

Seminararbeit

Rahmenthema des Wissenschaftspropädeutischen Seminars:

Diagnostik

Leitfach:

Sport

Thema der Arbeit:

Röntgendiagnostik: Anwendungen, Risiken und Zukunftsperspektiven

Verfasser: *Dustin Bichler*

Seminarleiter: *Bernd Pütz*

Abgabetermin: *11.11.2025*

Bewertung	Note	Notenstufe in Worten	Notenpunkte		Punkte
Schriftliche Arbeit				x 3	
Präsentation				x 1	
Summe:					
Gesamtleitung nach §29 Abs. 6 GSO = Summe :2 (gerundet):					

Datum und Unterschrift des Seminarleiters

Inhaltsverzeichnis

1	Bedeutung der Röntgenstrahlung für moderne Diagnostik	4
2	Zielsetzung	4
3	Historischer Hintergrund der Röntgenstrahlung	4
4	Physikalische Grundlagen	5
4.1	Erzeugung von Röntgenstrahlung	5
4.2	Auswirkung auf Materie	6
5	Anwendungen von Röntgenstrahlung	7
5.1	Konventionelles Röntgen	7
5.1.1	Frakturen	7
5.1.2	Thorax-Aufnahmen	9
5.2	Computertomographie	10
5.2.1	Low-Dose-Computertomographie	11
5.3	Fluoroskopie	12
5.3.1	Angiographie	13
6	Strahlenschutz	14
6.1	Gesetzliche Grenzwerte nach deutschem Strahlenschutzgesetz	14
6.2	Vergleich von medizinisch anfallender Strahlung zu beruflich expo- nierten Menschen	15
6.3	Strahlenschutz in der Anwendung für Personal und Patienten	15
7	Zukünftige Entwicklungen und Chancen	16
7.1	Künstliche Intelligenz in der Bildgebung	16
7.2	Verminderung der Strahlenbelastung	17
7.3	Steigerung der Qualität der Ergebnisse	18
7.4	Strahlenfreie Diagnoseverfahren als Alternative	18
7.4.1	Magnetresonanztomographie	18
7.4.2	Sonographie	19
8	Fazit	19

Schlussklärung	20
--------------------------	----

Tabellenverzeichnis

1 Kostenvergleich konventionelles Röntgen (KR) vs. Computertomographie (CT)	8
--	---

1 Bedeutung der Röntgenstrahlung für moderne Diagnostik

Vor 130 Jahren wurde die Röntgenstrahlung entdeckt. Seitdem hat das bildgebende Verfahren viele technologische Fortschritte gemacht. Dieser technologische Fortschritt erlaubt es der modernen Radiologie, den menschlichen Körper sehr detailliert abzubilden. Verbessertes Screening, Monitoring sowie die verbesserte Diagnose von Krankheiten bieten der modernen Medizin Möglichkeiten, das Wohl der Patienten zu steigern. Doch dieser technologische Fortschritt bringt auch Risiken mit sich. Viele bildgebende Verfahren, darunter auch das Röntgen, setzen Patienten ionisierender Strahlung aus, welche das Krebsrisiko potenziell erhöht. Außerdem stehen im Umgang mit intravenösen Kontrastmitteln allergische Reaktionen und weitere Risiken in Zusammenhang.

2 Zielsetzung

Ziel dieser Seminararbeit ist es, die Grundlagen und Anwendungen der modernen Röntgendiagnostik aufzuzeigen. Dabei werden physikalische Grundlagen sowie klinische Einsatzbereiche näher erläutert, um ein umfassenderes Verständnis über die Röntgendiagnostik zu erlangen. Dabei sollen diagnostische Risiken besonders kritisch analysiert werden, um die mit der Röntgendiagnostik verbundenen gesundheitlichen Risiken bewerten zu können. Zudem werden zukünftige Entwicklungen sowie Chancen des bildgebenden Verfahrens dargestellt und kritisch beleuchtet.

3 Historischer Hintergrund der Röntgenstrahlung

Die Röntgenstrahlung wurde 1895 durch den deutschen Physiker Wilhelm Conrad Röntgen entdeckt. Noch im selben Jahr, am 28. Dezember 1895 publizierte Röntgen eine erste Mitteilung an die „Physikalisch-Medizinische Gesellschaft zu Würzburg“ mit dem Titel „[Ü]ber eine neue Art von Strahlen“. Im Schreiben ging er auf die durch ihn neu entdeckte, zu Beginn „X-Strahlen“ bezeichnete Strahlung ein. In einem seiner

ersten Versuche wurde eine „Gasentladungsröhre“ (später „Röntgenröhre“ genannt) in lichtundurchlässigen, schwarzen Karton gehüllt. Der Versuch wurde in einem vollständig optisch abgeschirmten Versuchsraum durchgeführt. Er beobachtete, dass ein mit Bariumplatincyanoxyd beschichteter Schirm spontan zu fluoreszieren begann, also spontan Licht emittierte (22, 3). Dies ließ auf eine zuvor unbekannte, Materie durchdringende Strahlung schließen, da durch optische Abriegelung jegliche Art von sichtbarem Licht sowie Ultraviolettstrahlung ausgeschlossen werden konnte (22, 3). Es folgten weitere Versuche, die dieses Prinzip verwendeten. So wurde systematisch die Durchdringbarkeit verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Dicke untersucht. Das Auffällige war, dass die verschiedenen Materialien in verschiedenem Grade für die neue Strahlung durchlässig waren (22, 5). Dies ließ sich auch anhand des menschlichen Körpers zeigen. So warfen die Knochen von durch Röntgenstrahlung durchsetzten Körperteilen einen Schatten auf den fluoreszierenden Schirm, während der Rest für die Röntgenstrahlung durchlässig war (22, 4). Basierend auf weiteren Versuchen gelangte W.C. Röntgen zur Erkenntnis, dass die Durchdringbarkeit von Stoffen von ihrer Dichte sowie ihrer Ordnungszahl, die die Anzahl der Protonen im Kern eines Atoms angibt, abhängt (22, 3-9). Dieses Prinzip wird bis heute in der Röntgendiagnostik verwendet. Es schafft die Möglichkeit, nicht-invasive Untersuchungen durchzuführen und so eine weitere Verletzung des menschlichen Körpers während der Diagnose zu vermeiden.

4 Physikalische Grundlagen

Um das moderne Verfahren der Röntgendiagnostik zu verstehen, ist es von Vorteil, die physikalischen Eigenschaften der Röntgenstrahlung einordnen zu können, um dieses diagnostische Verfahren in Bezug auf Wechselwirkungen mit biologischem Gewebe sowie auf daraus resultierende Grenzen und Risiken einzuschätzen.

4.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung entsteht in der modernen Anwendung durch die Verwendung einer „Röntgenröhre“. Diese ist prinzipiell ein evakuiertes Gefäß, in dem sich ein Paar aus

Anode und Kathode befindet, an denen eine Beschleunigungsspannung anliegt. Um die Anzahl der zu beschleunigenden Elektronen zu erhöhen, liegt an der wendelförmigen Kathode eine Heizspannung an. Die freigesetzten Elektronen erfahren nun im starken elektrischen Feld, welches durch die Spannung zwischen den Elektroden entsteht, eine Beschleunigung in Anodenrichtung. Ca. 1% der aufgebrachten Elektronenenergie wird in Röntgenstrahlung umgewandelt (17, 7). Der Rest der aufgewendeten Energie wird in Form von Wärme auf das Anodenmaterial umgewandelt (22, 3). Die erzeugte Röntgenstrahlung lässt sich in zwei verschiedene Typen aufteilen: in die sogenannte „Bremsstrahlung“, bei der die beschleunigten Elektronen beim Auftreffen und Eindringen in die Anode abrupt „gebremst“ werden. Die sog. „Charakteristische Strahlung“ zeichnet sich dadurch aus, dass durch Elektronenübergänge in den inneren Schalen der Atome der Anode Energie freigesetztgesetztgesetzt wird (18, 4-6). Außerdem weist die charakteristische Strahlung ein materialabhängiges Spektrum auf (9, 834f.). Die entstandene Röntgenstrahlung durchdringt nun den menschlichen Körper und tritt dort mit dem menschlichen Gewebe in Wechselwirkung.

4.2 Auswirkung auf Materie

Die Auswirkung von Röntgenstrahlung auf verschiedene Materialien spielt in der Röntgendiagnostik eine wichtige Rolle, um Risiken klar zu verstehen und abzugrenzen. Röntgenstrahlung tritt in verschiedenen Arten mit Materie in Wechselwirkung (18, 11). Dabei relevant für die Diagnostik sind unter anderem der „Photoeffekt“ und der „Compton-Effekt“. Beim Photoeffekt überträgt ein Photon seine gesamte Energie auf ein in einem Atom gebundenes Elektron und löst es aus dem Atom, da die Energie des Photons in die kinetische Energie des Elektrons übergeht (9, 839-842). Das Atom wird durch diesen Vorgang ionisiert (18, 11). Die Veränderung der molekularen Struktur, die durch die Ionisierung der Atome des Gewebes entsteht, kann zu schwerwiegenden Folgen der menschliche Gesundheit führen, z.B. kann es bei hochenergetischer Strahlenexposition zu einer schwer zu behandelnden Schädigung des zentralen Nervensystems (20, 132ff.) kommen. Der Compton-Effekt beschreibt die teilweise Energieübertragung eines Photons auf ein schwach gebundenes Elektron. Das Photon wird dabei abgelenkt. Die Energieübertragung des Photons auf das

gebundene Elektron bewirkt die Ionisierung eines Atoms des menschlichen Gewebes (9, 840).

5 Anwendungen von Röntgenstrahlung

Das Verfahren der Röntgendiagnostik ist für die moderne Medizin essenziell. Es ermöglicht, schnell und zuverlässig Bilder von inneren Organen und Knochen zu erstellen, was bei der frühzeitigen Erkennung und Behandlung von Verletzungen, Fehlstellungen oder Erkrankungen hilfreich ist.

5.1 Konventionelles Röntgen

Das konventionelle Röntgen stellt in der modernen Medizin ein wichtiges bildgebendes Verfahren dar, um schnelle Diagnosen durchzuführen, die im Vergleich zur Computertomographie (CT) günstiger sind und eine geringere Strahlenbelastung verursachen (1, 2). Konventionelles Röntgen liefert ein zweidimensionales Bild, auf dem Knochenveränderungen sichtbar werden (11, 2). Im Folgenden werden Anwendungen des konventionellen Röntgens sowie deren Vor- und Nachteile untersucht, um die diagnostische Effektivität und potenzielle Risiken für Patienten abzuwägen und zu beurteilen. Aufgrund hoher Kosten anderer bildgebender Verfahren wird das konventionelle Röntgen häufig als Erstdiagnose verwendet, da es kostengünstig (siehe Tabelle 1) und verfügbar ist (8, 2). So ist im direkten Vergleich beispielsweise die CT des Handgelenks durchschnittlich sechsmal so kostenintensiv wie das konventionelle Röntgen an derselben Stelle. Auch die Anschaffungskosten einer CT-Einheit sind um ein Vielfaches höher als die einer Einheit für konventionelles Röntgen (26, 3). Deshalb kann häufig nur konventionelles Röntgen als Erstdiagnose durchgeführt werden.

5.1.1 Frakturen

„A fracture is a breach in the structural continuity of the bone cortex, with a degree of injury to the surrounding soft tissues“ (24, 1). Die frühzeitige Diagnose von Frakturen ist essenziell, um langfristige Einschränkungen wie z.B. Osteonekrose, Pseudarthrose

Untersuchung	durchschnittliche Kosten	Quelle
KR Handgelenk	17,48 €	(3, 25)
KR Halswirbelsäule	68,22 €	(26, 5)
KR Lendenwirbelsäule	79,85 €	(26, 5)
CT Handgelenk	110,75 €	(3, 25)
CT Gehirn	154,00 €	(26, 5)
CT Halswirbelsäule	177,14 €	(26, 5)

Tabelle 1: Kostenvergleich konventionelles Röntgen (KR) vs. Computertomographie (CT)

oder chronische Schmerzen zu vermeiden und die durch diese Komplikationen entstehenden sozioökonomischen Folgen zu reduzieren (3, 25).

Knietraumata werden zunächst hauptsächlich durch konventionelles Röntgen diagnostiziert. Die frühzeitige Diagnose ist wichtig, um Bewegungseinschränkungen, Knieinstabilität bzw. Achsenfehlstellungen des Kniegelenks oder Schmerzen zu vermeiden (1, 1). Allerdings ist die Sensitivität des konventionellen Röntgens unzureichend, um Frakturen des Knies bzw. deren Art zu erkennen, was zu Missinterpretationen führen kann (1, 7). Der Cohens Kappa (κ) liefert ein Maß für die Übereinstimmung zwischen zwei Bewertern. Analysen zeigen, dass die Übereinstimmung der Diagnosen konkomitierender Knochenbrüche im Knie mittels konventionellem Röntgen bzw. CT nur moderat ist (1, 4). Die Sensitivität des konventionellen Röntgens sinkt dabei mit steigender Anzahl der vorhandene Frakturen (1, 7). CT kann hier potenzielle Vorteile bieten, was im entsprechenden Kapitel genauer thematisiert wird.

Die Diagnose von Luxationsfrakturen des Mittelfußes, die häufig als Lisfranc-Verletzungen bezeichnet werden, ist schwierig, da ein erheblicher Teil der Frakturen unverschoben ist oder nicht zu erkennen ist (8, 5). Durch hohe Kosten anderer bildgebender Verfahren sowie durch die weitere Begrenzung der Ausstattung in Notaufnahmen wird das konventionelle Röntgen auch hier als häufigstes Verfahren einer Erstdiagnose verwendet, da es kostengünstig und zugänglich ist (8, 2). Für akute Diagnosen von Frakturen, besonders in der Notaufnahme, eignen sich andere bildgebende Verfahren wie CT oder Magnetresonanztomographie (MRT) weniger, da sie häufig undurchführbar sind (8, 2). Analysen zeigen, dass bilaterale Röntgenaufnahmen unter Belastung des Fußes

zuverlässigere Diagnosen bei subtilen Lisfranc-Verletzungen als herkömmliche CTs erlauben (8, 5). So kann die Sensitivität gesteigert werden, ohne auf Verfahren mit hoher Strahlenbelastung zurückgreifen zu müssen.

Behzadi *et al.* legen jedoch nahe, dass in Fällen von Kahnbeinfrakturen des Handgelenks eine kostengünstige Diagnose durch konventionelles Röntgen nicht zielführend ist, da das konventionelle Röntgen eine geringe Sensitivität aufweist, was zu einer fehlerhaften Diagnose und so zu weiteren Komplikationen führt (3, 24 f.). Eine fehlerhafte Diagnose kann zu einem verlängerten Heilungsprozess führen, was nach ihnen zu einem größeren sozioökonomischen Schaden führt als die Verwendung des kostenintensiven Verfahrens der CT (3, 25).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Wahl des bildgebenden Verfahrens im Einzelfall abgewägt werden muss. Obwohl das konventionelle Röntgen ein verfügbares, kostengünstiges Verfahren mit niedriger Strahlenbelastung darstellt, weist es bei einer hohen Anzahl an Frakturen eine geringe Sensitivität auf und kann komplexe und subtile Frakturen häufig nicht zuverlässig bestimmen. In solchen Fällen kann die CT eine wertvolle Ergänzung für die Bildgebung sein, um Fehldiagnosen und daraus entstehende sozioökonomische Schäden zu vermeiden.

5.1.2 Thorax-Aufnahmen

Erkrankungen der Lunge gehören zu den häufigsten Untersuchungen konventioneller Röntgendiagnostik (5, 2). Dies geschieht meistens mit einer Aufnahme des Thorax. Das ist durch die schnelle Durchführbarkeit der Bildakquisition sowie der Möglichkeit, diese während des Liegens der Patienten in einem Bett und so auch auf der Intensivstation durchzuführen, zu begründen (21, 140). Bei korrekter Durchführung der Röntgen-Thorax-Aufnahme konnten Referenzwerte laut Renz *et al.* bereits im Jahr 2022 problemlos unterschritten werden (21, 141). Dies könnte sich durch einen technologischen Fortschritt erklären lassen, beispielsweise durch die Verwendung moderner, sensitiver Detektoren oder einer Einblendung des Strahlenfeldes, also der Fokussierung des Strahlenfeldes auf die zu untersuchenden Körperregionen, um

Strahlenexposition anliegender Körperregionen und des Personals zu minimieren (5, 2). Einer der häufigsten Gründe einer Röntgenuntersuchung des Thorax bei Patienten im Kindes- und Jugendalter ist die Plausibilität einer Lungenerkrankung (21, 143). Dabei hält die Röntgenuntersuchung einen wichtigen Stellenwert, da sie als allgegenwärtig verfügbar, schnell und einfach durchzuführen gilt (21, 146). Dennoch sollten auch in diesem Gebiet verschiedene bildgebende Verfahren auf ihre Vorteile analysiert werden und in Erwägung gezogen werden.

5.2 Computertomographie

Die CT gilt als weitverbreitetes bildgebendes Verfahren. Es zeichnet sich unter anderem durch seine hohe Sensitivität aus (27, 2). Bei diesem Verfahren rotiert eine Quelle an Röntgenstrahlung um ein Objekt. Röntgenstrahlung durchdringt das Objekt und wird auf der gegenüberliegenden Seite detektiert. Durch die Rotation der Quelle entstehen Detektionen verschiedener Eintrittswinkel, welche an ein Datenerfassungssystem (DAS) gesendet werden, welches aus den verschiedenen Datentomographische Bilder erzeugt (15, 1-3). So wird eine dreidimensionale Ansicht der zu untersuchenden Körperregion ermöglicht. In der Diagnostik von Frakturen gilt die CT als Referenzverfahren, da es Frakturen detailliert darstellt und okkulte Frakturen und Fälle von Pseudarthrose zu identifizieren (16, 389). Auch in der Diagnose intrazerebraler Blutungen gilt die CT als akkurates Verfahren, um Standort und Art der Blutung zu diagnostizieren (27, 1). Trotz der hohen Genauigkeit der CT stellt die hohe Strahlenexposition und damit verbundene Gesundheitsrisiken einen erheblichen Nachteil des Verfahrens dar (6, 1). So stellen Anwendungen der CT laut Luís Duarte *et al.* 11 % der radiologischen Prozeduren in den USA dar, verursachen jedoch zwischen 40 % - 70 % der Strahlenexposition, bei hospitalisierten Patienten bis zu 97,5 % (16, 393). Dabei wird betont, dass die pädiatrische Bevölkerung eine zehnfache Strahlenempfindlichkeit aufweist und dass keine sichere Dosis ionisierender Strahlung existiert, unterhalb der kein Risiko für Zellschäden und ein daraus resultierendes Krebsrisiko besteht (16, 388). Und obwohl die CT als verlässlicher gilt als das konventionelle Röntgen, so sollte es aufgrund der hohen Strahlenbelastung sowie der mit dem Verfahren verbundenen hohen Kosten nur in Einzelfällen verwendet werden

(1, 1 f.). Die Vor- und Nachteile des Verfahrens sollten fallspezifisch abgewägt werden, um die Relevanz der diagnostischen Genauigkeit der hohen Strahlenbelastung und den hohen anfallenden Kosten einzuschätzen.

5.2.1 Low-Dose-Computertomographie

Viele Wissenschaftler legen nahe, dass geringe Mengen an ionisierender Strahlung vorteilhaft für den Menschen sind (27, 7). Allgemein kann eine hohe Strahlenexposition das Risiko für Krebsarten wie Speicheldrüsenkrebs steigern (27, 7). Besonders das Gehirn, die Augenlider und die Speicheldrüse sind überdurchschnittlicher Strahlenbelastung ausgesetzt (27, 4). Gleichzeitig besteht ein bedeutsamer Zusammenhang zwischen hochdosierter Strahlenexposition und dem Risiko für kortikale und subkapsuläre Katarakte oder andere linsenförmige Veränderungen der Augenlinse (27, 1f.). Deshalb wird die häufige Verwendung der CT hinterfragt, besonders im Umgang mit Kindern, zum Beispiel bei der Diagnose von Appendizitis (27, 1). Bei diesen besteht ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung von Krebserkrankung nach einer CT-Behandlung. Besonders das Risiko eines Gehirntumors ist nach einer CT-Aufnahme des Kopfes besonders hoch und steigt mit der Anzahl der Aufnahmen (6, 7).

Eine Form der CT, die sogenannte „Low-Dose-CT“, bietet im Gegensatz zu der klassischen die Möglichkeit, Strahlenexposition zu senken und dabei für die Diagnose akzeptable Qualität zu behalten (27, 2). Die Low-Dose-CT (LDCT) ist dabei eine Variante der CT, bei der das Röhrenstrom-Zeit-Produkt gesenkt wird, was besonders bei jungen Patienten die im Körper akkumulierte Strahlendosis senkt und so das krebserregende Risiko senkt (27, 7). Dies stellt einen großen Vorteil für die langfristige Gesundheit der Patienten dar, bringt jedoch auch Nachteile mit sich. So führt der Umgang der LDCT zu einer geringeren Qualität der Bildgebung und möglicherweise unqualifizierten Ergebnissen (27, 3). So eignet sich die CT als Diagnoseverfahren bei Patienten mehr, bei denen sich Metallkomponenten im zu untersuchenden Knochen befinden, da die LDCT in solchen Fällen eine niedrigere Bildqualität aufweist (16, 389).

In der Diagnose von Frakturen ist es wichtig, die Strahlenexposition durch die Anwendung von CT zu senken und dennoch die Bildqualität beizubehalten (16, 394). Luís Duarte u.a. zeigen auf, dass bei der Bewertung von Traumata, welche Patienten erfuhren und bei denen, die sich im Verfahren des Tomografischen Monitorings befinden, die Verwendung von LDCT im klinischen Alltag sinnvoll zur Erkennung von Frakturen ist (16, 394). Dort kann so die Strahlenexposition der Patienten gesenkt werden, während die Rate der erkannten Frakturen beibehalten werden kann (16, 392-394). Zudem werden die hohen Kosten der CT dabei reduziert (16, 394).

Besonders bei der Diagnose und Überwachung intrazerebraler Blutungen spielt das Senken der Strahlenbelastung eine große Rolle. Dort werden zur Krankheitsüberwachung mehrere CT-Untersuchungen des Kopfes durchgeführt. Jedoch existierte laut Wu *et al.* unter anderem im Jahr 2020 keine Richtlinie, um intrazerebrale Blutungen mit Hilfe von CT zu diagnostizieren (27, 2). In der Anwendung des Monitorings erweist sich jedoch die CT als diagnostisch überdimensioniert, da hierbei eine hohen Strahlendosis erforderlich ist, während LDCT sich trotz der geringeren Strahlendosis als geeignet erweisen kann, da im Rahmen des Monitorings die Qualität der Bildgebung genügt (27, 3).

5.3 Fluoroskopie

Fluoroskopie ist ein auf der Röntgendiagnostik basierendes bildgebendes Verfahren. Dabei wird es routiniert verwendet, um strukturelle und funktionelle Anatomie aufzuzeigen, also Aufnahmen in Echtzeit zu erstellen, was einen entscheidenden Vorteil gegenüber der CT oder MRT darstellt (23, 216). Im Zuge des technischen Fortschritts anderer bildgebender Verfahren wie der CT, MRT oder des Ultraschalls sinkt die Relevanz der Fluoroskopie bereits seit Jahrzehnten (23, 214).

Shalom *et al.* legen nahe, dass auch die klinische Bedeutung von Fluoroskopie groß ist. Sie zeigen auf, dass die Fluoroskopie im postoperativen Setting häufig verwendet wird, um weitere Komplikationen zu erkennen (23, 216). Obwohl auch CT in vielen Fällen postoperativer Untersuchungen unverzichtbar ist und Vorteile gegenüber der

Anwendung von Fluoroskopie besitzt, ist die Verwendung von Fluoroskopie teilweise vorteilhaft, da sie bei gezielten Untersuchungen die Strahlenexposition der Patienten im Vergleich zur CT reduzieren kann (23, 215).

Darüber hinaus ermöglicht die Fluoroskopie eine fokussierte Betrachtung und Bewertung der zu untersuchenden Bereiche. Außerdem können anatomische Prozesse besser beurteilt werden als statische, bildgebende Verfahren (23, 2).

5.3.1 Angiographie

Mit Hilfe der Angiographie können Blutgefäße des Körpers dargestellt werden. Bei der konventionellen Angiographie, auch Katheterangiographie genannt, wird ein Katheter in ein Blutgefäß eingeführt. Sobald er die gewünschte Stelle erreicht hat, wird ein Kontrastmittel durch den Katheter in das Blutgefäß verabreicht. Dieses Kontrastmittel ist aufgrund seiner Beschaffenheit auf Röntgenbildern sichtbar und ermöglicht eine detaillierte Darstellung der Blutgefäße. Dabei bietet die Katheterangiographie den Vorteil gegenüber anderen bildgebenden Verfahren, vor allem durch seine hohe Bildqualität, räumliche Auflösung sowie der Kontrastauflösung. Dafür können durch die Verwendung eines Katheters verschiedene Komplikationen entstehen, wie Infektionen, innere Blutungen oder eine Beschädigung der Blutgefäße (19, 1).

Neben der Katheterangiographie wird auch die moderne CT-Angiographie verwendet, die nicht-invasiv ist. Anders als bei der Katheterangiographie muss bei der CT-Angiographie dabei weder ein Katheter eingeführt werden, noch ein Kontrastmittel direkt in das Blutgefäß verabreicht werden. Stattdessen kann das Kontrastmittel venös injiziert, um die Sichtbarkeit zu verbessern und die Dauer der Prozedur zu reduzieren. Doch die CT-Angiographie bietet gegenüber der Katheterangiographie einen geringeren Detaillierungsgrad. In beiden Verfahren werden Kontrastmittel verwendet. Die Verwendung von Kontrastmitteln birgt bei Eingriffen das Risiko möglicher allergischer Reaktionen oder einer Nierenschädigung (19, 1).

Obwohl die Angiographie einen wichtigen Bestandteil der Röntgendiagnostik darstellt,

so stellt sie ein Beispiel für die Herausforderungen der modernen Röntgendiagnostik. Sie ist aufgrund ihrer hohen diagnostischen Genauigkeit für die moderne Medizin unverzichtbar, verursacht jedoch eine hohe Strahlenexposition und birgt weitere potenzielle Risiken (19, 1).

6 Strahlenschutz

Strahlenschutz spielt in der Radiologie eine zentrale Rolle, da durch diesen der langfristige Schutz der Patienten vor ionisierender Strahlung gesichert werden soll. Es wird nahegelegt, dass eine niedrige Strahlenexposition sich vorteilhaft auf den Menschen auswirkt, während eine hohe Strahlenexposition das Risiko für diverse Krebserkrankungen erhöht (27, 7).

6.1 Gesetzliche Grenzwerte nach deutschem Strahlenschutzgesetz

Um den Schutz der Bevölkerung, aber genauso von Patienten und Personal, das ionisierender Strahlung ausgesetzt ist, sicherzustellen, legt das Deutsche Strahlenschutzgesetz (StrSchG) Grenzwerte für die Bevölkerung und beruflich exponierte Personen fest und schreibt vor, dass ionisierende Strahlung in der Medizin nur angewandt werden darf, wenn der gesundheitliche Nutzen der Behandlung dem Risiko durch Strahlenbelastung überwiegt (7, 63 f.). Laut dem Strahlenschutzgesetz wird zwischen drei Expositionskategorien unterschieden: Exposition der Bevölkerung, berufliche Exposition und medizinische Exposition (7, 10 f.). Für beruflich exponierte Personen liegt der jährliche Maximalwert der effektiven Dosis, welche die Strahlenexposition des gesamten Körpers berücksichtigt, bei 20 Millisievert, nur in Ausnahmen bei 50 Millisievert. Falls diese beruflich exponierte Person das 18. Lebensjahr noch nicht vollendet hat, nur bei einem Millisievert effektiver Dosis (7, 59 f.).

Zudem existiert eine von der Strahlenschutzkommission veröffentlichte Empfehlung, die „Orientierungshilfe für bildgebende Untersuchungen“ in der Medizin, was zur Orientierung dient, jedoch betont, dass die Kriterien der Orientierungshilfe das

Urteil einer Indikation durch einen Arzt mit erforderlicher Fachkunde nicht ersetzt (25, 3).

6.2 Vergleich von medizinisch anfallender Strahlung zu beruflich exponierten Menschen

Im Deutschen Strahlenschutzgesetz sind beruflich anfallende Äquivalentdosen festgelegt, denen einzelne Organe ausgesetzt werden dürfen. So dürfen der Augenlinse beispielsweise jährlich nur 20 Millisievert an Strahlung durch berufliche Exposition ausgesetzt werden. Dieser Wert wird bei einer CT-Untersuchung des Kopfes bereits um beinahe 100% überschritten (27, 6). Haga *et al.* untersuchten die Dosis, welcher Ärzte während der fluoroskopischen Diagnose einer Lungenspiegelung ausgesetzt sind. Dies geschah mit Hilfe eines Augenlinsendosimeters, welches Strahlung nahe der Augenlinse misst (10, 695). Sie zeigten auf, dass die Werte für die Strahlendosis, welche die Augenlinsen erhielten, zwischen 4.82 mSv bzw. 25,9 mSv jährlich, mit einem Durchschnitt von $7,68 \text{ mSv} \pm 5,27 \text{ mSv}$ lagen (10, 693). Es besteht also ein enormes Risiko für Ärzte, die röntgendiagnostische Verfahren anwenden, selbst hohen Mengen an ionisierender Strahlung ausgesetzt zu sein. Dabei gilt keine Menge an dieser als gesundheitlich unbedenklich (16, 388). Dabei besteht ein bedeutender Zusammenhang zwischen hoher Strahlenexposition der Augenlinse und Risiko für kortikale und subkapsuläre Katarakte bzw. anderer linsenförmiger Veränderungen dieser (27, 1f.).

6.3 Strahlenschutz in der Anwendung für Personal und Patienten

Um Personal vor Strahlenexposition des Gehirns zu schützen, werden zum Beispiel bleihaltige OP-Hauben mit Strahlenschutz verwendet (14, 171). Indik berichtete über diverse Fälle, in denen Ärzte Gehirntumore entwickelten. Dabei konnte sich diese Entwicklung auf ihre Arbeit zurückführen lassen, da 85 % der Tumore linksseitig waren, was durch die Arbeitsweise, bei der Ärzte typischerweise auf der rechten Seite des Patienten arbeiteten, während besonders die linke Seite des Kopfes dem Patienten

und so der Strahlenquelle zugerichtet war (14, 171). Dabei bewirkte der Schädel an sich erhebliche Strahlenabschwächung, die OP-Haube schwächte Strahlung jedoch nur moderat ab (14, 171). Doch die moderate Abschwächung durch die OP-Haube lag auch daran, dass der Großteil der Strahlung aus Streustrahlung über den Hals auf das Gehirn traf (14, 171 f.). Diese Streustrahlung kann nicht von einer Kopfbedeckung abgeschwächt werden. Strahlenschutz gilt dabei nicht als erforscht und verstanden. Es müssen weiterhin Forschungen unternommen werden, um Strahlenbelastung weiterhin zu reduzieren, um gesundheitliche Bedenken für Patienten und Personal zu minimieren.

7 Zukünftige Entwicklungen und Chancen

Zukünftige Entwicklungen sind wichtig für die Röntgendiagnostik, um medizinisches Personal zu entlasten, Genauigkeit der Diagnostik zu maximieren und gesundheitliche Risiken durch Strahlenbelastung für Patienten und Personal zu minimieren.

7.1 Künstliche Intelligenz in der Bildgebung

Künstliche Intelligenz spielt in der Radiologie eine sehr wichtige Rolle (5, 2-4). Durch sie kann Strahlenbelastung reduziert werden, indem sie Rauscheffekte der Bildgebung verringert oder Kontraste vergrößert, wodurch Bilder effektiver und präziser analysiert werden können (5, 2-4). Durch eine steigende Menge an von künstlicher Intelligenz analysierter Daten steigt auch die Genauigkeit der Diagnostik durch künstliche Intelligenz (12, 13). So kann medizinisches Personal entlastet werden.

Zudem werden „Workflow-Priorisierungen“ vorgenommen, die darauf abzielen, Patienten mit höherer Wahrscheinlichkeit der Erkrankung in der Diagnose zu priorisieren, während Patienten mit geringerer Wahrscheinlichkeit der Erkrankung erst anschließend diagnostisch untersucht werden (5, 3). So kann die diagnostische Effizienz in der Bildgebung gesteigert werden.

Bertsche *et al.* stellten 3D-Lokalisierung aus einer Monoplanprojektion, also ei-

ner zweidimensionalen Röntgenaufnahme durch Training eines KI-Modells dar, was zu einer 3D-Navigation nahezu in Echtzeit mit einer akzeptablen Genauigkeit führte (4, 1557). So kann die räumliche Orientierung der Ärzte erleichtert werden, was die Planung und Durchführung komplexer Eingriffe erleichtert.

Künstliche Intelligenz bietet viele Vorteile für die moderne Radiologie. Durch sie können die Strahlenexposition der Patienten und des Personals gesenkt, aber auch die Belastung des medizinischen Fachpersonals verringert werden.

7.2 Verminderung der Strahlenbelastung

Um die kumulierte Strahlendosis zu verringern, werden diverse Strategien verfolgt.

Azizmohammadi *et al.* stellten ein Verfahren dar, das zur Reduktion der Strahlenbelastung bei interventionellen angiographischen Untersuchungen des Herzens dient. Bei diesen Untersuchungen werden i.d.R. Echtzeitbilder erstellt. Ein KI-Modell konnte so trainiert werden, dass es Bilder vorhersagte, was zu einer Reduktion der Anzahl der erstellten Bilder und so zu einer Verringerung der Strahlenbelastung führte, was besonders bei der pädiatrischen Bevölkerung von Vorteil ist (2, 10).

In der LDCT wird das Röhrenstrom-Zeit-Produkt der CT gesenkt, um Strahlenexposition und das daraus resultierende Krebsrisiko zu verringern (27, 7). So kann die Qualität der Diagnose in vielen Fällen zur Diagnose genügen, während aufgrund des geringeren Röhrenstrom-Zeit-Produktes die Strahlenbelastung sinkt. Zudem können Kosten der Untersuchung reduziert werden (16, 392-394).

Auch ein fundiertes anatomische Verständnis kann zu einer Reduktion der Strahlenexposition führen. So ist die Diagnose von Lisfranc-Verletzungen sowohl mit Hilfe von konventionellem Röntgen als auch der CT schwierig (8, 5). Durch eine bilaterale Röntgenaufnahmen während der Belastung des Fußes können auch subtile und okkulte Frakturen sichtbar werden (8, 5). So können auch durch konventionelle Röntgenaufnahmen Frakturen sichtbar werden, was im Gegensatz zur CT mit einer

geringeren Strahlenbelastung verbunden ist.

7.3 Steigerung der Qualität der Ergebnisse

Die technologische Entwicklung in den bildgebenden Verfahren zielt nicht nur darauf ab, die Strahlenbelastung zu reduzieren, sondern auch auf eine Maximierung der diagnostischen Qualität der bildgebenden Verfahren.

Konventionelle Kontrastmittel liefern einen moderaten Kontrast. Sie verteilen sich unspezifisch, lagern sich zum Beispiel also kaum in zu untersuchendem Tumorgewebe an (13, 8). Zudem kann bei Vorerkrankungen der Niere Nephrotoxizität eintreten, also eine weitere Schädigung der Niere (13, 8).

Auf Nanopartikeln basierte Kontrastmittel bieten den Vorteil, auch bei Personen mit Nierenerkrankungen anwendbar zu sein während sie eine hohe Bildkontrastierung liefern und so zur diagnostischen Qualität beitragen (13, 5-10).

7.4 Strahlenfreie Diagnoseverfahren als Alternative

Strahlenfreie diagnostische Verfahren stellen Vorteile gegenüber radiologischen bildgebenden Verfahren dar, da bei ihnen keine gesundheitlichen Bedenken für Patienten und Personal entstehen.

7.4.1 Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie (MRT) stellt ein verbreitetes Verfahren der strahlenfreien bildgebenden Verfahren dar. Die MRT ist dabei sehr sensitiv, was bei der Diagnose okkulten Frakturen und bei weichem Gewebe besonders vorteilhaft ist (8, 5). Dabei ist das Verfahren sehr kosten- und zeitaufwändig, was einen wesentlichen Grund für die geringe Verbreitung des Verfahrens im klinischen Alltag darstellt (8, 5). Deshalb stellt die MRT keine Einstiegsdiagnostik, wie es das konventionelle Röntgen ist, dar (5, 2).

7.4.2 Sonographie

Anders als die MRT stellt die Sonographie ein kostengünstiges strahlenfreies bildgebendes Verfahren dar. Aber auch hier ist das Verfahren im klinischen Alltag nur moderat verbreitet, was an einer mangelnden Vertrautheit des Personals mit dem Verfahren liegt, sowie der Unfähigkeit der Sonographie, tiefliegende Strukturen darzustellen (8, 5).

8 Fazit

In dieser Seminararbeit wurde die Relevanz der Röntgendiagnostik für die moderne Medizin untersucht. Dabei wurden Aspekte wie Strahlenexposition, diagnostische Genauigkeit sowie Kosten- und Zeitaufwand in Betracht gezogen. Zuerst wurden physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik berücksichtigt, um die Risiken durch ionisierende Strahlung besser nachvollziehen zu können. Anschließend wurden diverse Anwendungen der Röntgenstrahlung, deren Chancen sowie Risiken dargestellt. Das konventionelle Röntgen stellt aufgrund seiner geringen Kosten, hohen Verfügbarkeit und der geringen Strahlenbelastung ein geeignetes Verfahren zur Erstdiagnose dar. Bei komplexen und subtilen Frakturen ist jedoch die Sensitivität ungenügend, um genauere Diagnosen vorzunehmen. In solchen Fällen sind genauere Verfahren wie die Computertomographie zuverlässiger, weisen dafür eine höhere Strahlenbelastung auf und sind kosten- und zeitintensiver. Die Low-Dose-Computertomographie reduziert Kosten und Strahlenbelastung, liefert jedoch eine geringere diagnostische Genauigkeit als die reguläre Computertomographie. Obwohl keine gesetzliche Richtlinie für medizinisch anfallende Strahlenexposition in Deutschland besteht, ist diese nicht unbedeutend. Um die Strahlenbelastung zu senken, sollten Verfahren stets im Einzelfall durch ausgebildetes Fachpersonal entschieden werden, um benötigte diagnostische Genauigkeit und Strahlenbelastung abzuwägen. Auch zukünftige Entwicklungen zielen darauf ab, Strahlenbelastung für Personal und Patienten zu senken und die diagnostische Qualität der Verfahren zu vergrößern, um die langfristige Gesundheit aller an der Diagnose beteiligten Personen zu sichern. Weitere strahlenfreie bildgebende Verfahren stellen Alternativen zu radiologischen Verfahren

dar. Dazu zählen insbesondere die Magnetresonanztomographie und die Sonographie, die den Vorteil bieten, dass keine ionisierende Strahlung verwendet wird. So können Risiken, die mit der Verwendung ionisierender Strahlung verbunden sind, vermieden werden. Für manche Diagnosen sind diese Verfahren besonders geeignet, doch ihre Verfügbarkeit, die Vertrautheit der Ärzte mit diesen Verfahren und der hohe Kosten- und Zeitaufwand limitieren die alltägliche klinische Verwendung dieser Verfahren bislang.

Schlusserklärung

Ich versichere, dass ich die vorgelegte Seminararbeit persönlich und unverfälscht verfasst, sämtliche hierfür zu Hilfe genommene gedruckte sowie digitale Quellen im Literaturverzeichnis angegeben und die aus diesen Quellen stammende Zitate oder Belegstellen für sinngemäß wiedergegebene Inhalte in meiner Seminararbeit als solche kenntlich gemacht habe. Die Seminararbeit ist in dieser oder einer ähnlichen Form in keinem anderen Kurs des diesjährigen oder eines vorhergehenden Abiturjahrgangs vorgelegt worden.

Bei der Anfertigung der vorliegenden Arbeit habe ich den Chatbot ChatGPT (GPT-5 mini, OpenAI) verwendet, um grobe Ideen zur Formulierung des Textes sowie formale Hilfe zur Verwendung des Text-Editors LaTeX, mit dem diese Seminararbeit verfasst wurde. Nach dem Einsatz habe ich die generierten Ergebnisse jeweils vollumfänglich geprüft und, soweit erforderlich, überarbeitet. Ich versichere die lückenlose Einhaltung der erlernten wissenschaftlichen Standards und übernehme die volle Verantwortung für die gesamte vorliegende Arbeit.

Ort, Datum

Unterschrift

Direktorat:

gez. OStD R. Hoff

Oberstufenkoordinatoren:

gez. StD M. Böswald M.A.; gez. StD C. Karl

Literatur

- [1] M. Avci and N. Kozaci. Comparison of X-Ray Imaging and Computed Tomography Scan in the Evaluation of Knee Trauma. *Medicina*, 55(10):623, 2019.
- [2] F. Azizmohammadi, I. Navarro Castellanos, J. Miró, P. Segars, E. Samei, and L. Duong. Generative learning approach for radiation dose reduction in X-ray guided cardiac interventions. *Medical physics*, 49(6):4071–4081, 2022.
- [3] C. Behzadi. Comparison of conventional radiography and MDCT in suspected scaphoid fractures. *World Journal of Radiology*, 7(1):22, 2015.
- [4] D. Bertsche, V. Rasche, W. Rottbauer, and I. Vernikouskaya. 3D localization from 2D X-ray projection. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 17(9):1553–1558, 2022.
- [5] D. Bichler. Experteninterview mit Dr. Árpád Bischof, 2025.
- [6] B. Buchberger, K. Scholl, L. Krabbe, L. Spiller, and B. Lux. Radiation exposure by medical X-ray applications. *German medical science : GMS e-journal*, 20:Doc06, 2022.
- [7] Bundesamt für Justiz (BfJ). Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG). Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist.
- [8] C. Chen, J. Jiang, C. Wang, J. Zou, Z. Shi, and Y. Yang. Is the diagnostic validity of conventional radiography for Lisfranc injury acceptable? *Journal of foot and ankle research*, 16(1):9, 2023.
- [9] C. Gerthsen and D. Meschede. *Gerthsen Physik*. Springer-Lehrbuch. Springer Spektrum, Berlin [u.a.], 25. Aufl. edition, 2015.
- [10] Y. Haga, K. Chida, Y. Kimura, S. Yamanda, M. Sota, M. Abe, Y. Kaga, T. Meguro, and M. Zuguchi. Radiation eye dose to medical staff during respiratory

- endoscopy under X-ray fluoroscopy. *Journal of radiation research*, 61(5):691–696, 2020.
- [11] I. K. Haugen and P. Bøyesen. Imaging modalities in hand osteoarthritis—and perspectives of conventional radiography, magnetic resonance imaging, and ultrasonography. *Arthritis research & therapy*, 13(6):248, 2011.
- [12] A. Hosny, C. Parmar, J. Quackenbush, L. H. Schwartz, and H. J. W. L. Aerts. Artificial intelligence in radiology. *Nature reviews. Cancer*, 18(8):500–510, 2018.
- [13] J. C. Hsu, L. M. Nieves, O. Betzer, T. Sadan, P. B. Noël, R. Popovtzer, and D. P. Cormode. Nanoparticle contrast agents for X-ray imaging applications. *Wiley interdisciplinary reviews. Nanomedicine and nanobiotechnology*, 12(6):e1642, 2020.
- [14] J. H. Indik. Radiation Safety Is Not a No-Brainer. *JACC. Clinical electrophysiology*, 7(2):171–173, 2021.
- [15] H. Jung. Basic physical principles and clinical applications of computed tomography. *Progress in Medical Physics*, 32(1):1–17, 2021.
- [16] M. Luís Duarte, L. R. dos Santos, A. S. B. Oliveira, W. Iared, and M. S. Peccin. Computed tomography with low-dose radiation versus standard-dose radiation for diagnosing fractures: Systematic review and meta-analysis. *Sao Paulo Medical Journal*, 139(4):388–397, 2021.
- [17] A. H. Mahnken, R. W. Günther, V. Duda, C. S. Papst, and Walthers Eudard. Skript Radiologie: Grundlagen der Diagnostik und Intervention, 28.06.2013. https://www.ukgm.de/ugm_2/deu/umr_rdi/PDF/Radio-Skript_UMR_1_02.pdf.
- [18] H.-D. Nagel. Strahlenphysikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik: Wechselwirkungsprozesse, Strahlungserzeugung, Filterung, Kontrastgebung, Detektion, Dosisbegriffe, 2003. <http://sasgrad.de/data/documents/Strahlenphysik.pdf>.

- [19] o.V. Was ist der Unterschied zwischen einem CT-Angiogramm und einem Katheter-Angiogramm?, 2024. <https://de.vasinso.com/info/what-is-the-difference-between-a-ct-angiogram--92655190.html>, besucht am 29.10.2025.
- [20] E. Pariset, S. Malkani, E. Cekanaviciute, and S. V. Costes. Ionizing radiation-induced risks to the central nervous system and countermeasures in cellular and rodent models. *International journal of radiation biology*, 97(sup1):S132–S150, 2021.
- [21] D. M. Renz, C. Huisinga, A. Pfeil, J. Böttcher, N. Schwert, F. Streitparth, and J. Weidemann. Röntgenuntersuchungen des Thorax bei Kindern und Jugendlichen: Indikationen und Limitationen. *Der Radiologe*, 62(2):140–148, 2022.
- [22] W. C. Röntgen. *Ueber eine neue Art von Strahlen (Vorläufige Mittheilung)*. Stahel’sche k. Hof- u. Universitäts-Buch- u. Kunsthandlung, Würzburg, 1 edition, 1895.
- [23] N. E. Shalom, G. X. Gong, and M. Auster. Fluoroscopy: An essential diagnostic modality in the age of high-resolution cross-sectional imaging. *World Journal of Radiology*, 12(10):213–230, 2020.
- [24] J. R. Sheen, A. Mabrouk, and V. V. Garla. *Fracture Healing Overview*. Treasure Island (FL), 2025.
- [25] Strahlenschutzkommission (SSK). Orientierungshilfe für bildgebende Verfahren. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 300. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 27. Juni 2019.
- [26] Y. X. Tay, M. E. Ong, S. J. Foley, R. C. Chen, L. P. Chan, R. Killeen, M. S. Mak, J. P. McNulty, and K. Sanjeeva. True cost estimation of common imaging procedures for cost-effectiveness analysis - insights from a Singapore hospital emergency department. *European journal of radiology open*, 13:100605, 2024.

- [27] D. Wu, G. Wang, B. Bian, Z. Liu, and D. Li. Benefits of Low-Dose CT Scan of Head for Patients With Intracranial Hemorrhage. *Dose-response : a publication of International Hormesis Society*, 19(1):1559325820909778, 2020.