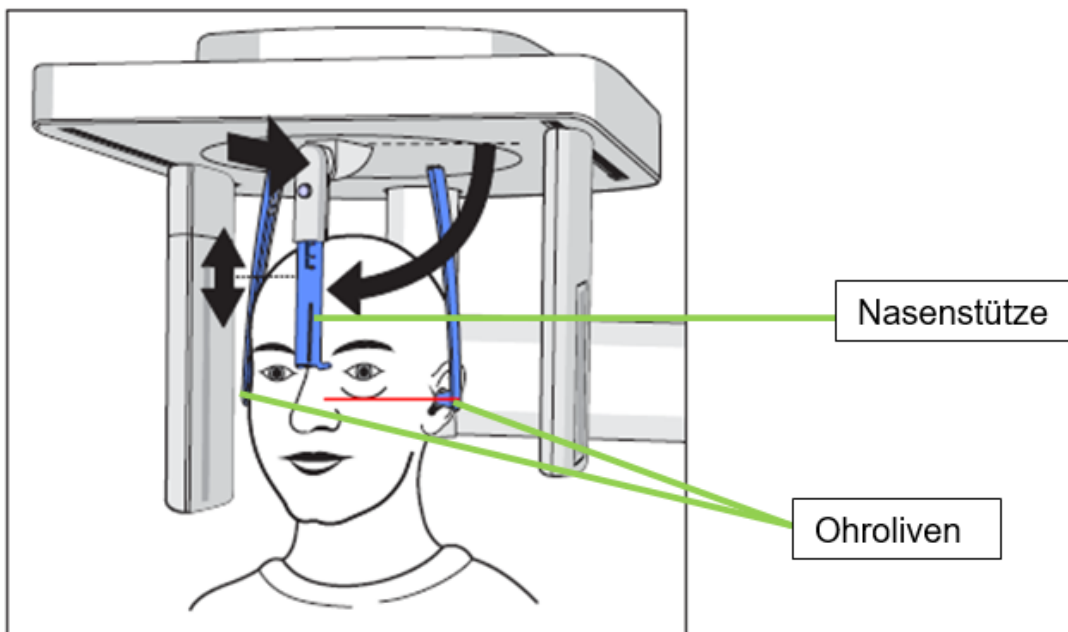


Abbildung 3: Positionierung im Fernröntgen (Sirona, 2017)

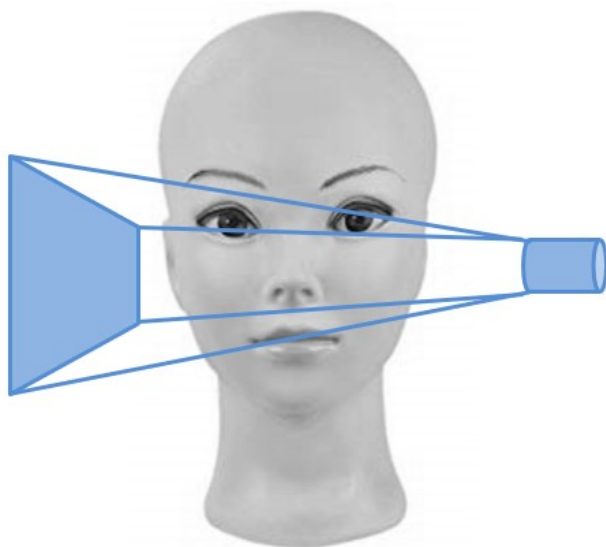


Abbildung 4: Strahlengang im Fernröntgen

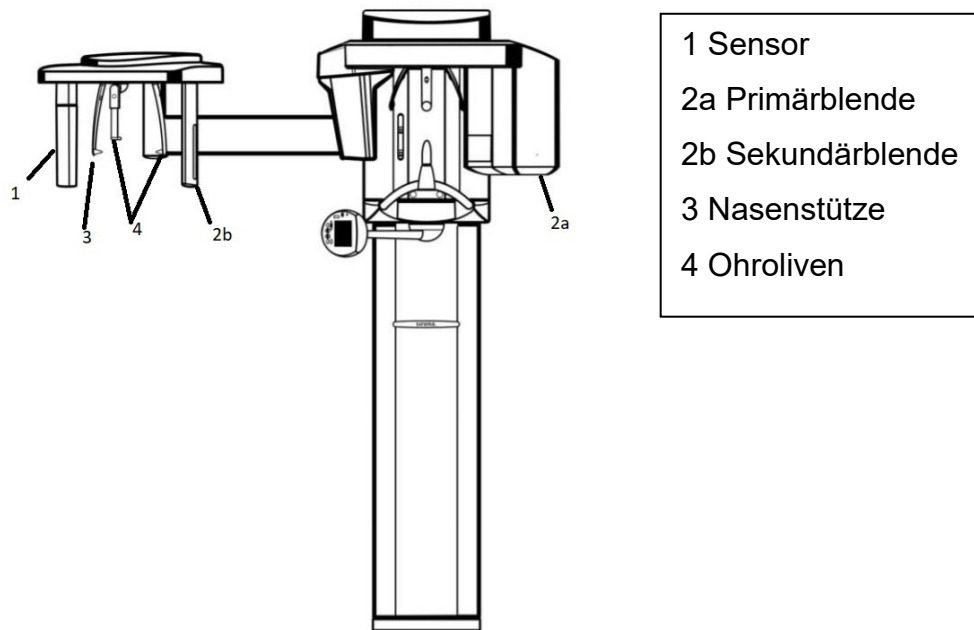


Abbildung 5: Fernröntgen Schematisch
(Sirona, 2017)

Der Abstand zwischen Primärblende und Sensor beträgt ca. 1,5m
Ausgehend von der Primärblende scannt ein pyramidenförmiger Röntgenstrahl innerhalb von ca. 9 Sekunden von links nach rechts den Kopf des/der Patienten/in ab (Sirona, 2017).

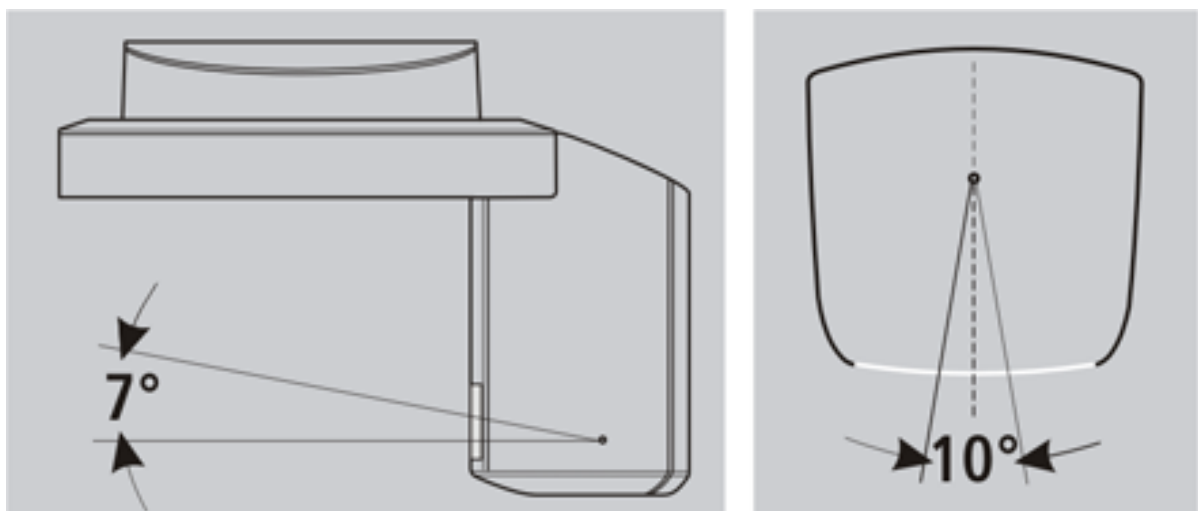


Abbildung 6: Zentralstrahl und Anodenwinkel (Sirona, 2017)

1.1.2. Das DVT des Schädels

1.1.2.1. Allgemeines

Die digitale Volumentomographie (=CBCT, cone beam CT) erlaubt eine dreidimensionale Darstellung der entsprechend aufgenommenen Gewebe. Im Fall des Schädels erstreckt sich das erfasste Gebiet je nach Gerätetyp vom Scheitel bis zum caudalsten Punkt des Kinns. Um das gesamte Gebiet darstellen zu können, braucht man ein bis mehrere Umläufe in unterschiedlichen Höhen (siehe Abbildung 10) (Ralf Schulze, 2009).

Besonders gut geeignet ist das DVT für die Darstellung von Hartgewebe.

Auch außerhalb der Zahnheilkunde werden Schädel DVT von unterschiedlichen Fachgruppen genutzt (HNO etc.) (Ralf Schulze, 2009).

Mit einer DVT-Aufnahme lassen sich auch zweidimensionale Schnittbilder errechnen. So müssen keine zusätzlichen Röntgenaufnahmen wie Fernröntgen, Orthopantomogramm oder ähnliches, gemacht werden, wodurch eine erneute Strahlenexposition vermieden werden kann (Hirschfelder, 2008).

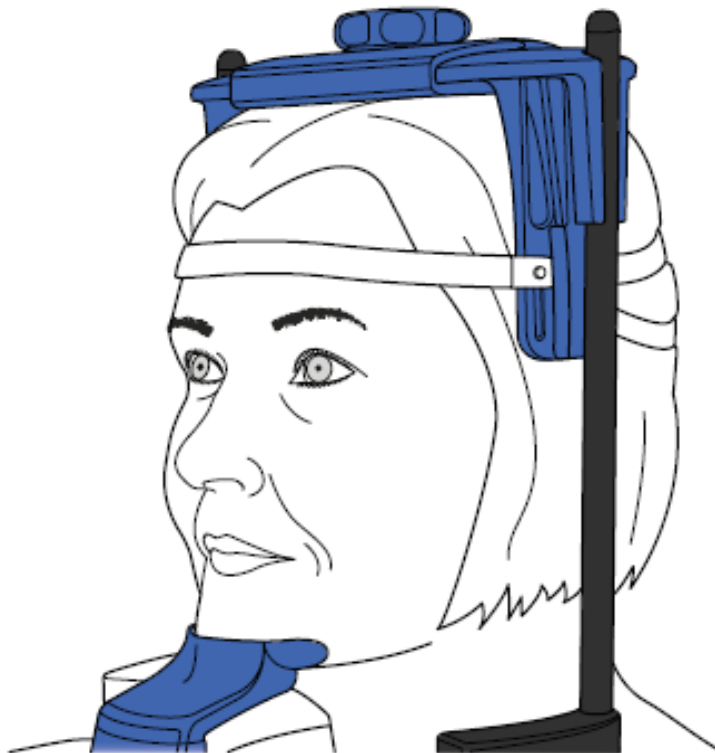


Abbildung 7: Positionierung im DVT (Planmeca, 2018)

1.1.2.2. Indikation in der oralen Chirurgie

Aus oralchirurgischer Sicht:

- (Prä-)implantologisch
- Kieferknochenangebot und Knochenqualität
- Frakturen von Wurzeln oder Alveolarfortsätzen
- Pathologien wie Tumore oder Zysten
- Anomalien
- Dysplasien von Zähnen und Zahnwurzeln
- retinierte Zähne
- zur genaueren Beurteilung unklarer Diagnosen aus anderen zweidimensionalen bildgebenden Verfahren

(Frank Hornung, 2014, Ralf Schulze, 2009)

1.1.2.3. Indikationen in der Kieferorthopädie

Neben den für den Kieferorthopäden relevanten oralchirurgischen Fragestellungen ergeben sich folgende zusätzliche für dieses Fachgebiet relevante Indikationen:

- Lippen-, Kiefer-, Gaumenspalte (Größe und das Ausmaß der Spalte, Knochenverhältnisse, Lage der Wurzel bzgl. Osteoplastik)
- Syndrom-Patienten/innen und craniofaziale Fehlbildungen
- Wurzelresorptionen (vor, während oder nach einer kieferorthopädischen Behandlung)
- Anatomische Strukturen, die einer kieferorthopädischen Bewegung im Weg stehen
- Sind Zahnbewegungen innerhalb der gegebenen Knochengrenzen möglich, vor allem in jenen Regionen, die klinisch relevant erscheinen
- Wurzeldysplasien und andere bewegungs- und positionierungsrelevante Anomalien
- Retinierte Zähne und Zahndurchbruchsstörungen sowie Nichtanlagen und Doppelanlagen → bezüglich ihrer Form, Ausprägung und Lage sowohl im Knochen wie auch zu ihren unmittelbaren Nachbarzähnen

- Abklärung von gutartigen/bösartigen Tumoren und tumorverdächtigen Zufallsbefunden aus dem von der Kieferorthopädie routinemäßig verwendeten Röntgenmaterial
- Knochenrelevante Grunderkrankungen wie zum Beispiel Cherubismus
- Odontom
- Fragliche Ankylosen
- Bei kieferorthopädisch- kieferchirurgischen Kombinationsfällen

1.1.2.4. Technische Grundlagen: DVT

Beim DVT trifft ein dreidimensionales, kegelförmiges Strahlenbündel auf einen zweidimensionalen Flächendetektor. Die Strahlenquelle rotiert zirkulär um den Körper und die anschließende Software berechnet dessen dreidimensionales Volumen.

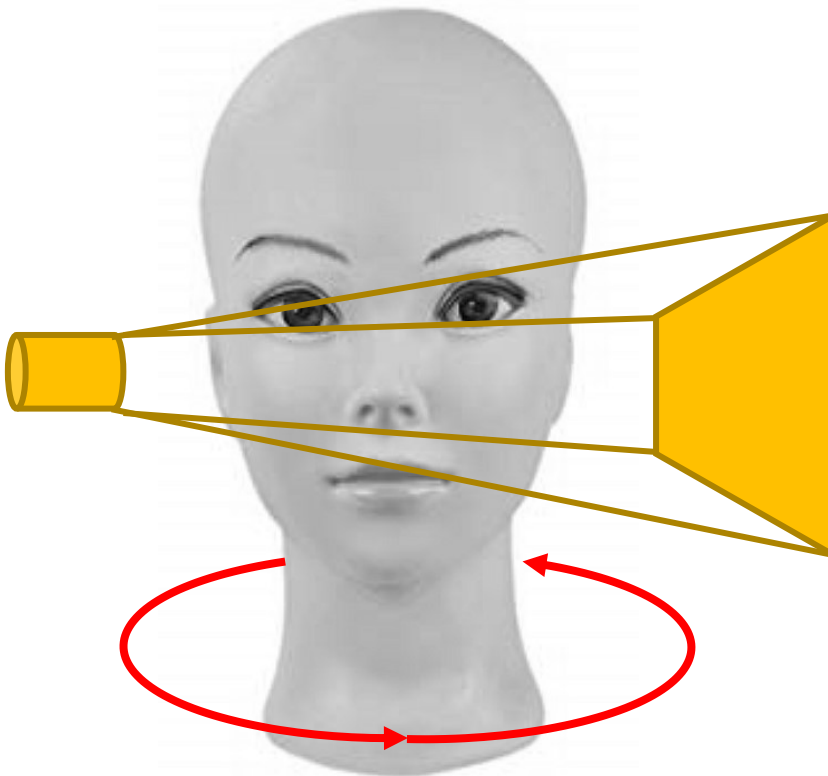


Abbildung 8: DVT Schema

Es ist möglich die Schnittbildebene axial, coronal, sagittal und parasagittal einzeln zu betrachten. (Ralf Schulze, 2009).

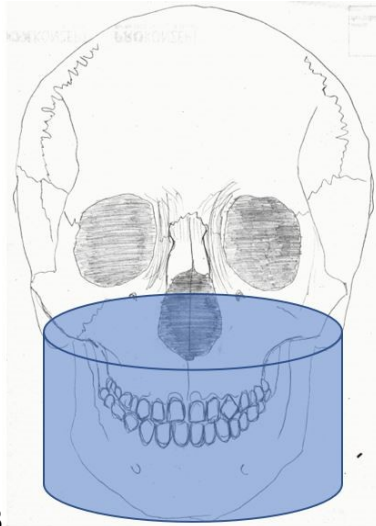


Abbildung 9: Schnittbildebene: coronal, sagittal, axial, 3D (Denecke, 2019)

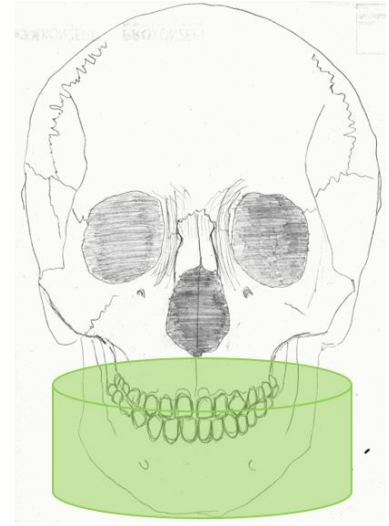
Mittels mehrerer verschiedener „Field of View“ (FOV) kann man bestimmte Abschnitte auswählen, die vom DVT aufgenommen werden sollen, um so die Strahlenbelastung möglichst gering zu halten (Semper, 2013a).

Die Größe der FOV ist vom jeweiligen Gerät vorgegeben, die Positionierung kann man individuell festlegen. Bei einigen Geräten ist es auch möglich eine Aufnahme vom ganzen Schädel zu machen, siehe Abbildung 10.

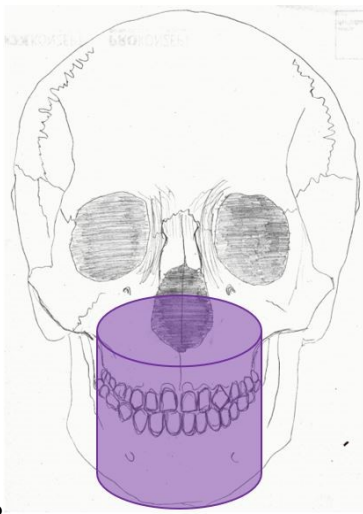
Die Auflösung wird in „Voxel“ angegeben, bedeutet „volumetrische Pixel“ und setzt das Sichtfeld zusammen. Je kleiner die Voxelgröße, umso detailtreuer und hochauflösender wird das zu erhaltende Bild sein (Semper, 2013b).



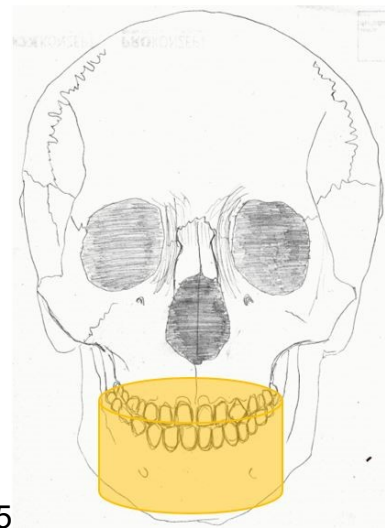
a) 11x8



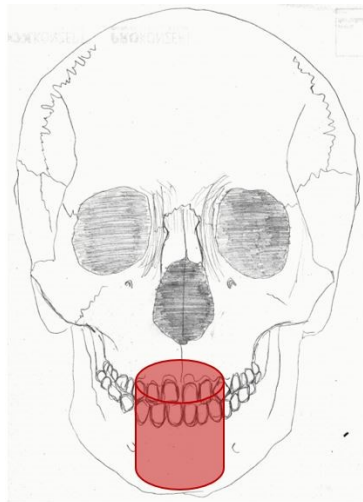
b) 11x5



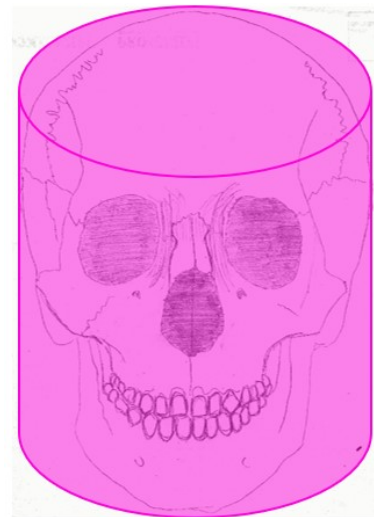
c) 8x8



d) 8x5



e) 5x5



f) ganzer Schädel

Abbildung 10: FOV: 11x8, 11x5, 8x8, 5x5, 8x5, ganzer Schädel

1.2. Fragestellung

Nachdem sowohl das Fernröntgen wie auch das DVT vom Verfahren her strahlenbelastend sind und diese aber für die routinemäßige KFO Diagnostik eine große Relevanz haben, ergibt sich die Fragestellung nach der Belastung von strahlensensiblen Strukturen im Darstellungsgebiet. Aus der Literatur ist bekannt, dass vor allem das Auge und die Schilddrüse besonders strahlensensible Strukturen darstellen.

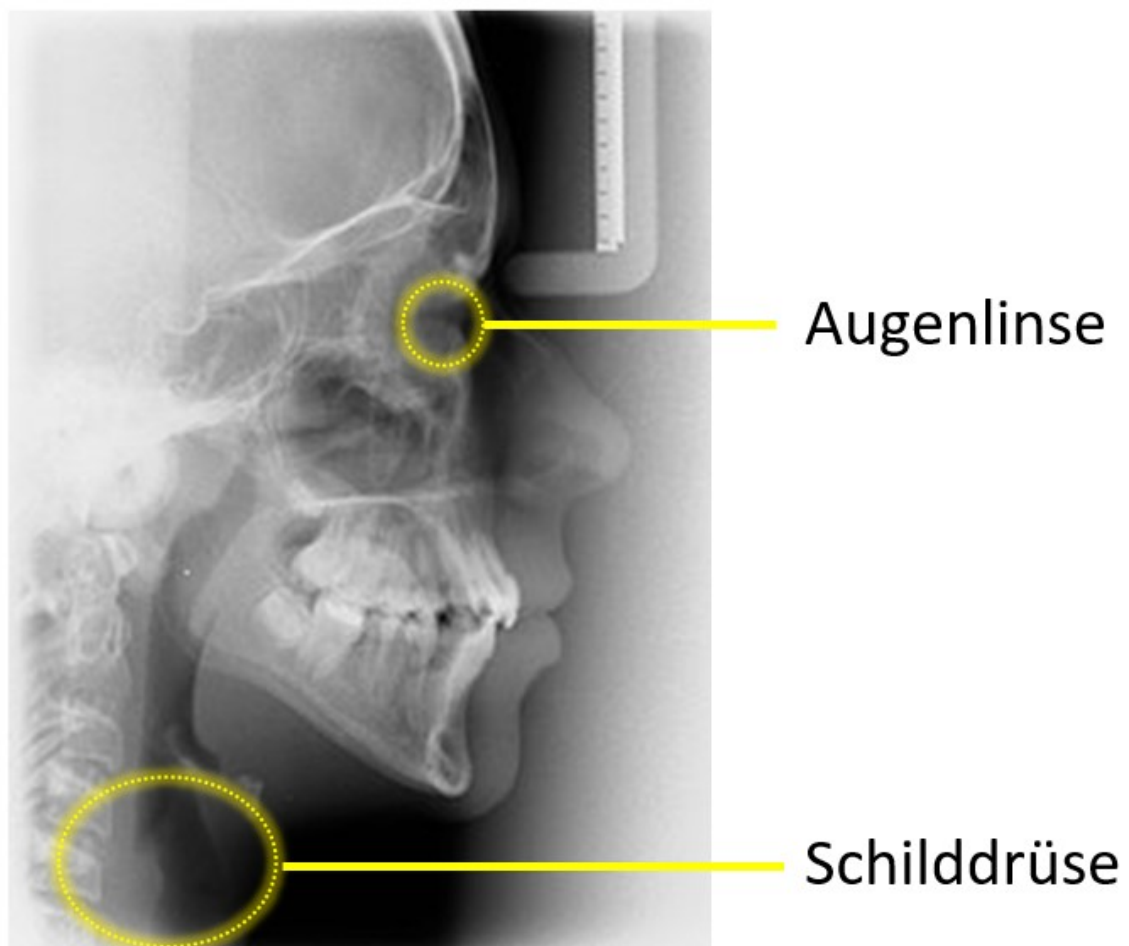


Abbildung 11: Fernröntgen [modifiziert nach: (Wikipedia)]

1.3. Anatomie

1.3.1. Die Augenlinse

1.3.1.1. Aufbau des Auges

Der Bulbus oculi (Augapfel) setzt sich aus der Cornea [1], der Lens cristallina [2], der Iris [3], dem Nervus opticus [4], und dem Corpus vitreum (Glaskörper) [5] zusammen. Der Bulbus wiederum ist zusammengesetzt aus Sclera (Lederhaut) [6], Uvea (Gefäßhaut) und Retina (Netzhaut) [7]. Die Uvea formt die Iris und den Ziliarkörper [8] im vorderen Anteil des Bulbus, sowie die Choroidea [9] im hinteren (Kahle, 2005).

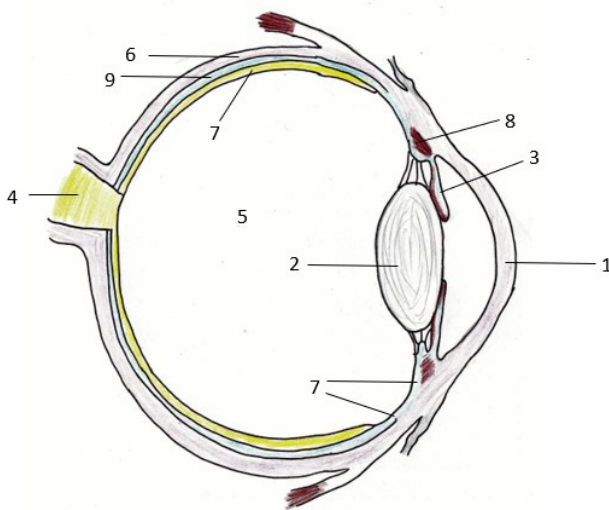


Abbildung 12: Der Aufbau des Auges

1.3.1.2. Die Linse

Die Lens cristallina ist bikonvex geformt und besteht aus langen Epithelzellen (Kahle, 2005). Sie ist ca. 4mm dick und misst 9-10mm im Durchmesser.

Man kann die Linse in verschiedene Zonen einteilen. Die Substantia lentis [1], die aus den zelloosen Fibrae lentis (Linsenfasern) [2+3] besteht, befindet sich unter dem Linsenepithel und setzt sich aus dem härteren Nucleus lentis (Linsenkern) [2] innen und dem weichen Cortex lentis (Linsenrinde) [3] außen zusammen. Das Epithelium lentis [4] reicht von der Vorderseite der Linse bis hin zum Äquator [5].

Umschlossen wird die Linse von der Capsula lentis [6], die 15µm dick ist und an welcher die Zonulafasern [7] anhaften.

Außerdem besitzt die Linse einen Polus anterior [8] und einen Polus posterior [9] (Dauber, 2011).

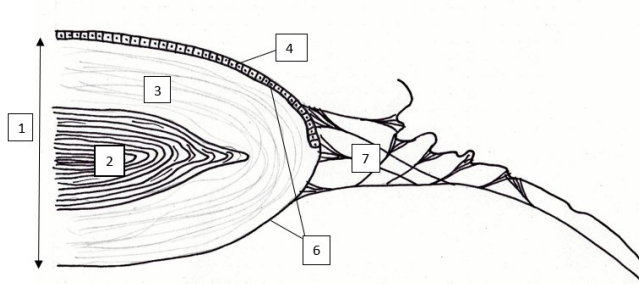


Abbildung 13: Linse mit Zonula

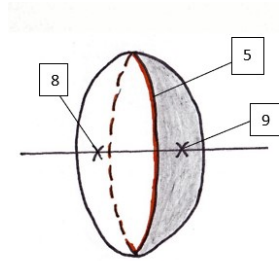


Abbildung 14: Polus anterior und posterior

1.3.2. Die Schilddrüse

1.3.2.1. Aufbau der Glandula thyroidea

Die Glandula thyroidea ist zusammengesetzt aus dem Lobus dexter [1] und dem Lobus sinister [2], die über den Isthmus glandulae thyroideae [3] miteinander verbunden sind. Außerdem geht vom Isthmus ein weiterer Lobus pyramidalis [4] aus. Die beiden Lobi dexter und sinister verfügen jeweils über einen Polus superior [5] und einen Polus inferior [6]. Umschlossen wird die Glandula thyroidea von der Capsula glandulae thyroideae.

Die Schilddrüse zählt zu den Organen im Körper, das am stärksten durchblutet ist. Sie wird von den Arteriae thyroidea superior [7] und inferior [8] sowie von den Venae thyroideae superiores [9] und inferiores, die aus dem Plexus thyroideus impar [10] hervorgehen, versorgt.

Auf der Dorsalfläche der Schilddrüse sitzen die linsenförmigen Glandulae parathyroideae (5x3x2mm). Je Lobus befindet sich eine Glandula parathyroidea superior [11] und eine Glandula parathyroidea inferior [12].

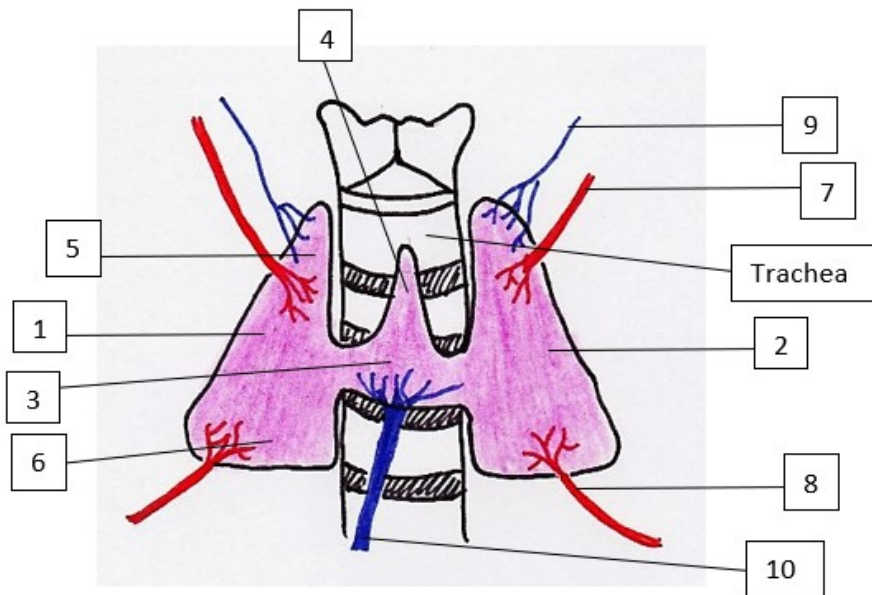


Abbildung 15: Glandula thyroidea (ventral)

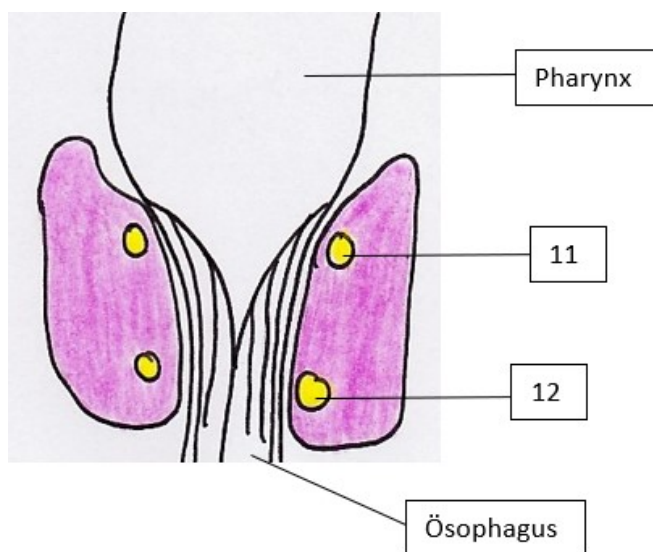


Abbildung 16: Glandula thyroidea (dorsal)

Die Schilddrüsenfollikel bestehen aus einschichtigem Epithel, das je nach Funktionsbereich flach, isoprismatisch, prismatisch oder hochzylindrisch ist. Diese Follikel produzieren und enthalten hormonhaltiges Sekret, das Kolloid genannt wird. Die produzierten Hormone sind Thyroxin (T₄), Trijodthyronin (T₃), die Einfluss auf den Zellstoffwechsel haben, sowie das Calcitonin, das den Blutcalciumspiegel mitreguliert (Kahle, 2005).

1.4. Strahlenschutz

Der Strahlenschutz wird hauptsächlich durch das ALARA-Prinzip gestaltet: „as low as reasonably achievable“. Es gilt die Strahlenexposition möglichst gering zu halten, die Anwendung ionisierender Strahlung zu rechtfertigen und so den einzelnen Patienten zu schützen.

Der effektivste Schutz vor Strahlung ist Abstand zu halten, denn laut dem Abstandquadratgesetz verringert sich die Dosis quadratisch, wenn sich der Abstand zum Ursprung vergrößert (Abstand zum Ursprung= a, Dosis= D).

$$D = 1/a^2$$

Außerdem ist es hilfreich sich gegen Strahlung abzuschirmen und ein strahlenundurchlässiges Material zwischen sich und dem Strahlenursprung zu bringen; genauso wichtig ist es die Dauer des Aufenthaltes im Strahlenfeld zu beschränken (Reiser et al., 2017).

Gesetzlich wird der Strahlenschutz in der Medizin in Österreich über die Medizinische Strahlenschutzverordnung - MedStrSchV, die Allgemeine Strahlenschutzverordnung - AllgStrSchV und das Strahlenschutzgesetz – StrSchG geregelt.

1.4.1. Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen sind genauso wie sichtbares Licht, UV-Licht, Infrarotstrahlen, γ -Strahlen und Radio- und Mikrowellen elektromagnetische Wellen. Sie sind Teil der indirekt ionisierenden Strahlen (Reiser et al., 2017).

Röntgenstrahlen liegen innerhalb des elektromagnetischen Spektrums oberhalb des ultravioletten Lichts, sie reichen von ca. 10nm bis ca. 10^{-1} nm (Fuhrmann, 2013).

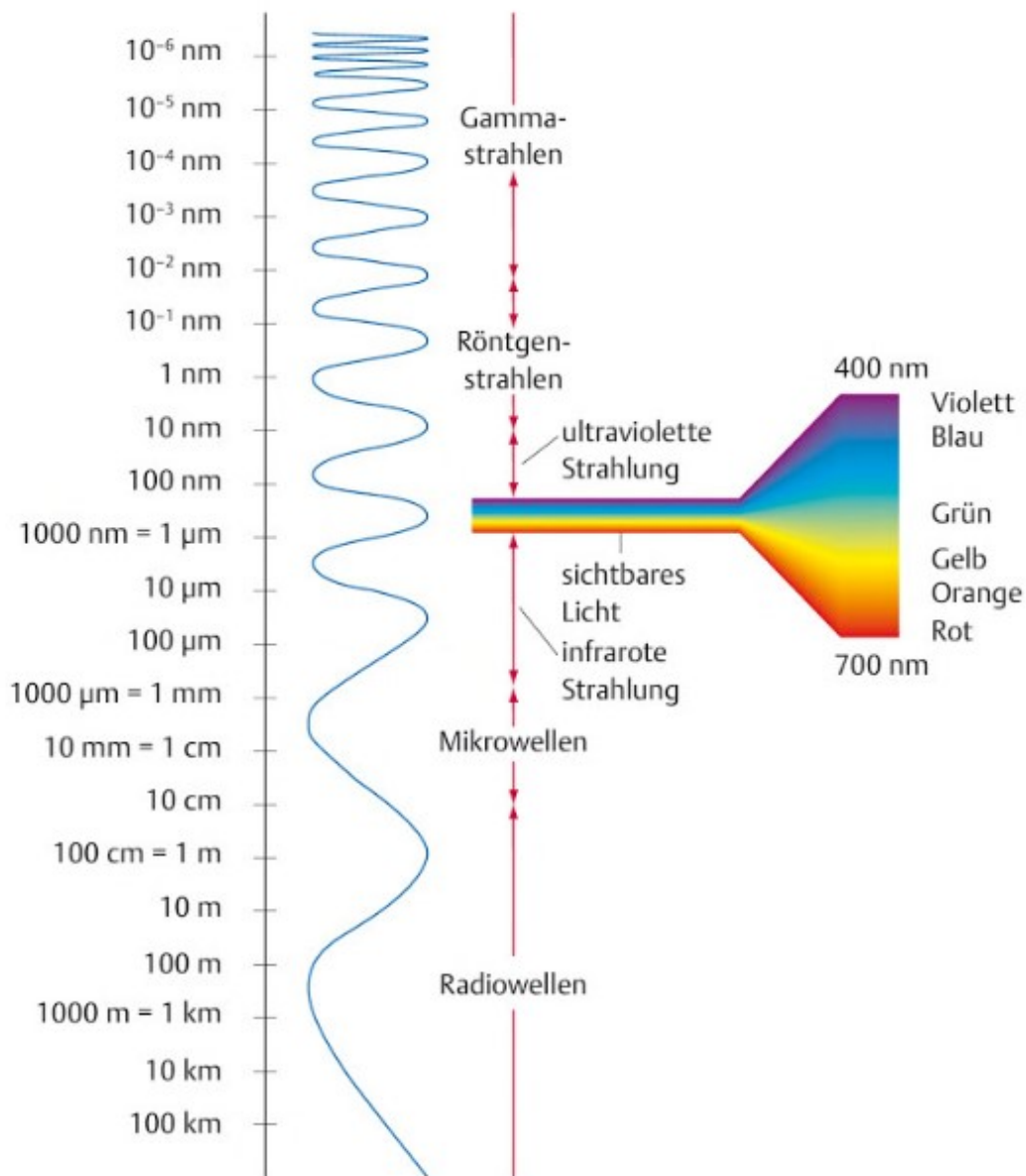


Abbildung 17: Elektromagnetisches Spektrum

Die künstlich erzeugten Röntgenstrahlen entstehen in einer Röntgenröhre, die mit 2 Elektroden, der Anode (positiv) und der Kathode (negativ), ausgestattet ist. Die Kathode enthält einen Wolframdraht, der erhitzt wird. So werden Elektronen vom Atom getrennt und von der Anode angezogen. Spannung beschleunigt die Teilchen, ein elektromagnetisches Feld leitet die Strahlung zum Brennfleck auf der Anode. Dort gibt sie ca. 1% Röntgenbremsstrahlung ab und 99% wird in Wärme umgewandelt (Reiser et al., 2017).

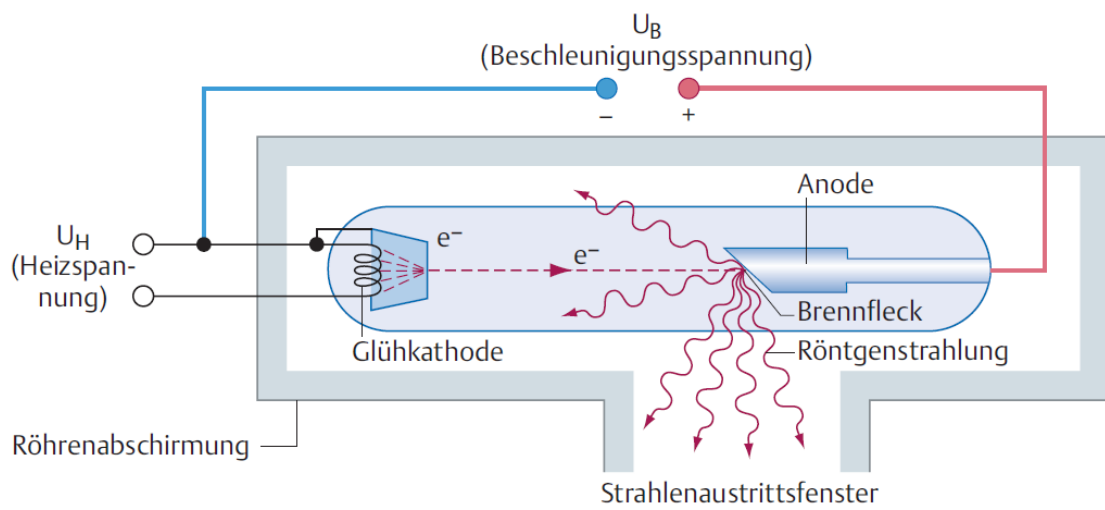


Abbildung 18: Entstehung von Röntgenstrahlung (Reiser et al., 2017)

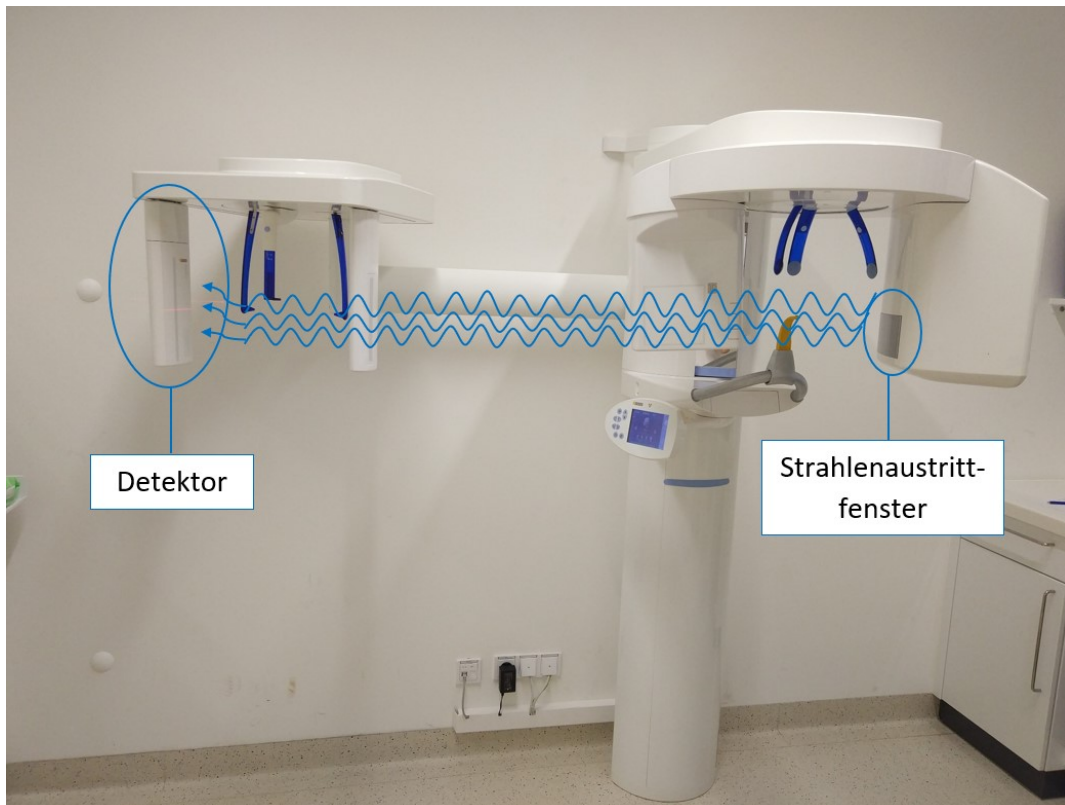


Abbildung 19: Strahlenaustrittsfenster und Detektor im Fernröntgen

1.4.2. Dosisbegriffe

Für die Bezeichnung der Äquivalentdosis in Organen wird der Begriff „Organdosis“ verwendet.

Organ- Äquivalentdosis (H)

$$H = W_R \times D$$

W_R = Strahlenwichtungsfaktor, wird von der Strahlenschutzverordnung festgelegt und bezieht die verschiedenen biologischen Wirksamkeiten der Strahlenart mit ein. [Strahlen-Wichtungsfaktor siehe 5.1.]

D = mittlere Energiedosis im Organ (Gray)

Einheit = J/kg oder Sievert (Sv)

Liegen mehrere Strahlenarten oder Energien vor, so ergeben alle Einzelbeträge zusammen die Organ-Äquivalentdosis (H) (Reiser et al., 2017).

Bezieht man zusätzlich die Strahlenempfindlichkeit der einzelnen Organe mit ein, so erhält man die **effektive Dosis** (Einheit: Sievert). Hierzu werden die Organ-Äquivalentdosen mit dem Gewebe-Wichtungsfaktor multipliziert und danach summiert. [Gewebe-Wichtungsfaktor siehe 5.2.]

$$H_{\text{eff}} = \sum T W_T H_T$$

(Reiser et al., 2017).

Dosisflächenprodukt

Das Dosisflächenprodukt (DAP, Dose-Area-Product) dient als Dosisindikator zur Abschätzung der Patientendosis. Es beschreibt die Strahlenbelastung, welcher der Patient bei einer Röntgenaufnahme ausgesetzt ist. Es ist somit für den Strahlenschutz ein wichtiges Hilfsmittel, um Risiken einzuschätzen. Es errechnet sich aus der Multiplikation der Einfalldosis mit der bestrahlten Fläche [mGy*cm²] (Schmidt and Freyschmidt, 2013).

Strahlenschutz

Im Rahmen des Strahlenschutzes wurden Werte für die effektive Dosis festgelegt, die pro Jahr nicht überschritten werden dürfen. Für eine Person der Bevölkerung, die beruflich nicht mit Strahlung zu tun hat gilt: 1mSv pro Jahr dürfen nicht überschritten werden. Dabei werden Expositionen im Rahmen einer ärztlichen Untersuchung oder Behandlung nicht berücksichtigt.

Auch gibt es Richtlinien für Personen, die beruflich strahlenexponiert sind. Sie werden eingeteilt in Personen der Kategorie A (ab 6mSv/Jahr), Personen der Kategorie B (bis 6mSv/Jahr).

Bei Personen der Kategorie A ist aufgrund ihrer beruflichen Handlungen anzunehmen, dass sie in 12 aufeinander folgenden Monaten einer größeren effektiven Dosis als 6mSv ausgesetzt sind. Für die Augenlinse ist eine größere Organäquivalentdosis als 45mSv anzunehmen und für Haut oder Hände, Unterarme, Füße und Knöchel eine größere Organäquivalentdosis als 150mSv. Personen der Kategorie B, sind Personen, die beruflich strahlenexponiert sind, aber nicht der Kategorie A zugehörig sind (AllgStrSchV, 2018).

Tabelle 1: Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen und Einzelpersonen der Bevölkerung (mSv/Jahr) (AllgStrSchV, 2018)

Körperdosis	Alle beruflich strahlenexponierten Personen (Kategorie A)	Personen der Kategorie B	Einzelpersonen der Bevölkerung
Effektive Dosis	20mSv	6mSv	1mSv
Augenlinse	150mSv	45mSv	15mSv
Haut, Hände, Unterarme, Füße, Knöchel	500mSv	150mSv	50mSv

1.4.3. Strahlenexposition

In der Literatur wird erläutert, dass bei einem Fernröntgen eine effektive Dosis von 5,6 μ Sv entsteht und bei einem DVT 11-674 μ Sv.

Eine Aufnahme mit dem digitalen Orthopantomogramm kommt auf 2,7 - 24,5 μ Sv, eine Kleinbildröntgenaufnahme auf 34,9 – 388 μ Sv.

Bei einer Computertomographie im Vergleich dazu, entstehen 180-2100 μ Sv (Fuhrmann, 2013).

1.4.4. Strahlungswirkung

Zunächst unterscheidet man zwischen deterministischen und stochastischen Strahlenschäden.

Bei deterministischen Strahlenschäden muss eine Schwellendosis überschritten werden, die sich aus der Organdosis ergibt. Je größer dabei die Strahlendosis ist, desto größer ist auch der Organschaden.

Bei stochastischen Strahlenschäden gibt es keine Schwellendosis, die Schäden entstehen zufällig, basierend auf statistischen Wahrscheinlichkeitsberechnungen. Je größer die Dosis desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Strahlenschaden entsteht (Reiser et al., 2017).

Primär löst die Röntgenstrahlung als ionisierende Strahlung den physikalischen Prozess der Absorption aus. Dadurch kommt es zu weitreichenden biochemischen Veränderungen mit beträchtlichen Gewebsfolgen. Es handelt sich um sehr komplexe Mechanismen, die von der atomaren Ebene bis hin zur makromolekularen Ebene reichen, in Form von Gewebszerstörung oder tumorösen Wucherungen.

Am problematischsten ist die Wirkung auf die Basen der Desoxyribonukleinsäure (DNA) und die darauffolgenden Einzel- bzw. Doppelstrangbrüche. Diese können zwar repariert werden, um eventuelle Mutationen zu verhindern, allerdings funktioniert dies nicht immer. Wenn beispielsweise die Schwellendosis überschritten wird oder die Stelle, an der Strahlung auftrifft, ungünstig ist, kann es entweder zu einer reduzierten Zellfunktion, zur Apoptose (programmierter Zelltod) oder zur Mutation kommen, die eine Krebsentstehung begünstigen kann (Fuhrmann, 2013).

1.5. Linsenschädigung und Strahlung

1.5.1. Warum ist die Augenlinse strahlensensibel?

Augenlinse, Keimdrüsen und Knochenmark sind schon sehr lange als die Organe bekannt, die am sensibelsten auf Strahlung reagieren, wobei der genaue Mechanismus warum die Linse so sensibel reagiert noch nicht komplett entschlüsselt wurde.

Als sehr wahrscheinlich angesehen wird, dass sich Zellschaden in der Linse sammelt, weil es keinen Zell turn-over gibt. Die Linse ist gefäßlos und hat eine niedrigere Stoffwechselaktivität als andere Gewebe. Außerdem stammen alle Zellen der Linse von einem einzigen Zelltyp, dem Epithelium lentis (Hamada, 2017).

Das Epithelium lentis teilt und differenziert sich in die Fibrae lentis, die weder Zellkern noch Mitochondrien enthalten und von dem darüberliegenden Epithelium lentis abhängig von Nährstoffen und Energie sind. Dieser Vorgang verlangsamt sich zwar in der Pubertät, aber die Linse hört nie auf zu wachsen (ICRP, 2012).

Die Capsula lentis, die die Linse umschließt enthält alle Zellen der Linse, die lebenden und die toten. So sammeln sich im Laufe der Zeit auch jene Zellen in der Linse, die durch Strahlung geschädigt und abgetötet wurden.

Auch werden folgende Umstände in der Literatur diskutiert, die die Strahlensensibilität der Linse beeinflussen:

- übermäßige Zellproliferation
- abnormale Differenzierung
- langsame Reparatur von DNA-Doppelsträngen Brüchen
- Telomere
- Vergreisung
- Kristallinveränderungen
- nicht zielgerichtete Wirkungen
- Entzündungen

(Hamada, 2017)

1.5.2. Schwellendosis für Linsenschädigung

Der deterministische Effekt nach Bestrahlung mit ionisierender Strahlung, wie zum Beispiel Röntgenstrahlung, benötigt eine Schwellendosis.

Laut der „International Commission on Radiological Protection“ (ICRP) wurde 2007 ein Schwellenwert für strahleninduzierte Katarakte 5Gy angenommen. Dieser Wert wurde von derselben Kommission aufgrund aktuellerer Studienlage 2012 revidiert und liegt daher bis auf Widerruf derzeit bei 0,5Gy. Diese Dosiswirkung ist kumulativ zu betrachten (ICRP, 2012).

1.5.3. Katarakt

Die häufigste strahleninduzierte Schädigung der Linse ist die Katarakt (Reiser et al., 2017), auch als „grauer Star“ bezeichnet, bei der die Linse trüb wird und die Sehschärfe abnimmt. Außerdem kann es zu Blendempfindlichkeit und Doppelbildern kommen.



Abbildung 20: Katarakt (Mißfeldt, 2012-2018)

Katarakte können angeboren (unter 1%) oder erworben (über 99%) sein. Meist sind erworbene Katarakte so genannte „Alterskatarakte“.

Außerdem zu den erworbenen Katarakten gehören:

- Katarakte, die durch Allgemeinerkrankungen bedingt sind, wie zum Beispiel Diabetes mellitus
- Katarakte bei Augenerkrankungen, wie zum Beispiel Heterochromiekatarakt
- Katarakte nach Eingriffen im Auge
- Katarakte bei Verletzungen, zum Beispiel
 - o Kontusions- und Perforationsrosetten
 - o hierzu gehören auch die strahleninduzierten Katarakte
 - o medikamentös indizierte Katarakte, zum Beispiel durch Cortison.

Angeborene Katarakte können einerseits vererbt werden oder auf Grund eines frühembryonalen Schadens bereits im Mutterleib entstehen.

Außerdem kann man Katarakte morphologisch einteilen in Cataracta nuclearis, Cataracta corticalis, Cataracta subcapsularis posterior, Cataracta matura und Cataracta hypermatura.

Katarakte können nicht medikamentös behandelt werden. Die einzige Möglichkeit ist eine operative Therapie, wenn sich der Patient dadurch visuell eingeschränkt fühlt, eine Cataracta (hyper-) matura vorliegt oder wenn bereits eine Augenhintergrunderkrankung besteht. Die Standardmethode ist die Extrakapsuläre Kataraktextraktion (ECCE), bei der zunächst die vordere Kapsel eröffnet und dann die trübe Linse entfernt wird. Anschließend wird eine künstliche sogenannte Hinterkammerlinse eingesetzt (Lang, 2014).

1.6. Schilddrüsenschädigung und Strahlung

Bei der Schilddrüse kommt es hauptsächlich zu stochastischen Strahlenschäden, das bedeutet, es wird keine Schwellendosis benötigt. Es kommt hierbei zu einer malignen Mutation der Schilddrüsenzellen. Selbst geringe Dosen ionisierender Strahlung reichen bei diesem strahlensensiblen Organ aus, um Schilddrüsenkrebs hervorzurufen. Bei einem soliden Tumor kann es durchschnittlich 20 Jahre dauern, bis sich Symptome äußern (Reiser et al., 2017).

1.6.1. Schilddrüsenmalignom

In Europa beträgt die Inzidenz für Schilddrüsenmalignome 3:100.000. In China, Hawaii und in der Region um Tschernobyl (Ukraine) ist ein Schilddrüsenmalignom häufiger.

Schilddrüsenmalignome lassen sich in Karzinome (ca. 95%), Lymphome, Fibrosarkome, Teratome und Metastasen einteilen.

Karzinome lassen sich darüber hinaus in differenziert, undifferenziert und C-Zell-Differenzierung unterteilen.

Zu den differenzierten Schilddrüsenkarzinomen gehören die papillären (55%) und follikulären (30%) Schilddrüsenkarzinome, zu den undifferenzierten gehört das anaplastische (10%) Schilddrüsenkarzinom und die C-Zell-Differenzierung. Sie wird auch medulläres (5%) Schilddrüsenkarzinom genannt.

Symptome für ein Schilddrüsenmalignom sind zunächst Strumaknoten. Diese können allein oder gehäuft auftreten und sind schmerzlos und derb.

Außerdem treten Beschwerden beim Schlucken, Stimmbandlähmungen mit Heiserkeit, Pupillenverengungen, Herabhängen des oberen Augenlids, Hervortreten der Augen und Behinderung des venösen Rückflusses zum Herzen auf.

Zur Diagnose eines Schilddrüsenmalignoms werden Sonographie und Szintigraphie verwendet. Außerdem kann man zur Beurteilung des Verlaufs Tumormarker im Blut zu Rate ziehen. Die Therapie der Wahl ist eine Operation.

Bei Tumoren, die Jod speichern, kann außerdem eine Radiojod-Therapie gemacht werden.

Bei Tumoren, die nicht Jod speichern, undifferenziert und strahlensensibel sind kann eine Strahlentherapie hilfreich sein.

Palliativ kann eine Chemotherapie unterstützend wirken (Braun, 2017).

1.7. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit war es, die Strahlenbelastung der Augenlinse und der Schilddrüse in der kieferorthopädischen Schäldiagnostik zu eruieren. Augenlinse und Schilddrüse sind oberflächlich liegende, strahlensensible Gebiete, die im Fernröntgen und in der digitalen Volumentomographie miterfasst werden können. Anhand von Versuchsmessungen mit einem Phantomkopf und Messkristallen wurden Messungen durchgeführt, um nähere Informationen bezüglich der Strahlenbelastung für diese strahlensensiblen Gebiete zu erlangen.

2. Material und Methoden

2.1. Der Versuchsaufbau

Die Durchführung der Messungen am Fernröntgengerät (Sirona orthophos XG 3D) und am DVT (Planmeca ProMax 3D Max) fand an der Abteilung für Oralchirurgie und Kieferorthopädie der Universitätsklinik für Zahnmedizin und Mundgesundheit in Graz statt.

Hierfür wurde der Phantomkopf eines „Alderson Rando Phantom“ aus gewebeäquivalentem Polymer mit Thermolumineszenzkristallen aus Lithiumfluorid bestückt. Diese Kristalle sind in der Lage die absorbierte Energie zu speichern, welche anschließend mit Hilfe eines speziellen Auswerteverfahrens ausgelesen wurde. Die Auswertung der Messkristalle erfolgte im Kompetenzzentrum für Medizinische Physik und Strahlenschutz am LKH- Universitätsklinikum Graz.

2.5.1. Messung ohne Augenabdeckung

Die Messkristalle wurden wie folgt positioniert:

- 1x am Augenaußenwinkel links
- 1x am Augenaußenwinkel rechts
- 1x am Punkt „Nasion“
- 1x auf Höhe der Schilddrüse

Siehe Abb. 21

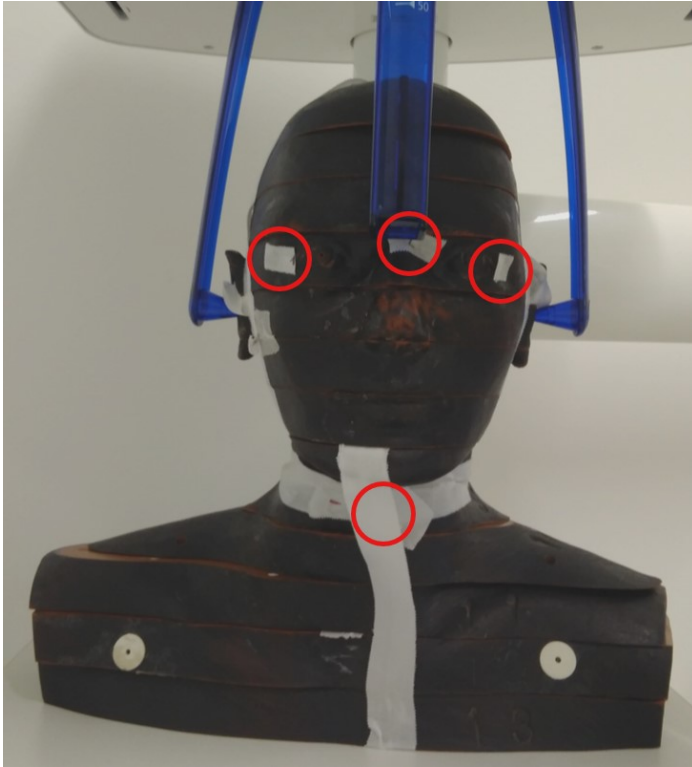


Abbildung 21: Position der Messkristalle ohne Augenabdeckung

2.5.2. Messung mit Augenabdeckung

Für weitere Messungen wurde über die Messkristalle am Augenaußenwinkel rechts und links jeweils eine „Augenabdeckung“ geklebt. (siehe Abbildung 23)



Abbildung 22: AttenuRad CT Eye Shield (UniversalMedical)

Diese Augenabdeckung wurde aus einem CT Augenschutz „AttenuRad CT Eye Shield“ zugeschnitten. Diese flexible Augenabdeckung besteht aus Bismuth, hat einen Gummiüberzug, ist 1mm dick und hält laut Herstellerangaben ca. 50% der Strahlung ab (Biosmith).

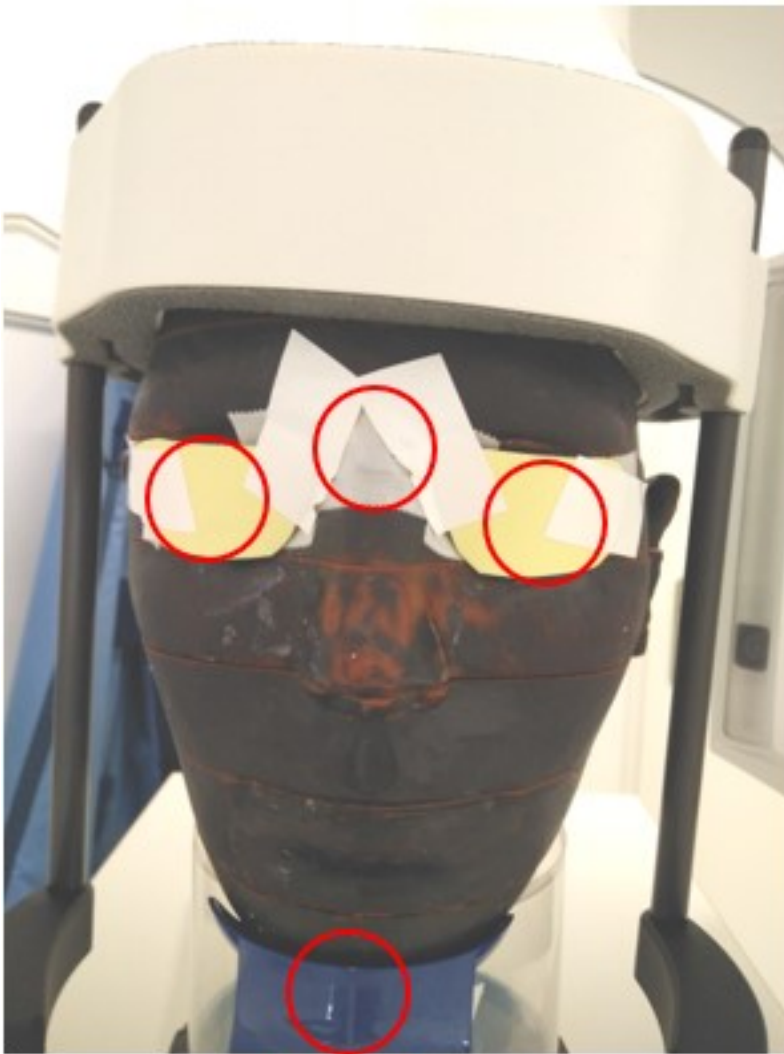


Abbildung 23: Positionierung der Augenabdeckung „AttenuRad CT Eye Shield“ am Phantomkopf

Die Messkristalle wurden wie folgt positioniert:

- 1x am Augenaußenwinkel links, mit Augenabdeckung
- 1x am Augenaußenwinkel rechts, mit Augenabdeckung
- 1x am Punkt „Nasion“
- 1x auf Höhe der Schilddrüse

Siehe Abb. 23

2.2. Der Versuchsablauf

2.2.1. Fernröntgen



Abbildung 24: Versuchsablauf Fernröntgen

Die Einstellungen, die im Fernröntgen/Ceph ausgewählt wurden, richteten sich nach dem Körpergewicht und Körpergröße einer untersuchten Person unterschiedlichen Alters und entsprechen den Einstellungen, die von der Firma Sirona vorgegeben werden.

1. „Kind“	73kV, 15mA, 9,4sec
2. „Jugendliche(r)/Frau“	77kV, 14mA, 9,4sec
3. „Frau/Mann“	84kV, 13mA, 9,4sec

(Sirona, 2017)

kV= Kilo Volt, Einheit für die elektrische Spannung, bzw. Röhrenspannung

mA= Milliampere, Einheit für die Stromstärke, bzw. Röhrenstrom

sec= Sekunden, Zeiteinheit

In der vorliegenden Studie erfolgten fünf Messdurchgänge pro Einstellung mit je 20 Röntgenaufnahmen - mit Messkörpern und ohne Augenabdeckung.

Anschließend erfolgte ein Messdurchgang pro Einstellung mit je 20 Röntgenaufnahmen - mit Messkörpern und mit Augenabdeckung.

Tabelle 2: Versuchsablauf im Fernröntgen

	Messungen ohne Augenabdeckung	Messungen mit Augenabdeckung
Auge links	20 x „Kind“	20 x „Kind“
	20 x „Jugendliche(r)/Frau“	20 x „Jugendliche(r)/Frau“
	20 x „Frau/Mann “	20 x „Frau/Mann “
Auge rechts	20 x „Kind“	20 x „Kind“
	20 x „Jugendliche(r)/Frau“	20 x „Jugendliche(r)/Frau“
	20 x „Frau/Mann “	20 x „Frau/Mann “
Nasion	20 x „Kind“	20 x „Kind“
	20 x „Jugendliche(r)/Frau“	20 x „Jugendliche(r)/Frau“
	20 x „Frau/Mann “	20 x „Frau/Mann “
Schilddrüse	20 x „Kind“	20 x „Kind“
	20 x „Jugendliche(r)/Frau“	20 x „Jugendliche(r)/Frau“
	20 x „Frau/Mann “	20 x „Frau/Mann “

2.2.2. DVT



Abbildung 25: Versuchsablauf DVT

Die Einstellungen, die für das DVT ausgewählt wurden, richteten sich nach der, von der Firma vorgegebenen, Parameter.

Bei Auswahl „Schädelgröße M“, Länge 23cm

Tabelle 3: Die Einstellungen im DVT (Schädelgröße M, Länge 23cm)

Bezeichnung	kV	mA	sec	DAP	CTDI
„ultra low dose – low dose“	96kV	2,2mA	9sec	464 mGy*cm ²	0,5 mGy
„ultra low dose – normal“	96kV	4mA	9sec	767 mGy*cm ²	0,8 mGy
„ultra low dose – HD“	96kV	5mA	12sec	1295 mGy*cm ²	1,3 mGy
“normal – low dose“	96kV	4mA	18sec	1606mGy*cm ²	1,7mGy
“normal – normal“	96kV	5,6mA	27sec	2149 mGy*cm ²	2,3 mGy
“normal – HD“	96kV	7,1mA	36sec	3678 mGy*cm ²	3,9 mGy

DAP= angezeigtes (Dosis-Area-Produkt) Dosisflächenprodukt [mGy*cm] (siehe Kapitel 1.4.2. Dosisbegriffe, Seite 29)

CTDI= Angezeigter CT-Dosisindex [mGy]

Mit dem Phantomkopf erfolgte ein Durchgang pro Einstellung (mit Schädelgröße: M; Länge: 23cm), je eine Aufnahme ohne Augenabdeckung und ein Durchgang pro Einstellung (mit Schädelgröße: M; Länge: 23cm), je eine Aufnahme mit Augenabdeckung.

Tabelle 4: Versuchsablauf im DVT (Phantomkopf)

	Messungen ohne Augenabdeckung	Messungen mit Augenabdeckung
Auge links	1x "normal – low dose"	1x "normal – low dose"
	1 x "normal – normal"	1 x "normal – normal"
	1 x "normal – HD"	1 x "normal – HD"
	1x „ultra low dose – low dose“	1x „ultra low dose – low dose“
	1x „ultra low dose – normal“	1x „ultra low dose – normal“
	1x „ultra low dose – HD“	1x „ultra low dose – HD“
Auge rechts	1x "normal – low dose"	1x "normal – low dose"
	1 x "normal – normal"	1 x "normal – normal"
	1 x "normal – HD"	1 x "normal – HD"
	1x „ultra low dose – low dose“	1x „ultra low dose – low dose“
	1x „ultra low dose – normal“	1x „ultra low dose – normal“
	1x „ultra low dose – HD“	1x „ultra low dose – HD“
Nasion	1x "normal – low dose"	1x "normal – low dose"
	1 x "normal – normal"	1 x "normal – normal"
	1 x "normal – HD"	1 x "normal – HD"
	1x „ultra low dose – low dose“	1x „ultra low dose – low dose“
	1x „ultra low dose – normal“	1x „ultra low dose – normal“
	1x „ultra low dose – HD“	1x „ultra low dose – HD“
Schilddrüse	1x "normal – low dose"	1x "normal – low dose"
	1 x "normal – normal"	1 x "normal – normal"
	1 x "normal – HD"	1 x "normal – HD"
	1x „ultra low dose – low dose“	1x „ultra low dose – low dose“
	1x „ultra low dose – normal“	1x „ultra low dose – normal“
	1x „ultra low dose – HD“	1x „ultra low dose – HD“

Des Weiteren erfolgten Messungen mit einem Echtschädel (ohne Gehirn). (Siehe Tabelle 5 und 6 (nächste Seite)). Dieser wurde freundlicherweise vom Institut für makroskopische und klinische Anatomie zur Verfügung gestellt. Es wurde die „Schädelgröße M“ und die Länge 16cm gewählt. Die Durchgänge erfolgten pro Einstellung, je eine Aufnahme ohne Augenabdeckungen.

Tabelle 5: Die Einstellungen im DVT für den Echtschädel (Schädelgröße M, Länge 16cm)

	kV	mA	sec	DAP	CTDI	Bezeichnung
1.	96kV	4mA	9sec	803mGy*cm ²	0,8mGy	“normal – low dose”
2.	96kV	5,6mA	13,5sec	1074mGy*cm ²	1,1mGy	“normal – normal”
3.	96kV	7,1mA	18sec	1839mGy*cm ²	2mGy	“normal – HD”
4.	96kV	2,2mA	4,5sec	232mGy*cm ²	0,2mGy	„ultra low dose – low dose”
5.	96kV	4mA	4sec	384mGy*cm ²	0,4mGy	„ultra low dose – normal”
6.	96kV	5MmA	6sec	648mGy*cm ²	0,7mGy	„ultra low dose – HD”

Tabelle 6: Versuchsablauf im DVT (Echtschädel)

	Messungen ohne Augenabdeckung
Auge links	1x "normal – low dose"
	1 x "normal – normal"
	1 x "normal – HD"
	1x „ultra low dose – low dose“
	1x „ultra low dose – normal“
	1x „ultra low dose – HD“
Auge rechts	1x "normal – low dose"
	1 x "normal – normal"
	1 x "normal – HD"
	1x „ultra low dose – low dose“
	1x „ultra low dose – normal“
	1x „ultra low dose – HD“
Nasion	1x "normal – low dose"
	1 x "normal – normal"
	1 x "normal – HD"
	1x „ultra low dose – low dose“
	1x „ultra low dose – normal“
	1x „ultra low dose – HD“
Schilddrüse	1x "normal – low dose"
	1 x "normal – normal"
	1 x "normal – HD"
	1x „ultra low dose – low dose“
	1x „ultra low dose – normal“
	1x „ultra low dose – HD“

3. Ergebnisse – Resultate

3.1. Auswertung der Fernröntgenwerte

Die Messwerte wurden nach **Messort** (Augenaußenwinkel rechts, Augenaußenwinkel links, Nasenwurzel, Schilddrüse), **Abdeckung** (mit/ohne) und **Strahlendosis** aufgeteilt und miteinander verglichen.

Tabelle 7: Ergebnisse Fernröntgen mit und ohne Augenabdeckung (20 Aufnahmen)

Messort	Strahlendosis	Bezeichnung	Energiedosis [μGy]	
			ohne Augenabdeckung (20 Aufnahmen)	mit Augenabdeckung (20 Aufnahmen)
Auge li	73 kV, 15 mA, 9,4 sec	Kind	1326,1	232,1
	77 kV, 14 mA, 9,4 sec	Jugendliche(r)/Frau	1841,8	461,9
	84 kV, 13 mA, 9,4 sec	Frau/Mann	2151,7	864,8
Auge re	73 kV, 15 mA, 9,4 sec	Kind	146,5	72,4
	77 kV, 14 mA, 9,4 sec	Jugendliche(r)/Frau	183,7	91,4
	84 kV, 13 mA, 9,4 sec	Frau/Mann	234,7	128,3
Nase	73 kV, 15 mA, 9,4 sec	Kind	1455,7	1000,3
	77 kV, 14 mA, 9,4 sec	Jugendliche(r)/Frau	1749,4	1388,6
	84 kV, 13 mA, 9,4 sec	Frau/Mann	1910,6	1608,9
Schilddrüse	73 kV, 15 mA, 9,4 sec	Kind	191,6	175,7
	77 kV, 14 mA, 9,4 sec	Jugendliche(r)/Frau	217	176,7
	84 kV, 13 mA, 9,4 sec	Frau/Mann	237,8	213,9

Die Messergebnisse am fokushnahen Auge bewegten sich in Abhängigkeit von der Strahlendosis zwischen 1326 und 2151 μGy ohne Augenabdeckung und zwischen 232 und 864 μGy mit Augenabdeckung.

Beim rechten Auge hingegen lagen die Werte zwischen 146 und 234 μGy beziehungsweise zwischen 72 und 128 μGy und sind somit deutlich niedriger als jene vom linken Auge.

Die Messergebnisse an der Nase lagen zwischen 1455 und 1910 μ Gy beziehungsweise zwischen 1000 und 1608 μ Gy, während jene an der Schilddrüse mit Werten um 200 μ Gy deutlich niedriger lagen.

Die Ergebnisse der Messungen im Fernröntgen sind durch 20fache Aufnahmen entstanden. Damit man eine Einzeldosis beurteilen kann, wurden die Ergebnisse durch 20 geteilt.

Tabelle 8: Ergebnisse Fernröntgen mit und ohne Augenabdeckung (1 Aufnahme)

Energiedosis [μ Gy]				
Messort	Strahlendosis	Bezeichnung	ohne Abdeckung (1 Aufnahme)	mit Abdeckung (1 Aufnahme)
Auge li	73 kV, 15 mA, 9,4 sec	Kind	66,3	11,6
	77 kV, 14 mA, 9,4 sec	Jugendliche(r)/Frau	92,1	23,1
	84 kV, 13 mA, 9,4 sec	Frau/Mann	107,6	43,24
Auge re	73 kV, 15 mA, 9,4 sec	Kind	7,3	3,6
	77 kV, 14 mA, 9,4 sec	Jugendliche(r)/Frau	9,2	4,6
	84 kV, 13 mA, 9,4 sec	Frau/Mann	11,7	6,4
Nase	73 kV, 15 mA, 9,4 sec	Kind	72,8	50
	77 kV, 14 mA, 9,4 sec	Jugendliche(r)/Frau	87,5	69,4
	84 kV, 13 mA, 9,4 sec	Frau/Mann	95,5	80,4
Schilddrüse	73 kV, 15 mA, 9,4 sec	Kind	9,6	8,8
	77 kV, 14 mA, 9,4 sec	Jugendliche(r)/Frau	10,9	8,8
	84 kV, 13 mA, 9,4 sec	Frau/Mann	11,8	10,7

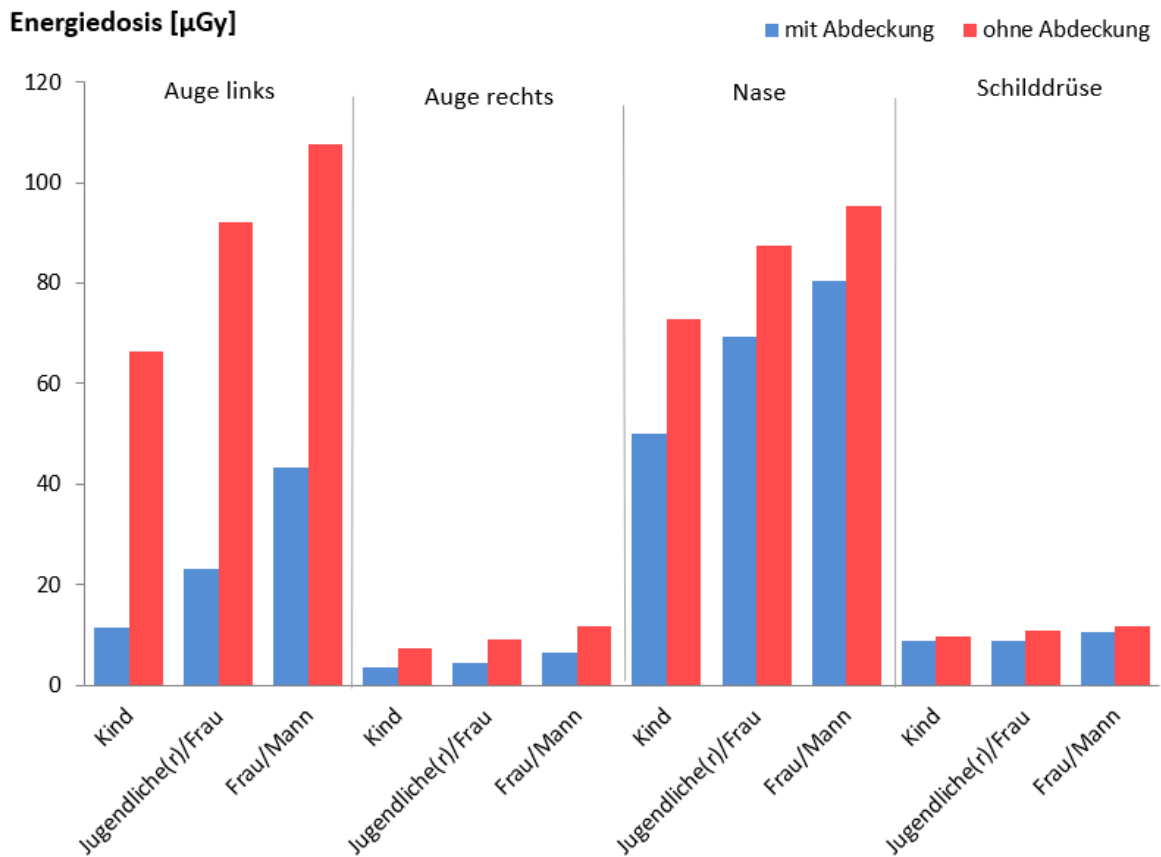


Abbildung 26: Ergebnis Fernröntgen mit und ohne Augenabdeckung (1 Aufnahme) - graphische Darstellung

Die Ergebnisse für „Auge links“ und „Nase“ sind in der Höhe der Strahlenbelastung miteinander vergleichbar, genauso wie die Ergebnisse „Auge rechts“ und „Schilddrüse“. Der Bereich der Nase zeigte eine etwas geringere Energiedosis als das linke Auge, aber eine höhere als das rechte Auge und die Schilddrüse.

Wie zu erwarten war, zeigte sich bei allen Messungen eine höhere Strahlenbelastung bei Aufnahmen ohne Augenabdeckung im Vergleich zu jenen mit Augenabdeckung.

Besonders an den Messungen an dem Fokus zugewendetem Auge ist der Unterschied besonders deutlich zu erkennen. Dieser Unterschied ist auf dem rechten Auge, der Nase und der Schilddrüse nicht so stark ausgeprägt (siehe Abbildung 26).

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die am Fernröntgengerät gewählten Einstellungen „Kind“, „Jugendliche(r)/Frau“, oder „Frau/Mann“, einen Einfluss auf die Energiedosis. Mit steigender Strahlenenergie, steigt auch die Energiedosis haben. Mit steigender Strahlenenergie, steigt auch die Energiedosis.

Auswertungen der DVT-Werte

3.1.1. Phantomkopf, mit und ohne Abdeckung

Tabelle 9: Ergebnisse DVT, Phantomkopf, mit und ohne Augenabdeckung

Phantomkopf		Energiedosis [mGy]	
Messort	Bezeichnung im DVT	ohne Abdeckung	mit Abdeckung
Auge li	ultra low dose - low dose	1,51	0,87
	ultra low dose - normal	2,1	1,42
	ultra low dose - HD	2,12	1,59
	normal - low dose	1,58	1,87
	normal - normal	5,1	3,58
	normal - HD	8,62	5,71
Auge re	ultra low dose - low dose	1,59	0,99
	ultra low dose - normal	2,89	1,69
	ultra low dose - HD	2,76	1,72
	normal - low dose	2,36	2,38
	normal - normal	4,8	3,02
	normal - HD	10,51	5,78
Nase	ultra low dose - low dose	1,68	1,38
	ultra low dose - normal	1,28	1,26
	ultra low dose - HD	2,38	2,29
	normal - low dose	2,6	3,14
	normal - normal	6,01	4,76
	normal - HD	8,26	7,12
Schilddrüse	ultra low dose - low dose	0,18	0,15
	ultra low dose - normal	0,13	0,13
	ultra low dose - HD	0,27	0,26
	normal - low dose	0,24	0,29
	normal - normal	0,51	0,52
	normal - HD	0,95	0,79

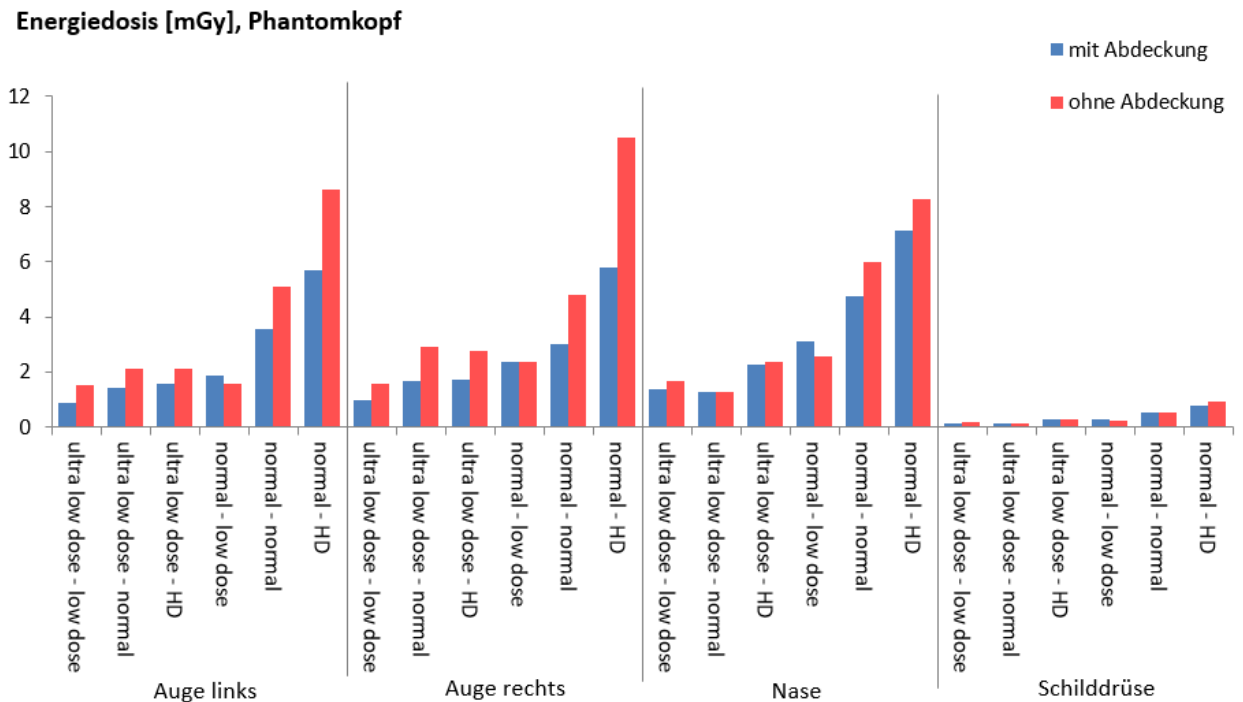


Abbildung 27: Ergebnisse DVT, Phantomkopf, mit und ohne Augenabdeckung – graphische Darstellung

Die Messergebnisse von „Auge links“ bewegten sich ohne Augenabdeckung zwischen 1,51 und 8,62mGy und zwischen 0,87 und 5,71mGy mit Augenabdeckung.

Die Messergebnisse am rechten Auge befanden sich ohne Augenabdeckung zwischen 1,59 und 10,52mGy und zwischen 0,99 und 5,78mGy mit Augenabdeckung.

Die Messergebnisse der Nase bewegten sich zwischen 1,68 bis 8,26mGy beziehungsweise zwischen 1,38 bis 7,12mGy.

Die Messergebnisse der Schilddrüse lagen im Vergleich zu den Messergebnissen der Augen und der Nase ohne Augenabdeckung mit 0,13 und 0,95mGy beziehungsweise 0,13 und 0,79mGy mit Augenabdeckung deutlich niedriger.

Die Ergebnisse der Messungen im DVT mit dem Phantomkopf zeigten, dass bei erhöhtem Dosisflächenprodukt (DAP) auch eine höhere Energiedosis auftrat (DAP: siehe Kapitel 1.4.2. Dosisbegriffe, Seite 29).

Auch hier im DVT war wie im Fernröntgen, wie zu erwarten war, eine Verringerung der Energiedosis durch die Augenabdeckung zu erkennen.

Die beiden Augen und die Nase haben im Vergleich zur Schilddrüse höhere Werte an Energiedosis erreicht, wobei das rechte Auge eine etwas höhere Energiedosis hat als das linke und das linke Auge eine höhere als die Nase.

3.1.2. Echtschädel ohne Abdeckung:

Tabelle 10: Ergebnisse DVT, Echtschädel, ohne Augenabdeckung

Echtschädel		Energiedosis [mGy]	
Messort	Dosis	ohne Abdeckung	Strahlendosis
Auge li	ultra low dose - low dose	0,54	96 kV, 2.2 mA, 4.5 sec
	ultra low dose - normal	1,00	96 kV, 4 mA, 4.5 sec
	ultra low dose - HD	0,90	96 kV, 5 mA, 6 sec
	normal - low dose	1,98	96 kV, 4 mA, 9 sec
	normal - normal	1,98	96 kV, 5.6 mA, 13.5 sec
	normal - HD	3,93	96 kV, 7.1 mA, 18 sec
Auge re	ultra low dose - low dose	0,68	96 kV, 2.2 mA, 4.5 sec
	ultra low dose - normal	1,25	96 kV, 4 mA, 4.5 sec
	ultra low dose - HD	1,23	96 kV, 5 mA, 6 sec
	normal - low dose	0,65	96 kV, 4 mA, 9 sec
	normal - normal	2,04	96 kV, 5.6 mA, 13.5 sec
	normal - HD	4,21	96 kV, 7.1 mA, 18 sec
Nase	ultra low dose - low dose	0,64	96 kV, 2.2 mA, 4.5 sec
	ultra low dose - normal	0,55	96 kV, 4 mA, 4.5 sec
	ultra low dose - HD	1,02	96 kV, 5 mA, 6 sec
	normal - low dose	0,82	96 kV, 4 mA, 9 sec
	normal - normal	1,98	96 kV, 5.6 mA, 13.5 sec
	normal - HD	2,77	96 kV, 7.1 mA, 18 sec
SD	ultra low dose - low dose	0,12	96 kV, 2.2 mA, 4.5 sec
	ultra low dose - normal	0,10	96 kV, 4 mA, 4.5 sec
	ultra low dose - HD	0,16	96 kV, 5 mA, 6 sec
	normal - low dose	0,19	96 kV, 4 mA, 9 sec
	normal - normal	0,36	96 kV, 5.6 mA, 13.5 sec
	normal - HD	0,65	96 kV, 7.1 mA, 18 sec

Energiedosis [mGy], Echtschädel (ohne Abdeckung)

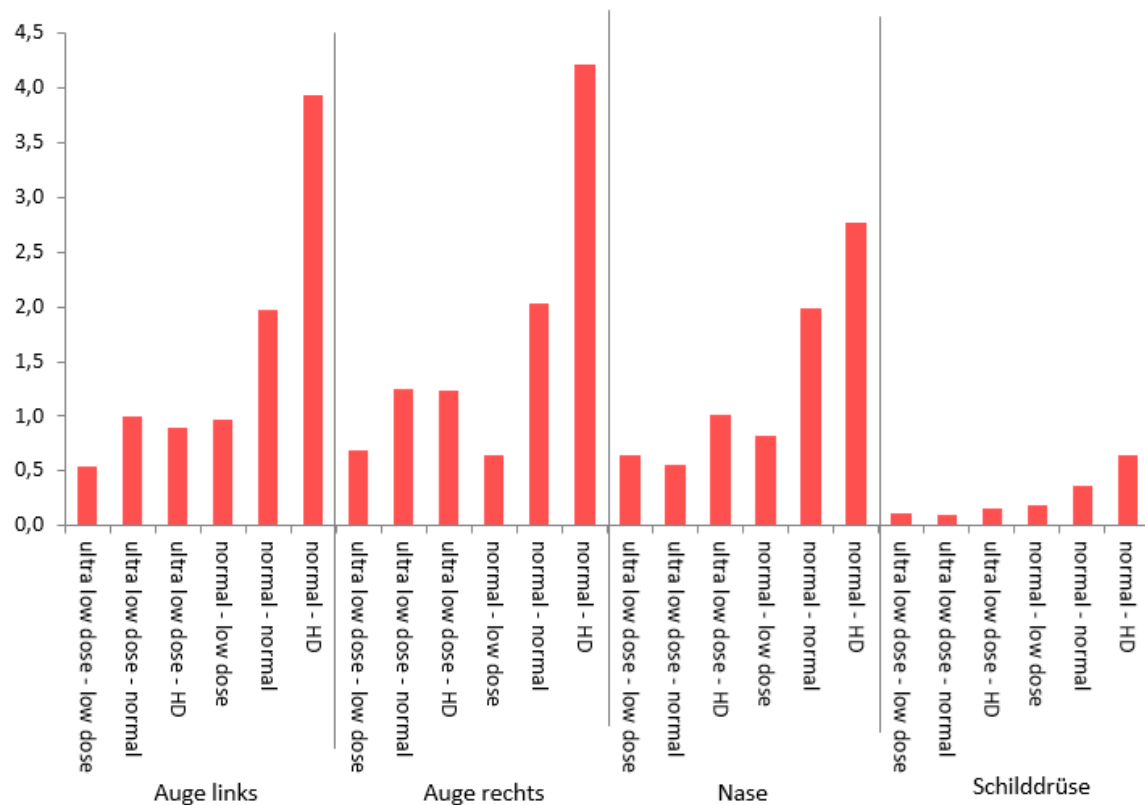


Abbildung 28: Ergebnisse DVT, Echtschädel, ohne Augenabdeckung - graphische Darstellung

Wie in Abbildung 28 zu sehen, waren die Messwerte zwischen linkem und rechtem Auge sehr ähnlich. Sie lagen zwischen 0,54 und 4,21mGy.

Die Messergebnisse der „Nase“ bewegten sich zwischen 0,55 und 2,77mGy und jene an der Schilddrüse zwischen 0,1 und 0,65mGy.

Die größten Schwankungen der Messergebnisse zeigten somit die Messposition „Auge rechts“, gefolgt von „Auge links“ und „Nase“. Die geringste Schwankung zeigte auch hier „Schilddrüse“.

Wie auch beim Phantomkopf hatten die beiden Augen die höheren Energiedosen, wobei das rechte Auge höhere Werte als das linke Auge aufwies.

Die niedrigsten Werte wurden bei der Schilddrüse gemessen.

3.1.3. Vergleich Echtschädel mit Phantomkopf, ohne Abdeckung

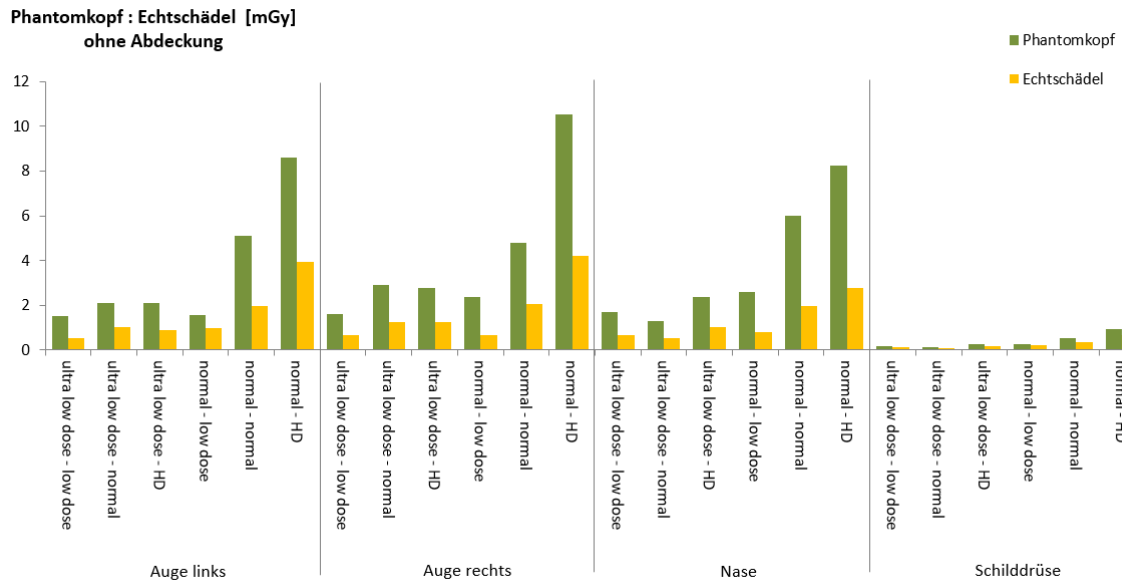


Abbildung 29: Vergleich Phantomkopf mit Echtschädel, ohne Augenabdeckung – graphische Darstellung

Die Abbildung 29 zeigt den Vergleich der Energiedosis ohne Augenabdeckung zwischen dem Phantomkopf und dem Echtschädel. Zu erkennen ist, dass der Phantomkopf durchgehend höhere Werte aufwies als der Echtschädel. Die Schwankungen der Messergebnisse waren im Echtschädel kleiner als mit dem Phantomkopf.

4. Diskussion

4.1. Interpretation der Ergebnisse

Ferröntgen

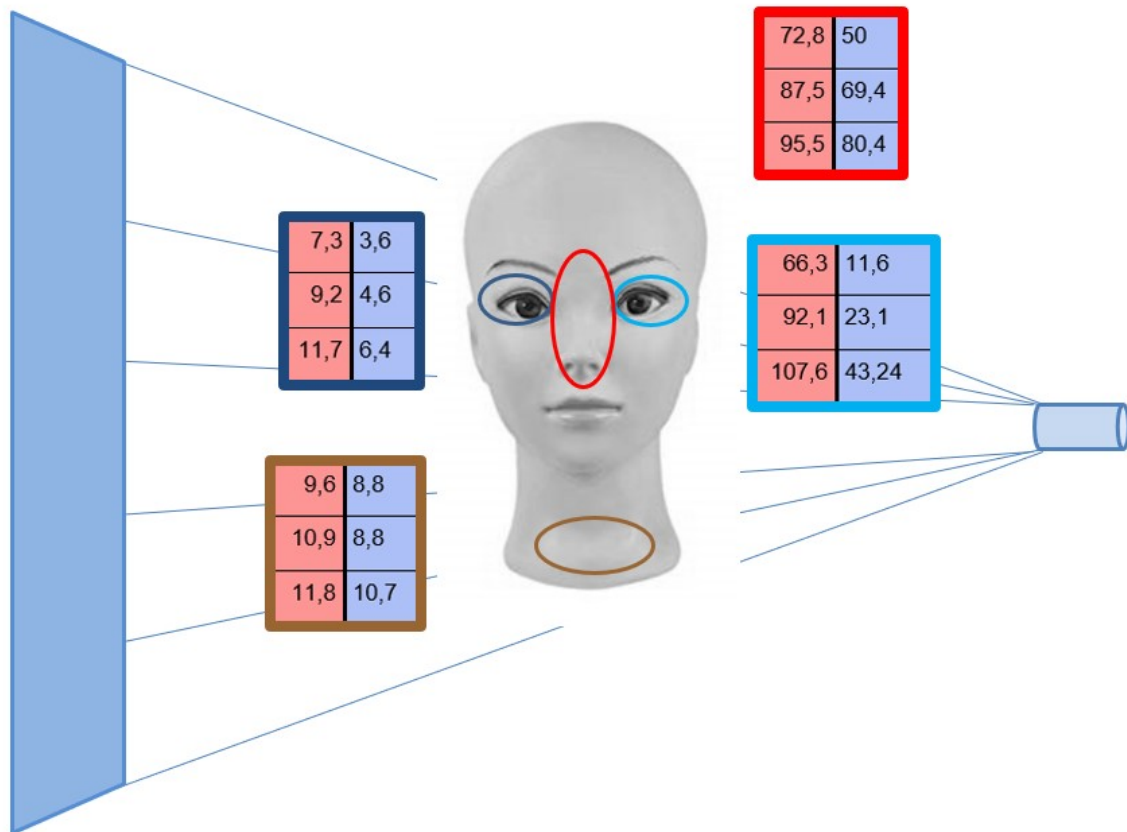


Abbildung 30: Zusammenfassung der Ergebnisse im Ferröntgen (µGy)

Tabelle 11: Legende zu Abbildung 30

Ohne Augenabdeckung	Mit Augenabdeckung
Kind	Kind
Jugendlich/ Frau	Jugendlich/ Frau
Frau/Mann	Frau/Mann

Wie in Abbildung 30 zu erkennen ist, hat im Fernröntgen das fokusnahe Auge die höchsten Energiedosiswerte, gefolgt von der Nase. Weit niedrigere Energiedosen haben das rechte Auge und die Schilddrüse. Erklären lässt sich diese Verteilung anhand der geometrischen Anordnung im Strahlenfeld.

Wie in Abbildung 31 zu erkennen, trifft im Fernröntgen der Röntgenstrahl zuerst das fokusnahe Auge, dann die Nase und dann das rechte Auge. Die Schilddrüse liegt geometrisch betrachtet außerhalb des Strahlenganges.

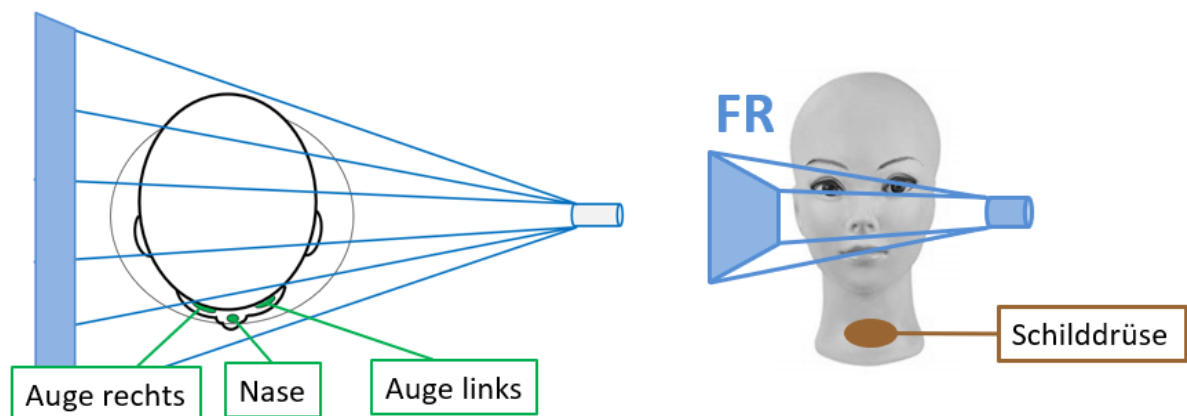


Abbildung 31: geometrische Anordnung der Messorte im Fernröntgen

DVT

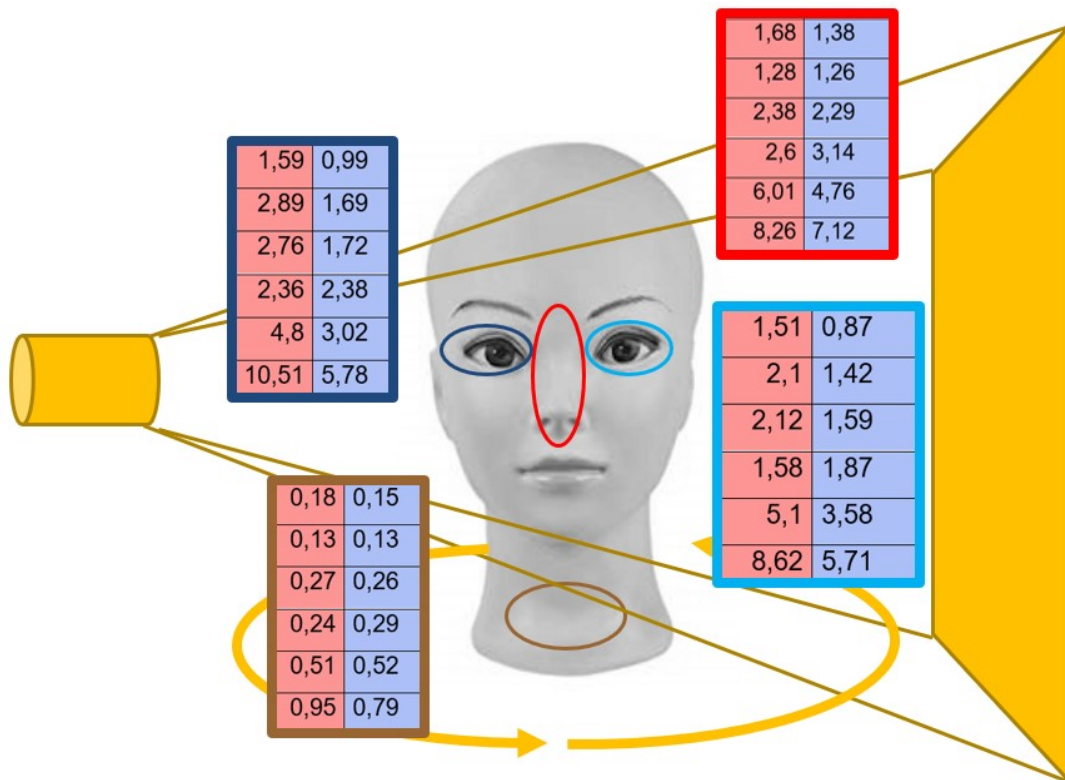


Abbildung 32: Zusammenfassung der Ergebnisse im DVT beim Phantomkopf (mGy)

Tabelle 12: Legende zu Abbildung 32

Ohne Augenabdeckung	Mit Augenabdeckung
ultra low dose - low dose	ultra low dose - low dose
ultra low dose - normal	ultra low dose - normal
ultra low dose - HD	ultra low dose - HD
normal - low dose	normal - low dose
normal - normal	normal - normal
normal - HD	normal - HD

Wie in Abbildung 32 zu sehen ist, haben die Ergebnisse der unterschiedlichen Messorte keine so großen Diskrepanzen wie dies im Fernröntgen der Fall ist. Das könnte sich daraus ergeben, dass die Strahlenquelle zirkulär um den Kopf rotiert – sich also auf einer Kreisbahn bewegt (siehe Abbildung 33). Die Schilddrüse hat hier ebenfalls niedrigere Energiedosen.

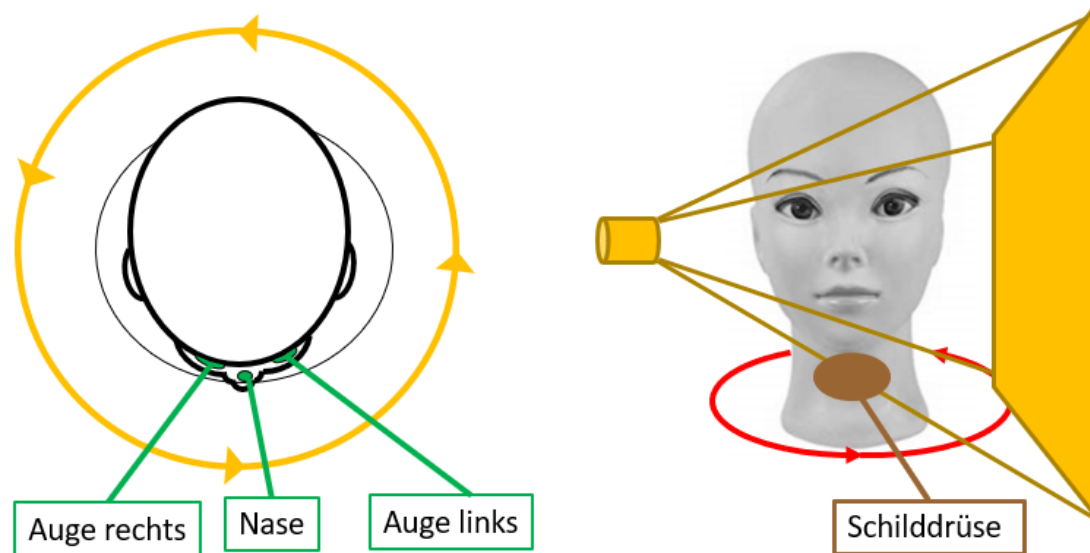


Abbildung 33: geometrische Anordnung der Messorte im DVT

4.1.1. Dosisverringern durch die Augenabdeckung

Um die Wirkung der Augenabdeckung zu deuten werden im Folgenden ausschließlich die Messergebnisse der Augen links und rechts interpretiert.

In den Ergebnissen im Fernröntgen ist zu erkennen, dass das linke Auge im Vergleich zum rechten Auge immer signifikant höhere Werte in den Messungen erreicht. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich die Strahlenquelle links des/der Patienten/Patientin befindet. Das erklärt auch die vergleichbaren Ergebnisse von „Auge links“ und „Nase“, sowie die vergleichbaren Ergebnisse von „Auge rechts“ und „Schilddrüse“, da die letzten beiden Messorte weiter entfernt, bzw. außerhalb der Strahlenquelle liegen.

Die Augenabdeckung „AttenuRad CT Eye Shield“, die für die Messungen verwendet wurde, führte zu einer signifikanten Verringerung der Strahlendosis. Dieser Effekt war besonders am linken Auge zu erkennen. Die prozentuale Verringerung ist in Tabelle 13 für das Fernröntgen und in Tabelle 14 für das DVT aufgeführt.

Tabelle 13: prozentuale Verringerung durch die Augenabdeckung im Fernröntgen

Messort	Bezeichnung im Fernröntgen	Verringerung mit Augenabdeckung um
Auge links	Kind	82,5%
	Jugendliche(r)/Frau	74,9%
	Frau/Mann	59,8%
Auge rechts	Kind	50,6%
	Jugendliche(r)/Frau	50,2%
	Frau/Mann	45,3%

Besonders stark war die Verringerung der Strahlendosis im Bereich des linken Auges. Hier bewegt sie sich zwischen 82,5% und 59,8% und beträgt durchschnittlich 72,4%. Beim rechten Auge wurde eine durchschnittliche Verringerung der Strahlendosis von 48,7% errechnet.

Tabelle 14: prozentuale Verringerung durch die Augenabdeckung im DVT

Messort	Bezeichnung im DVT	Verringerung mit Augenabdeckung um
Auge li	ultra low dose - low dose	42,3%
	ultra low dose - normal	32,4%
	ultra low dose - HD	24,9%
	normal - low dose	+ 18,3%
	normal - normal	29,8%
	normal - HD	33,8%
Auge re	ultra low dose - low dose	37,4%
	ultra low dose - normal	17,4%
	ultra low dose - HD	37,5%
	normal - low dose	+ 0,7%
	normal - normal	37,4%
	normal - HD	45%

Die Dosisverringierung im DVT beträgt am linken Auge durchschnittlich 24,2%, am rechten Auge 29%.

Hervorzuheben ist, dass bei „normal-low dose“ bei beiden Augen eine Dosissteigerung gemessen wurde. Diese liegt im Rahmen der vorhandenen Messunsicherheit von +/- 10% und kann unter anderem dadurch bedingt sein, dass nur eine Messung pro Einstellung vorgenommen wurde.

Die Dosisverringierung im DVT war im Vergleich jener zum Fernröntgen deutlich geringer. Dies dürfte sich vermutlich daraus ergeben, dass die Strahlenquelle im DVT zirkulär um den Kopf fährt und nicht, wie im Fernröntgen ausschließlich von links kommt. Somit schützt die Augenabdeckung die Linse nur für einen Teil der DVT-Aufnahme und ist dadurch nicht so effektiv wie im Fernröntgen.

4.1.2. Wie viele Fernröntgen oder DVTs braucht es theoretisch, um einen Katarakt auszulösen?

Um einen praxisrelevanten Bezug zu den Ergebnissen der Messungen herzustellen wurde in Tabelle 15 errechnet, wie viele Fernröntgen bzw. DVTs ohne Augenabdeckung und in Tabelle 16, wie viele Fernröntgen bzw. DVTs mit Augenabdeckung theoretisch gemacht werden müssten, um den Schwellenwert für das Auslösen eines Kataraktes zu erreichen, wenn die Schwellendosis bei 0,5Gy (\cong 500mGy) liegt.

Da der Schwellenwert für einen Katarakt momentan in der Literatur nicht einheitlich festgelegt ist, wird in dieser Arbeit vom niedrigsten und demnach „schlimmsten“ Wert ausgegangen. Dieser liegt laut International Commission on Radiological Protection 2012 bei 0,5Gy (ICRP, 2012). Auch der „National Council on Radiation Protection and Measurements“ (NCRP) gibt eine ähnliche Empfehlung heraus (NCRP, 2016).

Für das Fernröntgen wurden die Ergebnisse von „Auge li“ gewählt, da sich die Strahlenquelle links befindet.

Für das DVT wurde ein Mittelwert von „Auge li“ und „Auge re“ errechnet, da die Strahlenquelle rund um den Kopf fährt.

Tabelle 15: Wie viele FR/DVTs braucht es, um ein Katarakt auszulösen? – Ohne Augenabdeckung

	Einstellung	Ergebnis in mGy	Wie viele FR/DVTs?
FR	Kind	0,0663	≈ 7541
FR	Jugendliche(r)/Frau	0,0921	≈ 5428
FR	Frau/Mann	0,1076	≈ 4646
DVT	ultra low dose - low dose	1,548	≈ 322
DVT	ultra low dose - normal	2,497	≈ 200
DVT	ultra low dose - HD	2,439	≈ 205
DVT	normal - low dose	1,97	≈ 253
DVT	normal - normal	4,951	≈ 100
DVT	normal - HD	9,567	≈ 52

Tabelle 16: Wie viele FR/DVTs braucht es, um ein Katarakt auszulösen? – Mit Augenabdeckung

	Einstellung	Ergebnis in mGy	Wie viele FR/DVTs?
FR	Kind	0,0116	≈ 43103
FR	Jugendliche(r)/Frau	0,0231	≈ 21645
FR	Frau/Mann	0,04324	≈ 11563
DVT	ultra low dose - low dose	0,932	≈ 536
DVT	ultra low dose - normal	1,552	≈ 322
DVT	ultra low dose - HD	1,657	≈ 301
DVT	normal - low dose	2,122	≈ 235
DVT	normal - normal	3,3	≈ 151
DVT	normal - HD	5,745	≈ 87

In Tabelle 15 und 16 lässt sich erkennen, dass beim Kind erst nach 7.541 Aufnahmen ohne Augenabdeckung und 43.103 Aufnahmen mit Augenabdeckung nötig wären, um eine Kataraktbildung auszulösen. Bei Erwachsenen wären 4.646 beziehungsweise 11.563 Aufnahmen nötig.

Im DVT hingegen sind deutlich weniger Aufnahmen nötig. Ohne Augenabdeckung wären es 52 – 322 und mit Augenabdeckung 87 – 536 Aufnahmen, je nach Einstellung.

4.1.3. Organ-Äquivalentdosis für die Schilddrüse

Tabelle 17: Organäquivalentdosis in Sv für die Schilddrüse

	Einstellung	Ergebnis in μSv^*	Organäquivalentdosis „H“ in μSv^{**}
FR	Kind	0,0096	$4,8 \times 10^{-4}$
FR	Jugendliche(r)/Frau	0,0109	$5,45 \times 10^{-4}$
FR	Frau/Mann	0,0188	$9,4 \times 10^{-4}$
DVT	ultra low dose - low dose	0,183	$3,66 \times 10^{-3}$
DVT	ultra low dose - normal	0,134	$6,7 \times 10^{-3}$
DVT	ultra low dose - HD	0,27	0,0135
DVT	normal - low dose	0,242	0,0121
DVT	normal - normal	0,514	0,0257
DVT	normal - HD	0,945	0,0473

* Ergebnisse für die Schilddrüse

** $\times 0,05$ (W_R : Gewebewichtungsfaktor für die Schilddrüse)

$$H = W_R \times D$$

Die Organäquivalentdosis für die Schilddrüse war sowohl im DVT als auch im Fernröntgen, sehr niedrig. Diese niedrigen Werte sind dadurch bedingt, dass die Schilddrüse im Fernröntgen, geometrisch betrachtet tiefer, nicht direkt im Strahlenfeld liegt, wie die Messbereiche Auge links, Auge rechts und Nase (siehe Abbildung 34). Im DVT war die Organäquivalentdosis für die Schilddrüse etwas höher als jene im Fernröntgen. Dies lässt sich einerseits durch die generell höheren Energiedosen im DVT erklären, andererseits dadurch, dass die Schilddrüse im DVT im unteren Rand des Strahlenfeldes zu liegen kommt (siehe Abbildung 34).

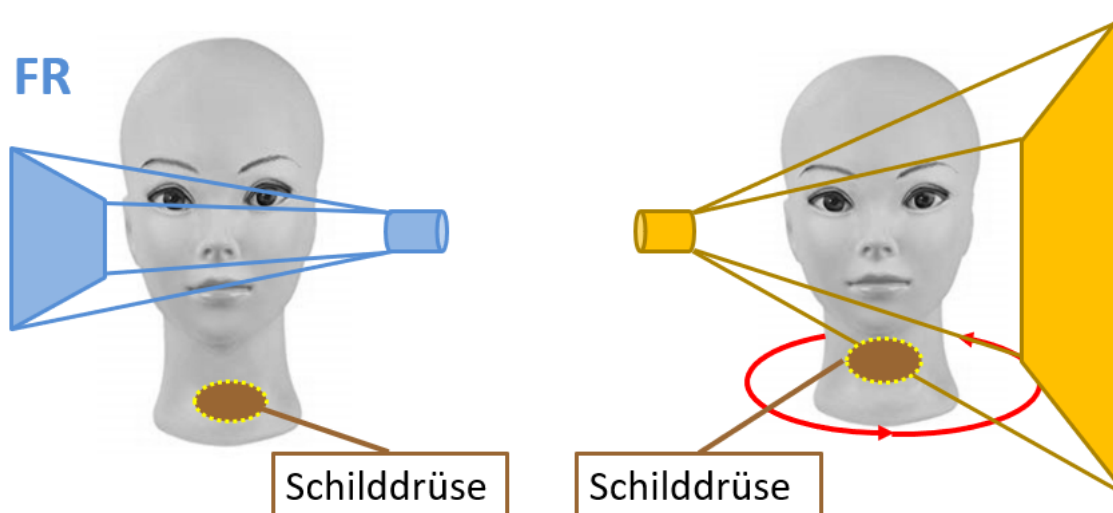


Abbildung 34: Position der Schilddrüse im FR und DVT

4.1.4. Vergleich Echtschädel mit Alderson Rando phantom

Der Vergleich der Ergebnisse im DVT zwischen dem Echtschädel und dem Alderson Rando Phantom ergaben, dass am Echtschädel durchgehend niedrigere Energiedosen gemessen wurden (siehe Abbildung 35).

Dieses Ergebnis könnte folgende Ursachen haben: einerseits wurde für die Messungen mit dem Phantomkopf die Einstellung „Schädelgröße M, 23cm“ gewählt und für den Echtschädel „Schädelgröße M, 16cm“, da der Echtschädel kleiner als der Phantomschädel war. Andererseits ist aufgrund des fehlenden Gehirns im Echtschädel anzunehmen, dass hier ein anderes Streuverhalten als im Phantomkopf vorliegt.

Leider fehlen auch in der Literatur die Erfahrungen eines Vergleichs.

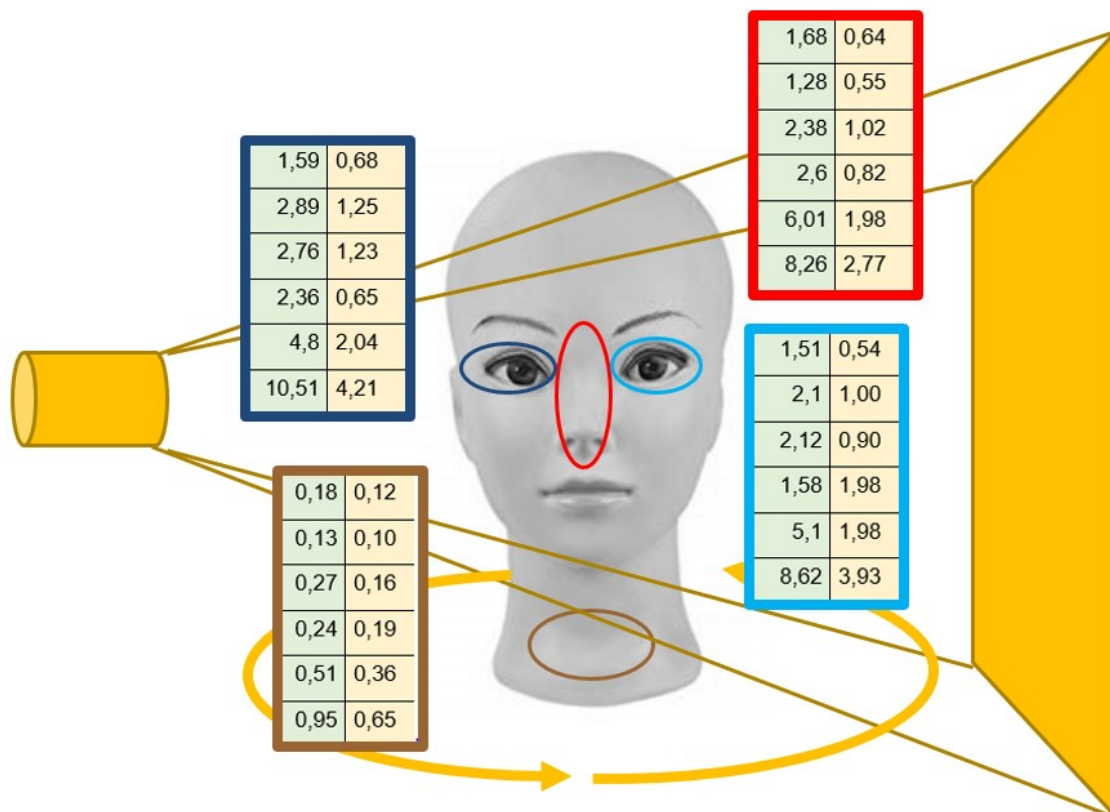


Abbildung 35: Vergleich Phantomkopf: Echtschädel im DVT, ohne Augenabdeckung (mGy)

Tabelle 18: Legende zu Abbildung 35

Phantomkopf	Echtschädel
ultra low dose - low dose	ultra low dose - low dose
ultra low dose - normal	ultra low dose - normal
ultra low dose - HD	ultra low dose - HD
normal - low dose	normal - low dose
normal - normal	normal - normal
normal - HD	normal - HD

4.1.5. Vergleich mit der Literatur

4.1.5.1. Augenlinse

Takao Kanzaki beschäftigte sich 2016 in seiner Studie mit der Strahlenbelastung für die Augenlinse in verschiedenen zahnärztlichen Röntgenverfahren, wobei er auch Messungen mit dem Fernröntgen und dem DVT durchgeführt hat.

Es wurde mit fluoreszierenden Glasdetektoren die Oberflächendosis der beiden Augen gemessen.

Die Einstellungen, die in dieser Studie für das Fernröntgen gewählt wurden, entsprachen annähernd der Einstellung „Kind“ in der vorliegenden Arbeit.

Die Einstellung für das DVT entsprach am ehesten der Einstellung „ultra low dose – normal“. Allerdings wurden für die DVT-Aufnahmen in Kanzakis Studie kleinere „Field of view“ im Front- und Seitenzahnbereich gemessen, und ist somit nicht mit der vorliegenden Studie vergleichbar.

Kanzaki maß im Fernröntgen $0,16 \pm 0,02 \text{ mGy}$ für das rechte Auge und $0,2 \pm 0,02 \text{ mGy}$ für das linke Auge und erreichte somit deutlich höhere Werte als in der vorliegenden Studie gemessen wurden (Kanzaki, 2016).

Tabelle 19: Vergleich der Ergebnisse von Kanzaki mit dieser Studie

	Diese Studie	Kanzaki
Linkes Auge	0,0663 mGy	0,2 ($\pm 0,02$) mGy
Rechtes Auge	0,0073 mGy	0,16 ($\pm 0,02$) mGy

Bei diesem Vergleich muss jedoch berücksichtigt werden, dass in Kanzakis Studie an anderen Geräten, mit anderen Einstellungen und mit anderen Oberflächendosisdetektoren gemessen wurde.

4.1.5.2. Weitere Gewebe im Auge

Im Auge befinden sich weitere Gewebe, die auf ionisierende Strahlung reagieren. Allerdings liegt die Schwellendosis für Gewebsschäden deutlich höher als für die Linse. Beispielsweise ist das Vorkommen einer Strahlenretinopathie ab einer Dosis von 45Gy wahrscheinlich. Faktoren wie Diabetes mellitus und laufende Chemotherapie begünstigen die Entstehung einer Strahlenretinopathie (Parsons, 1994). Durch die ionisierende Strahlung wird das Gefäßendothel geschädigt und eine Perfusionsstörung tritt auf. Eine weitere Folge der Schädigung des Gefäßendothels ist die Strahlenoptikopathie. (Filev, 2019).

Eine Strahlenretinopathie ist eine oft auftretende, unerwünschten Nebenwirkung der Bestrahlung bei Tumoren im Auge beziehungsweise im Kopf-/Halsbereich. Durch die chronische Minderperfusion des Gefäßendothels aufgrund der ionisierenden Strahlung kommt es zu einer retinalen Vaskulopathie. Die Strahlenretinopathie tritt unterschiedlich spät ab dem Zeitpunkt der Bestrahlung auf, im Durchschnitt sind es 2,6 Jahre (Joussen, 2011).

Eine Strahlenoptikopathie tritt ebenfalls als unerwünschte Nebenwirkung bei Bestrahlung von Tumoren im Bereich des Auges beziehungsweise des Kopf-/Halsbereiches auf und wird auch als „Schlaganfall im Auge“ bezeichnet. Hier kommt es zu einer Perfusionsstörung des Nervus opticus. Die Symptomatik beinhaltet einen augenblicklichen Sehverlust und Gesichtsfeldausfälle (Lemmen, 2019).

4.1.5.3. Schilddrüse

Aufgrund der internationalen Literatur zur Schilddrüse wurde in dieser Studie auf Messungen mit einer Schilddrüsenabdeckung verzichtet.

Jakob Roth führte 2006 mit Kleinbildaufnahmen Messungen an einem Alderson Phantom und drei unterschiedlichen Schilddrüsen Schutzvorrichtungen durch. Er benutzte einen Kragen mit 0,5mm Blei (Pb), eine Halbschürze mit 0,5mm Pb und ein Bleiblech mit 3mm Pb, dass er oberhalb der Schilddrüse positionierte.

Wie in Tabelle 20 zu erkennen ist, erreichte die Abschirmung mit dem 3mm Bleiblech Verringerung der Dosis von 99%, die Halbschürze von 6% und bei einem Kragen konnte man gar keine Dosisreduzierung messen (Roth, 2006).

Tabelle 20: Zusammenfassung der Ergebnisse von Roth 2006

Art der Abschirmung	Dosis (mGy)	% der Eintrittsdosis	Dosisreduktion
Ohne Abdeckung	0,00945	0,63	-
Kragen (0,5mm Pb)	0,00938	0,63	0%
Halbschürze (0,5mm Pb)	0,00887	0,59	6%
3mm Pb oberhalb der Schilddrüse	0,00019	0,01	99%

Xingmin Qu nahm 2012 ebenfalls Messungen mit einem Phantomkopf vor. Er testete verschiedene Methoden im DVT, um die Schilddrüse zu schützen. Die Messungen erfolgten einmal ohne Kragen, einmal mit dem Kragen um den vorderen Hals und einmal mit zwei Kragen - einen um den vorderen Hals und einen um den Nacken herum. Wie in Tabelle 21 zu erkennen ist, erreichten die Kragen im DVT eine Dosisreduktion zwischen 61,4% und 72,6% (Qu, 2012).

Tabelle 21: Zusammenfassung der Ergebnisse von Qu 2012

FOV (cm)	Ohne Kragen	1 Kragen (vorne)	Dosisreduktion 1 Kragen	2 Kragen (vorne+ hinten)	Dosisreduktion 2 Kragen
20x19	75,8 µSv	25 µSv	67%	29,1 µSv	61,4%
16x10	108 µSv	30,7 µSv	71,6%	29,6 µSv	72,6%
16x7	99,4 µSv	27,8 µSv	72%	27,8 µSv	72%

G.S. Han testete 2013 die Wirksamkeit einer Schilddrüsenabdeckungen von 0,35mm Pb in vier verschiedenen Panoramaröntgengeräten [Orthopantomograph® OP200 (Instrumentarium Dental, Tuusula, Finland), Orthophos CD (Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Germany), Orthophos XG Plus (Sirona Dental Systems GmbH) and ProMax® (Planmeca Oy, Helsinki, Finland)]. Messungen erfolgten einmal ohne Kragen, einmal mit dem Kragen um den vorderen Hals und einmal mit zwei Kragen - einen um den vorderen Hals und einen um den Nacken herum.

Wie in Tabelle 22 zu erkennen ist, erreichten die Kragen im Panoramaröntgen eine Dosisreduktion zwischen 9,6% und 22,5% (Han, 2013).

Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse von Han 2013

Gerät	Ohne Kragen (μSv)	1 Kragen (vorne) (μSv)	Dosisreduktion mit 1 Kragen	2 Kragen (vorne+hinten) (μSv)	Dosisreduktion mit 2 Kragen
OP200	27,89	25,2	9,6%	26,56	4,8%
Orthophos CD	67,87	58,87	13,3%	55,53	18,2%
Orthophos XG plus	54,6	43,95	19,5%	41,56	23,9%
ProMax	54,95	42,6	22,5%	45,45	17,3%

Zusammenfassung der Studien

Die Ergebnisse der Studien von Roth, Qu und Han sind sehr unterschiedlich. Auffällig ist, dass Roth mit einem Schilddrüsenkragen keinerlei Dosisreduktion maß, wohingegen Qu sowohl mit einem Kragen als auch mit 2 Kragen eine Dosisreduktion von 61,4 - 72,6% maß.

Wobei Roth seine Messungen mit Kleinbildern durchführte und Qu in einem DVT Gerät.

Han maß ebenfalls eine Dosisreduktion durch Bleikragen und verglich ebenfalls wie Qu „kein Kragen“, „ein Kragen“ und „zwei Kragen“ miteinander. Er testete hierbei vier verschiedene Panoramaröntgen Geräte. Allerdings maß er weniger Dosisreduktion als Qu, seine Reduktion war zwischen 9,6 und 22,5%.

4.2. Zusammenfassung

Um eine ganzheitliche Risikoeinschätzung für einen einzelnen Patienten bestimmen zu können, ist es erforderlich die Energiedosen aller zusätzlich zum Fernröntgen gemachten Röntgenaufnahmen (Orthopantomogramm und/oder Kleinbilder) einzubeziehen. Außerdem sollte man in der Energiedosisrechnung die natürliche pro Zeiteinheit nicht vernachlässigen – sie beträgt in Österreich pro Jahr 2,8mSv (AGES, 2013).

Bezüglich der Augenabdeckungen lässt sich folgendes zusammenfassend feststellen:

Beim Fernröntgen bewirkt die Abdeckung am stärker belasteten Auge (näher an der Strahlenquelle) zwischen 60% und 80% Reduktion je nach Dosiseinstellung.

Die Energiedosis ist im Fernröntgen zu niedrig, um ein Katarakt auszulösen

Beim DVT rotiert die Strahlenquelle zirkulär um den Schädel und die Dosisverringering beträgt insofern durchschnittlich nur ca. 26%. Wobei man berücksichtigen muss, dass die Dosis im Vergleich zum Fernröntgen deutlich höher ist.

Im Zuge der personalisierten Medizin wäre in Zukunft anzudenken eine individuelle Risikoeinschätzung mit einzubeziehen. Dies könnte beispielsweise im Rahmen eines digitalen Röntgenpasses stattfinden. Dieser registriert jede (zahn-) ärztliche Strahlenbelastung und berechnet für den/die Patienten/Patientin die individuelle Belastung für die einzelnen Organe und das Gesamtsystem.

5. Anhang

5.1. Strahlenwichtungsfaktor

Strahlungsart	Strahlungs-Wichtungsfaktor W_R
Photonen	1
Elektronen ^a und Myonen	1
Protonen und geladene Pionen	2
Alphateilchen, Spaltfragmente und Schwerionen	20
Neutronen	Eine stetige Funktion der Neutronenenergie (siehe Abb. 1 und Gleichung. 4.3)

Alle Werte beziehen sich auf die Strahlung, die auf den Körper auftrifft oder die – im Falle interner Strahlenquellen – von (einem) innerhalb des Körpers befindlichen Radionuklid(en) abgestrahlt wird.

^a Der Sonderfall der Auger-Elektronen, der unter Punkt 116 und in Abschnitt B.3.3 von Anhang B erläutert wird, ist zu beachten.

Abbildung 36: Strahlenwichtungsfaktoren (ICRP, 2007)

Der Strahlenwichtungsfaktor W_R bezieht die verschiedenen biologischen Wirksamkeiten unterschiedlicher Strahlenarten mit ein. Er wird mit der Energiedosis D multipliziert, um die Äquivalentdosis H zu berechnen. Die Einheit für die Äquivalentdosis ist Sievert.

$$H = W_R \cdot D$$

(Reiser et al., 2017)

5.2. Gewebewichtungsfaktor

Gewebe	w_T	w_T
Knochenmark (rot), Kolon, Lunge, Magen, Brust, restliche Gewebe ^a	0,12	0,72
Keimdrüsen	0,08	0,08
Blase, Oesophagus, Leber, Schilddrüse	0,04	0,16
Knochenoberfläche, Gehirn, Speicheldrüsen, Haut	0,01	0,04
	Gesamt	1,00

^a restliche Gewebe: Nebennieren, Obere Atemwege, Gallenblase, Herz, Nieren, Lymphknoten, Muskelgewebe, Mundschleimhaut, Bauchspeicheldrüse, Prostata (σ), Dünndarm, Milz, Thymus, Gebärmutter/Gebärmutterhals (φ)

Abbildung 37: Gewebewichtungsfaktoren (ICRP, 2007)

Der Gewebewichtungsfaktor w_T bezieht die ungleichen Strahlenempfindlichkeiten der Organe mit ein. Er wird mit der Summe der Organdosen H_T multipliziert, um die effektive Äquivalentdosis zu berechnen. Die Einheit für die effektive Äquivalentdosis ist Sievert.

$$H_{\text{eff}} = \sum w_T H_T$$

(Reiser et al., 2017)

5.3. *Versuchsprotokoll Fernröntgen – Phantomkopf*

Versuchsprotokoll für 20.11.2017

Einstellungen im Fernröntgen/Ceph

6. 73kV, 15mA, 9,4sec
7. 77kV, 14mA, 9,4sec
8. 84kV, 13mA, 9,4sec

Fünf Durchgänge pro Einstellung, je 20 Röntgenaufnahmen, mit Messkörpern, ohne Augenabdeckung. Ein Durchgang pro Einstellung, je 20 Röntgenaufnahmen, mit Messkörpern + Augenabdeckung.

5.4. *Versuchsprotokoll DVT – Phantomkopf*

Versuchsprotokoll für 30.01.2018 mit Phantomkopf im DVT

Einstellungen im DVT: Schädel: M; Länge: 23cm

- | | |
|---|-----------------------------|
| 9. 96kV; 4mA; 18sec; DAP: 1606mGy*cm ² ; CTDI: 1,7mGy | “normal – low dose” |
| 10. 96kV; 5,6mA; 27sec; DAP: 2149 mGy*cm ² ; CTDI: 2,3 mGy | “normal – normal” |
| 11. 96kV; 7,1mA; 36sec; DAP: 3678 mGy*cm ² ; CTDI: 3,9 mGy | “normal – HD” |
| 12. 96kV; 2,2mA; 9sec; DAP: 464 mGy*cm ² ; CTDI: 0,5 mGy | „ultra low dose – low dose” |
| 13. 96kV; 4mA; 9sec; DAP: 767 mGy*cm ² ; CTDI: 0,8 mGy | „ultra low dose – normal” |
| 14. 96kV; 5MmA; 12sec; DAP: 1295 mGy*cm ² ; CTDI: 1,3 mGy | „ultra low dose – HD” |

Ein Durchgang mit Messkörpern und ein Durchgang mit Messkörpern + Augenabdeckung.

5.5. *Versuchsprotokoll DVT – Echtschädel*

Versuchsprotokoll für 08.02.2018 mit Echtschädel im DVT

Einstellungen im DVT: Schädel: M; Länge: 16cm

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. 96kV; 4mA; 9sec; DAP: 803mGy*cm ² ; CTDI: 0,8mGy | “normal – low dose” |
| 2. 96kV; 5,6mA; 13,5sec; DAP: 1074 mGy*cm ² ; CTDI: 1,1 mGy | “normal – normal” |
| 3. 96kV; 7,1mA; 18sec; DAP: 1839 mGy*cm ² ; CTDI: 2 mGy | “normal – HD” |
| 4. 96kV; 2,2mA; 4,5sec; DAP: 232 mGy*cm ² ; CTDI: 0,2 mGy | „ultra low dose – low dose” |
| 5. 96kV; 4mA; 4,5sec; DAP: 384 mGy*cm ² ; CTDI: 0,4 mGy | „ultra low dose – normal” |
| 6. 96kV; 5MmA; 6sec; DAP: 648 mGy*cm ² ; CTDI: 0,2 mGy | „ultra low dose – HD” |

Ein Durchgang mit Messkörpern ohne Augenabdeckung.

Literaturverzeichnis

AGES 2013. Radioaktivität und Strahlung in Österreich.

ALLGSTRSCHV 2018. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit, des Bundesministers für Verkehr, Innovation und Technologie, der Bundesministerin für Bildung, Wissenschaft und Kultur sowie der Bundesministerin für Gesundheit und Frauen über allgemeine Maßnahmen zum Schutz von Personen vor Schäden durch ionisierende Strahlung (Allgemeine Strahlenschutzverordnung – AllgStrSchV).

BIOSMITH, F. L. M. P. Available: <https://www.biosmith.com/AttenuRad-CT-Eye-Shield.html> [Accessed].

BRAUN, J. M.-W., DIRK 2017. *Basislehrbuch Innere Medizin* ELSEVIER.

DAUBER, W. 2011. *Bild-Lexikon der Anatomie*, Thieme.

DENECKE. 2019. Available: <https://www.denecke-zahnmedizin.de/service/dvt-3d-roentgen.html> [Accessed].

DROSCHL, H. 1990. Skriptum Kieferorthopädie. *In: KLINISCHE ABTEILUNG FÜR KIEFERORTHOPÄDIE DER UNIV. KLINIK FÜR ZAHN-, M.-., UND KIEFERHEILKUNDE GRAZ (ed.)*.

EHRENFELD, M., SANDER, F.G., SCHWENZER, N., AHLERS, M.O., BANTLEON, H.P. 2011. *Kieferorthopädie*, Thieme.

FILEV, M. 2019. Kombinierte intravitreale Therapie mit Dexamethason und Bevacizumab bei Strahlenoptikopathie und -retinopathie. *Klinisches Monatsblatt Augenheilkunde, Thieme*.

FRANK HORNUNG, G. P. 2014. Digitale Volumentomografie in der KFO.

FUHRMANN, A. 2013. *Zahnärztliche Radiologie*, Thieme.

HAMADA, N. 2017. Ionizing radiation sensitivity of the ocular lens and its dose rate dependence. *International Journal of Radiation Biology*, VOL. 93 NO. 10.

HAN, C., LI, MA 2013. Shielding effect of thyroid collar for digital panoramic radiography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 42.

HIRSCHFELDER, U. 2008. Radiologische 3D-Diagnostik in der Kieferorthopädie (CT/DVT). *Deutsche Gesellschaft für Kieferorthopädie*.

ICRP 2007. Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007, ICRP-Veröffentlichung 103, Verabschiedet im März 2007,

- Veröffentlichungen der Internationalen Strahlenschutzkommission,
Deutsche Ausgabe herausgegeben vom Bundesamt für Strahlenschutz.
ICRP 2012. ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of
Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue
Reactions in a Radiation Protection Context.
- JOUSSEN, A. 2011. *Retinale Gefäßkrankungen*, Springer Berlin Heidelberg.
- KAHLE, W., PLATZER, W., FROTSCHER, M. 2005. *Taschenatlas Anatomie in 3
Bänden*, Thieme.
- KANZAKI, T., YARITA 2016. Absorbed dose to the eye lens during dental
radiography. *Springer Japan*, 5.
- LANG, G. K. 2014. *Augenheilkunde*, Thieme.
- LEMMEN, V. 2019. *Sehnerv-Erkrankungen* [Online]. Available:
<https://www.augenaerzte-in-duesseldorf.de/leistung/diagnose-und-therapie/sehnervkrankungen/> [Accessed 31.07.2019 2019].
- MIßFELDT, M. 2012-2018. *Grauer Star (Katarakt): Linsentrübung* [Online].
Available: <https://www.brillen-sehhilfen.de/grauer-star/> [Accessed
19.02.2019 2019].
- NCRP 2016. Guidance on radiation dose limits for the lens of the eye: overview of
the recommendations in NCRP Commentary No. 26. *International Journal
of Radiation Biology*.
- PARSONS, B., FITZGERALD, MENDENHALL, MILLION 1994. Radiation
retinopathy after external-beam irradiation: analysis of time-dose factors.
official journal of the American Society for radiation Oncology, 30, 765-773.
- PEINSIPP, N., ROOS, G., WEIMER, G. 2016. *Röntgenverordnung*, ecomed.
- PLANMECA 2018. Planmeca ProMax 3D Max & Planmeca Maximity
Bedienungsanleitung (3D-Bildgebung).
- QU, L., ZHANG, MA 2012. Thyroid shields for radiation dose reduction during
cone beam computed tomography scanning for different oral and
maxillofacial regions. *European Journal of Radiology*, 81.
- RALF SCHULZE, S. H., DIRK SCHULZE 2009. S1 Leitlinie Dentale
Volumentomographie. DGZMK.
- REISER, M., KUHN, F. P. & DEBUS, J. 2017. *Duale Reihe Radiologie*, Thieme.
- ROTH, J. 2006. Abschirmungen bei zahnärztlichen Röntgenaufnahmen.
Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin, Vol 116.

- SCHMIDT, T. & FREYSCHMIDT, J. 2013. *Handbuch diagnostische Radiologie: Strahlenphysik, Strahlenbiologie, Strahlenschutz*, Springer Berlin Heidelberg.
- SCHOPF, P. 2008. *Curriculum Kieferorthopädie*, Quintessenz-Verlag-GmbH.
- SEMPER, M. I. 2013a. *Bildqualität – Field of View* [Online]. Voxeltalk. Available: <https://voxeltalk.wordpress.com/2013/06/07/bildqualität-field-of-view-image-quality-field-of-view/> [Accessed 27.08.2018 2018].
- SEMPER, M. I. 2013b. *Bildqualität – Voxelgröße* [Online]. Voxeltalk. Available: <https://voxeltalk.wordpress.com/2013/07/18/bildqualität-voxelgröße-image-quality-voxelsize/> [Accessed 27.08.2018 2018].
- SIRONA 2017. Orthophos XG 3D/ Ceph, Orthophos XG 3D ready/ Ceph, Gebrauchsanweisung. In: GMBH, S. D. S. (ed.).
- UNIVERSALMEDICAL. *CT Eye Shields* [Online]. Available: <https://www.universalmedicalinc.com/ct-eye-shields.html> [Accessed].
- WEBER, T. 2010. *Memorix Zahnmedizin*, Georg Thieme Verlag KG.
- WIKIPEDIA. *Fernröntgenseitenbild* [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Fernr%C3%B6ntgenseitenbild> [Accessed].

