

Aus dem Fachbereich Medizin
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

betreut am
Zentrum der Kinder- und Jugendmedizin
Klinik für Kinder- und Jugendmedizin
Schwerpunkt: Neonatologie
Leiter: Prof. Dr. Rolf Schlößer

**Röntgenbelastung und Röntgenuntersuchungen
bei
Frühgeborenen und kranken Neugeborenen**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
des Fachbereichs Medizin
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

vorgelegt von
Deliah Weiß

aus Offenbach am Main

Frankfurt am Main, 2021

Dekan: Prof. Dr. Stefan Zeuzem
Referent/in: Prof. Dr. Rolf Schlößer
Korreferent/in: Prof. Dr. Claus Michael Rödel

Tag der mündlichen Prüfung: 23.11.2021

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis	12
1. Einleitung.....	14
1.1 Einleitung – allgemein	14
1.2 Einleitung – Röntgen	17
1.2.1 Absorption von Röntgenstrahlen	17
1.3 Einleitung – Ionisierende Strahlung.....	18
1.3.1 Die Energiedosis/ Eintrittsdosis	18
1.3.2 Dosisflächenprodukt.....	19
1.3.3 Die Effektive Dosis (ED).....	19
2. Fragestellung und Zielsetzung	20
3. Methode	21
3.1 Patient*innen	21
3.2 Datenherkunft.....	22
3.3 Technische Aspekte/ Röntgengerät	23
3.4 Berechnung des Dosisflächenproduktes und der Effektiven Dosis	24
3.5 Risikoabschätzung	29
4. Statistische Analyse	31
5. Ergebnisse	33
5.1 Patient*innen	33
5.1.1 Geburtsgewicht und Gestationsalter	33
5.1.2 Geburtsgröße	34
5.1.3 Aufenthaltsdauer	34
5.1.4 Anzahl verstorbener Patient*innen innerhalb der ersten zwei Lebenswochen	36

5.1.5 Dauer der invasiven und noninvasiven Beatmung	36
5.1.6 Klinische Aspekte	39
5.2 Röntgenaufnahmen	43
5.2.1 Zeitlicher Aspekt.....	43
5.2.2 Frequenz der Röntgenaufnahmen.....	46
5.2.3 Art der Röntgenaufnahmen	50
5.2.4 Art der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht	52
5.2.5 Gewicht am Tag der Röntgenaufnahme.....	55
5.3 Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert, DFP und ED bei verschiedenen Arten der Röntgenaufnahmen	55
5.3.1 DFP – Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung.....	55
5.3.2 Aufnahmespannung – Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung..	57
5.3.3 mAs-Wert – Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung	59
5.3.4 Effektive Dosis – Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung	60
5.3.5 Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert und Dosisflächenprodukt und Effektive Dosis bei verschiedenem Geburtsgewicht	62
5.3.6 Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP und ED in Abhängigkeit vom Gestationsalter	64
5.3.7 Kumulatives DFP und ED, sowie Risikoevaluation pro Aufenthalt bezogen auf das Geburtsgewicht	65
5.4 Strahlenbelastung mit speziellen Diagnosen.....	69
5.5 Indikation, Therapeutische Konsequenz und Pathologischer Befund.....	76
5.5.1 Indikation	76
5.5.2 Pathologischer Befund bezogen auf das Geburtsgewicht in g	79
5.5.3 Pathologischer Befund bezogen auf das Lebensalter in Tagen	81
5.5.4 Pathologischer Befund bezogen auf das Lebensalter in Wochen	82
5.5.5 Pathologischer Befund bezogen auf das Lebensalter in Monaten.....	84

5.5.6 Therapeutische Konsequenz bezogen auf das Geburtsgewicht.....	85
5.5.7 Therapeutische Konsequenz bezogen auf das Lebensalter in Tagen..	87
5.5.8 Therapeutische Konsequenz bezogen auf das Lebensalter in Wochen	89
5.5.9 Therapeutische Konsequenz bezogen auf das Lebensalter in Monaten	90
6. Diskussion	92
6.1 Frequenzen der Röntgenaufnahmen in Abhängigkeit von Geburtsgewicht, Gestationsalter und Aufenthaltsdauer	92
6.2 Arten der Röntgenaufnahmen und bestrahltes Areal	95
6.3 Aufnahmespannung, mAs-Wert, das DFP, die ED und das geschätzte Risiko dieser Studie im literarischen Vergleich – Arten der Röntgenaufnahmen	99
6.4 Kumulative ED und die Risikoeinschätzung in der Literatur – Gewichtsklassen	107
6.5 Referenzwerte aus den Leitlinien	108
6.6 Alternativen	112
7. Schlussfolgerung.....	116
8. Zusammenfassung.....	119
8.1 Deutschsprachige Zusammenfassung	119
8.2 Englischsprachige Zusammenfassung.....	121
9. Literaturverzeichnis	123
10. Lebenslauf.....	132
11. Danksagung	134
12. Schriftliche Erklärung.....	135

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konversionskoeffizienten für AP Thorax mit 3mmAl +0,1mmCu Filter Quelle: Elbakri et al. ²²	27
Abbildung 2: Konversionskoeffizienten für AP Abdomen mit 3mmAl +0,1mmCu Filter Quelle: Elbakri et al. ²²	27
Abbildung 3: Terminologie zur Risikobeschreibung nach diagnostischer Strahlenexposition Quelle: Martin et al. ²⁷	29
Abbildung 4: Aufenthaltsdauer in Tagen bezogen auf das Geburtsgewicht in g und die SSW in Tagen.....	36
Abbildung 5: Dauer der invasiven Beatmung in Tagen bezogen auf das Geburtsgewicht, Mittelwert und Standardabweichung.....	37
Abbildung 6: ANS bezogen auf das Geburtsgewicht in g	39
Abbildung 7: BPD bezogen auf das Geburtsgewicht in g	40
Abbildung 8: NEC bezogen auf das Geburtsgewicht in g	41
Abbildung 9: Katheteranlage bezogen auf das Geburtsgewicht in g	42
Abbildung 10: Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Jahr	43
Abbildung 11: Anzahl der Röntgenaufnahmen im zeitlichen Verlauf	44
Abbildung 12: Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Patient*in pro Jahr in den jeweiligen Gewichtsgruppen.....	46
Abbildung 13: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht in g, Darstellung im Scatterplot.....	48
Abbildung 14: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Gestationsalter in Tagen, Darstellung im Scatterplot	48
Abbildung 15: Logarithmische Darstellung der Anzahl der Röntgenaufnahmen an den jeweiligen Lebenstagen	50
Abbildung 16: Röntgen-Thorax – Beispielbilder.....	51
Abbildung 17: Röntgen-Abdomen – Beispielbilder	51
Abbildung 18: Häufigkeit in % der verschiedenen Arten von Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht und das Gestationsalter	54
Abbildung 19: Dosisflächenprodukt nach erster (links) und zweiter (rechts) Beurteilung, Mittelwert±SD	57

Abbildung 20: Aufnahmespannung nach erster (links) und zweiter (rechts) Beurteilung, Mittelwert \pm SD	59
Abbildung 21: mAs-Wert nach erster (links) und zweiter (rechts) Beurteilung, Mittelwert \pm SD	60
Abbildung 22: Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP bezogen auf das Geburtsgewicht, Mittelwert \pm SD	63
Abbildung 23: Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP bezogen auf das Geburtsgewicht, Scatterplot	63
Abbildung 24: Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP bezogen auf das Gestationsalter, Mittelwert \pm SD	64
Abbildung 25: Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP bezogen auf das Gestationsalter, Scatterplot	65
Abbildung 26: Aufenthaltsdauer, Anzahl der Röntgenaufnahmen und das Dosisflächenprodukt (pro Aufnahme/ Aufenthalt) in Abhängigkeit vom Geburtsgewicht in g, Mittelwert	67
Abbildung 27: Kumulatives DFP in $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ bezogen auf das Geburtsgewicht und die Anzahl an Röntgenaufnahmen pro Patient*in. Darstellung der multiplen Variablen im Scatterplot. Die Anzahl der Bilder wird zur besseren Verdeutlichung in Größe und Farbe dargestellt.	68
Abbildung 28: Kumulative ED in μSv pro Aufenthalt bezogen auf das Geburtsgewicht in g, Median (Minimum und Maximum).....	68
Abbildung 29: DFP pro Aufnahme bezogen auf das Geburtsgewicht in g und die Anzahl der Bilder pro Patient*in, Multiple Korrelation	72
Abbildung 30: DFP pro Aufnahme bezogen auf das Gewicht am Tag der Aufnahme in g und die Anzahl der Bilder pro Patient*in, Multiple Korrelation	73
Abbildung 31: Kumulatives DFP bezogen auf das Geburtsgewicht in g und die Anzahl der Bilder pro Patient*in, Multiple Korrelation	75
Abbildung 32: Gegenüberstellung der Indikation und der darauffolgenden Therapieänderung	78
Abbildung 33: Häufigkeit (%) der diagnostierten NEC, Auffälligkeiten des resp. Systems, der iatrogenen Diagnosen und unauffälligen Befunde in Abhängigkeit vom Geburtsgewicht in g	81

Abbildung 34: Häufigkeiten (%) der therapeutischen Konsequenz bezogen auf das Geburtsgewicht in g	87
Abbildung 35: Unsicherheiten in der Bestimmung der Effektiven Dosis und dem geschätzten Risiko	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geburtsgewicht in g	33
Tabelle 2: Gestationsalter in SSW.....	34
Tabelle 3: Geburtsgröße in cm	34
Tabelle 4: Aufenthaltsdauer in Tagen	35
Tabelle 5: Dauer der invasiven Beatmung.....	37
Tabelle 6: Dauer der noninvasiven Beatmung.....	38
Tabelle 7: ANS	39
Tabelle 8: BPD	40
Tabelle 9: NEC	41
Tabelle 10: Katheteranlage.....	42
Tabelle 11: Röntgenparameter von 4167 Röntgenaufnahmen, die im Zeitraum von sechs Jahren gemacht wurden – Zeitliche Aspekte.....	44
Tabelle 12: Anzahl der Patient*innen pro Jahr bezogen auf das Geburtsgewicht	45
Tabelle 13: Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Jahr bezogen auf das Geburtsgewicht	45
Tabelle 14: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Gestationsalter	47
Tabelle 15: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht	47
Tabelle 16: Häufigkeitsverteilung der Röntgenaufnahmen im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf	49
Tabelle 17: Art der Röntgenaufnahmen nach erster und zweiter Beurteilung .	52
Tabelle 18: Art der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht nach erster Beurteilung	53
Tabelle 19: Art der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht nach zweiter Beurteilung.....	54
Tabelle 20: Art der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Gestationsalter nach zweiter Beurteilung.....	54
Tabelle 21: Gewicht am Tag der Röntgenaufnahme	55
Tabelle 22: DFP und ED bezogen auf die Art der Aufnahme, Mittelwert±SD ..	56
Tabelle 23: Aufnahmespannung und ED bezogen auf die Art der Aufnahme .	58
Tabelle 24: Strom-Zeit-Produkt und ED bezogen auf die Art der Aufnahme ...	60

Tabelle 25: Effektive Dosis in μSv der einzelnen Geburtsgewichtsgruppen (Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung)	61
Tabelle 26: Effektive Dosis in μSv der einzelnen Arten von Röntgenaufnahmen (Werte in Klammern: nach zweite Beurteilung)	62
Tabelle 27: Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP sowie ED pro Aufnahme in Bezug auf das Geburtsgewicht, Mittelwert \pm SD	62
Tabelle 28: Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP pro Aufnahme in Bezug auf das Gestationsalter, Mittelwert \pm SD	64
Tabelle 29: Kumulatives DFP, kumulative ED und kumulatives Risiko pro Aufenthalt bezogen auf das Geburtsgewicht	66
Tabelle 30: Diagnosen.....	71
Tabelle 31: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf die Indikation und prozentuale Verteilung einer darauffolgenden Therapieänderung.....	77
Tabelle 32: Indikation bezogen auf das Geburtsgewicht	79
Tabelle 33: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf den pathologischen Befund und das Geburtsgewicht	80
Tabelle 34: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf den pathologischen Befund und die Lebensstage.....	82
Tabelle 35: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf den pathologischen Befund und die Lebenswochen	84
Tabelle 36: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf den pathologischen Befund und die Lebensmonate.....	85
Tabelle 37: Häufigkeiten der therapeutischen Konsequenz bezogen auf das Geburtsgewicht	86
Tabelle 38: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf die therapeutische Konsequenz und das Lebensalter in Tagen	89
Tabelle 39: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf die therapeutische Konsequenz und das Lebensalter in Wochen	90
Tabelle 40: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf die therapeutische Konsequenz und das Lebensalter in Monaten	91
Tabelle 41: Frequenz der Röntgenaufnahmen in Abhängigkeit von Geburtsgewicht, Gestationsalter und Aufenthaltsdauer	94
Tabelle 42: Häufigkeiten der verschiedenen Arten der Röntgenaufnahmen in %, literarischer Vergleich.....	98

Tabelle 43: Aufnahmespannung, mAs-Wert, DFP, ED, geschätztes Risiko pro Aufnahme dieser Studie, literarischer Vergleich, Mittelwert \pm SD.....	105
Tabelle 44: Vergleich des DFP pro Aufnahmeart mit den DRWs ²³	110

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
ALARA	<i>As low as reasonably achievable</i>
ANS	<i>Atemnotsyndrom</i>
AP	<i>anterior-posterior</i>
APA-Style	<i>American Psychological Association - Style</i>
ÄS	<i>ärztliche und zahnärztliche Stelle</i>
BK	<i>Braunülenkatheter</i>
BPD	<i>Bronchopulmonale Dysplasie</i>
CE	<i>Communauté Européenne</i>
CPAP	<i>continuous positive airway pressure</i>
CT	<i>Computertomographie</i>
DFP	<i>Dosisflächenprodukt</i>
DRW)	<i>Diagnostischen Referenzwerte</i>
EC	<i>European Commission</i>
ED	<i>Effektive Dosis</i>
ESD	<i>Eintrittsdosis</i>
EU	<i>Europäische Union</i>
Gy	<i>Gray</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
J	<i>Joule</i>
K _{ai}	<i>Air Kerma</i>
kV	<i>Kilovolt</i>
mAs	<i>Milliamperesekunde</i>
Min. - Max.	<i>Minimum - Maximum</i>
mmAl	<i>mm Aluminium</i>
mmCu	<i>mm Kupfer</i>
NAK	<i>Nabelarterienkatheter</i>
NEC	<i>Nekrotisierende Enterokolitis</i>
NICU	<i>Neonatal Intensive Care Unit</i>
Nr	<i>Nummer</i>
NRPB	<i>National Radiological Protection Board</i>
NVK	<i>Nabelvenenkatheter</i>
O ₂	<i>Sauerstoff</i>

OP	<i>Operation</i>
PA	<i>posterior-anterior</i>
PACS®.....	<i>Picture Achiving and Communication System</i>
path.....	<i>pathologisch</i>
PDA.....	<i>persistierender Ductus arteriosus</i>
RöV	<i>Röntgenverordnung</i>
SD	<i>Standardabweichung</i>
SSW	<i>Schwangerschaftswochen</i>
STUK.....	<i>Radiation and Nuclear Safety Authority</i>
Sv	<i>Sievert</i>
VP-Shunt.....	<i>ventrikulo-peritonealer Shunt</i>
ZNS	<i>Zentrales Nervensystem</i>
ZVK	<i>Zentraler Venenkatheter</i>

1. Einleitung

1.1 Einleitung – allgemein

Im Bereich der Neonatologie, Intensivmedizin für Früh- und Neugeborene, kommen die kleinen Patient*innen oft multimorbide, mit ernsten internistischen und chirurgischen Problemen zur Welt oder sind für bestimmte Komplikationen gefährdet, die sich aus ihrer Unreife ergeben. Besonders bei einer notwendigen intensivmedizinischen Behandlung sind sekundäre Erkrankungen häufig. Auf der anderen Seite hat sich die Prognose von Frühgeborenen innerhalb der letzten Jahrzehnte sehr verbessert, was vor allem an der Betreuung in dafür extra ausgelegten Einheiten liegt, an der Unterstützung des respiratorischen Systems und der Möglichkeit zur parenteralen Ernährung^{1,2}.

Dennoch bedarf es eines hohen Maßes an Diagnostik und Therapie innerhalb von nur kürzester Zeit. Dabei spielen sowohl bei reifen kranken Neugeborenen und erst recht bei Frühgeborenen Erkrankungen der Atemwege und der Lunge eine Hauptrolle. Nach wie vor ist das konventionelle Röntgen in diesem Bereich der Medizin ein wichtiges Instrument, um zu einer Diagnose zu kommen oder um den Erfolg von Behandlungen zu überprüfen. Die Computertomographie (CT) ist dabei aufgrund der eingeschränkten Mobilität der Früh- und Neugeborenen, aber auch wegen der meist nicht vertretbaren hohen Strahlenbelastung keine gute Option³.

Diagnostische Bildgebungen werden nicht nur für die Erstbefundung genutzt⁴, sondern auch bei der Kontrolle des Krankheitsverlaufs eines Kindes und der Kontrolle von interventionellen Maßnahmen. Neben den Erkrankungen des respiratorischen Systems können auch angeborene Fehlbildungen oder die Nekrotisierende Enterokolitis (NEC) dazu führen, dass in Summe mehrere Röntgenaufnahmen pro Patient*in anfallen können. Die Lunge wird hierbei am häufigsten untersucht, trotz zunehmender Literatur über den Ultraschall des Thorax^{5,6,3,7-11}. Diejenigen, die am unreifsten geboren sind, sind am vulnerabelsten gegenüber ionisierender Strahlung, haben aber gleichzeitig die gravierendsten Diagnosen und bekommen die meisten Bilder⁴.

Dabei gilt stets das As-Low-As-Reasonably-Achievable (ALARA)-Prinzip und es wird versucht, die anfallende Röntgenbelastung so gering wie möglich zu halten und dennoch die bestmögliche Qualität der Bilder zu erzielen. Viele der ernstesten gesundheitlichen Verfassungen verlangen jedoch eine unbedingte Abklärung, da die durch die Strahlung verursachten möglichen Schäden geringer sind als diejenigen, die das Früh- oder Neugeborene durch das Verpassen der eigentlichen Diagnose erleiden würde.

Besorgte Eltern und Kliniker äußern dennoch immer wieder Bedenken bezüglich der diagnostischen Strahlenexposition von Früh- oder Neugeborenen. Die Überlegung, ob die ionisierenden Strahlen zu Krebs in der Kindheit oder Jugend führen können, bietet immer wieder Raum zur Diskussion¹².

Die anfallende Röntgenbelastung ist aus verschiedenen Gründen theoretisch nicht zu unterschätzen. Die Patient*innen sind nur wenige Tage alt, erhalten in Summe teilweise viele Aufnahmen und haben auf der anderen Seite eine hohe Lebenserwartung, wenn sie die Neugeborenenzeit ohne Komplikationen überleben.

Der biologische Effekt ionisierender Strahlung resultiert aus der Wirkung auf lebende Zellen. Trifft durch eine Röntgenbehandlung ionisierende Strahlung auf eine Körperzelle, so kann es dort durch Auftreffen der Strahlung auf die DNA-Stränge zu Einzel- und Doppelstrangbrüchen kommen. Die Zellteilung in der Metaphase der Mitose kann unterdrückt werden und es kann zu Mutationen während der Meiose führen¹³. Die Folgen sind Funktionsverlust der Zelle, karzinogene Veränderungen oder der Zelluntergang¹³. Der biologische Effekt der verwendeten ionisierenden Strahlung ist dabei abhängig von der Radiosensitivität der bestrahlten Gewebe, welche je nach Anzahl der undifferenzierten Zellen, der mitotischen Aktivität und der Dauer der aktiven Proliferation der Zellen in diesem Gewebe variiert¹³. Bei Embryos, Föten und Früh-/ Neugeborenen, die aufgrund der hohen Proliferationsrate ihrer Zellen, der mitotischen Aktivität und dem hohen Maße an undifferenzierten Zellen über eine schnelle Entwicklung und ein schnelles Wachstum verfügen, liegt es auf der Hand, dass die ionisierende Strahlung erhebliche Schäden verursachen

kann^{14-16,13}. So stehen diejenigen Gewebe unter größerem Einfluss der ionisierenden Strahlung, welche insgesamt eine größere Proliferationsrate haben, wie etwa das hämatopoetische System und die Gonadenanlagen, während das Zentrale Nervensystem (ZNS), die Leber und die Schilddrüse weniger sensitiv reagieren.¹³

Des Weiteren ist es bei den kleinen Körpergrößen der Patient*innen technisch schwierig, wirklich nur die Körperregion zu durchleuchten, die von diagnostischem Interesse ist. Oft werden mehr Organe in dem Untersuchungsfeld abgebildet, was zu einem Anstieg der Effektiven Dosis führen kann. Eine türkische Studie bei intensivbehandelten Neugeborenen ergab, dass es aufgrund der kleinen Körpergröße der Patienten relativ schwierig ist, die bestrahlte Region tatsächlich niedrig zu halten, sowie strahlensensitive Organe von der Strahlung abzuschirmen¹⁷. Puch-Kapst et al.¹⁸ gab einen Anstieg von 33% der ED an, wenn die bestrahlte Körperfläche nur um 1 cm ihrer Länge oder Breite mehr als gefordert eingeblendet wird¹⁸.

Es ist wichtig, die Röntgenbelastungen der Patient*innen fortlaufend zu evaluieren, mit Referenzwerten zu vergleichen und sie möglichst zu minimieren.

Mit dieser retrospektiven Studie, die sich mit der Röntgenbelastung basierend auf der Art und Anzahl der Intervention und der dabei verwendeten Dosis beschäftigt, soll herausgefunden werden, inwieweit Röntgenaufnahmen ein gesundheitliches Risiko für Patient*innen der Neonatologie darstellen. Dabei soll zunächst überhaupt dargestellt werden, wie häufig welche Patient*innen geröntgt werden. Die International Commission on Radiological Protection (ICRP) stellte erstmals im Report Nr. 60 den Begriff der ED vor, die unter Einberechnung von äquivalenter Dosis und Gewebegewichtungsfaktor, die Dosis und das Risiko der Röntgenaufnahme abschätzen kann¹⁹.

Die Strahlendosis pro Aufenthaltsdauer eines/r Patient*in und pro Röntgenaufnahme soll evaluiert werden, mit Werten der Literatur, Referenzwerten des ICRP und der European Commission (EC) sowie mit diversen Leitlinien verglichen werden.

Verschiedene klinische Parameter, wie Geburtsgewicht, Gestationsalter, Aufenthaltsdauer und die Indikation für eine Röntgenaufnahme sollen ausgewertet und wenn möglich mit den klinischen Daten anderer Neonatal Intensive Care Units (NICU) verglichen werden.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Studie sollen die Röntgenbelastungen evaluiert werden. Außerdem soll analysiert werden, welche Aufnahmen in Zukunft möglicherweise verzichtbar sind oder durch alternative Methoden ersetzt werden könnten.

1.2 Einleitung – Röntgen

Zum besseren Verständnis dieser Arbeit sollen an dieser Stelle die physikalischen Eigenschaften von Röntgenstrahlen erklärt werden.

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge im Bereich von Ultraviolett- und Gammastrahlung, somit einem Wellenlängenbereich von 10^{-9} m und 10^{-11} m²⁰. Aufgrund ihres enormen Energiegehalts sind sie in der Lage, Elektronen aus den äußeren Elektronenschalen eines Atoms zu schlagen und gehören somit zu der ionisierenden Strahlung.

1.2.1 Absorption von Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen besitzen generell die Fähigkeiten, Materie zu durchdringen, werden dabei aber in unterschiedlichem Maße abgeschwächt. Diese Differenz lässt sich bei der Auswertung der Bilder nutzen.

Die Intensität der Röntgenstrahlung nimmt exponentiell mit der Durchdringungstiefe ab. Die Schwächung ist dabei abhängig von der Dichte des Stoffes, der Ordnungszahl des Elementes und der Wellenlänge der Strahlung⁸. Knochen, welche über eine hohe Dichte verfügen und das Atom Ca²⁺ (Calcium) mit einer hohen Ordnungszahl besitzen, absorbieren viel Röntgenstrahlung und stellen sich auf dem Film hell dar. Durch die Verwendung von Kontrastmittel

können verschiedene Gewebe sichtbar gemacht werden, die sich sonst schwer darstellen lassen²⁰.

Trifft Röntgenstrahlung nun auf Materie, kann sie Atome anregen, beziehungsweise diese ionisieren. Die Lichtemission der angeregten Atome oder die Bildung von Ionen kann mit Speicherfolien oder mithilfe von digitalen Detektorsystemen eingefangen werden. Anschließend kann man diese elektronisch besser kontrastieren und darstellen²⁰.

1.3 Einleitung – Ionisierende Strahlung

Ionisierende Strahlung kann beim Auftreffen auf Materie dazu führen, dass ihre kinetische Energie auf das angestoßene Atom übertragen wird²⁰. Dabei wird dieses Atom entweder angeregt oder es wird ionisiert.

Ionisierende Strahlung findet sich in unserer natürlichen Umgebung, als sogenannte Höhenstrahlung, einer aus dem Kosmos stammenden Strahlung²⁰, oder in Form von radioaktiven Isotopen. Sie kann in der Medizin für interventionelle, diagnostische, therapeutische und palliative Zwecke genutzt werden.

Die Dosimetrie beschäftigt sich mit den Wechselwirkungen ionisierender Strahlung mit der Materie, die sie durchdringt. Sie versucht, diese Wechselwirkungen mittels Ionendosis, Energiedosis, der relativen biologischen Wirksamkeit sowie dem Bewertungsfaktor zu messen und zu bewerten²⁰.

1.3.1 Die Energiedosis/ Eintrittsdosis

Die Menge an Energie, welche in einem Material absorbiert wird, bezeichnet man als strahlenabsorbierte Dosis oder als [rad].

Die Energiedosis ist definiert als absorbierte Strahlungsenergie pro kg Masse des durchstrahlten Stoffes²⁰.

Sie berechnet sich aus der Energie des Röntgenstrahls [mA, Milliampere] und der zeitlichen Dauer des einfallenden Röntgenstrahls [s, Sekunde]. Es ist eine

einfache und schnelle Methode die Strahlendosis zu quantifizieren, eingeschränkt allerdings hinsichtlich der Nichtmiteinbeziehung von Radiosensitivität und Größe des bestrahlten Areals¹³.

$$1 \text{ Joule/Kilogramm (J/kg)} = 1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy}^{20}$$

1.3.2 Dosisflächenprodukt

Das Dosisflächenprodukt multipliziert die Energiedosis mit der Fläche, die bestrahlt wurde. Sie wird angegeben in mGy*cm².

1.3.3 Die Effektive Dosis (ED)

Da manche Gewebe, beziehungsweise Organe sensitiver gegenüber ionisierender Strahlung sind als andere, gibt es den Begriff der effektiven Dosis. Dort wird ein sogenannter Bewertungsfaktor für die einzelnen Gewebe, bzw. Organe mit eingerechnet und so die entsprechende Dosis für den gesamten Körper berechnet. Auch hier wird gemessen in der Einheiten rem oder in SI-Einheiten Sievert (Sv)²⁰.

2. Fragestellung und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit war eine retrospektive Untersuchung der Röntgenaufnahmen von Früh- und Neugeborenen und der Vergleich dieser mit anderen Instituten und Literaturenvergleichen.

Berücksichtigt wurden dabei die Daten von Früh- und Reifgeborenen, die im Zeitraum 01.01.2013 bis 31.12.2018 in der „Klinik für Kinderheilkunde und Jugendmedizin“ auf der Neugeborenenintensivstation, der Früh- und Neugeborenenüberwachungsstation und der Säuglingsstation mindestens eine Röntgenaufnahme erhielten.

So soll ein Überblick über die Verhältnisse der Röntgenuntersuchungen des NICU der Universitätsklinik Frankfurt erhalten werden. Wir erwarten hierbei einen Zusammenhang zwischen der Unreife der Früh- und Neugeborenen und/oder der Schwere der Erkrankung und der kumulativen Strahlendosis. Die genaue Höhe der Strahlendosis der untersuchten Patient*innen der untersuchten NICU ist nicht genau bekannt und soll in dieser Studie gefunden werden. Außerdem sollen die einzelnen Indikationen retrospektiv bewertet und literarisch verglichen werden, um in Zukunft möglicherweise Röntgenaufnahmen bei einzelnen Patient*innen einzusparen.

Nach intensiver Literaturrecherche beschäftigte sich die letzte deutsche Studie 2009 mit einer ähnlichen Thematik¹⁸. Weitere Studien stammen aus den verschiedensten Ländern und entstanden maßgeblich in den 90ern und 2000ern. Deshalb erachten wir es als wichtig, die Thematik in der heutigen Dekade erneut auszuwerten.

3. Methode

3.1 Patient*innen

Die klinischen Daten stammen von 1307 Patienten und Patientinnen, welche sich im Zeitraum vom 01.01.2013 bis 31.12.2018 in der „Neonatalogie“ (Leiter: Prof. Dr. med R. Schlößer) befanden und im Zuge dieser Behandlung mindestens eine Röntgenaufnahme erhielten. Die NICU der Universitätskinderklinik Frankfurt umfasst 12 Betten. Hinzu kommen noch zwei Stationen mit je 18 und 12 Betten, auf welchen seltener Röntgenaufnahmen gemacht werden. Insgesamt werden 500 bis 700 Patient*innen pro Jahr therapiert.

Dabei wurden sämtliche Diagnosen berücksichtigt, zum Beispiel das Atemnotsyndrom (ANS), die Bronchopulmonale Dysplasie (BPD), Neugeboreneninfektionen, Trinkschwäche, intraventrikulären Blutungen, Fehlbildungen, NEC, Persistierender Ductus arteriosus (PDA) und viele mehr.

Früh- und Neugeborene, die unter 14 Tagen verstarben (n=32), wurden nicht berücksichtigt. Bei 17 Patient*innen konnte die Dokumentation retrospektiv nicht eindeutig nachvollzogen werden, sodass auch diese aus der Studie ausgeschlossen werden mussten.

Die Daten der Patient*innen wurden vom Tage ihrer Geburt bis zum Zeitpunkt ihrer Entlassung verwendet. Patient*innen, die innerhalb ihres ersten Lebensjahres von auswärtigen Kliniken zugewiesen wurden und sich für diagnostische oder therapeutische Zwecke in stationärer Behandlung befanden, wurden miteingeschlossen. Allerdings wurden hierbei keine Fremdaufnahmen berücksichtigt, sondern nur die im Uniklinikum Frankfurt analysierten Röntgenbilder. Vereinzelt Röntgenaufnahmen wurden in den Jahren 2012 und 2019 angefertigt, bei Kindern, die beispielsweise im Dezember 2018 geboren wurden und bis Januar 2019 im stationären Aufenthalt waren. Diese Aufnahmen wurden generell berücksichtigt.

Dabei wurden verschiedene Parameter analysiert, welche die Patient*innen anhand verschiedener Merkmale klassifizieren können. Bei den Patient*innen interessierten uns die Geburtslänge, das Geburtsgewicht, das Gewicht am Tag der Röntgenuntersuchung, der Lebensstag zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme und das Geburtsalter in Tagen sowie Schwangerschaftswochen (SSW). Des Weiteren war die Diagnose, bzw. die Diagnosen der oft multimorbiden Früh- und Neugeborenen, die Atemhilfe bezogen auf die Art (invasiv/ noninvasiv) und die Dauer des Aufenthaltes in Tagen von Interesse.

Der zweite wichtige Untersuchungsansatz waren die Röntgenuntersuchungen an sich. Hier achteten wir auf die Indikation, eine mögliche Therapieänderung als Konsequenz des bildlichen Befundes und auf den pathologischen Befund selbst. Es wurden das Dosisflächenprodukt (DFP), die Aufnahmespannung und der Milliamperesekunde-Wert (mAs-Wert) ermittelt.

Auch die Röntgenfelder wurden in Augenschein genommen. Hierbei wurde zwischen Thorax-, Thoraxabdomen-, Abdomen-, Extremitäten- und Schädelaufnahmen differenziert. Aufgrund der Seltenheit wurden die Extremitäten- und Schädelaufnahmen nicht mit in die statistische Auswertung aufgenommen. Bei der Betrachtung der Bilder wurde anschließend der tatsächlich durchleuchtete Bereich der Patient*innen notiert. Etwaige Besonderheiten, wie eine Aufnahme in Linksseitenlage, im Inkubator oder eine Betaufnahme wurden berücksichtigt.

3.2 Datenherkunft

Ausgewählt wurden alle Patient*innen, die mindestens eine Röntgenaufnahme erhielten. Anschließend wurde der neonatologische Entlassungsbericht, sowie die neonatologische Anamnese via PID-Nummern (Patienten ID Nummer) im ORBIS®-System des Uniklinikums Frankfurt gesucht und ausgewertet. ORBIS® ist das Krankenhausinformationssystem der Firma AGFA Health Care, welches im Uniklinikum Frankfurt genutzt wird. Es dient der einheitlichen Darstellung und Dokumentation von Therapie, Diagnostik und Krankheitsverläufen der Patient*innen, und ermöglicht so eine rasche Koordination des Arbeitsalltages

in der Klinik. Folgende Werte ließen sich dem ORBIS®-System entnehmen: Geburtsgewicht, Gestationsalter, Geburtsgröße, Aufenthaltsdauer, Art und Dauer der Intubation, Indikation der Röntgenaufnahme und der Aufenthaltsort.

Die eingescannten Patientenakten waren digital im Archiv des Krankenhauses gespeichert und mittels des Programmes ENAIO® auffindbar. Aus ihnen wurden die Informationen für die Indikation einer Röntgenaufnahme, für eine mögliche Therapieänderung aufgrund einer erfolgten Röntgenaufnahme und für einen pathologischen Befund entnommen. Zudem konnte hier das Gewicht am Tage der Röntgenaufnahme herausgelesen werden.

Die Röntgenbilder sind im Picture Archiving and Communication System (PACS®) hinterlegt und können dort eingesehen werden. Das Dosisflächenprodukt in $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$, das Strom-Zeit-Produkt in mAs und die Aufnahmespannung in Kilovolt (kV) waren dort gespeichert. Die Röntgenbilder wurden retrospektiv beurteilt unter Berücksichtigung der Art (Thorax, Thoraxabdomen, Abdomen und Sonstige), des Datums der Aufnahme und der Häufigkeit der einzelnen Aufnahmen.

3.3 Technische Aspekte/ Röntgengerät

Die Röntgenaufnahmen der neonatologischen Intensivstation 14-2, der Stationen 32-6 und 32-7 des Universitätsklinikums Frankfurt wurden mit der mobilen Röntgeneinheit Mobilett-XP (Gerät A229, Hersteller: Siemens) gefertigt. Die Ausleseeinheit der Speicherfolie der Station 14-2 wurde von der Firma Phillips hergestellt, die der Stationen 32-6 und 32-7 von der Firma Fuji. Das Gerät verfügt über eine EU-Zulassung und CE-Kennzeichnung.

Ein Fokus-Film-Abstand von 120 cm wurde verwendet, die Aufnahmespannung beträgt mindestens 65 kV und der mAs-Wert mindestens 0,63 mAs. Strom-Zeit-Produkt und Aufnahmespannung werden in jedem Fall individuell anhand hauseigener Tabellen eingestellt. Diese Tabellen orientieren sich an Referenzwerten des Bundesamts für Strahlenschutz, der Strahlenschutzkommission und der Leitlinie der Bundesärztekammer. Die

Eigenfilterung des Strahlers beträgt 1,8 mmAl (mm Aluminium), die der Blende 2,0 mmAl und die der DFP-Messkammer 0,5 mmAl, sodass sich daraus eine Gesamtfilterung von 4,4 mmAl ergibt. Manuell anwählbar ist der variable Filter mit 0,1 mmCu (mm Kupfer), dieser wird hausintern immer eingesetzt. Ein Streustrahlenraster wird nicht verwendet, da der Körperdurchmesser der Patient*innen <15 cm ist.

3.4 Berechnung des Dosisflächenproduktes und der Effektiven Dosis

Das DFP konnte direkt dem Onlinesystem PACS® entnommen werden. Das DFP konnte bei 3067 von 4168 Bildern bestimmt werden. Die fehlenden Werte wurden mit einfacher linearer Regression in GraphPad Prism 9.0.0® bestimmt. Das logarithmierte Gewicht am Tag der Aufnahme und das logarithmierte DFP wurden für die Kategorien Röntgen Thorax, Röntgen Abdomen und Röntgen Thoraxabdomen miteinander korreliert. Das Gewicht hatte einen positiven Einfluss auf das DFP pro Aufnahme (Thorax: $F(1,1436)= 1828, p<0.001, R \text{ squared}: 0,56$, Abdomen: $F(1,79)= 87,2, p<0,001, R \text{ squared}= 0,52$, Thoraxabdomen: $F(1,1491)= 1551, p<0,001, R \text{ squared}= 0,51$).

Anschließend wurde das DFP mit folgenden Formeln berechnet:

- Röntgen-Thorax: $Y= 10^{(1,008 \cdot \log_{10}(X) - 4,158)}$
- Röntgen-Abdomen: $Y= 10^{(1,201 \cdot \log_{10}(X) - 4,673)}$
- Röntgen-Thoraxabdomen: $Y= 10^{(0,861 \cdot \log_{10}(X) - 3,542)}$

Diese errechneten Werte wurden ausschließlich verwendet, um die kumulative Dosis eines/r Patient*in für den stationären Aufenthalt zu berechnen. Bei allen anderen statistischen Operationen des DFP wurden nur die 3067 tatsächlich vorhandenen Werte berücksichtigt, welche als große Grundgesamtheit statistisch aussagekräftig waren. Das DFP wurde in $\text{mGy} \cdot \text{cm}^2$ für die einzelnen Arten von Aufnahmen, sowie in Relation zum Geburtsgewicht/ Gewicht am Tag der Röntgenuntersuchung angegeben. Bei graphischen Darstellungen wurde die Einheit $\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2$ verwendet. Variationen in der Feldgröße können zu Unsicherheit bezüglich des DFP führen^{21,22}. Werte des DFP wurden im

Anschluss mit Referenzwerten des Bundesamtes für Strahlenschutz²³ und der Literatur^{21,16,24-26} verglichen.

Da unterschiedliche Gewebe unterschiedliche Sensitivität gegenüber ionisierender Strahlung, in diesem Falle Röntgenstrahlung, besitzen, ist zudem die Effektive Dosis (ED) von Bedeutung. Sie beinhaltet spezifische Gewichtungsfaktoren für einzelne Gewebe und Organe. Die ED kann zur Risikoeinschätzung der Röntgenaufnahmen beitragen.

Der Begriff der ED wurde erstmals im Jahr 1990 im ICRP Bericht Nr.60¹⁹ vorgestellt. Obwohl das Konzept kontrovers diskutiert wird²⁷, kommt es immer wieder zum Einsatz – auch in der pädiatrischen Radiologie^{22,28-34,21,18,16,4,35,17,36}. Nun ist aber zu berücksichtigen, dass die ED kein exakt, mathematisch berechenbarer Wert ist. Auch ist sie keine absolute Größe, welche sich an dem*der Patient*in messen lässt. Die ED ist eine Schätzgröße. So kommt es, dass es viele verschiedene Methoden gibt, die ED zu bestimmen. Sie kann mit Monte Carlo Simulationen, Messungen von Organdosen direkt am Phantom, Rosensteintabellen³⁷ oder dem Monte Carlo basierten Computerprogramm PCXMC 2.0 (Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) Finland)³⁸ ermittelt werden. Alle Methoden führen zu Konversionskoeffizienten, mit denen man aus den Eingangsgrößen DFP, Eintrittsdosis (ESD) oder Air Kerma (K_{ai}) die ED berechnen kann.

Die Rosensteintabellen aus dem Jahr 1979 wurden von Robinson und Dellagrammaticas (1983)³⁹, von Faulkner et al. (1989)⁴⁰ und Wilson-Costello et al. (1996)³⁵ verwendet.

Konversionsfaktoren basierend auf dem National Radiological Protection Board (NRPB) R279⁴¹ und NRPB SR279⁴² fanden sich in der Arbeit von Le Heron et al.⁴³ und seinem später entwickelten Computerprogramm Child Dose⁴⁴ wieder. NRPB R279⁴¹, NRPB SR279⁴² und die Arbeiten von Le Heron et al.^{44,43} berücksichtigen dabei die im ICRP Nr. 60 (1990) vorgestellten Organdosen¹⁹. Makri et al.²⁸, Brindhavan et al.³⁴, Jones et al.²¹, Puch-Kapst et al.¹⁸ und

Armpilia et al.¹⁶ verwendeten diese Konversionskoeffizienten.

Für die Anwendung der Konversionskoeffizienten wurden folgende Eingangsgrößen genutzt^{42,43,41} :

- Röntgenfilter (mmAl, mmCu)
- Aufnahmespannung (kV)
- DFP (mGy*cm²) oder ESD (mGy)
- Art der Aufnahme (anterior-posterior (AP) Thorax/ Abdomen, posterior-anterior (PA) Thorax/ Abdomen).

Eine andere Methode beschreibt die Messung von Organdosen direkt am Phantom, welches in Größe, Gewicht und Gewebeverteilung dem Körper eines Früh- oder Neugeborenen ähneln soll. Ono et al.⁴ und Smans et al.³⁰ benutzten ein Phantom aus dem Material Voxel, Jones et al.²¹ acht Lagen Perspex.

Das Computerprogramm PCXMC 2.0 (STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority) Finland)³⁸ basiert ebenfalls auf Monte Carlo Kalkulationen. Es berechnet am mathematischen Modell für unterschiedliche morphologische Patientenfaktoren (Gewicht und Größe) die Organdosis und die ED für Patient*innen⁴⁵. Unter Verwendung der Gewebegewichtungsfaktoren aus dem ICRP Nr.103⁴⁶ und ICRP Nr.60¹⁹, kann die ED für 29 Organe und Gewebe abgeschätzt werden⁴⁵. Die Dosiskalkulationssoftware fand in mehreren Arbeiten der pädiatrischen Radiologie Einzug. Elbakri et al.²², Karambatsakidou et al.³², Schmidt et al.³³, Smans et al.³⁰ und Donadieu et al.³⁶ verwendeten PCXMC 2.0.

Die Ermittlung der ED mittels PCXMC 2.0 kann sehr zeitaufwändig sein²². 2014 entwickelte Elbakri et al.²² mit Konversionskoeffizienten anwendbar auf das DFP eine einfache und doch relativ akkurate Methode für die neonatale Radiologie, die ED und das Risiko einer Röntgenuntersuchung zu bestimmen²². Für sieben mathematische Modelle mit einem Gewicht zwischen 500g und 6000g, wurden in Abhängigkeit von Aufnahmespannung (kV), Aufnahmeart AP Thorax/ Abdomen, Röntgenfilter (3 mmAl/ 3 mmAl+0,1 mmCu)

Konversionskoeffizienten ($\mu\text{Sv}/\text{mGy}\cdot\text{cm}^2$) ermittelt²². Wir verwendeten seine Tabellen.

Table 3. CFs ($\mu\text{Sv}/\text{mGy cm}^2$) for chest AP with 3.0 mm Al+0.1 mm Cu filtration.

kV kg	50	55	60	65	70	75	80	Average \pm SD
0.5	10.95	11.34	11.63	11.84	12.00	12.14	12.26	11.74 \pm 0.47
1.0	5.62	5.84	6.01	6.14	6.25	6.34	6.42	6.09 \pm 0.28
2.0	3.80	3.97	4.11	4.22	4.31	4.40	4.47	4.18 \pm 0.24
3.0	2.78	2.91	3.02	3.10	3.18	3.24	3.30	3.07 \pm 0.19
4.0	2.01	2.12	2.21	2.28	2.34	2.40	2.45	2.26 \pm 0.16
5.0	1.77	1.87	1.95	2.01	2.07	2.12	2.17	1.99 \pm 0.14
6.0	1.64	1.75	1.84	1.92	1.98	2.04	2.09	1.90 \pm 0.16

Abbildung 1: Konversionskoeffizienten für AP Thorax mit 3mmAl +0,1mmCu Filter

Quelle: Elbakri et al.²²

Table 5. CFs ($\mu\text{Sv}/\text{mGy cm}^2$) for abdomen AP with 3.0 mm Al+ 0.1 mm Cu filtration.

kV kg	50	55	60	65	70	75	80	Average \pm SD
0.5	8.59	8.96	9.26	9.50	9.69	9.85	9.99	9.41 \pm 0.50
1.0	4.89	5.14	5.35	5.52	5.66	5.78	5.89	5.46 \pm 0.36
2.0	2.96	3.15	3.31	3.44	3.55	3.65	3.73	3.40 \pm 0.28
3.0	2.11	2.27	2.39	2.50	2.59	2.67	2.75	2.47 \pm 0.23
4.0	1.71	1.85	1.97	2.06	2.15	2.22	2.29	2.03 \pm 0.21
5.0	1.54	1.67	1.79	1.88	1.97	2.05	2.11	1.86 \pm 0.21
6.0	1.30	1.42	1.51	1.60	1.67	1.73	1.79	1.57 \pm 0.18

Abbildung 2: Konversionskoeffizienten für AP Abdomen mit 3mmAl +0,1mmCu Filter

Quelle: Elbakri et al.²²

Elbakri et al.²² gab die Aufnahmespannung in 5er-Schritten an, sodass dazwischenliegende Werte der Aufnahmespannung mittels linearer Interpolation ergänzt werden konnten. Konversionskoeffizienten für Aufnahmespannungen >80 kV wurden mit einem Polynom 3. Grades errechnet. Für jede Aufnahmespannung wurde anschließend eine Potenzfunktion angenähert, auf der die Konversionskoeffizienten eines jeden Gewichtes lagen – diese sind im Folgenden exemplarisch dargestellt.

Potenzfunktion entsprechend der jeweiligen Aufnahmespannung für AP-Thorax-Aufnahmen mit einem Filter von 3 mmAl+0,1 mmCu für die Berechnung der Konversionskoeffizienten:

- 70 kV: $y = 6,8625x^{-0,728}$
- 73 kV: $y = 6,9251x^{-0,724}$
- 75 kV: $y = 6,9668x^{-0,722}$
- 77 kV: $y = 7,003x^{-0,719}$
- 79 kV: $y = 7,0391x^{-0,717}$
- 81 kV: $y = 7,0737x^{-0,714}$
- 85 kV: $y = 7,1549x^{-0,709}$
- 90 kV: $y = 7,2735x^{-0,704}$

Potenzfunktion entsprechend der jeweiligen Aufnahmespannung für AP-Abdomen-Aufnahmen mit einem Filter von 3mmAl +0,1mmCu für die Berechnung der Konversionskoeffizienten:

- 73 kV: $y = 5,8704x^{-0,694}$
- 75 kV: $y = 5,9213x^{-0,691}$
- 77 kV: $y = 5,9665x^{-0,688}$
- 79 kV: $y = 6,0117x^{-0,685}$
- 81 kV: $y = 6,057x^{-0,681}$
- 85 kV: $y = 6,1451x^{-0,676}$
- 88 kV: $y = 6,2132x^{-0,672}$
- 90 kV: $y = 6,2606x^{-0,669}$

Da es keine Tabellen für die kombinierte Aufnahme von Thorax und Abdomen gab, wurde das DFP der Thoraxabdomenaufnahmen für das jeweilige Körpergewicht mit den gemittelten Koeffizienten für Thorax- und Abdomenaufnahmen multipliziert.

Als Röntgenfilter wurden 4,4 mmAl +0,1 mmCu verwendet, dies entspricht am ehesten den Tabellen 3 und 5 von Elbakri et al²².

Fehlende Werte der Aufnahmespannung wurden entsprechend dem Gewicht am Tag der Röntgenuntersuchung mittels hauseigener Tabellen ergänzt, sodass auch für diese Bilder Konversionskoeffizienten für das DFP zur Verfügung standen. So konnte für jedes Früh- oder Neugeborene die kumulative ED für den gesamten Aufenthalt bestimmt werden.

3.5 Risikoabschätzung

Im ICRP Bericht Nr. 60¹⁹ finden sich Faktoren zur Risikoabschätzung von 2,8 bis $13 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, bei denen das durch Strahlung induzierte Risiko für Krebs – vor allem für Leukämien, aber auch andere Krebsarten in der ersten Lebensdekade steigt¹⁹. Diese Werte basieren maßgeblich auf Daten, welche nach diagnostischen Röntgenaufnahmen bei Schwangeren ausgewertet wurden, unterscheiden sich aber nicht sehr von denjenigen Risikowerten, die von japanischen Kernwaffen-Überlebenden errechnet werden konnten¹⁹. Diese Studie befasst sich mit der Auswertung von Röntgenaufnahmen von Neugeborenen, die größtenteils vor der vollendeten 37ten Woche geboren wurden, und somit ungefähr das gleiche Risikoprofil besitzen, wie diejenigen, die noch in utero Röntgenstrahlen ausgesetzt werden. Für die Arbeit orientieren wir uns am oberen Wert von $13 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. Das heißt: pro erhaltener ED von einem Sievert, erhöht sich das Risiko Krebs zu entwickeln um 0,13. Sowohl die Werte der ED, der kumulativen ED und der Risikoeinschätzung sind – wie später diskutiert – Schätzwerte und werden deshalb nicht nur in absoluten Zahlen angegeben, sondern gruppiert nach Risikostufen (siehe Abbildung 3).

E dose range (mSv)	Level of risk ^a	Proposed risk term	Examples of medical exposures
<0.1	1 in 1 million	Negligible	Radiographs of chest, limbs, head, neck and teeth
0.1–1	1 in 100 000	Minimal	Radiographs of spine, abdomen and pelvis
1–10	1 in 10 000	Very low	Barium meals and enemas, CT scans of head, chest and abdomen, nuclear medicine bone scans
10–100	1 in 1000	Low	Double CT scans for contrast enhancement, higher dose interventional radiology procedures

^aThe excess lifetime risk of fatal cancer to a reference adult patient resulting from radiation exposures in the dose ranges could be a factor of up to 10 higher or lower than values quoted.

Abbildung 3: Terminologie zur Risikobeschreibung nach diagnostischer Strahlenexposition

Quelle: Martin et al.²⁷

Der ICRP entwickelt Leitlinien und Empfehlungen, um das Risiko nach ionisierenden Strahlen zu minimieren. Die maximale Dosis, die ein Individuum innerhalb eines Jahres im öffentlichen Raum erhalten darf, sind 20 mSv pro Jahr, für eine Schwangere beträgt die Dosis 1mSv für die neun austragenden Monate¹⁹. Abweichungen werden hierbei gemacht für Schwangere, welche einer beruflichen Strahlenexposition ausgesetzt sind, hier beträgt die maximale Dosis innerhalb von neun Monaten fünf Mal so viel, also 5 mSv¹⁹. Da alle in der Studie untersuchten Patient*innen deutlich unter diesen Referenzwerten lagen,

ist eine nähere Betrachtung und ein Vergleich mit diesen Werten hinfällig (siehe Tabelle 29).

4. Statistische Analyse

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit den Computerprogrammen Microsoft Excel®, GraphPad Prism 9.0.0® und BiAS®.

Diesbezüglich wurden die zunächst in Microsoft Excel® eingegebenen Primärdaten in kleinere Tabellen formatiert und von dort direkt in GraphPad Prism 9.0.0® und BiAS® importiert.

Die deskriptiv beschriebenen Ergebnisse wurden prozentual und in absoluten Häufigkeiten mit Median±SD (Standardabweichung) und Mittelwert ± SD angegeben.

Die Homogenität des Datenkollektivs wurde mit dem D'Agostino-Pearson Omnibus Normality Test geprüft ($p < .05$). Zur Beurteilung von mehreren nicht-normalverteilten Datensätzen kam der Kruskal-Wallis-Test zum Einsatz. Unterschiede zweier nicht-normalverteilten Datensätze wurden im Anschluss mit dem Dunn's Test untersucht.

Ein Unterschied von Größen wurde bei einem Wert von $p < 0,05$ als statistisch signifikant gewertet⁴⁷. Um die Größe dieses Unterschiedes zu evaluieren wurde das Konfidenzintervall (CI) betrachtet und bei allen Tests auf 95% gesetzt. Das Signifikanzniveau wurde graphisch im American Psychological Association (APA)-Style (APA: .12(ns), .033(*), .002 (**), <.001(***)) visualisiert.

Die Veranschaulichung der Daten in graphischer Form wurde mit Microsoft Word® und GraphPad Prism 9.0.0® ermöglicht. Miteinander korrelierende quantitative Merkmale ließen sich mit einer Punktwolke als Wertepaar abbilden⁴⁷. Lineare Zusammenhänge wurden anschließend mit dem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten r quantifiziert, wobei ein positiver Wert einen gleichsinnigen und ein negativer Wert einen inversen Zusammenhang beschrieb⁴⁷. Die graphische Darstellung der Verteilung von Stichproben wurde mit dem Box- und Whisker Plot realisiert, in welchem abwechselnd Lagemaße (Mittelwert, Median, Quartile, Maxima und Minima) und Streumaße (Spannweite und Quartilsabstand) zur Geltung kamen⁴⁷.

In beratender Funktion für die Auswahl und das Durchführen der richtigen Tests, sowie des Lösens von statistischen Problemen fungierte das Institut für Biostatistik und Mathematische Modellierung des Universitätsklinikums Frankfurt.

5. Ergebnisse

5.1 Patient*innen

5.1.1 Geburtsgewicht und Gestationsalter

Die 1307 Patienten und Patientinnen hatten ein mittleres Geburtsgewicht von 2350g±1083 g (Spannweite: 320 g bis 5380 g). Da für einige Tabellen relevant, wurden die Patient*innen in fünf Gewichtsklassen eingeteilt und mit den Gruppen 1-5 betitelt:

- **Gruppe 1:** <500 g
- **Gruppe 2:** ELBW (extremely low birth weight): ≥500 g bis <1000 g
- **Gruppe 3:** VLBW (very low birth weight): ≥1000 g bis <1500 g
- **Gruppe 4:** LBW (low birth weight): ≥1500 g bis <2500 g
- **Gruppe 5:** NBW (normal birth weight): ≥2500 g

Tabelle 1: Geburtsgewicht in g

Geburtsgewicht in g (n=1307), Mittelwert (±SD)/ Min. bis Max.	2350 (±1083) / 320 bis 5380
Anzahl der Patient*innen (n=1307), n (%)	
<500g	17 (1,3)
≥500g bis <1000g	175 (13,4)
≥1000g bis <1500g	197 (15,1)
≥1500g bis <2500g	301 (23)
≥2500g	617 (47,2)

Das mittlere Gestationsalter lag bei 241,1±35,45 Tagen, dies entspricht 34+3 (±5,5) SSW (Spannweite: 22+6 SSW bis 42+3 SSW). Auch das Gestationsalter unterteilten wir in verschiedene Gruppen und betitelten diese mit Gruppe 1-5:

- **Gruppe 1:** 20 - 23+6 SSW
- **Gruppe 2:** 24 - 31+6 SSW
- **Gruppe 3:** 32 - 36+6 SSW
- **Gruppe 4:** 37 - 41+6 SSW
- **Gruppe 5:** >42 +0 SSW

Tabelle 2: Gestationsalter in SSW

Gestationsalter in SSW [Tagen] (n=1307), Mittelwert (\pmSD)	34+3 (\pm 5,5) [241,1 (\pm 35,45)]
Anzahl der Patient*innen (n=1307), n (%)	
20 - 23+6 SSW	13 (1)
24 - 31+6 SSW	421 (32,2)
32 - 36+6 SSW	341 (26,1)
37 - 41+6 SSW	524 (40,1)
>42 + 0 SSW	8 (0,6)

5.1.2 Geburtsgröße

Die Patient*innen waren im Mittel zum Zeitpunkt ihrer Geburt 45 (\pm 7,4) cm (Spannweite 23 bis 62cm) groß.

Tabelle 3: Geburtsgröße in cm

Geburtsgröße in cm (n=1302), Mittelwert \pm SD/ Min. bis Max.	45 (\pm 7,4) / 23 bis 62
Geburtsgröße in cm pro Gewichtsklasse (n=1302), Mittelwert (\pmSD)	
<500g	29,1 (\pm 5,1)
\geq500g bis <1000g	33,6 (\pm 3,9)
\geq1000g bis <1500g	38,6 (\pm 3,0)
\geq1500g bis <2500g	44,2 (\pm 3,1)
\geq2500g	51,5 (\pm 3,1)

5.1.3 Aufenthaltsdauer

Alle Kinder wurden im Zeitraum vom 01.01.2013 bis 31.12.2018 behandelt und geröntgt. Es wurden nur diejenigen Kinder berücksichtigt, die mindestens eine Röntgenaufnahme erhalten haben. Diese Kinder befanden sich im Mittel 30,38 Tage (Median: 16, Spannweite: 1 Tag bis 255 Tage) im stationären Aufenthalt.

1270 Patient*innen hielten sich ausschließlich im Uniklinikum Frankfurt auf, während sich 36 Patient*innen zwischenzeitlich in anderen Kliniken befanden, oder anschließend in andere Kliniken verlegt wurden.

Die Aufenthaltsdauer wurde in Zusammenhang mit dem Geburtsgewicht sowie dem Gestationsalter gesetzt.

Tabelle 4: Aufenthaltsdauer in Tagen

Korrelation nach Spearman (Geburtsgewicht vs. Aufenthaltsdauer): $r=-0,68$, $p<.001$, $n=1307$

Korrelation nach Spearman (Gestationsalter vs. Aufenthaltsdauer): $r=-0,67$, $p<.001$, $n=1307$

	Aufenthaltsdauer in Tagen, Median (Spannweite)
Geburtsgewicht in g	
<500 g	129 (195)
≥500 g bis <1000 g	78 (255)
≥1000 g bis <1500 g	54 (166)
≥1500 g bis <2500 g	24 (194)
≥2500 g	8 (96)
Gestationsalter in SSW	
20 - 23+6 SSW	136 (255)
24 - 31+6 SSW	55 (199)
32 - 36+6 SSW	18 (194)
37 - 41+6 SSW	8 (96)
>42 + 0 SSW	5 (8)

Sowohl das Geburtsgewicht in g, als auch die SSW in Tagen korrelierten signifikant ($p<.001$) gegensinnig mit der Aufenthaltsdauer in Tagen. Je unreifer und je kleiner die Patient*innen geboren waren, desto länger befanden sie sich im stationären Aufenthalt (siehe Abbildung 4).

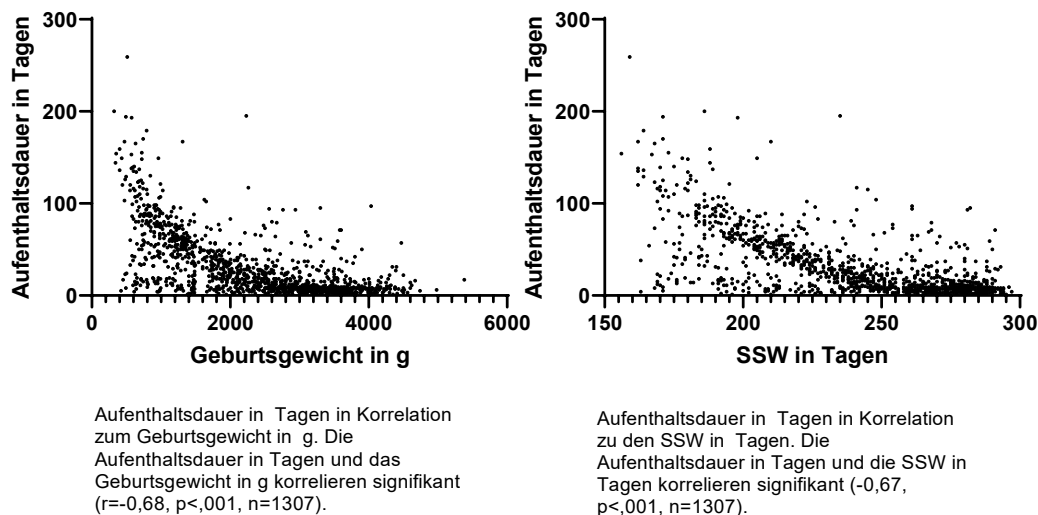


Abbildung 4: Aufenthaltsdauer in Tagen bezogen auf das Geburtsgewicht in g und die SSW in Tagen

5.1.4 Anzahl verstorbener Patient*innen innerhalb der ersten zwei Lebenswochen

32 Kinder verstarben nach weniger als 14 Tagen und wurden gemäß der Ausschlusskriterien für die Analyse der Daten nicht berücksichtigt. Diese Kinder erhielten in Summe 126 der erfolgten Röntgenaufnahmen. Diese hohe Summe ergibt sich am ehesten aus den schweren Krankheitsverläufen.

5.1.5 Dauer der invasiven und noninvasiven Beatmung

494 der Patient*innen wurden mindestens einen Tag beatmet. Dabei befand sich in den Gruppen „<500 g“ und „≥500 g bis <1000 g“ ein(e) Patient*in und in der Gruppe „≥2500 g“ zwei Patient*innen, deren Dokumentation über eine etwaige Beatmung uneindeutig war. Diese Patient*innen wurden in der deskriptiven statistischen Auswertung außer Acht gelassen und als „nicht beatmet“ eingeordnet. Dabei waren die Kinder im Mittel 9,4 (± 16) Tage intubiert. Die längste Intubationszeit betrug 111 Tage.

Tabelle 5: Dauer der invasiven Beatmung

Korrelation nach Spearman (Geburtsgewicht vs. Dauer): $r=-0,38$, $p<.001$, $n=494$

Dauer der invasiven Beatmung in Tagen (n=494), Mittelwert (±SD)	9,4 (±16)
invasiv beatmete Patient*innen, n (%)	494 (37,8)
Dauer der invasiven Beatmung pro Gewichtsklasse für alle tatsächlich beatmeten Patient*innen, Mittelwert (±SD)	
<500 g	41,8 (±50,0)
≥500 g bis <1000 g	13,8 (±14,0)
≥1000 g bis <1500 g	7,1 (±12,8)
≥1500 g bis <2500 g	4,5 (±6,0)
≥2500 g	6,5 (±11,7)

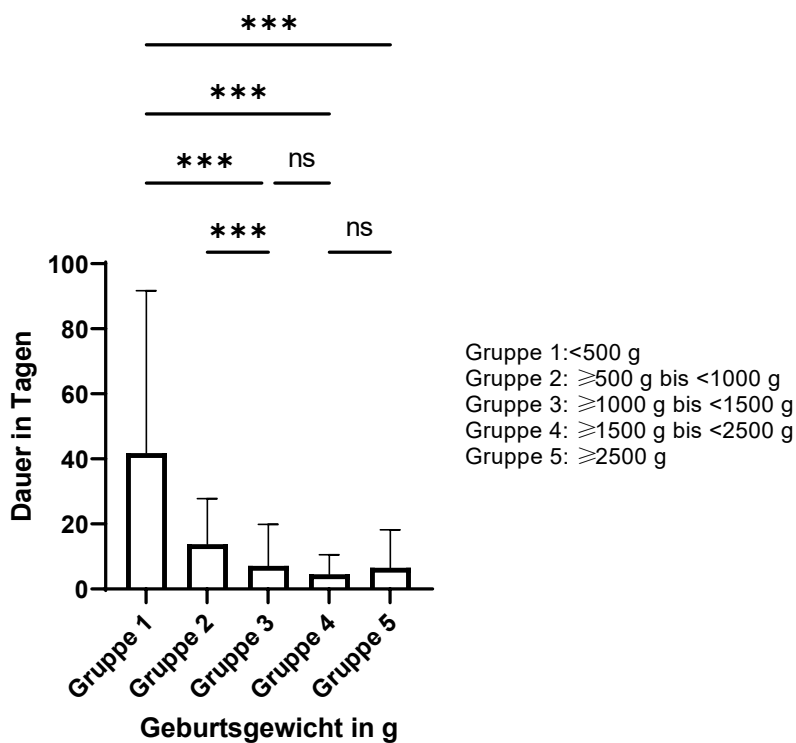


Abbildung 5: Dauer der invasiven Beatmung in Tagen bezogen auf das Geburtsgewicht, Mittelwert und Standardabweichung

677 der Patient*innen wurden mindestens einen Tag noninvasiv beatmet. Dabei wurden die Kinder im Mittel 9 ($\pm 13,8$) Tage noninvasiv beatmet. Die längste noninvasive Beatmungszeit betrug 117 Tage.

Table 6: Dauer der noninvasiven Beatmung

Korrelation nach Spearman (Geburtsgewicht vs. Dauer): $r=-0,68$, $p<.001$, $n=677$

Dauer der noninvasiven Beatmung in Tagen ($n=677$), Mittelwert ($\pm SD$)	9 ($\pm 13,8$)
noninvasiv beatmete Patient*innen, n(%)	677 (51,8)
Dauer der noninvasiven Beatmung pro Gewichtsklasse für alle tatsächlich beatmeten Patient*innen, Mittelwert$\pm SD$	
<500 g	35,1 \pm 22,0
≥ 500 g bis <1000 g	23,0 \pm 19,0
≥ 1000 g bis <1500 g	6,7 \pm 6,5
≥ 1500 g bis <2500 g	2,3 \pm 2,1
≥ 2500 g	2,4 \pm 3,1

5.1.6 Klinische Aspekte

Ein Atemnotsyndrom (ANS) wurde insgesamt bei 74,2 % aller Patient*innen diagnostiziert. Es wurde in 25,5% (n=247) der Fälle zumindest einmal mit Surfactant behandelt. Während Kinder mit einem Geburtsgewicht von <500 g in 88,2% der Fälle ein ANS aufwiesen, fiel diese Diagnose prozentual stetig ab. Verdeutlicht wird dies in Tabelle 7 und Abbildung 6.

Tabelle 7: ANS

ANS (n=1307), n (%)	968 (74,2)
Anzahl der ANS-Patient*innen pro Gewichtsklasse, n(%)	
<500 g	15 (88,2)
≥500 g bis <1000 g	166 (94,9)
≥1000 g bis <1500 g	181 (91,9)
≥1500 g bis <2500 g	239 (79,4)
≥2500 g	367 (59,5)

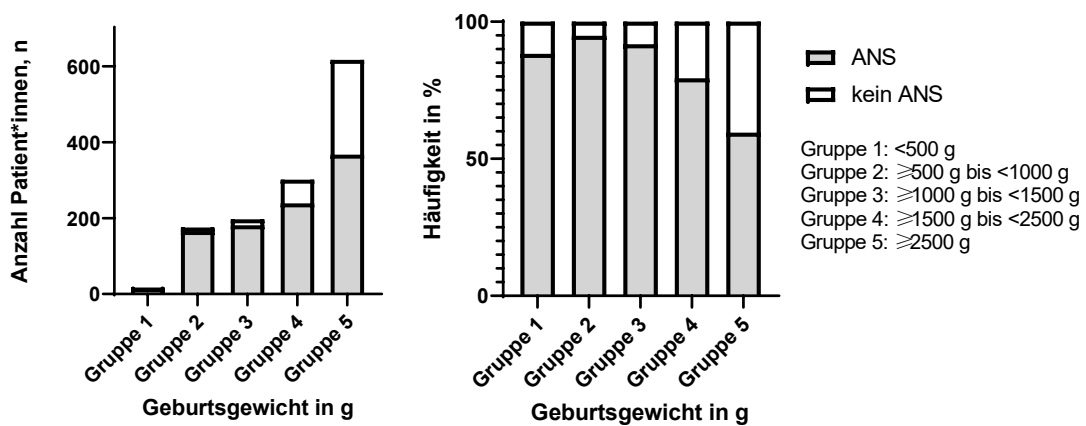


Abbildung 6: ANS bezogen auf das Geburtsgewicht in g

Eine ähnliche Verteilung spiegelte sich bei Patient*innen wieder, die eine BPD entwickelten. Von insgesamt 93 Kindern, waren dies 70,6% aller Patient*innen mit einem Gewicht von <500 g und bloß 0,5% der Patient*innen, welche 2500 g wogen.

Tabelle 8: BPD

BPD (n=1307), n (%)	93 (7,1)
Anzahl der BPD-Patient*innen pro Gewichtsklasse, n (%)	
<500g	12 (70,6)
≥500g bis <1000g	68 (38,9)
≥1000g bis <1500g	8 (4,1)
≥1500g bis <2500g	2 (0,7)
≥2500g	3 (0,5)

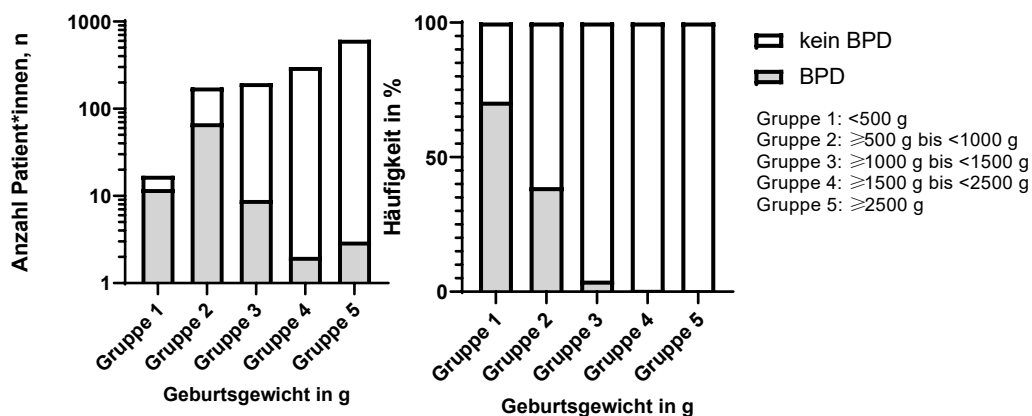


Abbildung 7: BPD bezogen auf das Geburtsgewicht in g

Eine NEC wurde in 3,2% (n=42) der Fälle diagnostiziert. Bei insgesamt 97 Patient*innen, also bei 7,4% bestand eine typische Symptomatik, die zu einer Diagnostik geführt hatte, ohne dass eine NEC bestätigt wurde. Das Auftreten einer NEC zeigte einen klaren Zusammenhang mit dem Geburtsgewicht. Von den 17 Patient*innen in der Kategorie <500 g entwickelten 29,4% eine NEC, es folgte ein klarer Abwärtstrend der Diagnose bei steigendem Geburtsgewicht. So bekamen Patient*innen der Gewichtsklasse ≥ 500 g bis <1000 g in 13,7% der Fälle eine NEC, bei Kindern zwischen ≥ 1500 g bis <2500 g waren es lediglich 2,3% der Kinder und bei einem Geburtsgewicht von ≥ 2500 g entwickelte keine*r der Patient*innen eine NEC.

Tabelle 9: NEC

NEC (n=1307), n (%)	42 (3,2)
Anzahl der NEC-Patient*innen pro Gewichtsklasse, n (%)	
<500g	5 (29,4)
≥ 500g bis <1000g	24 (13,7)
≥ 1000g bis <1500g	6 (3,1)
≥ 1500g bis <2500g	7 (2,3)
≥ 2500g	0

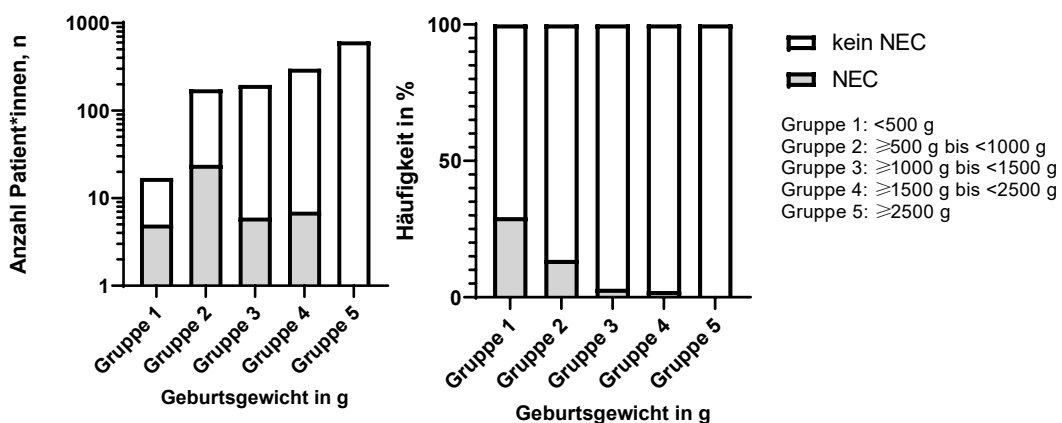


Abbildung 8: NEC bezogen auf das Geburtsgewicht in g

Bei 39,5% der Patient*innen wurde ein zentraler Katheter gelegt [Zentraler Venenkatheter (ZVK), Nabelvenenkatheter (NVK), Nabelarterienkatheter (NAK), Braunülenkatheter].

Tabelle 10: Katheteranlage

Katheteranlage (n=1307), n (%)	517 (39,5)
Katheteranlage pro Gewichtsklasse, n (%)	
<500g	15 (88,2)
≥500g bis <1000g	149 (85,1)
≥1000g bis <1500g	125 (63,5)
≥1500g bis <2500g	79 (26,2)
≥2500g	149 (24,1)

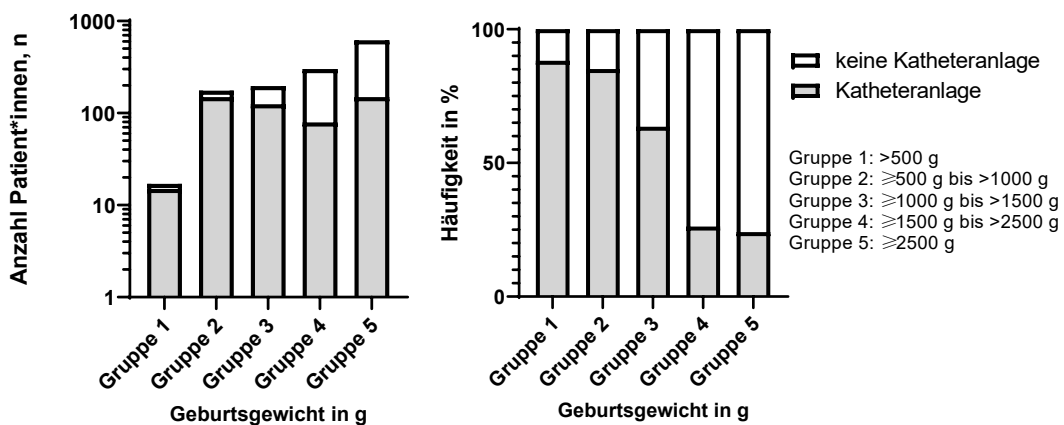


Abbildung 9: Katheteranlage bezogen auf das Geburtsgewicht in g

5.2 Röntgenaufnahmen

5.2.1 Zeitlicher Aspekt

Insgesamt wurden im Zeitraum vom 01.01.2013 bis zum 31.12.2018 4167 Röntgenaufnahmen erstellt, die in dieser Arbeit analysiert wurden. Es wurden zwischen 664 und 723 Aufnahmen pro Jahr gefertigt.

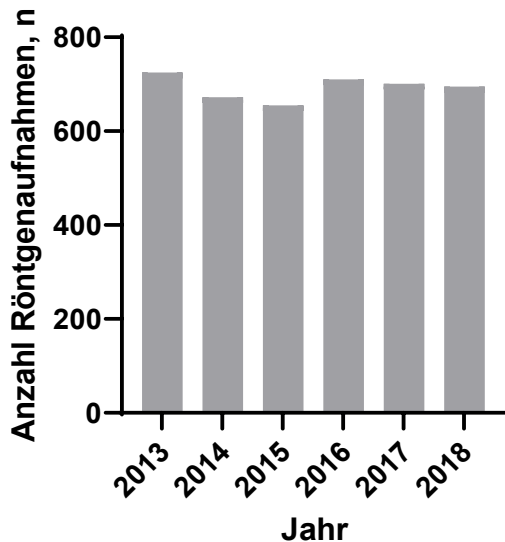


Abbildung 10: Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Jahr

Von insgesamt 3843 stationär behandelten Patient*innen erhielten mindestens 1307 eine Röntgenaufnahme, dies entspricht 34%. An dieser Stelle auffällig, ist die zunehmende Zahl an stationär behandelten Kindern, bei gleichbleibender Anzahl an pro Jahr erstellten Röntgenaufnahmen. 2018 wurden 180 Kinder mehr als im Jahr 2013 behandelt, und dennoch war es möglich, 2018 die Röntgenaufnahmen um 55 gegenüber 2013 zu senken. So sank die Zahl der im Mittel pro Kind angefertigten Röntgenaufnahmen kontinuierlich ab, bis sie zuletzt bei 0,9 Aufnahmen pro Patient*in und Aufenthalt lag. Ein Mann-Whitney-U-Test wurde berechnet, dieser zeigte, dass sich die mittlere Anzahl an Röntgenaufnahmen pro Patient*in in den Jahren 2013 bis 2018 signifikant unterschied. Graphisch dargestellt ist dieser Sachverhalt in Abbildung 11.

Tabelle 11: Röntgenparameter von 4167 Röntgenaufnahmen, die im Zeitraum von sechs Jahren gemacht wurden – Zeitliche Aspekte

Mann-Whitney-U-Test (Röntgenaufnahmen pro Patient*in): N=2,4423, p<.014595

Jahr	Anzahl an Röntgenaufnahmen, n	Anzahl der Patient*innen, die sich in stationärer Behandlung befanden	Röntgenaufnahmen pro Patient*in, Mittelwert
2013	723	561	1,29
2014	671	578	1,16
2015	664	625	1,06
2016	709	664	1,07
2017	701	674	1,04
2018	668	741	0,9

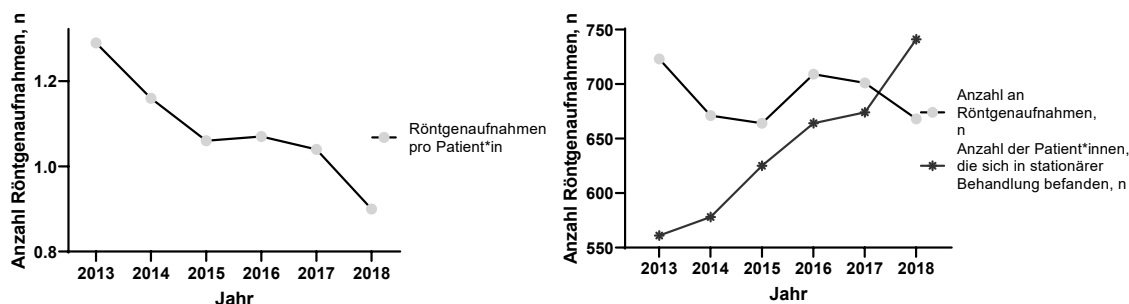


Abbildung 11: Anzahl der Röntgenaufnahmen im zeitlichen Verlauf

Auf den Zusammenhang zwischen den einzelnen Röntgenaufnahmen in den Gruppen „Geburtsgewicht in g“ und den Verlauf der Jahre wurde in Tabelle 13 im Detail eingegangen. Beobachtet werden kann eine Kontinuität der Anzahl Patient*innen.

Abbildung 12 visualisiert die im Durchschnitt in dem jeweiligen Jahr erstellten Röntgenaufnahmen bei einem Kind mit einem entsprechenden Geburtsgewicht. Die stärkste Diskontinuität verzeichnete sich dabei in Gruppe 1 (<500 g). Gruppe 2 (≥500 g bis <1000 g) und Gruppe 3 (≥1000 g bis <1500 g) zeigen

beide eine absinkende Anzahl an Röntgenaufnahmen, während sich die Aufnahmen bei Kindern mit einem höheren Geburtsgewicht in Gruppe 4 und Gruppe 5 auf einem gleichbleibenden Niveau halten.

Tabelle 12: Anzahl der Patient*innen pro Jahr bezogen auf das Geburtsgewicht

Anzahl der Patient*innen, n						
Geburtsgewicht	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<500 g	3	1	2	3	6	2
≥500 g bis <1000 g	33	25	29	26	32	30
≥1000 g bis <1500 g	22	33	34	34	36	36
≥1500 g bis <2500 g	34	50	57	45	55	57
≥2500 g	116	104	75	105	111	100
gesamt	208	213	197	213	240	225

Tabelle 13: Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Jahr bezogen auf das Geburtsgewicht

Anzahl der Aufnahmen, n						
Geburtsgewicht	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<500 g	33	1	34	68	88	11
≥500 g bis <1000 g	265	210	252	181	161	163
≥1000 g bis <1500 g	97	121	127	96	116	120
≥1500 g bis <2500 g	91	124	125	91	117	147
≥2500 g	237	216	126	273	219	227
gesamt	723	672	664	709	701	668

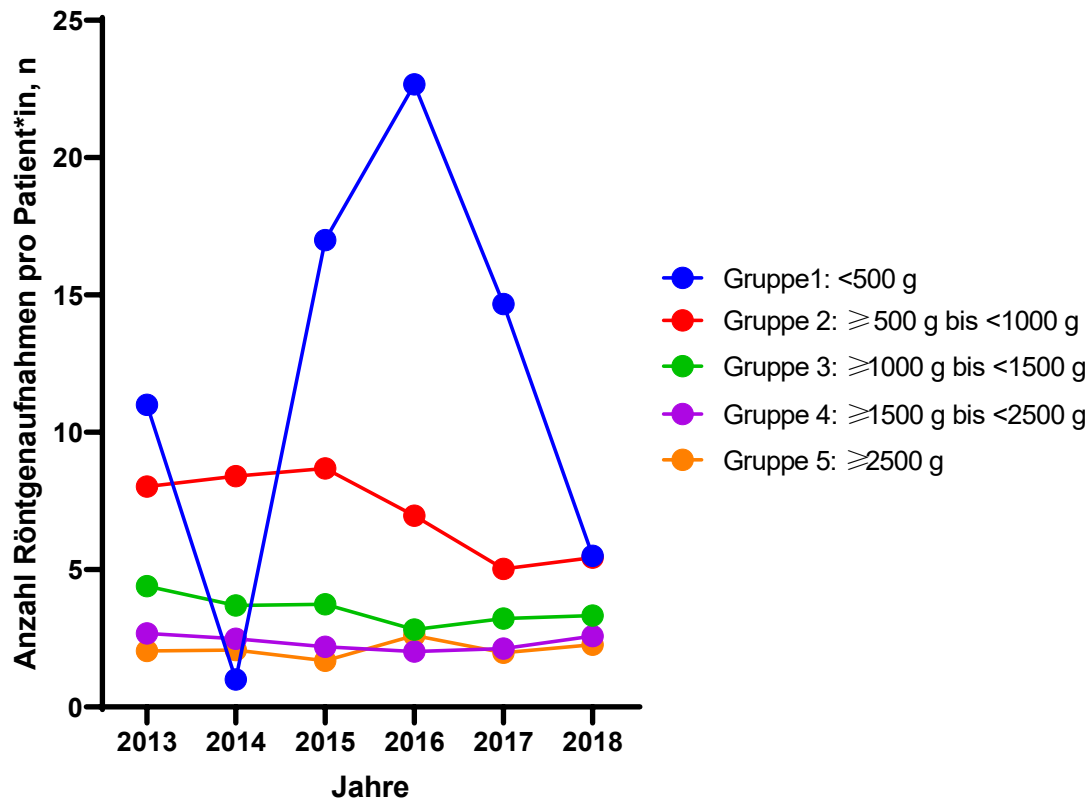


Abbildung 12: Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Patient*in pro Jahr in den jeweiligen Gewichtsgruppen

5.2.2 Frequenz der Röntgenaufnahmen

Die mittlere Anzahl an Röntgenaufnahmen pro Patient*in betrug 3,19 Aufnahmen (Spannweite: 1 bis 38).

Der Patient mit den meisten Röntgenaufnahmen erhielt 38 Aufnahmen, wog 490g und wurde in der 24+3 Woche geboren. Er hatte eine Komorbidität mit 21 Diagnosen, wie zum Beispiel ein ANS, eine BPD, einen PDA, eine Herzinsuffizienz und eine Neugeboreneninfektion. Er befand sich 194 Tage in stationärer Betreuung.

Die mittlere Anzahl an Röntgenaufnahmen nahm mit steigendem Geburtsgewicht und Gestationsalter ab, wie in Tabelle 14 und 15 dargestellt. Graphisch im Scatterplot dargestellt, verzeichnete sich eine Punktwolke von mit steigendem Geburtsgewicht abnehmenden Röntgenaufnahmen (siehe Abbildung 13 und 14).

Tabelle 14: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Gestationsalter

Korrelation nach Spearman (Gestationsalter vs. Anzahl Röntgenaufnahmen):

$r=-0,42$, $p<.001$, $n=1307$

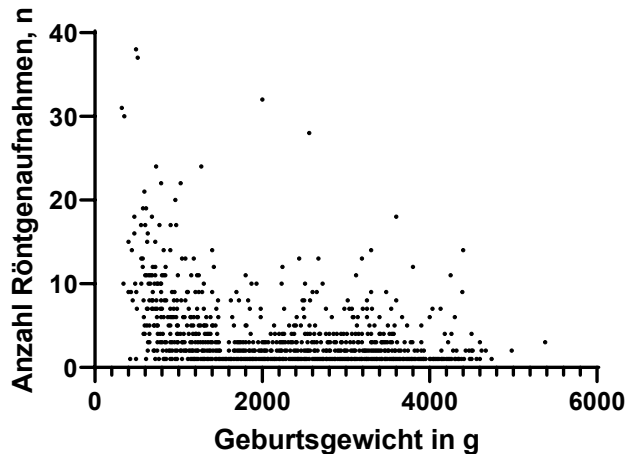
Gestationsalter in SSW	Anzahl der Röntgenaufnahmen (n=4167), n (%)	Anzahl der Röntgenaufnahme pro Patient*in, Mittelwert (\pm SD)	Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Patient*in, Median (Minimum und Maximum)
20 - 23+6 SSW	204 (4,9)	15,7 (\pm 9,7)	14 (1-36)
24 - 31+6 SSW	2059 (49,4)	4,9 (\pm 4,8)	3 (1-37)
32 - 36+6 SSW	768 (18,4)	2,27 (\pm 2,6)	1 (1-32)
37 - 41+6 SSW	1119 (26,9)	2,13 (\pm 2,5)	1 (1-28)
>42 + 0 SSW	16 (0,4)	2,14 (\pm 2,2)	1 (1-7)

Tabelle 15: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht

Korrelation nach Spearman (Geburtsgewicht vs. Anzahl Röntgenaufnahmen):

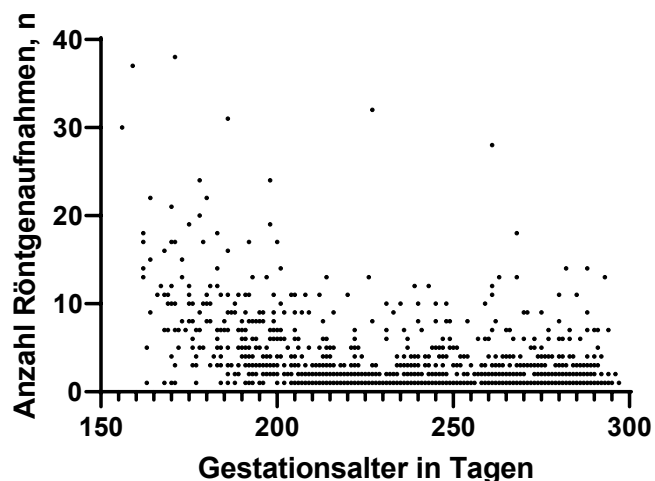
$r=0,43$, $p<.001$, $n=1307$

Geburtsgewicht in g	Anzahl der Röntgenaufnahmen (n=4167), n(%)	Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Patient*in, Mittelwert (\pm SD)	Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Patient*in, Median (Minimum und Maximum)
<500 g	236 (5,6)	13,9 (\pm 10,3)	10 (1-38)
\geq 500 g bis <1000 g	1233 (29,6)	7,1 (\pm 5,4)	6 (1-37)
\geq 1000 g bis <1500 g	682 (16,4)	3,6 (\pm 3,6)	2 (1-24)
\geq 1500 g bis <2500 g	707 (17)	2,3 (\pm 2,7)	1 (1-32)
\geq 2500 g	1309 (31,4)	2,1 (\pm 2,4)	1 (1-28)



Anzahl der Röntgenaufnahmen in Korrelation zum Geburtsgewicht in g. Die Anzahl der Röntgenaufnahmen und das Geburtsgewicht korrelieren signifikant ($r=-0,43$, $p<,001$, $n=1307$).

Abbildung 13: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht in g, Darstellung im Scatterplot



Anzahl der Röntgenaufnahmen in Korrelation zum Gestationsalter in Tagen. Die Anzahl der Röntgenaufnahmen und das Geburtsgewicht korrelieren signifikant ($r=-0,42$, $p<,001$, $n=1307$).

Abbildung 14: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Gestationsalter in Tagen, Darstellung im Scatterplot

47% ($n= 614$) der Patient*innen erhielten nur eine einzige Röntgenaufnahme, 17,1% wurden zweimal geröntgt und nur noch 5,44% ($n=71$) erhielten insgesamt vier Röntgenuntersuchungen. Mehr als 30 Aufnahmen wurden nur bei vier Kindern angefertigt, sieben der Patient*innen erhielten zwischen 21 und 30 Aufnahmen, dies macht mit 0,3% bzw. 0,5% nur einen Bruchteil aller

Röntgenaufnahmen auf der Intensivstation aus. Allerdings sind die 62 Patient*innen zu ergänzen, die zwischen 11 bis 20 Aufnahmen erhielten.

Am ersten Lebenstag erhielten 81,4% aller Patient*innen eine Röntgenaufnahme. Mit steigendem Alter an Lebenstagen, nahm die Anzahl an Röntgenaufnahmen kontinuierlich ab.

Tabelle 16: Häufigkeitsverteilung der Röntgenaufnahmen im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf

Anzahl der Patient*innen, die eine Aufnahme am jeweiligen Lebenstag erhielten (n=1307), n(%)	
Aufnahme am 1. Lebenstag	1064 (81,4)
Aufnahme am 2. Lebenstag	465 (35,6)
Aufnahme am 3. Lebenstag	232 (17,8)
Aufnahme am 4. Lebenstag	147 (11,2)
Aufnahme am 1. - 7. Lebenstag	1265 (96,8)
Aufnahme am 1. - 30. Lebenstag	1296 (99,2)
Aufnahme am 31. - 60. Lebenstag	121 (9,3)
Anzahl der Patient*innen, die eine bestimmte Anzahl an Aufnahmen erhielten (n=1307), n (%)	
Eine Aufnahme	614 (47)
Zwei Aufnahmen	224 (17,1)
Drei Aufnahmen	144 (11)
Vier Aufnahmen	71 (5,4)
5 bis 10 Aufnahmen	181 (13,8)
11 bis 20 Aufnahmen	62 (4,7)
21 bis 30 Aufnahmen	7 (0,5)
>30 Aufnahmen	4 (0,3)

Die meisten Bilder (n=1404) wurden direkt nach der Geburt am 1. Lebenstag gemacht, am 2. Lebenstag waren es 658 und am 3. Lebenstag 299 Aufnahmen. Weit mehr als die Hälfte, 65,5% aller Röntgenaufnahmen wurden in der Lebenswoche 1 angefertigt, nur noch 8,4% in der 2. Lebenswoche, 7,2% in der 3. Lebenswoche und bloß 4,6% in der 4. Lebenswoche.

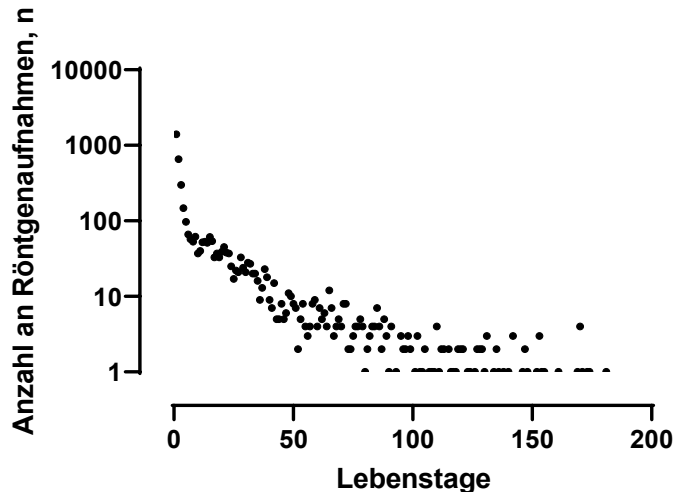


Abbildung 15: Logarithmische Darstellung der Anzahl der Röntgenaufnahmen an den jeweiligen Lebensstagen

5.2.3 Art der Röntgenaufnahmen

Es wurden dabei 94,1% Thoraxaufnahmen (AP) im Register dokumentiert. Die Röntgenaufnahmen des Abdomens (AP und in Linksseitenlage) hatten einen Anteil von 4,3%. Keine dieser Aufnahmen wurden als Thoraxabdomenaufnahmen klassifiziert. Es gab 0,6% Schädelaufnahmen. Die restlichen Röntgenaufnahmen, welche bildliche Darstellungen von Extremitäten, der Wirbelsäule oder vom Kolon nach Kontrastmittelgabe beinhalteten, wurde der Übersicht halber zusammengefasst und betrug lediglich 1,1% aller Aufnahmen. Aufgrund der geringen Anzahl von Schädelaufnahmen, sonstigen Aufnahmen und den nicht vorhandenen Thoraxabdomenaufnahmen wurden diese bei der statistischen Auswertung außer Acht gelassen (siehe Tabelle 17).

Die Durchsicht der Bilder ergab jedoch, dass einige ursprünglich als Thorax- oder Abdomenaufnahme klassifizierte Bilder eigentlich in der Kategorie der Thoraxabdomenaufnahmen einzugliedern waren. Um dies zu verdeutlichen, werden im Folgenden Beispielbilder präsentiert; stets notiert ist die Originaleinteilung und die Einteilung nach zweiter Beurteilung.

Abbildung 16: Röntgen-Thorax – Beispielbilder

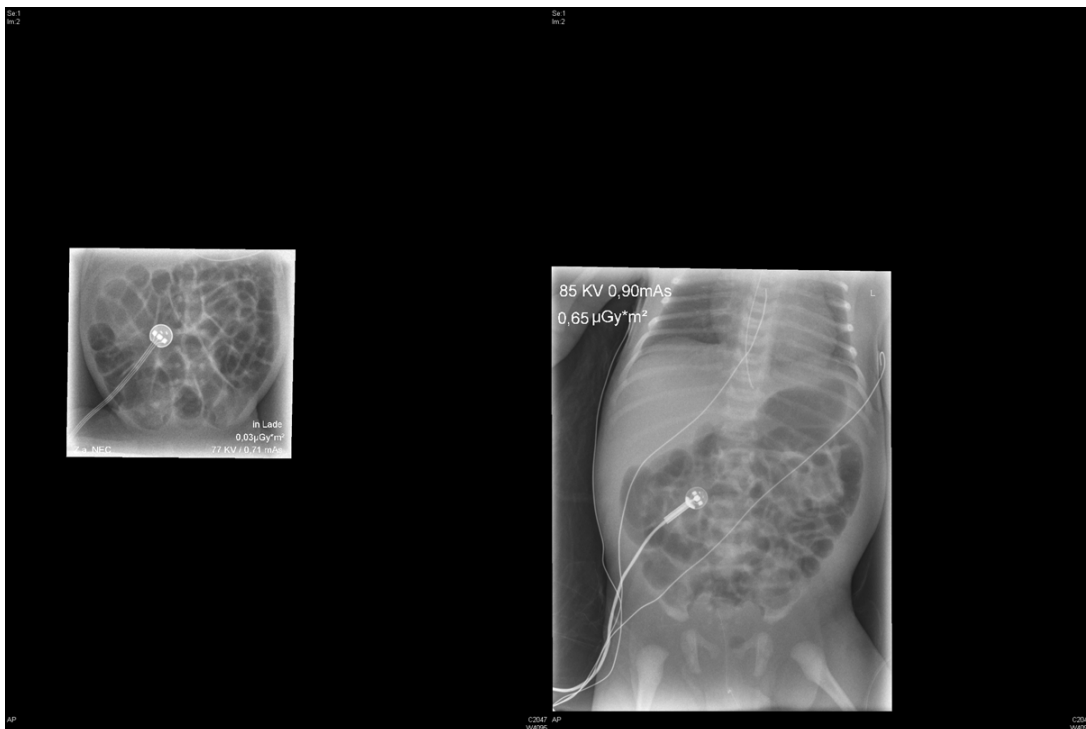


Originalbezeichnung:
Röntgen-Thorax
Zweite Beurteilung:
Röntgen-
Thoraxabdomen

Originalbezeichnung:
Röntgen-Thorax
Zweite Beurteilung:
Röntgen-
Thoraxabdomen

Originalbezeichnung:
Röntgen-Thorax
Zweite Beurteilung:
Röntgen-Thorax

Abbildung 17: Röntgen-Abdomen – Beispielbilder



Originalbezeichnung: Röntgen-
Abdomen
Zweite Beurteilung: Röntgen-Abdomen

Originalbezeichnung: Röntgen-
Abdomen
Zweite Beurteilung: Röntgen-
Thoraxabdomen

Aus diesem Grunde wurden sämtliche Aufnahmen erneut gesichtet und nach der tatsächlichen Abbildung klassifiziert. Es ergaben sich 47,6% Thoraxaufnahmen, 3,2% reine Abdomen und 47,5% Thoraxabdomenaufnahmen. Die meisten Röntgenaufnahmen wurden also in der Kategorie der Thorax- und kombinierte Thoraxabdomenaufnahmen gemacht (siehe Tabelle 17). Zur besseren Übersicht werden im Folgenden die Werte der ersten und zweiten Beurteilung nur noch tabellarisch dargestellt. Im Text wird lediglich auf die Ergebnisse der zweiten Beurteilung eingegangen.

Tabelle 17: Art der Röntgenaufnahmen nach erster und zweiter Beurteilung

Anzahl der Röntgenaufnahmen nach erster Beurteilung (n=4165), n(%)	
Thorax	3917 (94,1)
Abdomen	179 (4,3)
Anzahl der Röntgenaufnahmen nach zweiter Beurteilung (n=4158), n(%)	
Thorax	1981 (47,6)
Abdomen	134 (3,2)
Thoraxabdomen	1974 (47,5)

5.2.4 Art der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht

Die durchschnittliche Häufigkeit, sowie die Art der Röntgenaufnahmen wurden in Bezug auf das Gestationsalter und das Geburtsgewicht in den nachfolgenden Tabellen 18, 19 und 20 dargestellt. Da nach erster Beurteilung über 90% aller Aufnahmen als „Thoraxaufnahmen“ betitelt wurden, ist es nicht verwunderlich, dass es in Tabelle 18 in allen Gewichtskategorien vor allem Thoraxaufnahmen gibt. Diese Einteilung lässt sich also nur schwer nutzen, um einen etwaigen Trend zu beobachten.

Bei Untersuchungen nach zweiter Beurteilung und Einteilung der Bilder in die Gruppen Thoraxaufnahme, Thoraxabdomenaufnahme und Abdomenaufnahme war eine Tendenz abhängig vom Geburtsgewicht sichtbar. Es dominierten stets die Thoraxaufnahme und die Thoraxabdomenaufnahme. Im Hinblick auf das

Geburtsgewicht fiel diesbezüglich auf, dass bei einem niedrigeren Geburtsgewicht prozentual mehr Thoraxabdomenaufnahmen gemacht wurden und bei einem höheren Gewicht mehr Thoraxaufnahmen. Von allen angefertigten Aufnahmen der Geburtsgewichtskategorie <500 g, gab es 58,1% Thoraxabdomenaufnahmen, deren Anzahl kontinuierlich abflachte und bei einem Geburtsgewicht von ≥ 2500 g nur noch 39,4% betrug. Insbesondere die Lagekontrolle nach NAK-/ NVK-Anlage führte in 86% zu Thoraxabdomenaufnahmen, nur in 14% wurde die Lage mittels reinen Abdomenaufnahmen kontrolliert. Die Thoraxaufnahmen erfuhren bei einem Anteil von 37,3% in der Gewichtsklasse <500 g einen Anstieg bis auf 58,4% in der Klasse ≥ 2500 g. Abdomenaufnahmen waren generell seltener vertreten, vor allem bei Patient*innen mit einem Geburtsgewicht <1500 g, was daran liegt, dass eben jene Patient*innen 83,3% all derjenigen Patient*innen ausmachten, die eine NEC ausbildeten.

Die Aufnahmearten Thorax, Abdomen, Thoraxabdomen wurden für die jeweiligen Gruppen mittels Yates-Cochran-Test auf einen Trend untersucht. Die Art der Aufnahme steht in einem Zusammenhang mit dem Geburtsgewicht (Chi-Quadrat=25,04, $p=0.000001$, $n=4090$) und dem Gestationsalter (Chi-Quadrat=25,37, $p<.000001$, $n=4090$).

Table 18: Art der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht nach erster Beurteilung

Geburtsgewicht in g	Anzahl der Patient*innen, $n=1307$	Anzahl der Röntgen aufnahmen insgesamt, $n=4167$	Anzahl an Röntgen aufnahmen pro Patient*in, Mittelwert (\pm SD)	Thorax abdomen, n(%)	Thorax, n(%)	Abdomen, n(%)
<500 g	17	236	13,9 (\pm 10,3)	0	224 (94,9)	11 (4,7)
≥ 500 g bis <1000 g	175	1233	7,1 (\pm 5,4)	0	1123 (91,1)	93 (7,5)
≥ 1000 g bis <1500 g	197	682	3,6 (\pm 3,6)	0	636 (93,3)	26 (3,8)
≥ 1500 g bis <2500 g	301	707	2,3 (\pm 2,7)	0	661 (93,5)	30 (4,2)
≥ 2500 g	617	1309	2,1 (\pm 2,4)	0	1273 (97,2)	19 (1,5)

Tabelle 19: Art der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht nach zweiter Beurteilung

Geburtsgewicht in g	Anzahl der Patient*innen, n=1307	Anzahl der Röntgen aufnahmen insgesamt, n=4167	Anzahl an Röntgen aufnahmen pro Patient*in, Mittelwert (\pm SD)	Thorax abdomen, n(%)	Thorax, n(%)	Abdomen, n(%)
<500 g	17	236	13,9 (\pm 10,3)	137 (58,1)	88 (37,3)	8 (3,4)
\geq 500 g bis <1000 g	175	1233	7,1 (\pm 5,4)	651 (52,8)	490 (39,7)	70 (5,7)
\geq 1000 g bis <1500 g	197	682	3,6 (\pm 3,6)	349 (51,2)	293 (43)	23 (3,4)
\geq 1500 g bis <2500 g	301	707	2,3 (\pm 2,7)	321 (45,4)	345 (48,8)	21 (3)
\geq 2500g	617	1309	2,12 (\pm 2,4)	516 (39,4)	765 (58,4)	12 (1)

Tabelle 20: Art der Röntgenaufnahmen bezogen auf das Gestationsalter nach zweiter Beurteilung

Gestationsalter in SSW	Anzahl der Patient*innen, n=1307	Anzahl der Röntgen aufnahmen insgesamt, n=4167	Anzahl an Röntgen aufnahmen pro Patient*in, Mittelwert (\pm SD)	Thorax abdomen n(%)	Thorax n(%)	Abdomen n(%)
20 - 23+6	13	204	15,7 (\pm 9,7)	108 (52,9)	86 (42,2)	6 (2,9)
24 - 31+6	421	2059	4,9 (\pm 4,8)	1081 (52,5)	842 (40,9)	96 (4,7)
32 - 36+6	341	768	2,27 (\pm 2,6)	344 (44,8)	385 (50,1)	21 (2,7)
37 - 41+6	524	1119	2,13 (\pm 2,5)	436 (39)	659 (58,9)	11 (1)
>42+0	8	17	2,14 (\pm 2,2)	7 (41,2)	9 (53)	0

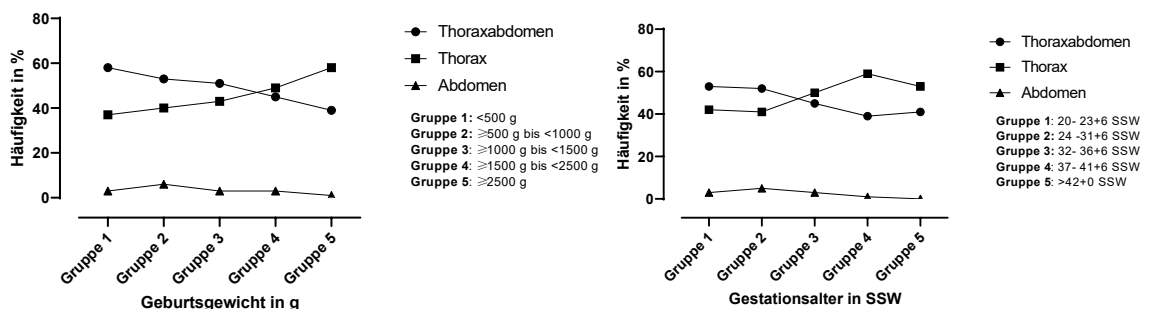


Abbildung 18: Häufigkeit in % der verschiedenen Arten von Röntgenaufnahmen bezogen auf das Geburtsgewicht und das Gestationsalter

5.2.5 Gewicht am Tag der Röntgenaufnahme

Das Gewicht am Tage der Röntgenaufnahme ließ sich bei 4150 Aufnahmen bestimmen und ist nachfolgend in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Gewicht am Tag der Röntgenaufnahme

Gewicht in g	Anzahl der Röntgenaufnahmen (n=4150), n(%)
<500 g	81 (2)
≥500 g bis <1000 g	1011 (24,4)
≥1000 g bis <1500 g	765 (18,4)
≥1500 g bis <2500 g	863 (20,8)
≥2500 g	1430 (34,5)

5.3 Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert, DFP und ED bei verschiedenen Arten der Röntgenaufnahmen

5.3.1 DFP – Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung

Das DFP wurde bei 3064 der 4167 Röntgenaufnahmen ermittelt, und betrug im Mittel $1,9 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$. Bei Thoraxaufnahmen betrug das DFP im Mittel $1,8 \pm 1,5 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$ (Spannweite: $0,1 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$ bis $10,3 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$). Bei den Abdomenaufnahmen waren es $1,5 \pm 1,4 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$ (Spannweite $0,1 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$ bis $8,1 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$). Bei den kombinierten Thoraxabdomenaufnahmen wurden im Mittel ein DFP von $2 \pm 1,6 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$ verwendet. Vergleichen wir diesen Wert mit den mittleren DFP der Thorax- und Abdomenaufnahmen nach der zweiten Einteilung, so liegt dieser knapp über den im Schnitt anfallenden DFP von Thoraxaufnahmen, Abdomenaufnahmen und dem gemittelten DFP aller Aufnahmen.

Tabelle 22: DFP und ED bezogen auf die Art der Aufnahme, Mittelwert±SD

Mann-Whitney-U-Test 1. Beurteilung: Thorax vs. Abdomen: $p=.127$

Globaler p-Wert (Kruskal-Wallis Test) 2. Beurteilung: $p<.001$

Post-hoc-Vergleiche (Dunn's Test) 2. Beurteilung: Thorax vs. Abdomen: $p=.021$,
Thorax vs. Thoraxabdomen $p<.001$, Abdomen vs. Thoraxabdomen $p<.001$

Art der Röntgenaufnahmen	Anzahl der Röntgenaufnahmen (nach zweiter Beurteilung), n	Dosisflächenprodukt in mGy*cm², Mittelwert±SD	Effektive Dosis in µSv, Mittelwert±SD
Thorax	2917 (1442)	1,9±1,5 (1,8±1,5)	8,3±6,2 (7,4±5,9)
Thoraxabdomen	n.v. (1502)	n.v. (2±1,6)	n.v. (8,8±5,3)
Abdomen	114 (82)	1,8±1,7 (1,5±1,4)	8,4±5,8 (6,7±5,1)

Graphisch dargestellt wird die Verteilung des DFPs unter Verwendung unterschiedlicher Aufnahmearten mittels Box- und Whisker Plot (Mittelwertes±SD) in Abbildung 19. Vergleiche zwischen den Gruppen Thorax und Abdomen wurden mit dem Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Hier fand sich nach erster Einteilung kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Kategorien.

Bei erneuter Einteilung der Aufnahmen, zeigte der Kruskal-Wallis Test einen signifikanten Unterschied ($p<0,001$). Hier wurden Vergleiche zwischen zwei Gruppen mit dem Dunn's Test geprüft und mittels dem APA-Style visualisiert. Mit einem Signifikanzniveau von $p<0,001$ zeigten sich hier Unterschiede zwischen Thorax-/ Thoraxabdomenaufnahmen und Abdomen-/ Thoraxabdomenaufnahmen.

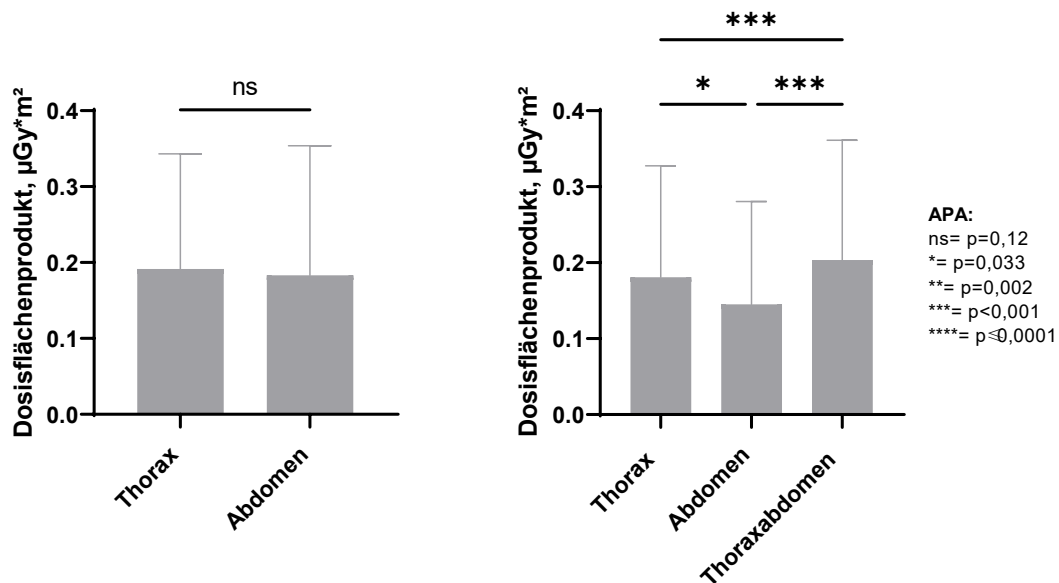


Abbildung 19: Dosisflächenprodukt nach erster (links) und zweiter (rechts) Beurteilung, Mittelwert±SD

5.3.2 Aufnahmespannung – Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung

Die Aufnahmespannung wurde bei 3189 der 4167 Röntgenaufnahmen ermittelt, und betrug im Mittel 79,1kV.

Bei Thoraxaufnahmen betrug die Aufnahmespannung im Mittel 79,4±5 kV (Spannweite: 50 kV bis 91 kV). Bei den Abdomenaufnahmen waren es 77,7±4 kV (Spannweite: 69 kV bis 88 kV), bei den gemischten

Thoraxabdomenaufnahmen waren es im Mittel 79±4,2 kV (Spannweite: 50 kV bis 98 kV).

Tabelle 23: Aufnahmespannung und ED bezogen auf die Art der Aufnahme

Mann-Whitney-U-Test 1. Beurteilung: Thorax vs. Abdomen: $p=0.002$

Globaler p-Wert (Kruskal-Wallis Test) 2. Beurteilung: $p<0.001$

Post-hoc-Vergleiche (Dunn's Test) 2. Beurteilung: Thorax vs. Abdomen: $p=0.001$,
Thorax vs. Thoraxabdomen $p=0.004$, Abdomen vs. Thoraxabdomen $p=0.053$

Art der Röntgenaufnahme	Anzahl der Röntgenaufnahmen (nach zweiter Beurteilung), n	Aufnahmespannung, kV	Effektive Dosis, μSv
Thorax	3033 (1503)	79,2 \pm 4,6 (79,4 \pm 5)	8,3 \pm 6,2 (7,4 \pm 5,9)
Thoraxabdomen	n.v. (1561)	n.v. (79 \pm 4,2)	n.v (8,8 \pm 5,3)
Abdomen	120 (85)	77,8 \pm 4,1 (77,7 \pm 4)	8,4 \pm 5,8 (6,7 \pm 5,1)

Dargestellt wird die Verteilung der Aufnahmespannung in kV bei Verwendung unterschiedlicher Arten der Röntgenaufnahmen in Abbildung 20.

Vergleiche zwischen den Gruppen Thorax und Abdomen in der Originaleinteilung wurden mit dem Mann-Whitney-U-Test durchgeführt und waren für die Gruppe Thorax/ Abdomen signifikant unterschiedlich ($p=0,002$). Auch nach zweiter Beurteilung ergab der Kruskal-Wallis Test einen signifikanten Unterschied ($p<0,001$) innerhalb der zu testenden Gruppen. Nach Analyse des Dunn's Tests fanden sich diese Unterschiede insbesondere in den Gruppen Thorax/ Abdomen ($p=0,001$) und Thorax/ Thoraxabdomen ($p=0,004$).

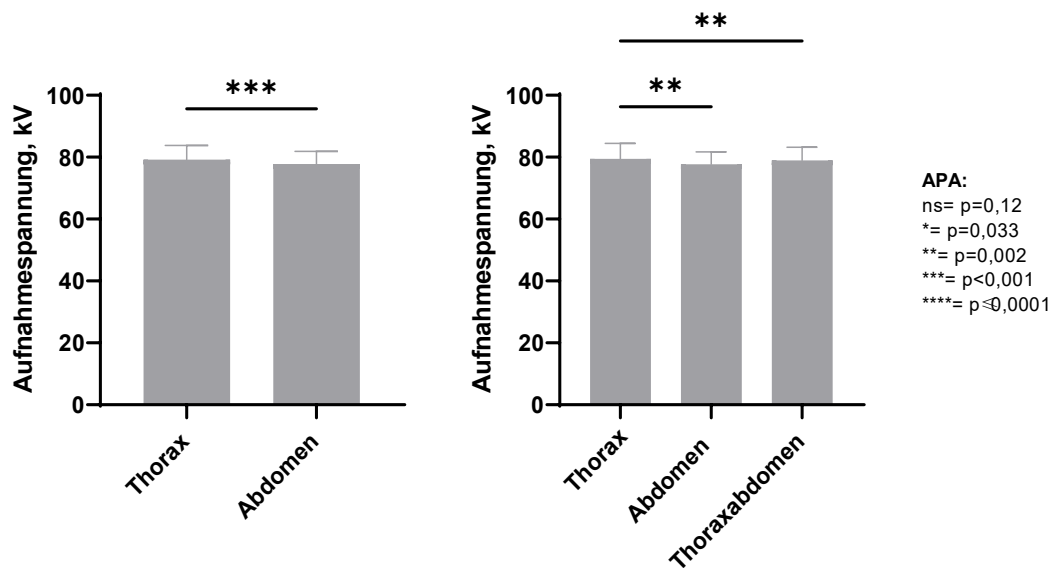


Abbildung 20: Aufnahmevoltage nach erster (links) und zweiter (rechts) Beurteilung, Mittelwert \pm SD

5.3.3 mAs-Wert – Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung

Der mAs-Wert wurde bei 3190 der 4167 Röntgenaufnahmen ermittelt, und betrug im Mittel 0,75 mAs.

Bei Thoraxaufnahmen betrug der mAs-Wert im Mittel $0,75\pm 0,07$ mAs (Spannweite: 0,08 mAs bis 0,9 mAs), bei den Abdomenaufnahmen waren es $0,73\pm 0,09$ mAs (Spannweite: 0,1 mAs bis 1 mAs), bei den gemischten Thoraxabdomenaufnahmen waren es im Mittel $0,74\pm 0,08$ mAs (Spannweite: 0,07 mAs bis 2 mAs). Mit einer sehr kleinen SD von stets $<0,1$, ist der mAs-Wert, als ein sehr stabiler Wert zu beschreiben.

Tabelle 24: Strom-Zeit-Produkt und ED bezogen auf die Art der Aufnahme

Mann-Whitney-U-Test 1. Beurteilung: Thorax vs. Abdomen: $p=0.028$

Globaler p-Wert (Kruskal-Wallis Test) 2. Beurteilung: $p<0.001$

Post-hoc-Vergleiche (Dunn's Test) 2. Beurteilung: Thorax vs. Abdomen: $p=0.002$,
Thorax vs. Thoraxabdomen $p<0.001$, Abdomen vs. Thoraxabdomen $p=0.219$

Art der Röntgenaufnahme	Anzahl der Röntgenaufnahmen (nach zweiter Beurteilung), n	mAs-Wert	Effektive Dosis
Thorax	3034 (1505)	$0,74 \pm 0,08$ ($0,75 \pm 0,07$)	$8,3 \pm 6,2$ ($7,4 \pm 5,9$)
Thoraxabdomen	n.v. (1560)	n.v. ($0,74 \pm 0,08$)	n.v. ($8,8 \pm 5,3$)
Abdomen	120 (85)	$0,73 \pm 0,08$ ($0,73 \pm 0,09$)	$8,4 \pm 5,8$ ($6,7 \pm 5,1$)

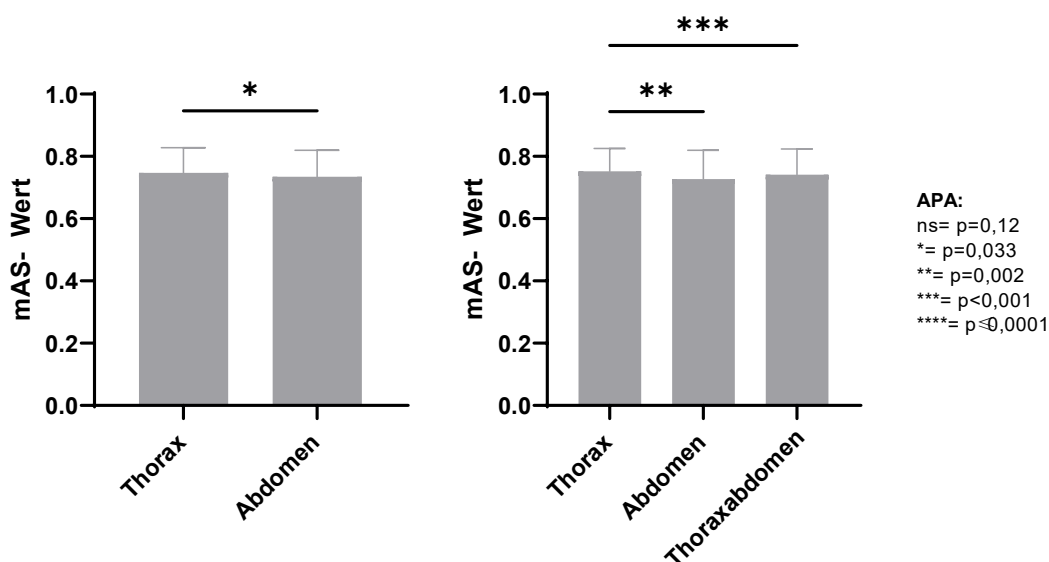


Abbildung 21: mAs-Wert nach erster (links) und zweiter (rechts) Beurteilung, Mittelwert \pm SD

5.3.4 Effektive Dosis – Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung

Da die Konversionskoeffizienten von der Art der Röntgenaufnahme abhängig sind, ergeben sich nach doppelter Einteilung der Bilder immer zwei Werte für die Effektive Dosis. Die Effektive Dosis betrug im Mittel $7,8 \mu\text{Sv}$ pro Röntgenaufnahme (Spannweite: $0,4 \mu\text{Sv}$ bis $90,7 \mu\text{Sv}$). Die ED pro Aufnahme eines Früh- oder kranken Neugeborenen der einzelnen Gewichtsguppen und

der unterschiedlichen Röntgenaufnahmen sind Tabelle 25 und Tabelle 26 zu entnehmen. Die Werte nach erster Einteilung der Bilder sind leicht erhöht, da in dieser Kohorte fast alle Bilder in die Kategorie „Thorax“ eingeteilt wurden. Diese Kategorie benötigte aber den höchsten Konversionskoeffizienten zur Ermittlung der ED.

Insgesamt lässt sich nach erster und zweiter Beurteilung für eine Aufnahme der Patient*innen > 2500g gegenüber den anderen Gewichtsguppen eine signifikant höhere ED erkennen. Nach erneuter Einteilung der Bilder zeigt sich außerdem ein signifikanter Unterschied der Thoraxabdomenaufnahmen gegenüber den Abdomen- und den Thoraxaufnahmen, die ED eben solcher Aufnahmen war am höchsten.

Tabelle 25: Effektive Dosis in μSv der einzelnen Geburtsgewichtsguppen (Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung)

Globaler p-Wert (Kruskal-Wallis Test) 1. Beurteilung: $p < .001$

Post-hoc-Vergleiche (Dunn's Test) 1. Beurteilung: Gruppe 1 vs. Gruppe 2: $p = .803$, 1 vs. 3: $p > .999$, 1 vs. 4: $p > .999$, 1 vs. 5: $p < .001$, 2 vs. 3: $p > .999$, 2 vs. 4: $p = .044$, 2 vs. 5: $p < .001$, 3 vs. 4: $p = .582$, 3 vs. 5: $p < .001$, 4 vs. 5: $p < .001$

Globaler p-Wert (Kruskal-Wallis Test) 2. Beurteilung: $p < .001$

Post-hoc-Vergleiche (Dunn's Test) 2. Beurteilung: Gruppe 1 vs. Gruppe 2: $p > .999$, 1 vs. 3: $p = .008$, 1 vs. 4: $p = .310$, 1 vs. 5: $p < .001$, 2 vs. 3: $p = .020$, 2 vs. 4: $p > .999$, 2 vs. 5: $p < .001$, 3 vs. 4: $p > .999$, 3 vs. 5: $p < .001$, 4 vs. 5: $p < .001$

	Effektive Dosis in μSv , Mittelwert \pm SD	Effektive Dosis in μSv , Median (Spannweite)
<500 g	8,7 \pm 8,7 (8,3 \pm 8,4)	7,1(0,7-82,3) [6,6(0,7-82,3)]
\geq 500 g bis <1000 g	7,7 \pm 6,7 (7,4 \pm 6,3)	6,4(0-90,7) [6,2(0-83,3)]
\geq 1000 g bis <1500 g	7,9 \pm 6,1 (6,7 \pm 5,4)	6,3(0,7-58,8) [5,5(0,7-58,8)]
\geq 1500 g bis <2500 g	7,9 \pm 4,6 (6,8 \pm 4,6)	6,8(0,4-42,7) [5,9(0,4-48,3)]
\geq 2500 g	9,3 \pm 4,5 (9,2 \pm 4,4)	8,4(0-33,3) [8,1(0,4-32,4)]

Tabelle 26: Effektive Dosis in μSv der einzelnen Arten von Röntgenaufnahmen (Werte in Klammern: nach zweiter Beurteilung)

Mann-Whitney-U-Test 1. Beurteilung: Thorax vs. Abdomen: $p=0.069$

Globaler p-Wert (Kruskal-Wallis Test) 2. Beurteilung: $p<0.001$

Post-hoc-Vergleiche (Dunn's Test) 2. Beurteilung: Thorax vs. Abdomen: $p=0.711$, Thorax vs. Thoraxabdomen $p<0.001$, Abdomen vs. Thoraxabdomen $p<0.001$

	Effektive Dosis in μSv Median (Spannweite)	Effektive Dosis in μSv Mittelwert \pm SD
Thorax	7,2 (0,4-90,7) [6,4 (0,4-82,3)]	8,3 \pm 6,2 (7,4 \pm 5,9)
Abdomen	7,3 (0,6-41,5) [6 (0,6-41,5)]	8,4 \pm 5,8 (6,7 \pm 5,1)
Thoraxabdomen	n.v. [7,7 (0,6-83,3)]	n.v. (8,8 \pm 5,3)

5.3.5 Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert und Dosisflächenprodukt und Effektive Dosis bei verschiedenem Geburtsgewicht

Mit steigendem Gewicht steigt die im Mittel pro Aufnahme verwendete Aufnahmespannung, der mAs-Wert und das DFP. Die ED war insbesondere bei sehr leicht geborenen Patient*innen $<500\text{ g}$ und bei den $\geq 2500\text{ g}$ erhöht. Das lässt sich durch hohe Konversionskoeffizienten der strahlensensiblen unreifen Frühgeborenen und das hohe DFP der schwereren Patient*innen begründen. Die genauen Daten sind Tabelle 27 zu entnehmen.

Tabelle 27: Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP sowie ED pro Aufnahme in Bezug auf das Geburtsgewicht, Mittelwert \pm SD

Korrelation nach Spearman (Aufnahmespannung vs. Geburtsgewicht): $r=0,68$, $p<0,001$, $n=3189$

Korrelation nach Spearman (mAs-Wert vs. Geburtsgewicht): $r=0,59$, $p<0,001$, $n=3190$

Korrelation nach Spearman (DFP vs. Geburtsgewicht): $r=0,67$, $p<0,001$, $n=3064$

Geburtsgewicht	Aufnahmespannung kV	mAs-Wert	DFP, $\text{mGy}\cdot\text{cm}^2$	Effektive Dosis, μSv Erste Beurteilung (Zweite Beurteilung)
$<500\text{ g}$	76,42 ($\pm 2,89$)	0,69 ($\pm 0,06$)	1 (± 1)	8,7 \pm 8,7 (8,3 \pm 8,4)
$\geq 500\text{ g bis } <1000\text{ g}$	76,45 ($\pm 2,83$)	0,71 ($\pm 0,11$)	1,1 (± 1)	7,7 \pm 6,7 (7,4 \pm 6,3)
$\geq 1000\text{ g bis } <1500\text{ g}$	77,45 ($\pm 2,84$)	0,73 ($\pm 0,06$)	1,4 ($\pm 1,1$)	7,9 \pm 6,1 (6,7 \pm 5,4)
$\geq 1500\text{ g bis } <2500\text{ g}$	78,61 ($\pm 5,38$)	0,77 ($\pm 0,09$)	1,9 ($\pm 1,2$)	7,9 \pm 4,6 (6,8 \pm 4,6)
$\geq 2500\text{ g}$	83,27 ($\pm 3,84$)	0,79 ($\pm 0,07$)	3,1 ($\pm 1,6$)	9,3 \pm 4,5 (9,2 \pm 4,4)

Die graphische Darstellung in Abbildung 22 macht den Anstieg der Werte bei steigendem Geburtsgewicht deutlich.

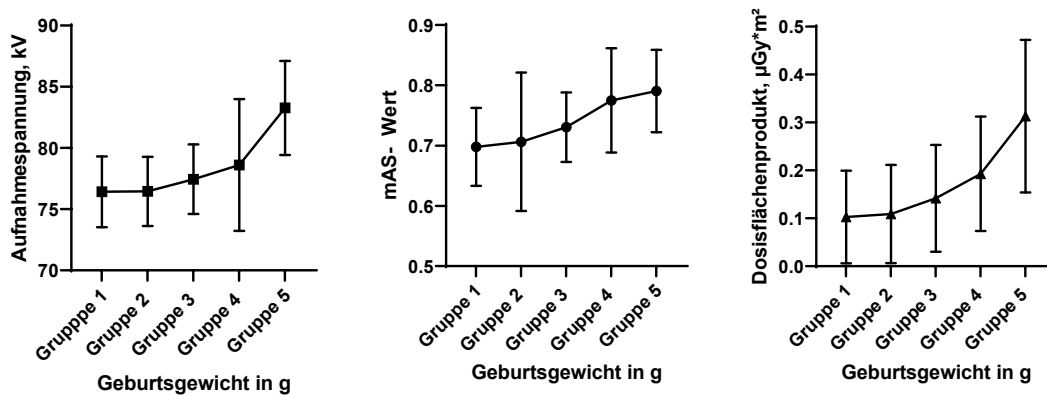


Abbildung 22: Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP bezogen auf das Geburtsgewicht, Mittelwert \pm SD

Dargestellt im Scatterplot wurde die Korrelation zwischen dem Geburtsgewicht und den einzustellenden Parametern mittels Linearer Regression getestet. In allen Fällen korrelierte das Geburtsgewicht signifikant und gleichsinnig mit diesen Parametern. Insbesondere das DFP war stark abhängig vom Geburtsgewicht ($r=0,67$, $p<0,001$, $n=3064$). Dies ist in Einklang mit der normalen Entwicklung, da bei zunehmender Körpergröße das zu bestrahlende Areal und die damit verwendete Dosis steigen (Abbildung 23).

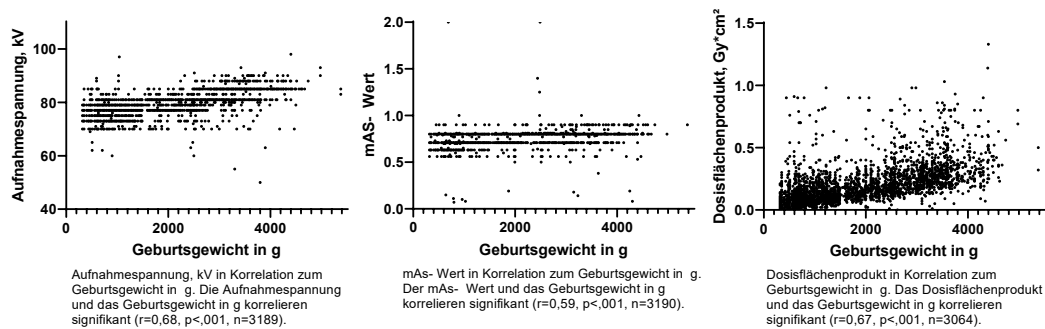


Abbildung 23: Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP bezogen auf das Geburtsgewicht, Scatterplot

5.3.6 Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP und ED in Abhängigkeit vom Gestationsalter

Die Aufnahmespannung, der mAs-Wert und das DFP wurden außerdem in Korrelation mit dem Gestationsalter der Patient*innen gesetzt. Dargestellt ist dies in Tabelle 28, Abbildung 24 und 25. Es ergaben sich die gleichen Resultate wie unter 5.3.5 diskutiert.

Tabelle 28: Röntgenparameter wie Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP pro Aufnahme in Bezug auf das Gestationsalter, Mittelwert \pm SD

Korrelation nach Spearman (Aufnahmespannung vs. Gestationsalter): $r=0,64$, $p<.001$, $n=3188$

Korrelation nach Spearman (mAs-Wert vs. Gestationsalter): $r=0,5544$, $p<.001$, $n=3189$

Korrelation nach Spearman (DFP vs. Gestationsalter): $r=0,62$, $p<.001$, $n=3064$

Gestationsalter in SSW	Aufnahmespannung kV	mAs-Wert	Dosisflächenprodukt, mGy*cm ²
20 - 23+6	76,9 ($\pm 3,6$)	0,72 ($\pm 0,2$)	1,4 ($\pm 1,5$)
24 - 31+6	77,0 ($\pm 2,9$)	0,71 ($\pm 0,07$)	1,2 ($\pm 1,1$)
32 - 36+6	79,1 ($\pm 4,6$)	0,77 ($\pm 0,07$)	2 ($\pm 1,3$)
37 - 41+6	83,3 ($\pm 4,8$)	0,79 ($\pm 0,08$)	3,2 ($\pm 1,6$)
>42+0	83,8 ($\pm 3,3$)	0,8 ($\pm 0,05$)	2,8 ($\pm 0,7$)

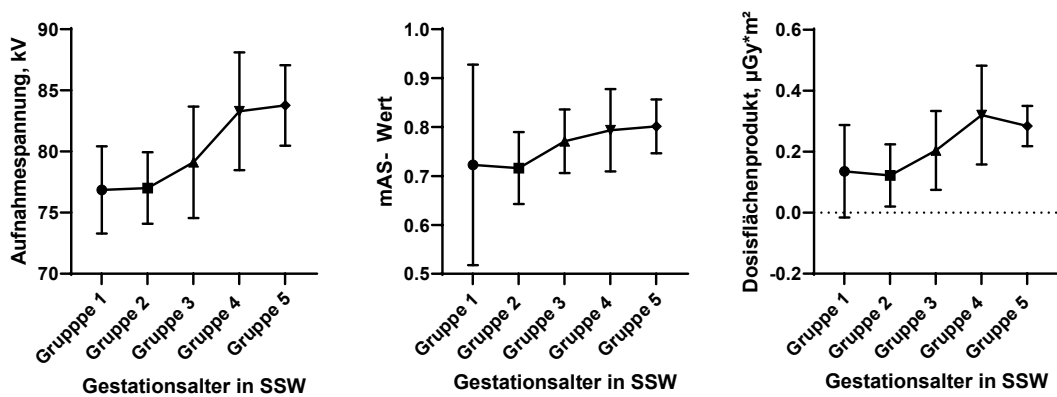


Abbildung 24: Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP bezogen auf das Gestationsalter, Mittelwert \pm SD

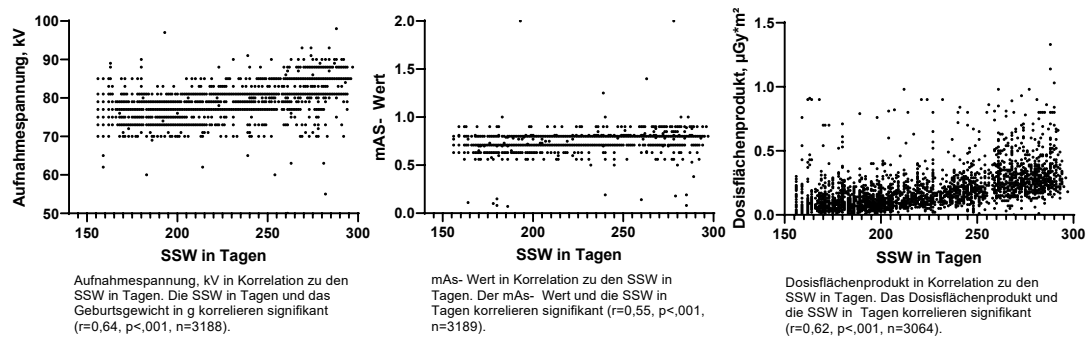


Abbildung 25: Aufnahmespannung, mAs-Wert und DFP bezogen auf das Gestationsalter, Scatterplot

5.3.7 Kumulatives DFP und ED, sowie Risikoevaluation pro Aufenthalt bezogen auf das Geburtsgewicht

Wir können in Tabelle 29 den Trend beobachten, dass mit steigendem Geburtsgewicht die Aufenthaltsdauer in Tagen und die Anzahl an im Mittel angefertigten Röntgenaufnahmen kontinuierlich abfällt. Das DFP und die ED pro Aufenthalt und somit auch das Risiko, nach einer gewissen Strahlenexposition Krebs zu entwickeln, fallen mit steigendem Geburtsgewicht.

Das kumulative DFP pro Aufenthalt eines Früh- oder kranken Neugeborenen zeigte seinen Höhepunkt bei Patient*innen mit einem Geburtsgewicht von <500 g. Diese Kohorte erhielt im Mittel ein DFP von 14,3 mGy*cm² pro Patient*in. Das maximale DFP in der Geburtsgewichtsgruppe <500 g fand sich mit 45mGy*cm² bei einem Frühgeborenen der Woche 24+3 mit einem Geburtsgewicht von 490g. Der Patient befand sich 194 Tage im stationären Aufenthalt, erhielt in dieser Zeit 38 Röntgenaufnahmen und wurde 103 Tage beatmet. Klinisch entwickelte der Frühgeborene ein ANS, eine BPD, eine Herzinsuffizienz, Bradykardien, eine intraventrikuläre Blutung, einen Neugeborenenikterus, Krampfanfälle, eine Retinopathie, eine Hernie und Osteopenien. Bei subglottischer Stenose erfolgte des Weiteren die Anlage eines Tracheostoma. Außerdem kam es zu einer unspezifischen Neugeboreneninfektion mit Candida und einer Cholestase.

Das kumulative DFP bei Patient*innen der Geburtsgewichtsklassen „ ≥ 500 g bis < 1000 g“, „ ≥ 1000 g bis < 1500 g“ und „ ≥ 1500 g bis < 2500 g“ sinkt mit 7,4 mGy*cm² über 4,9 mGy*cm² auf 4,3 mGy*cm² ab – wie in Abbildung 26 dargestellt. Das liegt daran, dass Patient*innen dieser drei Geburtsgewichtsklassen mit im Mittel 7,1; 3,5 und 2,3 Aufnahmen pro Aufenthalt immer weniger Aufnahmen erhielten, während das DFP pro Aufnahme mit 1,1 mGy*cm²; 1,4 mGy*cm² und 1,9 mGy*cm² pro Aufnahme aber nur leicht anstieg. Patient*innen mit einem Geburtsgewicht ≥ 2500 g befanden sich 8 Tage (Median) im stationären Aufenthalt, rund 16 Tage kürzer als diejenigen mit einem Gewicht von ≥ 1500 g bis < 2500 g. Sie erhielten aber mit 3,1 mGy*cm² das höchste mittlere DFP pro Aufnahme. Dies lässt erklären, warum die Kurve des kumulativen DFP in Abbildung 26 für diese Kohorte ansteigt – auf ein mittleres kumulatives DFP von 6,3 mGy*cm².

Tabelle 29: Kumulatives DFP, kumulative ED und kumulatives Risiko pro Aufenthalt bezogen auf das Geburtsgewicht

Korrelation nach Spearman (Aufenthaltsdauer vs. Geburtsgewicht): $r=0,68$, $p<.001$, $n=1307$

Korrelation nach Spearman (Anzahl Röntgenaufnahmen vs. Geburtsgewicht):

$r=-0,42$, $p<.001$, $n=1307$

Geburtsgewicht	Aufenthaltsdauer in Tagen, Median (Spannweite)	Anzahl der Röntgenaufnahmen, Mittelwert (\pm SD)	Kumulatives DFP in mGy*cm ² , Mittelwert (\pm SD)	Kum. ED μ Sv, Mittelwert (\pm SD)	Kum. Risiko ($\cdot 10^{-6}$) bei ($13 \cdot 10^{-2}$ Sv ⁻¹)
<500 g	129 (195)	13,9 \pm 10,3	14,3 \pm 12,7	115,6 \pm 93,2 (108,2 \pm 89,3)	15 (14)
≥ 500 g bis <1000 g	78 (255)	7,1 \pm 5,4	7,5 \pm 7,6	51 \pm 45 (47,7 \pm 42,2)	6,6 (6,2)
≥ 1000 g bis <1500 g	54 (166)	3,6 \pm 3,6	5 \pm 7,4	26,6 \pm 33,9 (24 \pm 28,8)	3,5 (3,1)
≥ 1500 g bis <2500 g	24 (194)	2,3 \pm 2,7	4,3 \pm 6,1	17,2 \pm 22,6 (15,8 \pm 21,6)	2,2 (2,1)
≥ 2500 g	8 (96)	2,12 \pm 2,4	6,4 \pm 8,6	19 \pm 24,3 (18,5 \pm 23,6)	2,5 (2,4)

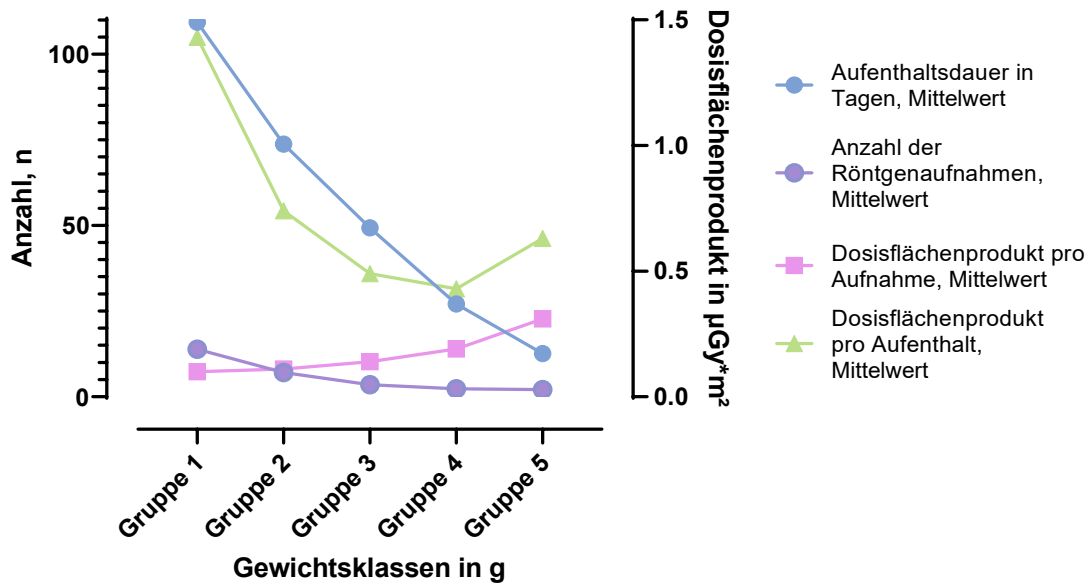


Abbildung 26: Aufenthaltsdauer, Anzahl der Röntgenaufnahmen und das Dosisflächenprodukt (pro Aufnahme/ Aufenthalt) in Abhängigkeit vom Geburtsgewicht in g, Mittelwert

Somit kommen wir zu der Erkenntnis, dass das kumulative DFP vor allem ein Zusammenspiel aus dem Geburtsgewicht und der Anzahl der Aufnahmen ist. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 27 abschließend dargestellt.

Patient*innen mit einem niedrigeren Geburtsgewicht haben besonders viele Röntgenaufnahmen (große, gelbe und grüne Punkte) mit einem niedrigen DFP pro Aufnahme, die ein hohes kumulatives DFP bedingen. Darauf folgend kommt es zu einem Knick in der Kurve bei mittelschwerem Geburtsgewicht.

Neugeborene mit einem hohen Geburtsgewicht erhalten zwar wenige Aufnahmen pro Patient*in (kleine, lila Punkte), allerdings durch die hohe Dosis pro Aufnahme insgesamt ein erhöhtes kumulatives DFP.

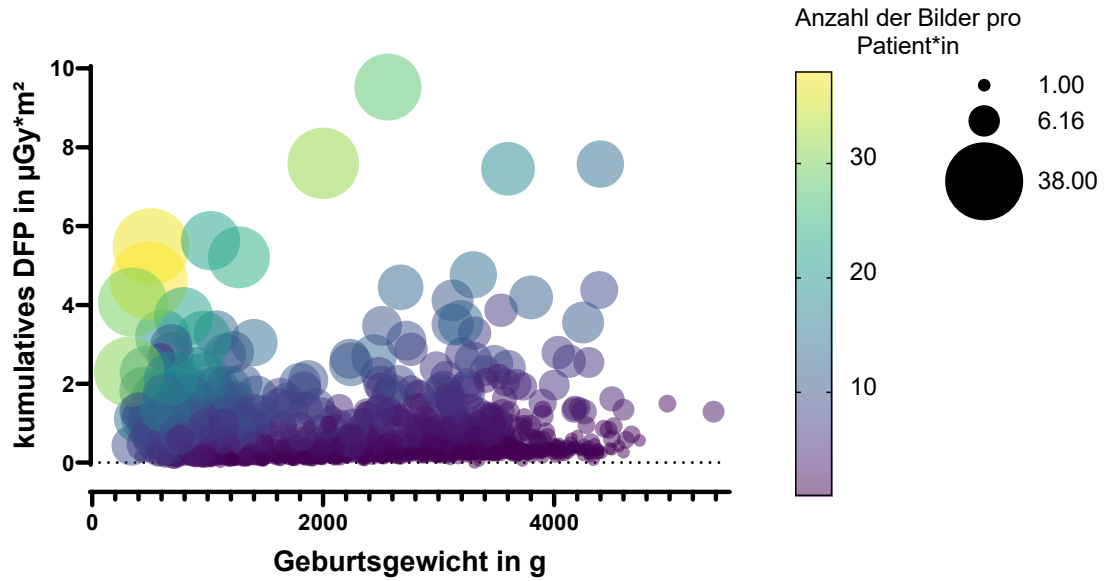


Abbildung 27: Kumulatives DFP in $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ bezogen auf das Geburtsgewicht und die Anzahl an Röntgenaufnahmen pro Patient*in. Darstellung der multiplen Variablen im Scatterplot. Die Anzahl der Bilder wird zur besseren Verdeutlichung in Größe und Farbe dargestellt.

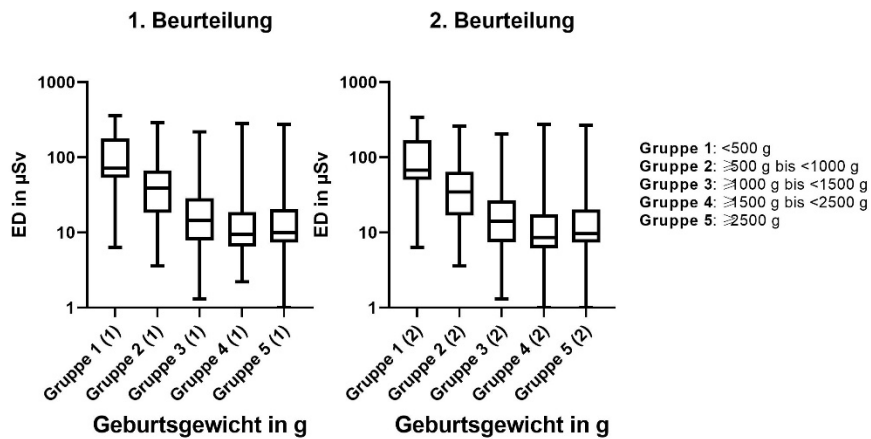


Abbildung 28: Kumulative ED in μSv pro Aufenthalt bezogen auf das Geburtsgewicht in g, Median (Minimum und Maximum)

5.4 Strahlenbelastung mit speziellen Diagnosen

Die häufigsten Diagnosen waren:

- ANS (n=968, 74,2%)
- BPD (n=93, 7,1%)
- PDA (n=214, 16,4%)
- NEC (n=42, 3,2%)
- Neugeboreneninfektion (n=619, 47,4%)
- Fehlbildungen (n=78, 6%)
- Intraventrikuläre Blutungen (n=59, 4,5%)

Ziel der weiteren Analyse ist, ob die erhaltene ED und das DFP pro Patient*in und pro Aufenthalt nicht nur mit der Unreife – Geburtsgewicht und Gestationsalter – sondern auch mit der Art der Diagnose korrelieren.

Die meisten Bilder erhielten Patient*innen mit der Diagnose BPD mit einer mittleren Anzahl von 9,9 Aufnahmen pro Patient*in. Sie befanden sich im Schnitt 97,1 Tage im stationären Aufenthalt, wogen im Mittel 727,8 g bei der Geburt und erhielten ein mittleres DFP von 1,2 mGy*cm² pro Aufnahme. Diese Zusammenhänge sind in Tabelle 30 auch für die restlichen Diagnosen dargestellt.

Die Analyse von Tabelle 30 brachte uns zu folgender Überlegung:

Patient*innen mit einer diagnostizierten NEC, intraventrikulären Blutung oder solche, die eine BPD entwickelten, wogen bei ihrer Geburt sehr wenig. Sie erhielten am Beginn ihres Lebens die meisten Aufnahmen, wiesen also am Tag der Röntgenaufnahme immer noch ein niedriges Gewicht auf. Da das Gewicht/ Körpergröße bestimmend für die Größe des kumulativen DFP ist, fiel dieses mit 18,6 mGy*cm² (BPD) und 17,3 mGy*cm² (NEC) trotz 9,9 (BPD) und 8,6 (NEC) Aufnahmen pro Patient*in im Vergleich nicht am höchsten aus.

Dennoch zeigt Abbildung 30, dass es in allen Gruppen Ausreißer gab; Patient*innen, die sowohl bei niedrigem Körpergewicht eine hohe Dosis und auch im weiteren Lebensverlauf mit zunehmendem Körpergewicht immer noch

viele Aufnahmen erhielten. Der letztere Aspekt führte insbesondere bei Patient*innen, welche eine intraventrikuläre Blutung entwickelten, zu einer im Mittel besonders hohen kumulativen Dosis mit im Schnitt $24,5 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$ pro Patient*in pro Aufenthalt. Die intraventrikuläre Blutung tritt nicht unmittelbar nach Geburt auf, bei der diese Kohorte im Schnitt 996g wog, sondern mit einer Verzögerung. Somit hatten die Patient*innen zum Zeitpunkt der Aufnahme zugenommen und wogen nun im Mittel 1389g . Dadurch wurden pro Aufnahme höhere Dosen verwendet von insgesamt $1,5 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$, als beispielsweise bei Patient*innen mit einer NEC ($1,25 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$) oder einer BPD ($1,2 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$), welche am Tag der Röntgenaufnahme insgesamt weniger wogen.

Ein ähnliches Bild zeichnete sich bei Kindern ab, die mit einer Fehlbildung geboren wurden. Bei einem initial höheren Geburtsgewicht erfolgten die Röntgenuntersuchungen postwendend bei höherem Gewicht am Tage der Untersuchung. Ergo betrug das DFP $2,8 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$ pro Aufnahme und begründete das hohe kumulative DFP von $24,1 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$ pro Aufenthalt.

Einen etwas moderateren Krankheitsverlauf zeichnete sich bei solchen ab, die ein ANS oder eine Neugeboreneninfektion aufwiesen. Patient*innen mit einem geringeren Gewicht bei Geburt erhielten im Mittel mehr Aufnahmen, die meisten Patient*innen erhielten jedoch mit $3,6$ (ANS) und $2,9$ (Neugeboreneninfektion) Aufnahmen pro Patient*in im Schnitt weniger Aufnahmen pro Aufenthalt. Trotz des höheren Körpergewichts am Aufnahmetag, somit eines höheren DFP pro Aufnahme, war das kumulative DFP bedingt durch die niedrige Anzahl der Bilder niedrig.

Tabelle 30: Diagnosen

	Anzahl der Patient*innen, n	Anzahl der Aufnahmen, n	Bilder pro Patient*in, Mittelwert (Spannweite)	Aufenthaltsdauer in Tagen, Mittelwert	Geburtsgewicht in g, Mittelwert	Gewicht am Tage der Röntgenaufnahme, Mittelwert	DFP pro Aufnahme in mGy*cm ² , Mittelwert	Kum. DFP pro Aufenthalt in mGy*cm ² , Mittelwert
BPD	93	944	9,9 (1-38)	97,1	727,8	1096	1,2	18,6
NEC	42	362	8,6 (1-37)	66	760,2	1088	1,3	17,3
intraventrikuläre Blutung	59	475	7,9 (1-38)	75,5	996	1389	1,5	24,5
PDA	214	1382	6,4 (1-22)	57,5	1098	1350	1,4	16,8
Fehlbildung	78	330	4,2 (1-28)	77,7	2563,6	2784	2,8	24,1
ANS	968	3470	3,6 (1-38)	35,9	1662	1830	1,8	14,1
Neugeboreneninfektion	619	1776	2,9 (1-31)	29,3	2028,6	2157	1,9	12,9

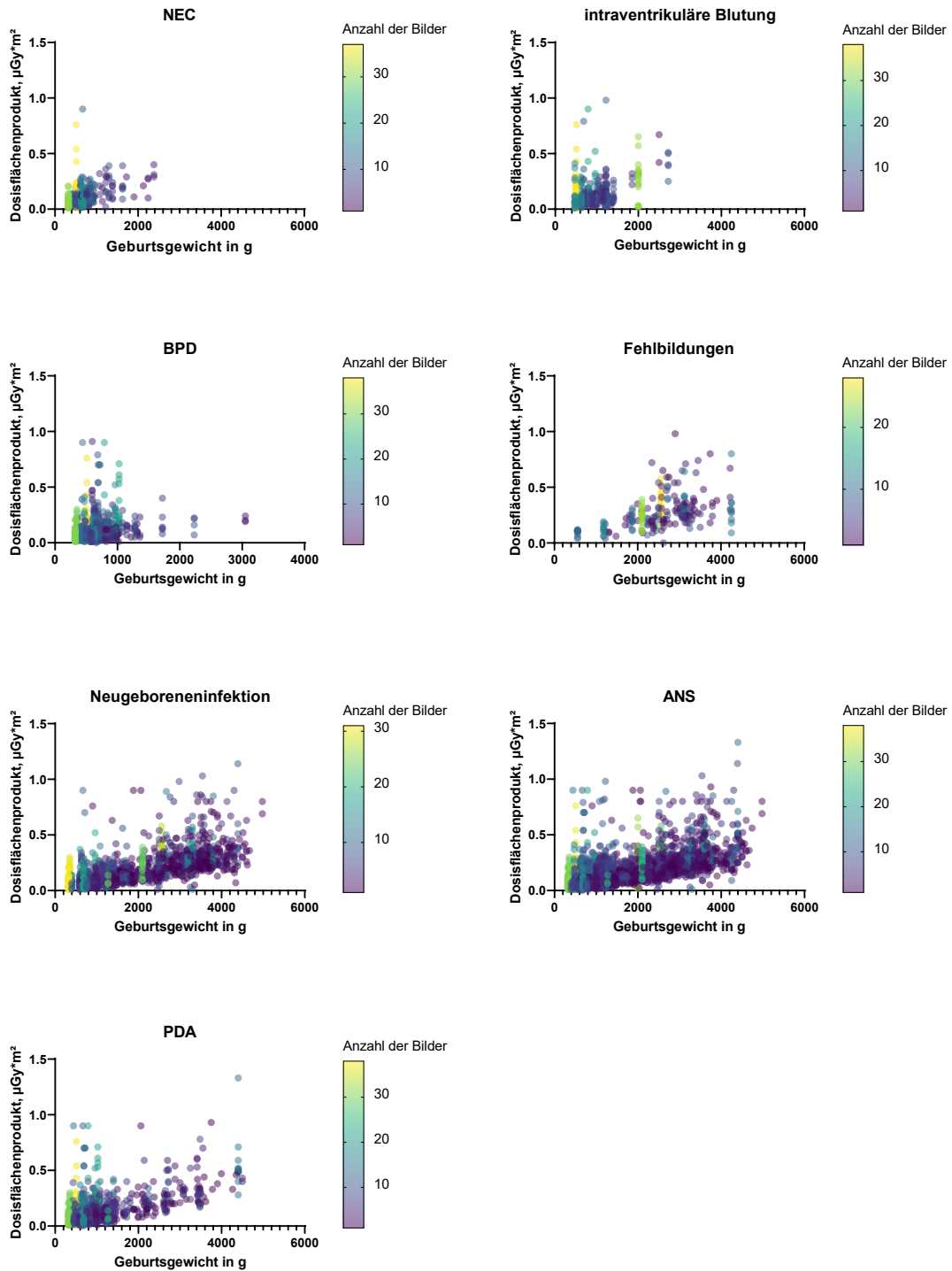


Abbildung 29: DFP pro Aufnahme bezogen auf das Geburtsgewicht in g und die Anzahl der Bilder pro Patient*in, Multiple Korrelation

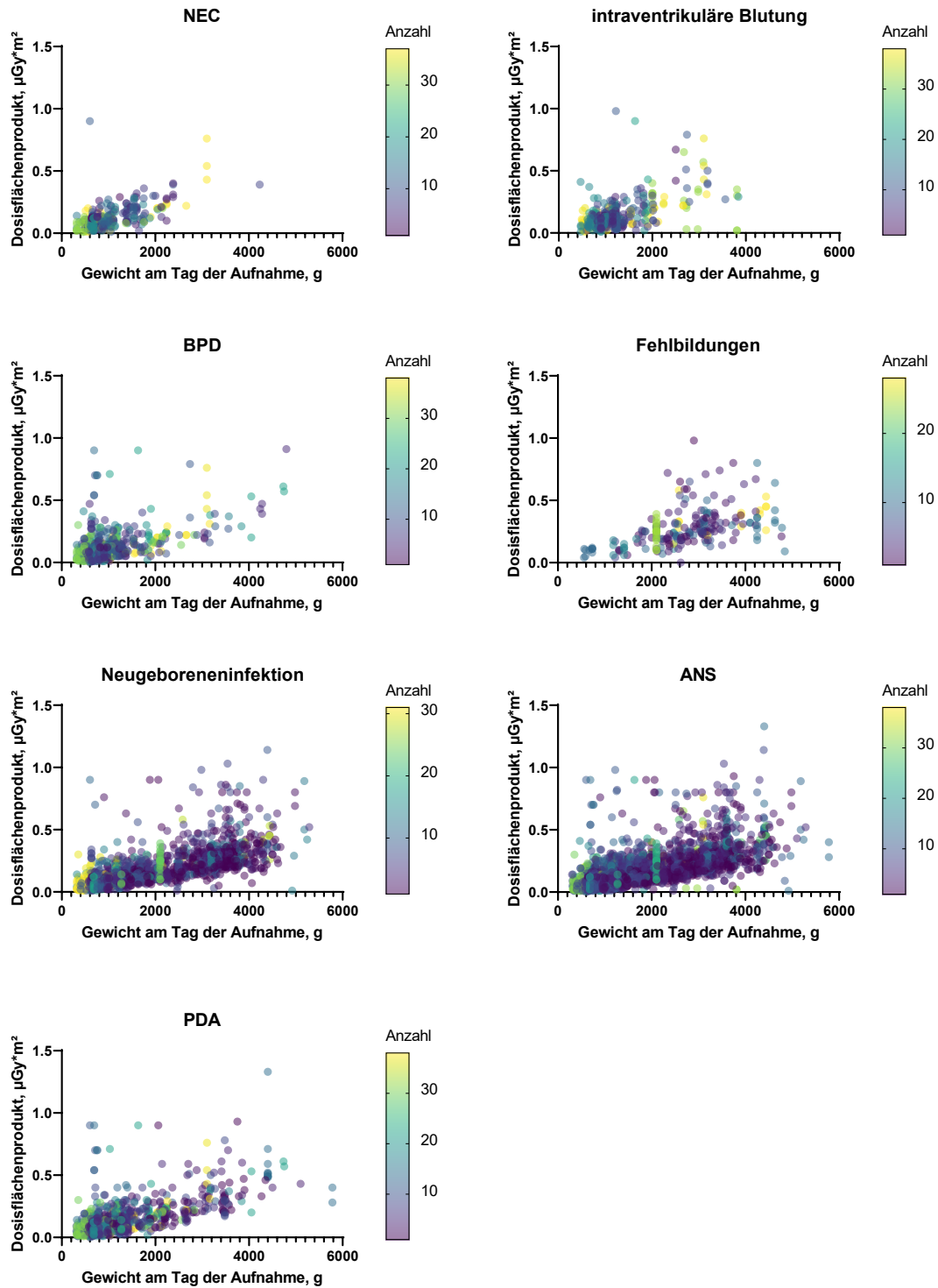


Abbildung 30: DFP pro Aufnahme bezogen auf das Gewicht am Tag der Aufnahme in g und die Anzahl der Bilder pro Patient*in, Multiple Korrelation

In Abbildung 31 findet sich die graphische Darstellung des kumulativen DFP bezogen auf das Geburtsgewicht je Diagnose, sowie die Anzahl der Bilder pro Patient*in.

In den Diagnosegruppen Neugeboreneninfektionen und ANS liegt eine relativ homogene Verteilung des kumulativen DFP vor. Dies liegt an der inversen Korrelation von Geburtsgewicht/ Anzahl der Bilder pro Patient*in und Gewicht/ DFP pro Aufnahme. Patient*innen mit einem niedrigeren Geburtsgewicht, erhielten mehr Röntgenaufnahmen, diese wiederum aber mit einem niedrigeren, gewichtsabhängigen DFP pro Aufnahme. Kranke Neugeborene mit einem hohen Geburtsgewicht, erhielten zwar weniger Aufnahmen, diese aber mit einem höheren DFP.

Anders gestaltete sich die Verteilung vom kumulativen DFP und der Anzahl der Bilder pro Patient*innen in den Gruppen, die mit einer NEC, intraventrikulären Blutungen oder einer BPD diagnostiziert wurden. Dort erhielten die Patient*innen die Aufnahmen überwiegend mit einem niedrigeren Gewicht, da das Geburtsgewicht niedrig war und die Manifestation der Erkrankungen perinatal stattfand. Somit fiel das höchste kumulative DFP hier auf diejenigen Patient*innen, welche die meisten Röntgenbilder erhalten haben.

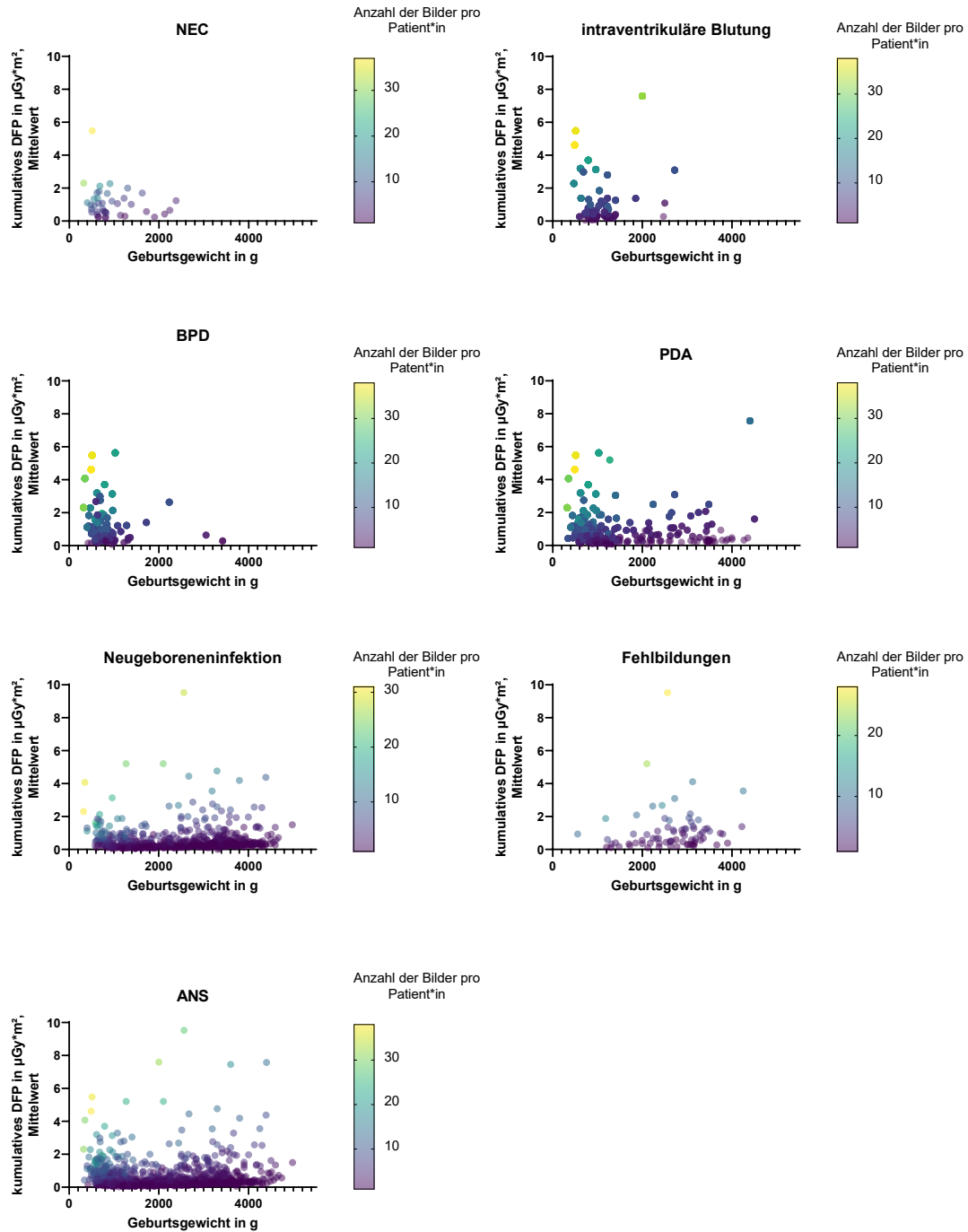


Abbildung 31: Kumulatives DFP bezogen auf das Geburtsgewicht in g und die Anzahl der Bilder pro Patient*in, Multiple Korrelation

5.5 Indikation, Therapeutische Konsequenz und Pathologischer Befund

5.5.1 Indikation

Die absolute und prozentuale Darstellung der Indikationen, sowie einer möglichen darauffolgenden Therapieänderung sind in Tabelle 31 sichtbar. Es gab Röntgenaufnahmen, welche mehrere Indikationen abdeckten.

Die meisten Therapieänderungen wurden nach der Kontrolle der Tubuslage, sowie nach der Kontrolle der Katheterposition durchgeführt. In 62% aller Aufnahmen, die zur Lagekontrolle des Tubus angefertigt wurden, war eine Korrektur der Lage oder sogar eine Umintubation nötig. Bei der Katheterkontrolle wurde die Lage in 61,6% der Fälle anschließend nachjustiert. Auch Drainagen wurden in 43,3% der Fälle lagekorrigiert. Drainagen, der Tubus und die entsprechenden Katheter sind für die kleinen Patient*innen lebensnotwendig, sodass ihre Funktionsfähigkeit entscheidend für den Therapieerfolg und die Prognose des Krankheitsverlaufes ist. Wir kommen zu dem Schluss, dass insbesondere diese drei Indikationen berechtigt zu der Anforderung eines Röntgenbildes anleiten, da sie wesentlich zur Optimierung der medizinischen Maßnahmen führten.

Ein akutes Abdomen oder der Verdacht einer beginnenden NEC veranlasste zur Indikation Röntgen Abdomen, mit in 45,8% darauffolgender Therapieänderung. Bei fast der Hälfte aller Aufnahmen mit Verdacht auf NEC fanden sich im Röntgenbild Zeichen einer NEC, die Aufnahmen sind für Pneumatosis intestinalis, freie Luft oder Luft in den Portalvenen sensibel und helfen maßgeblich bei der Entscheidung, im Anschluss die richtige Therapie zu wählen.

Es muss sich vor Augen geführt werden, dass bei respiratorischen Auffälligkeiten nur in 28,3% eine Änderung der Therapie wie etwa eine Intubation, die Verwendung von Überdruckbeatmung (CPAP) oder eine Surfactantapplikation erfolgte. Allerdings wurden gerade in dieser Kategorie, insbesondere bei respiratorischen Anpassungsstörungen (Tachypnoe,

Zyanose, sternale und interkostale Einziehung, Nasenflügel) direkt nach der Geburt die meisten Röntgenaufnahmen (n=1255) angefertigt.

495mal war der Grund für eine Röntgenaufnahme eine „Verlaufskontrolle“, immerhin in 26,5% der Fälle kam es zu einer Therapieänderung.

Tabelle 31: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf die Indikation und prozentuale Verteilung einer darauffolgenden Therapieänderung

Indikation	Anzahl der Indikationen (n=4420), n(%)	darauffolgende Therapieänderung, n(%)
Auffälligkeiten des resp. Systems	1255 (28,4)	355 (28,3)
Katheter (Braunülenkatheter (BK), NVK, NAK, ZVK)	986 (22,3)	607 (61,6)
Tubuslage	815 (18,3)	505 (62)
Verlaufskontrolle	495 (11,2)	131 (26,5)
Nach Surfactantapplikation	233 (5,3)	88 (37,8)
Akutes Abdomen; NEC	227 (5,1)	104 (45,8)
Drainagen	113 (2,6)	49 (43,4)

*fett markiert: >40% in der Spalte „darauffolgende Therapieänderung“

**Definition Therapieänderung: Im röntgenologischen Befund/ Visitendokumentation wurde ausdrücklich dokumentiert, dass nach dem Bild eine Änderung der Therapie erfolgt ist. z.B. Tubuslage rechter Hauptbronchus, folgende Änderung: Rückzug Tubus um z.B. 1cm.

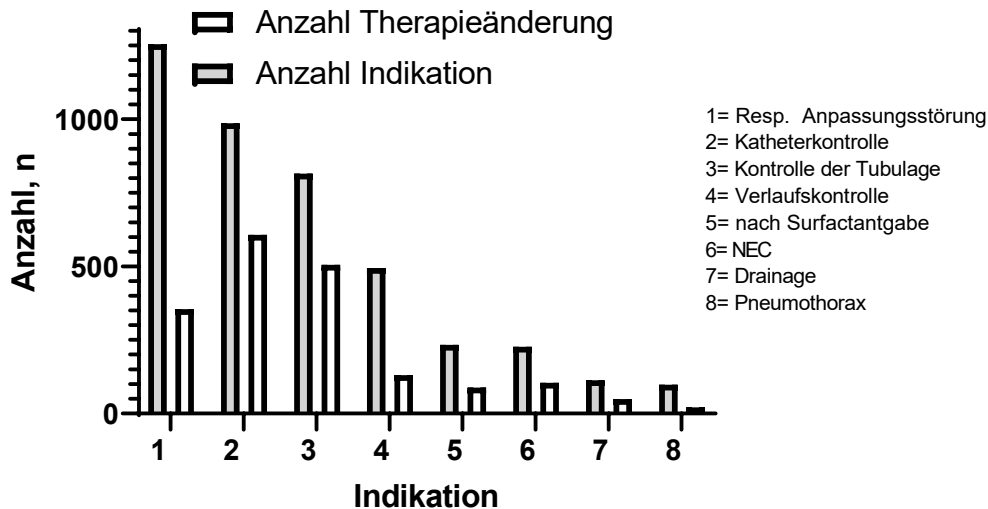


Abbildung 32: Gegenüberstellung der Indikation und der darauffolgenden Therapieänderung

Patient*innen der Gewichtsklasse <500 g und ≥500 g bis <1000 g erhielten die meisten Röntgenaufnahmen zur Kontrolle der Lagepositionen des Tubus und/ oder eines Katheters. Bei den Kindern ≥1000 g bis <1500 g wurde am häufigsten die Katheterlage kontrolliert, zweithäufigste Indikation war die Abklärung von Erkrankungen des respiratorischen Traktes. In den nachfolgenden Kategorien ≥1500 g bis <2500 g und ≥2500 g führten Fragestellungen nach Pathologien im respiratorischen System mit Abstand zu den meisten Aufnahmen (siehe Tabelle 32).

Aufnahmen aufgrund eines akuten Abdomens, Verdacht auf NEC oder zur Verlaufskontrolle einer gesicherten NEC wurden am häufigsten bei Patient*innen in der Kategorie ≥500g bis <1000g erstellt. Dort fielen diesbezüglich 129 Röntgenaufnahmen an, was 10,5% der in dieser Gewichtskategorie gemachten Röntgenaufnahmen entspricht (siehe Tabelle 32).

Tabelle 32: Indikation bezogen auf das Geburtsgewicht

Geburtsgewicht in g	Auffälligkeiten des resp. Systems	Katheter (BK, NVK, NAK, ZVK)	Tubuslage	Verlaufs kontrolle	Nach Surfactant	Akutes Abdomen; NEC	Drainagen
<500 g	18,2%	30,9%	28,4%	13,1%	2,5%	7,6%	1,7%
≥500 g bis <1000 g	16,0%	28,6%	25,3%	13,5%	7,5%	10,5%	0,6%
≥1000 g bis <1500 g	25,3%	29,1%	19,0%	9,5%	11,4%	5,4%	1,9%
≥1500 g bis <2500 g	37,6%	16,2%	15,7%	10,0%	5,8%	3,5%	5,1%
≥2500 g	44,0%	18,8%	14,9%	12,4%	1,1%	1,5%	4,0%

*Prozentzahlen bezogen auf die Gesamtzahl an Aufnahmen in den jeweiligen Geburtsgewichtskategorien.

5.5.2 Pathologischer Befund bezogen auf das Geburtsgewicht in g

In 76,7% der Fälle wurde ein pathologischer Befund nach Beurteilung der Röntgenaufnahmen gefunden.

Am häufigsten waren Auffälligkeiten des respiratorischen Systems notiert, diese nahezu in der Hälfte aller gemachten Röntgenaufnahmen. Zu den Auffälligkeiten des respiratorischen Systems wurden das ANS Stadium I bis IV, jegliche Transparenzminderungen oder Zeichnungsvermehrungen der Lunge, der Pneumothorax mit eventuellem Mediastinalshift, kleinzystische Aufhellungen der Lunge im Sinne einer BPD, Atelektasen, Dyselektasen, Infiltrationen der Lunge, Pleuraergüsse, Emphyseme, Lungenzysten, Lungenblutungen, Manifestationen von Pneumonie, Wet Lung Disease oder Lungenödeme und eventuelle Zwerchfellhoch- beziehungsweise Tiefstände gezählt. Den höchsten Anteil aller Aufnahmen machten Auffälligkeiten der Lunge in der Geburtsgewichtsgruppe <500 g aus. Dort zeigten 77,5% eben solche Auffälligkeiten. Der Anteil an den Aufnahmen nahm anschließend kontinuierlich ab, so dass in der Geburtsgewichtsgruppe ≥2500 g nur noch knapp die Hälfte der Bilder eine Auffälligkeit des respiratorischen Systems aufwies. Vor dem Hintergrund, dass die Lungenreife natürlich maßgeblich von der Schwangerschaftswoche und somit indirekt vom Geburtsgewicht abhängig ist, war dieser Trend zu erwarten.

latrogene Diagnosen fanden sich in 949 aller gemachten Aufnahmen (22,8%). Damit waren folgende Befunde gemeint: Inkorrekte Lage des endotrachealen Tubus, eines Einschwemmkatheters, eines NVK oder NAK, einer thorakalen

oder peritonealen Drainage und in Einzelfällen Fehllagen von Broviac-Kathetern oder eines ventrikulo-peritonealen Shunts (VP-Shunt). In einem Fall fiel in der Röntgenaufnahme ein abgerissener Katheter auf. Den höchsten Anteil verzeichneten die iatrogenen Diagnosen bei den besonders kleinen Patient*innen mit einem Geburtsgewicht von <1500g – knapp ein Drittel aller Bilder wies eine inkorrekte Lage von Kathetern, Drainagen oder Tuben auf.

Nekrotisierende Enterokolitis: Zeichen einer Pneumatosis intestinalis, freie abdominelle Luft, Luft in den Portalgefäßen oder einer Kontrastmittelverteilung außerhalb des Darms führten zur Befundung einer NEC im Röntgenbild. Dilatierte Darmschlingen, Meteorismus, ein deutlich geblähtes Abdomen und atypische Darmgasverteilungen ließen den Verdacht einer beginnenden NEC entstehen. In 378 Bildern, 9,1% aller Bilder, fanden sich entsprechende Untersuchungsergebnisse. Am häufigsten kamen diese Auffälligkeiten bei Kindern mit einem Geburtsgewicht von ≥ 500 g bis <1000 g mit 14,5% vor.

Bei Betrachtung der Befunde in Abhängigkeit mit dem Geburtsgewicht der Kinder wird deutlich, dass mit steigendem Geburtsgewicht mehr Aufnahmen angefertigt wurden, die im Nachhinein als unauffällig beurteilt wurden. So fand man bei Kindern <500 g in fast 92% aller Aufnahmen eine Pathologie, bei Kindern ≥ 2500 g waren 30,8% aller Aufnahmen blande.

Tabelle 33: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf den pathologischen Befund und das Geburtsgewicht

Pathologischer Befund	Anzahl der Bilder, die diese Pathologie zeigen, n(%)				
	<500g	≥ 500 g bis <1000g	≥ 1000 g bis <1500g	≥ 1500 g bis <2500g	≥ 2500 g
Anzahl der Bilder, n	236	1233	682	707	1309
Auffälligkeiten des resp. Systems					
Iatrogene Diagnose	80 (33,9)	367 (29,8)	178 (26,1)	112 (15,8)	212 (16,2)
NEC, Verdacht auf NEC	27 (11,4)	179 (14,5)	76 (11,1)	44 (6,2)	52 (4)
Kein pathologischer Befund	19 (8,1)	206 (16,7)	159 (23,3)	200 (28,3)	403 (30,8)

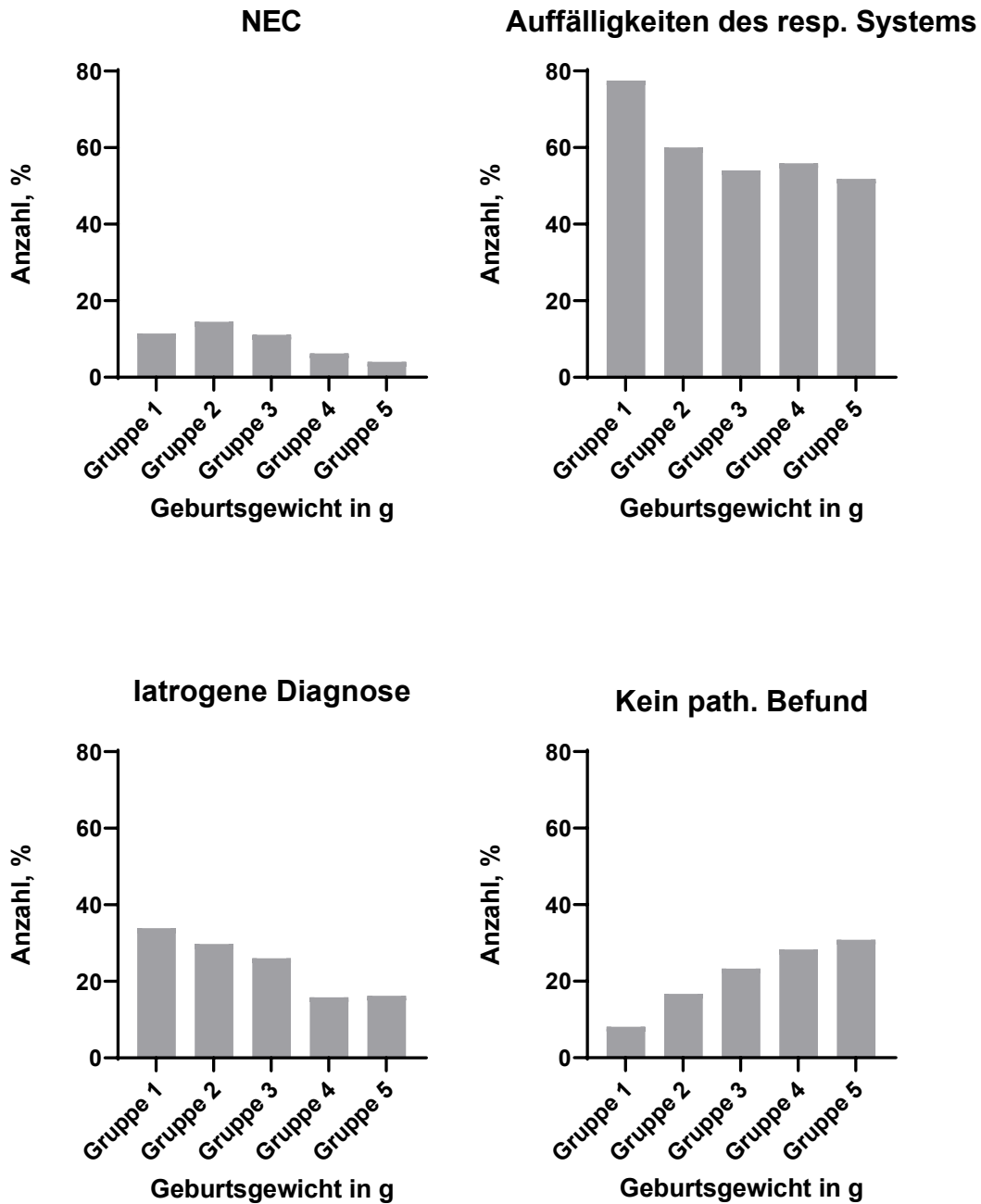


Abbildung 33: Häufigkeit (%) der diagnostierten NEC, Auffälligkeiten des resp. Systems, der iatrogenen Diagnosen und unauffälligen Befunde in Abhängigkeit vom Geburtsgewicht in g

5.5.3 Pathologischer Befund bezogen auf das Lebensalter in Tagen

Die meisten Bilder, die Auffälligkeiten des respiratorischen Systems oder eine iatrogene Diagnose zeigten, wurden an den ersten Lebenstagen angefertigt. Ihre Inzidenz fiel mit steigendem Lebensalter ab. Die NEC manifestierte sich

später, dies schlug sich in den prozentualen Werten nieder.

Ein Drittel aller unauffälligen Befunde (n=982) fanden sich bei Aufnahmen des ersten Lebenstages, an dem mit n=1404 die mit Abstand meisten Röntgenuntersuchungen insgesamt erfolgten. Die unauffälligen Befunde zeigten mit 24,9% aller Aufnahmen des ersten Lebenstages (n=1404), 21,1% am zweiten Tag (n=659) und 27,7% am dritten Lebenstag (n=299) eine Schwankung von 6,6% und sind somit als relativ konstant und von den ersten drei Lebenstagen als unabhängig zu werten.

Table 34: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf den pathologischen Befund und die Lebensstage

Pathologischer Befund	Anzahl der Bilder mit diesem path. Befund (n=4156), n(%)	Anzahl der Bilder, die am ersten Tag aufgenommen wurden (n=1404), n*(%**)	Anzahl der Bilder, die am zweiten Tag aufgenommen wurden (n=659), n(%)	Anzahl der Bilder, die am dritten Tag aufgenommen wurden (n=299), n(%)
Auffälligkeiten des respiratorischen Systems	2358 (56,7)	857 (36,3)	363 (15,4)	157 (6,7)
Kein pathologischer Befund	982 (23,6)	350 (35,6)	139 (14,1)	83 (8,5)
Iatrogene Diagnose	948 (22,8)	229 (24,2)	199 (21)	77 (8,1)
NEC, Vorstufen NEC	378 (9,1)	55 (14,6)	43 (11,4)	19 (5)

*n= Anzahl der Bilder, die in diesem Zeitraum aufgenommen wurden und den entsprechenden pathologischen Befund aufwiesen

**%=Anteil dieser Bilder zum Zeitpunkt x an der Gesamtzahl der Bilder mit diesem pathologischen Befund (z.B. 857/2358)

(Dies gilt für die Tabellen: 34, 35, 36)

5.5.4 Pathologischer Befund bezogen auf das Lebensalter in Wochen

Bezogen auf die Gesamtanzahl der Aufnahmen in Lebenswoche 1-4 (siehe Tabelle 35) wurden respiratorische Pathologien anteilig mit 57,4% in Lebenswoche 1, mit 54% in der zweiten Woche, 57% in der dritten Woche und zu 58% in Woche 4 beschrieben. Die Frühgeborenen und kranken Neugeborenen scheinen insgesamt sehr lange unter Problemen des Respirationstraktes zu leiden, so dass dadurch bedingte Aufnahmen unabhängig der Lebenswoche in 50-60% der Fälle stets gleich vertreten sind.

Einen ähnlichen Eindruck lieferte uns die Auswertung der iatrogenen Diagnosen in Bezug auf das Lebensalter. 21,5% von n=2728 Bildern der Lebenswoche 1, 27,5% bei n=348 in Woche 2, 28,8% in Woche 3 zu 27,5% in Lebenswoche 4 zeigten falsch positionierte Tuben, Katheter oder Drainagen. So scheint auch dieses Problem eher weniger abhängig von dem Lebensalter der Patient*innen, als vielmehr abhängig von anderen Faktoren wie dem Geburtsgewicht und der Körpergröße.

Die NEC oder ihre Vorstufen, auftretend in 378 der Röntgenaufnahmen, nahm mit 6,1% aller Bilder (n=2728) in Lebenswoche 1, 14,1% in Lebenswoche 2, über 16,9% der in der dritten Lebenswoche gemachten Aufnahmen (n=302) bis hin zu 17,6% aller Aufnahmen in Woche 4 zu. Dies deckt sich mit der Tatsache, dass sich die NEC nicht unmittelbar nach der Geburt manifestiert, sondern in den allermeisten Fällen eine Anlaufzeit von zwei bis vier Wochen benötigt, um aufzutreten.

Einzig der unauffällige Befund schien mit dem Lebensalter gleichsinnig zu korrelieren. Mit steigendem Lebensalter fiel der relative prozentuale Anteil der unauffälligen Befunde ab. Von den 2728 der in Lebenswoche 1 gemachten Bilder zeigten 666 und damit 24,4% aller Bilder einen unauffälligen Befund, 22,7% aller Bilder in Lebenswoche 2, 18,2% in der dritten Woche und nur noch 17,6% aller Bilder in Woche 4. Ursächlich sind die Unterschiede der Patient*innenpopulation. So waren unter den Patient*innen, welche in der ersten Lebenswoche eine Röntgenaufnahme erhielten viele, die ein hohes Geburtsgewicht (Mittelwert: 2613g) und damit auch ein hohes Gewicht am Tag der Aufnahme (Mittelwert: 2167g) aufwiesen. In der Gruppe der Patient*innen, welche spät, also in der vierten Lebenswoche noch Röntgenaufnahmen erhielten, gab es viele, welche bei Geburt sehr wenig wogen (Mittelwert: 1189g) und dieses Gewichtsdefizit am Tag der Röntgenaufnahme in der vierten Lebenswoche immer noch nicht aufgeholt hatten, sodass der Mittelwert des Gewichtes zu diesem Zeitpunkt nur 1308g betrug. Da pathologische Befunde häufiger bei Kindern mit einem niedrigerem Geburtsgewicht zu finden waren, erklärt sich so die Verteilung, sprich die prozentuale Abnahme der unauffälligen Befunde bei voranschreitender Lebenswoche.

Tabelle 35: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf den pathologischen Befund und die Lebenswochen

Pathologischer Befund	Anzahl der Bilder mit diesem path. Befund (n=4156), n	Anzahl der Bilder, die in den ersten 7 Tagen aufgenommen wurden (n=2728), n(%)	Anzahl der Bilder, die in der zweiten Lebenswoch e aufgenommen wurden (n=348), n(%)	Anzahl der Bilder, die in der dritten Lebenswoch e aufgenommen wurden (n=302), n(%)	Anzahl der Bilder, die in der vierten Lebenswoch e aufgenommen wurden (n=193), n(%)
Auffälligkeiten des respiratorischen Systems	2358	1566 (66,4)	188 (8)	172 (7,3)	112 (4,7)
Kein pathologischer Befund	982	666 (67,8)	79 (8)	55 (5,6)	34 (3,5)
Iatrogene Diagnose	948	586 (61,8)	96 (10)	87 (9,2)	53 (5,6)
NEC, Vorstufen NEC	378	166 (43,9)	49 (13)	51 (13,5)	34 (9)

5.5.5 Pathologischer Befund bezogen auf das Lebensalter in Monaten

Auffälligkeiten des respiratorischen Systems fielen mit 57,2% aller Aufnahmen (n=3616) vor allem in dem ersten Lebensmonat ins Gewicht, während sie im zweiten Lebensmonat nur noch 49,8% der Aufnahmen (n=317) ausmachten. Iatrogene Diagnosen wurden mit 22,9% aller Bilder im ersten und 24,9% aller Bilder im zweiten Lebensmonat ungefähr gleich häufig gefunden. Dies war vor dem Hintergrund des Heranwachsens der Kinder, der Zunahme der Körpergröße und somit der leichteren Anlage der Katheter eher unerwartet. Die NEC manifestierte sich häufiger bei Aufnahmen im zweiten Lebensmonat mit 18% von allen Bildern (n=317) im Vergleich zu den 8,6% aller 3616 Bilder aus dem ersten Lebensmonat.

Mit 25,2% fanden sich im zweiten Lebensmonat nahezu gleich viele Bilder, die einen unauffälligen Befund aufwiesen, verglichen mit dem ersten Lebensmonat mit 23,3%.

Tabelle 36: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf den pathologischen Befund und die Lebensmonate

Pathologischer Befund	Anzahl der Bilder mit diesem path. Befund (n=4156), n	Anzahl der Bilder, die im ersten Lebensmonat gemacht wurden (n=3616), n(%)	Anzahl der Bilder, die im zweiten Lebensmonat gemacht wurden (n=317), n(%)
Auffälligkeiten des respiratorischen Systems	2358	2069 (87,7)	158 (6,7)
Kein pathologischer Befund	982	842 (85,7)	80 (8,1)
Iatrogene Diagnose	948	827 (87,2)	79 (8,3)
NEC, Vorstufen NEC	378	311 (82,3)	57 (15,1)

5.5.6 Therapeutische Konsequenz bezogen auf das Geburtsgewicht

Von insgesamt 4056 Bildern ließ sich evaluieren, ob anschließend eine Therapieänderung erfolgte oder ob eine solche ausblieb. In 38,1% der Fälle, gab es nach dem erfolgten Röntgenbild eine therapeutische Konsequenz, die so dokumentiert wurde, dass sie auch im Nachhinein nachvollziehbar war. Es ist davon auszugehen, dass Bilder, in Folge deren keine Therapieänderung gefunden werden konnte, dennoch eine solche Änderung nach sich zogen. Besonderes Augenmerk sollte deswegen nicht auf die absoluten Zahlen, sondern auf die generelle Häufigkeitsverteilung gelegt werden.

Die prozentuale Darstellung ist in Tabelle 37 sichtbar. Wichtig ist, auf die Tendenzen zwischen den einzelnen Geburtsgewichtgruppen zu achten.

Je schwerer die Kinder und damit je reifer sie wurden, desto weniger Therapieänderung folgten auf ein Röntgenbild. Wo es in der Kategorie <500 g und ≥500 g bis <1000 g noch knapp die Hälfte der Aufnahmen waren, die im Endeffekt zur einer Therapieänderung führten, so waren es bei den Kindern ≥2500 g 71,4% der Bilder, die ohne jegliche Konsequenz blieben.

Pathologien des Atmungsapparates korrelierten ebenfalls mit der Unreife der Patient*innen, die Anzahl an Änderungen der Beatmungstherapie (Intubation, CPAP, usw.) nahm konstant mit steigendem Gewicht ab. Bei 18,6% der Bilder in der Kategorie des Geburtsgewichtes <500 g wurden anschließend therapeutische Maßnahmen eingeleitet, bei den Kindern ≥ 2500 g waren es nur noch 9,4% der Bilder. Auch die Gabe von Surfactant korrelierte negativ mit dem Geburtsgewicht.

Therapeutische Maßnahmen, die infolge einer NEC oder dem Verdacht auf NEC eingeleitet wurden, waren mit 1,3% insbesondere in der Gewichtskategorie <500 g nötig, bei den Kindern ≥ 2500 g war dies nach lediglich in 0,07% aller Aufnahmen der Fall.

Die verschiedenen therapeutischen Konsequenzen wurden für die jeweiligen Geburtsgewichtskategorien mittels Yates-Cochran-Test auf einen Trend untersucht. Die therapeutischen Konsequenzen stehen in einem Zusammenhang mit dem Geburtsgewicht (Chi-Quadrat=62,44, $p=0.000000$).

Tabelle 37: Häufigkeiten der therapeutischen Konsequenz bezogen auf das Geburtsgewicht

Therapeutische Konsequenz	≤ 500 g	>500 g bis ≤ 1000 g	>1000 g bis ≤ 1500 g	>1500 g bis ≤ 2500 g	>2500 g
Anzahl der Bilder	236	1233	682	707	1309
Keine Änderung	54,20%	53,40%	57,80%	68,50%	71,40%
Korrektur eines Katheters	20,30%	18,70%	17,90%	11,50%	11,50%
Beatmungstherapie	18,60%	17,20%	13%	8,50%	9,40%
Surfactant	4,20%	7,30%	7,90%	6,60%	1,90%
Drainage	2,50%	0,60%	1,50%	4,40%	3,20%
Nahrungspause/ Darmspülung	1,30%	1,10%	1,10%	1,10%	0,07%

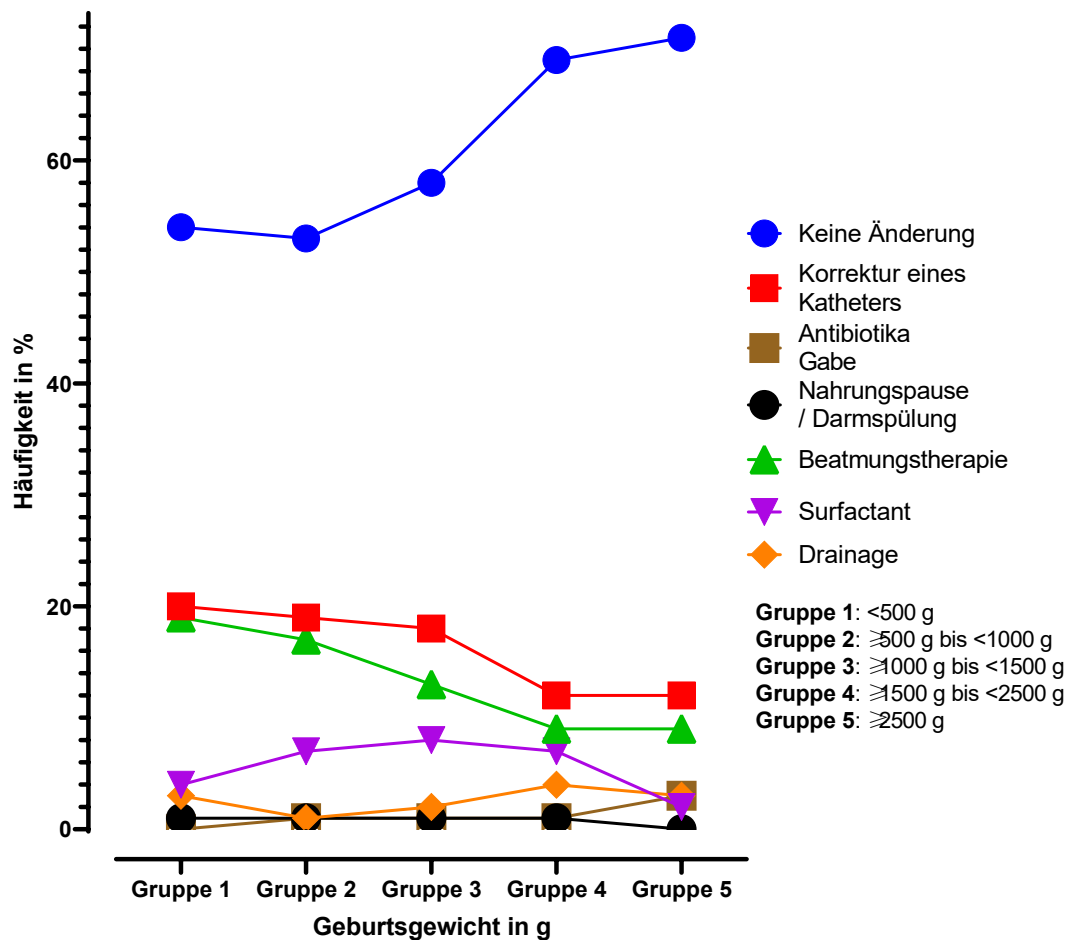


Abbildung 34: Häufigkeiten (%) der therapeutischen Konsequenz bezogen auf das Geburtsgewicht in g

5.5.7 Therapeutische Konsequenz bezogen auf das Lebensalter in Tagen

Der gesundheitliche Zustand ist bei den Frühgeborenen und kranken Neugeborenen in den meisten Fällen unmittelbar nach der Geburt am instabilsten und bedarf in diesem Zeitraum nicht nur den höchsten diagnostischen Aufwand, sondern auch den höchsten Therapeutischen.

Nicht nur die Anzahl der Aufnahmen nahmen mit steigendem Lebensalter ab, sondern auch die Anzahl an erfolgten Therapieänderungen.

Bei 15,6% aller Röntgenbilder (n=4056) wurde im Anschluss die Lage eines Katheters verändert. Zum Teil direkt aus der Indikation „Erbitte Lagekontrolle

des Katheters“ resultierend, zum Teil fiel die inkorrekte Lage der Katheter aber auch als Zufallsbefund bei Aufnahmen auf, die ursprünglich zu einem anderen Zweck angefertigt wurden. Die meisten von diesen Veränderungen erfolgten am ersten und zweiten Lebenstag.

13,1% aller Bilder zogen eine initiale respiratorische Therapie im Sinne einer Intubation, einer CPAP-Anlage oder einer Sauerstoff (O₂)-Therapie nach sich. Bei 5,6% der Aufnahmen wurde im Anschluss Surfactant via Magensonde oder direkt über den Tubus appliziert. Den Erwartungen entsprechend erfolgte 70,8% aller Surfactantapplikationen an Lebenstag 1, in 18,5% an Lebenstag 2 und in nur 4% an Lebenstag 3.

Es gibt eine große Anzahl an Bildern (n=2469), welche nicht unmittelbar zu einer nachvollziehbaren Therapieänderung führten. Dies entspricht mit 59,4% weitaus mehr als der Hälfte aller Aufnahmen. Die meisten solcher Aufnahmen entstanden mit 907 (35,3%) am ersten Lebenstag. Zusammenfassend wurde bei 64,6% aller am ersten Lebenstag angefertigten Aufnahmen, bei 57,5% derjenigen vom zweiten Tag und bei 62,5% aller am 3ten Lebenstag aufgenommenen Aufnahmen, keine Therapie eingeleitet oder eine bestehende Therapie fortgeführt.

Dargestellt werden diese Zusammenhänge in Tabelle 38.

Tabelle 38: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf die therapeutische Konsequenz und das Lebensalter in Tagen

Therapeutische Konsequenz	Anzahl der Röntgen aufnahmen (n=4056), n(%)	Anzahl der Interventionen am 1. Lebenslag (n=1404)*, n(%)**	Anzahl der Interventionen am 2. Lebenslag (n=659), n(%)	Anzahl der Interventionen am 3. Lebenslag (n=299), n(%)
Keine Änderung	2469 (59,4)	907 (35,3)	379 (14,8)	187 (7,3)
Korrektur eines Katheters	633 (15,2)	154 (24,3)	143 (22,6)	63 (10)
Beatmungsänderung	533 (12,8)	174 (32,6)	67 (12,6)	33 (6,2)
Surfactant Gabe	226 (5,4)	160 (70,8)	42 (18,5)	9 (4)
Drainage	96 (2,3)	15 (15,6)	23 (25)	9 (9,3)
Nahrungspause/ Darmspülung	65 (1,6)	3 (4,6)	3 (4,6)	0 (0)
Operation (OP)	32 (0,8)	3 (9)	7 (21,9)	1 (3,1)

*n=1404/ 659/ 299 bezieht sich auf die insgesamt Anzahl an Therapieänderung, die in diesem Zeitraum (z.B 1. Lebensstag) erfolgt sind

**n(%) gibt die absolute Anzahl der Therapieänderungen in den jeweiligen Kategorien in Abhängigkeit zu den Lebenstagen an. Diese Anzahl n wird in Relation zu den insgesamt in den Kategorien erfolgten Röntgenaufnahmen gesetzt (z.B 907/2496)
(Dies gilt für alle Tabellen 38, 39, 40)

5.5.8 Therapeutische Konsequenz bezogen auf das Lebensalter in Wochen

Innerhalb der ersten Lebenswoche erfolgten 2728 Röntgenaufnahmen, 348 Bilder waren es in der zweiten Woche, nur noch 302 in der 3. Lebenswoche und letztendlich 193 in der 4. Lebenswoche. Auch dies ist auf eine Stabilisierung des gesundheitlichen Zustandes im Laufe der Zeit zurückzuführen.

Von allen Korrekturen der Katheter und von allen Änderungen einer Beatmungstherapie erfolgten die meisten in der ersten Lebenswoche mit 419 (Korrektur eines Katheters) und 303 (Änderung einer Beatmungstherapie). Surfactant wurde mit 97,8% am häufigsten in der ersten Lebenswoche gegeben.

Die meisten Aufnahmen wurden in der ersten Lebenswoche gemacht, hier erfolgten auch die meisten Röntgenaufnahmen, die keine Therapieänderung nach sich zogen (n=1700). Dies entsprach 62,3% aller in der ersten

Lebenswoche gemachten Bilder, 60,3% derjenigen der zweiten Lebenswoche, 56,6% in Lebenswoche 3 und 59,1% in Woche 4. Dies verleitet zu der Aussage, dass unabhängig der Lebenszeit, konstant bei ca. 40% aller Bilder eine Initiierung oder eine Änderung der Therapie erfolgt.

Tabelle 39: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf die therapeutische Konsequenz und das Lebensalter in Wochen

Therapeutische Konsequenz	Anzahl (n=4156), n(%)	Anzahl der Interventionen innerhalb der ersten 7. Lebensstage (n=2728), n(%)	Anzahl der Interventionen innerhalb der 2. Lebenswoche (n=348), n(%)	Anzahl der Interventionen innerhalb der 3. Lebenswoche (n=302), n(%)	Anzahl der Interventionen innerhalb der 4. Lebenswoche (n=193), n(%)
Keine Änderung	2569 (62,5)	1700 (62,2)	210 (8,2)	171 (6,7)	114 (4,4)
Korrektur eines Katheters	633 (15,2)	419 (66,2)	60 (9,5)	44 (6,9)	30 (4,7)
Beatmungsänderung	533 (12,8)	303 (56,8)	54 (17,8)	60 (11,3)	36 (6,8)
Surfactant Gabe	226 (5,4)	221 (97,8)	2 (0,8)	1 (0,4)	1 (0,4)
Drainage	96 (2,3)	76 (89,6)	11 (11,5)	1 (1)	1 (1)
Nahrungspause /Darmspülung	65 (1,6)	14 (21,5)	10 (15,4)	18 (27,7)	7 (10,8)
OP	32 (0,8)	17 (53,1)	7 (21,9)	3 (9,4)	2 (86,3)

5.5.9 Therapeutische Konsequenz bezogen auf das Lebensalter in Monaten

In Tabelle 40 dargestellt finden sich etwaige Therapieänderungen, bezogen auf den ersten und den zweiten Lebensmonat. Die meisten Aufnahmen (n=3616) wurden im ersten Lebensmonat gemacht, wobei berücksichtigt werden muss, dass sich in diesem Zeitraum mehr Kinder in stationärer Betreuung befanden als im zweiten Lebensmonat. Dabei erfolgten in beiden Kategorien die meisten Änderungen zur Korrektur der Katheterlage, gefolgt von Änderungen der Beatmungstherapie.

Tabelle 40: Anzahl der Röntgenaufnahmen bezogen auf die therapeutische Konsequenz und das Lebensalter in Monaten

Therapeutische Konsequenz	Anzahl (n=4156), n(%)	Anzahl der Interventionen innerhalb der ersten 30. Lebenstage (n=3616), n(%)	Anzahl der Interventionen innerhalb des 2. Lebensmonats (n=317), n(%)
Keine Änderung	2569 (62,5)	2227 (86,7)	204 (7,9)
Korrektur eines Katheters	633 (15,2)	559 (88,3)	51 (8,5)
Beatmungsänderung	533 (12,8)	455 (85,4)	50 (9,4)
Surfactant Gabe	226 (5,4)	225 (99,6)	0 (0)
Drainage	96 (2,3)	90 (93,8)	2 (2,1)
Nahrungspause/ Darmspülung	65 (1,6)	50 (76,9)	13 (20)
OP	32 (0,8)	(90,6)	0,6 (9,4)

6. Diskussion

Hauptziel dieser Arbeit war es, die Strahlenbelastung der Patient*innen in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren zu evaluieren, mit Referenz- und Literaturwerten zu vergleichen, um die Empfehlungen einer möglichen Strahlenreduktion zu formulieren.

6.1 Frequenzen der Röntgenaufnahmen in Abhängigkeit von Geburtsgewicht, Gestationsalter und Aufenthaltsdauer

Ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der gemachten Röntgenaufnahmen, der Unreife der Neugeborenen, der Aufenthaltsdauer und der gesicherten Diagnosen war zu erwarten^{4,35,48}.

Diese Studie hat ergeben, dass Früh- und Neugeborene der NICU mit einem niedrigeren Geburtsgewicht und/oder Gestationsalter im Mittel mehr Röntgenaufnahmen pro Aufenthalt erhielten und die Aufenthaltsdauer insgesamt länger ist (siehe Tabelle 41).

So erhielten Patient*innen mit einem Geburtsgewicht von <750 g im Mittel 10,1 (Spannweite 1 bis 38 Aufnahmen) Röntgenaufnahmen; dies fällt im literarischen Vergleich niedrig aus.

Wir haben die Frequenz der Röntgenaufnahmen in Abhängigkeit von Geburtsgewicht, Gestationsalter und Aufenthaltsdauer mit sechs verschiedenen Studien aus den Jahren 1996 bis 2014 verglichen. Auffällig war hierbei eine generelle Abnahme der durchschnittlichen Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Aufenthalt im Laufe der Jahre. In den Jahren 1996 bis 2006, entstanden in der niedrigsten Gewichtsklasse von < 750 g und in der Kategorie 24-27,9 SSW Mittelwerte von 31 Aufnahmen³⁵ (1996), 26 Aufnahmen⁴ (2002) und 19,5 Aufnahmen³⁶ (2006), während Puch-Kapst et al.¹⁸ in ähnlichen Kategorien einen durchschnittlichen Wert von 11 Aufnahmen (2009) ermittelte und wir retrospektiv für die Jahre 2013 bis 2018 einen Wert von 10,1 bestimmen konnten.

2008 ermittelte die Studie von Smans et al.²⁹ einen mittleren Wert von 9,6 Aufnahmen pro Patient*in für ein Geburtsgewicht <1000 g, 2014 waren es 15,4

Aufnahmen pro Patient*in in der Studie von Dabin et al.²⁶ In unserer Studie erhielten Frühgeborene dieser Gruppe (<1000 g) nur 7,7 Aufnahmen.

Das Uniklinikum befindet sich, diesem zeitlichen Trend folgend, im internationalen Vergleich an der unteren Grenze der gemachten Röntgenuntersuchungen.

Es gibt eine deutliche Varianz der mittleren Frequenz der Röntgenaufnahmen, (zwischen 9,6 Aufnahmen²⁹ und 31 Aufnahmen³⁵), welche zwischen den einzelnen Studien und Institutionen existiert. Sogar innerhalb der einzelnen Patientengruppen herrschen gravierende Unterschiede. Das Kind mit den wenigsten Aufnahmen in der Kategorie <500 g dieser Studie erhielt eine Aufnahme, das mit den meisten 38 Aufnahmen.

Diese Variation resultiert nicht nur – wie oben dargestellt – aus dem zeitlichen Abwärtstrend, sondern auch auf ungleichen Kohorten. Die Patient*innen unterscheiden sich nach ihren Diagnosen und nach der Schwere ihrer Erkrankung. Das Universitätsklinikum Frankfurt ist ein Level 1 NICU, behandelt gebündelt diejenigen, deren gesundheitlicher Zustand am gravierendsten ist und diejenigen, die mehr Diagnostik benötigen. Dementsprechend erscheint die durchschnittliche Anzahl der Röntgenaufnahmen, welche im internationalen Vergleich niedrig ist, im Einklang mit dem aktuellen medizinischen Standard.

Andererseits können diese Unterschiede aber auch auf unterschiedlicher Handhabung der Röntgendurchführung basieren. So wäre es möglich, dass die Anforderung „Röntgen“ in einigen Institutionen öfter und schneller gestellt wird, während andere Häuser eher restriktiv vorgehen. Wenn dem so sei, könnten eine einheitlichere Handhabung und klare internationale Indikationsleitlinien womöglich zu einer Minimierung der Aufnahmen führen.

Ohne Berücksichtigung jeglicher Parameter, wie etwa dem Geburtsgewicht oder dem Gestationsalter, erhielten die Patient*innen unserer Studie im Mittel 3,19 Röntgenaufnahmen pro Aufenthalt. Dies deckt sich in etwa mit den Werten der Literatur – 3,2 Aufnahmen¹⁶, 4 Aufnahmen¹⁸, 4,75 Aufnahmen⁴⁹, 5 Aufnahmen⁵⁰, 5,3 Aufnahmen⁵¹, 6 Aufnahmen²⁸ und 10 Aufnahmen⁵², hat

aber aufgrund der unterschiedlichen Patient*innen-Populationen, sowie Studiengrößen (in der Literatur oft sehr klein) keine große Aussagekraft.

Tabelle 41: Frequenz der Röntgenaufnahmen in Abhängigkeit von Geburtsgewicht, Gestationsalter und Aufenthaltsdauer

Referenz	Geburtsgewicht	Aufenthalts- dauer in Tagen	Anzahl der Röntgen- aufnahmen	Gestionsalter in Tagen, Mittelwert
Diese Studie 2020 <i>Mittelwert±SD</i> <i>[Median</i> <i>(Spannweite)]</i>	<500 g	109,3±67 [129 (195)]	13,9±10,3 [10 (1-38)]	173,4
	≥500 g bis <1000 g	73,7±42,9 [78 (255)]	7,1±5,4 [6 (1-37)]	183,2
	≥1000 g bis <1500 g	49,3±25,3 [54 (166)]	3,6±3,6 [2 (1-24)]	204,7
	≥1500 g bis <2500 g	27,1±20,7 [24 (194)]	2,3±2,7 [1 (1-32)]	234,6
	≥2500 g	12,6±14,2 [8 (96)]	2,12±2,4 [1 (1-28)]	270,6
Wilson Costello D. et al.³⁵ 1996 <i>Mittelwert</i> <i>(Spannweite)</i>	<750 g	115 (77-175)	31 (12-59)	177,8
Ono K. et al.⁴ 2002 <i>Median</i> <i>(Spannweite)</i>	<750 g	172 (110-389)	25,9	187
	750 g -1000 g	126 (74-236)	18,6	191
	1000 g-500 g	73,6 (40-139)	8,6	217
	1500 g-2500 g	23,8 (1-301)	2,6	251
	>2500 g	8,5 (1-131)	3,2	274
Dabin et al.²⁶ 2014 <i>Mittelwert (Median)</i>	<1000 g	-	15,4 (11)	-
	>1000 g	-	5,9 (4)	-
Puch-Kapst et al.¹⁸ 2009 <i>Median</i> <i>(Spannweite)</i>	<750 g	97,5 (2-291)	11 (1-82)	-
	750-1000 g	74,5 (6-135)	7 (1-26)	-
	1000g-1250 g	52 (14-247)	2,5 (1-54)	-
	1250 g-1500 g	46 (14 -286)	2 (1-54)	-
	>1000 g-1500g	-	2 (1-54)	-
Smans et al.²⁹ 2008 <i>Mittelwert</i>	<1000 g	-	9,6	-
Donadieu J et al.³⁶ 2006 <i>Median</i>	-	-	19,5	168-195,3
	-	-	8	196-223,3
	-	-	2	224-237,3

6.2 Arten der Röntgenaufnahmen und bestrahltes Areal

Die Röntgenaufnahme, die in dieser Studie am häufigsten gemacht wurde, war die Thoraxaufnahme. Dies gilt für alle Gewichtsklassen und alle Gestationsalter. Während sich in der Literatur eine ähnliche Situation zeigte^{18,50,35,16,26,53,49,29}, war die Thoraxabdomenaufnahme die vorherrschende Aufnahmetechnik bei Ono K. et al.⁴, begründet mit dem Vorteil einer gleichzeitigen Aufnahme von Abdomen und Thorax in nur einer Aufnahme.

Bei der zweiten Bewertung unserer Röntgenbilder teilten wir 47,5% aller Aufnahmen in die Kategorie Thoraxabdomenaufnahmen ein. Im Vergleich zu den anderen Studien liegt der Wert von 47,5% Thoraxabdomenaufnahmen nur mit den Werten von Ono K. et al.⁴ und Donadieu et al.³⁶ gleichauf (siehe Tabelle 42).

Die Indikation für eine Thoraxabdomenaufnahme sollte immer streng hinterfragt werden, da die ED und das DFP pro Röntgenaufnahme höher sind. Es gibt teilweise Indikationen, wie etwa die bildliche Darstellung eines Nabelvenenkatheters oder eines ventrikuloperitonealen Shunts, die eine Thoraxabdomenaufnahme verlangen. Doch diese Aufnahmen sollten nicht als Routineaufnahmen durchgeführt werden, wenn sich das Organ von Interesse allein im Thorax bzw. im abdominellen Bereich befindet.

Es bereitete klinisch mitunter Schwierigkeiten bei Thoraxaufnahmen nur den Thorax abzubilden und bei Abdomenaufnahmen nur das Abdomen. Die Folge waren Thoraxabdomenaufnahmen, die dennoch in der ursprünglich angeforderten Kategorie „Thorax“ und „Abdomen“ gespeichert wurden.

Dies führte uns zu der Fragestellung, ob und wie offiziell die einzelnen Bereiche „Thorax, Thoraxabdomen und Abdomen“ definiert sind. Die European Commission (EC), die WHO und die Leitlinien der Bundeärztekammer empfehlen eine größentechnische Einstellung der Bilder und definierten die Areale, welche strahlenexponiert werden^{54,55,56}.

Cheng-Chung Yu et al.¹³ fasste die Kriterien in einem Review für eine optimale Thoraxaufnahme und für eine Abdomenaufnahme zusammen. Die ideale Thoraxaufnahme sollte am oberen Bildrand den unteren Halsbereich und am unteren Bildrand den oberen Bereich des Abdomens mitabbilden¹³. Nicht zu sehen sein sollten der Schädel und die oberen Extremitäten¹³. Eine abdominelle Aufnahme sollte am oberen Bildrand das Diaphragma abbilden und am unteren die Symphyse, die Gonadenanlagen sollten nicht im Bild erscheinen¹³. Auch die EC⁵⁴ gibt Orientierungshilfen für die Anfertigung einer Thoraxaufnahme. Dargestellt werden soll der Thorax „vom Halsabschnitt der Trachea bis T12/L1“, in speziellen Fällen können Teile des Abdomens mitabgebildet werden – Trachea, Zwerchfell, proximales Bronchialsystem, das Gefäßmuster und Wirbelsäule mit paraspinale Strukturen sowie das Mediastinum sollten mit abgebildet werden⁵⁴.

Trotz dieser Vorgaben fällt es in der Realität immer wieder schwer, nur das diagnostisch relevante Areal abzubilden, besonders dann, wenn der/ die Patient*in besonders klein ist. 2006 führte Soboleski et al.⁵⁷ eine Studie durch mit dem Ergebnis, dass lediglich 55% aller gemachten Thoraxaufnahmen das Lungenfeld mitabbildeten – 45% dahingegen Organe und Gewebe, die nicht von therapeutischer und diagnostischer Relevanz waren. Je kleiner die Patient*innen waren, desto geringer fiel das Verhältnis von abgebildeten Organen zu teils unnötig abgebildeten Organen und Geweben aus.

Bader et al.⁵⁸ fand 2007 heraus, dass in seiner Patient*innengruppe (<1500 g) 85% der Thoraxaufnahmen das gesamte Abdomen sowie die Nackenregion mit abbildeten, 62% aller abdominellen Aufnahmen beinhalteten Oberschenkel und die männlichen Geschlechtsorgane.

Datz H. et al.⁵⁹ untersuchte Patient*innen der Gewichtsgruppen zwischen <1500 g und <2000 g hinsichtlich teils unnötig bestrahlter Körpergewebe. 16% (<1500 g) bzw. 12% (<2000 g) aller Thoraxaufnahmen bildeten das Becken mit ab, bei 62% bzw. 65% aller abdominellen Aufnahmen wurden die Oberschenkel mit abgebildet und bei 51% (<1500g) bzw. 52% (<2000g) aller

Thoraxabdomenaufnahmen war die untere Kopfregion sichtbar⁵⁹. Diese Bestrahlung außerhalb der gewünschten Organregion erhöhte retrospektiv die ED insgesamt um den Faktor 2 bei Thoraxaufnahmen, um 1,9 bei Abdomenaufnahmen und um 1,3 bei Thoraxabdomenaufnahmen⁵⁹. Durch eine bessere Abschirmung der unnötig bestrahlten Körperregionen sei jedoch eine Reduzierung von 50 % der ED möglich – unabhängig von Geburtsgewicht, Gestationsalter und der Patientengröße⁵⁹.

Wir kommen zu dem Punkt, an dem ein ständiges Kräftemessen zwischen dem Schutz des Früh- oder Neugeborenen und der Qualität des Bildes herrscht. Die Abschirmung unnötiger Organe und Gewebe ist sinnvoll. Allerdings kann eine Überabschirmung zu einem Qualitätsverlust des Bildes führen, der im schlimmsten Falle zu einer Wiederholung der Aufnahme führen kann. Eine erneute bildliche Aufnahme würde jedoch in jedem Fall die ED und das DFP erhöhen und damit das Risiko durch Strahlenexposition.

Dieser schmalen Gratwanderung kann man etwas leichter aus dem Weg gehen, indem man primär versucht, insgesamt Aufnahmen einzusparen, als akribisch Größenvorgaben des Röntgenfeldes einzuhalten.

Außerdem könnten Aufnahmen, die ursprünglich als Thorax- oder Abdomenaufnahme angefordert wurden, dann aber Thorax und Abdomen zeigten, auch als tatsächliche Thoraxabdomenaufnahmen eingespeichert werden. Dies ermöglicht in Zukunft die leichtere Klassifizierung und Evaluation der Bilder, denn nur durch Evaluation, durch Bewusstwerden der Problematik, können Lösungsansätze gesucht und gefunden werden.

Tabelle 42: Häufigkeiten der verschiedenen Arten der Röntgenaufnahmen in %, literarischer Vergleich

Referenz	Jahr	Geburts- gewicht in g/ Gestations- alter in SSW	Thorax, %	Abdo- men, %	Thorax- abdomen, %	Studien- kriterien
Diese Studie (nach erster Beurteilung)	2020	<500 g	94,9	5,1	0	
		≥500 g bis <1000 g	91,1	7,5	0	
		≥1000 g bis <1500 g	97,2	3,8	0	
		≥1500 g bis <2500 g	93,5	4,2	0	
		≥2500g	96,8	1,5	0	
Diese Studie (nach zweiter Beurteilung)	2020	<500 g	37,3	3,4	58,1	
		≥500 g bis <1000 g	39,7	5,8	52,8	
		≥1000 g bis <1500 g	43	3,4	51,2	
		≥1500 g bis <2500 g	48,8	3	45,4	
		≥2500 g	58,1	1	39,7	
Puch- Kapst K. et al.¹⁸	2009		69	7	22	194 VLBW infants
Donadieu et al.³⁶	2006	24 - 27,9	43,4	9,1	46,4	450 preterm infants, <34SSW, median birth weight 1250g, median gestational age 30,1 SSW
		28 - 31,9	44,8	6,6	47,4	
		32 - 33,9	49,1	9,9	40,9	
Ono et al.⁴	2002		33	4	58	2408 neonates, divided into five birth weight groups
Sutton et al.⁵⁰	1998	<750 g bis >1500 g	67	15	7	<750g bis >1500g
Wilson-Costello et al.³⁵	1996	<750g	54	28	15	25 infants <750g
Armpilia CI et al.¹⁶	2002		68,4	13,7	17,9	30 neonates
Dabin et al.²⁶	2014		60,4	28,6	11	235 premature newborns, <37SSW
Fletcher et al.⁵³	1986		74,6	4,6	15,9	350 neonates
Mc Parland et al.⁴⁹	1996		63,9	20,9	15,2	NICU patients
Smans et al.²⁹	2008		56,7	8,1	32,3	255 neonates

6.3 Aufnahmespannung, mAs-Wert, das DFP, die ED und das geschätzte Risiko dieser Studie im literarischen Vergleich – Arten der Röntgenaufnahmen

Die Haupteffekte ionisierender Strahlung auf den Fetus in utero, beziehungsweise auf das früh- oder neugeborene Kind sind im schlimmsten Fall der Tod, Fehlbildungen, mentale Retardierung und das Entstehen von Malignomen (vor allem Leukämien)^{19,60-62}. Diese Effekte wurden maßgeblich an den japanischen Überlebenden der Atombomben beobachtet und in langjährigen Studien evaluiert⁶⁰⁻⁶³. Innerhalb der ersten zwei Wochen der Schwangerschaft kann ionisierende Strahlung zum Tode des Kindes führen, danach können während der Organogenese (2. bis 6. SSW) ionisierende Strahlen Fehlbildungen verursachen. Diese Effekte sind für unsere Studie primär irrelevant. Zwischen der 6. und 40. Woche, damit für uns relevant, ist die Organogenese abgeschlossen und das dominierende Entwicklungsmerkmal ist das Größenwachstum des Fetus. Nur das Gehirn entwickelt sich in dieser Phase noch stark, so dass die Strahlung zu geistiger Retardierung führen kann. Das vorherrschende Risiko ist die Gefahr für später im Leben des Kindes auftretenden Tumore (vor allem Leukämien) durch das stochastische Strahlenrisiko⁶¹⁻⁶³.

Es gibt aber auch gegenteilige Quellen und Meinungen. Wird das Risiko bezüglich der Entstehung von Krebs nach diagnostischen Röntgenaufnahmen evaluiert, gibt es keine Korrelation zwischen dem Auftreten von kindlichen Leukämien und sonstigen Tumoren und den erfolgten diagnostischen Röntgenaufnahmen^{64,60,63,65,66}. Das Risiko bei diagnostischen Röntgenaufnahmen wird als sehr gering eingeschätzt^{48,21}. Ritenour et al.⁶³ berichtet bei japanischen Überlebenden der Atombomben, welche eine niedrige Dosis (0 bis 9 rem) erhalten haben, über keinen Zusammenhang zwischen erhaltener Strahlung und Karzinogenese. In den meisten der länger begleiteten Patient*innengruppen treten zwar Tumore auf, diese decken sich mit dem allgemeinen Risikoprofil für Tumore der jeweiligen Region⁶⁰⁻⁶².

Es ist schwierig, das eventuelle Lebenszeitrisko für Früh- und Neugeborene nach erfolgter Röntgenaufnahme zu evaluieren.

Der ICRP Bericht Nr. 60¹⁹ nennt den Wert von 2,8 bis $13 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, bei welchem das durch Strahlung induzierte Risiko für Krebs – vor allem für Leukämien, aber auch andere Krebsarten in der ersten Lebensdekade steigt.

Verschiedene Studien haben sich mit der Risikoeinschätzung pro angefertigter Röntgenaufnahme beschäftigt^{17,28,18,50,4,35,26,16}. Die Risikowerte variieren dabei von $1 \cdot 10^{-6}$ für eine Thoraxaufnahme¹⁶ bis zu einem Risikowert von $5,2 \cdot 10^{-6}$ für eine Thoraxabdomenaufnahme³⁵. Das bedeutet in diesem Fall, dass ein*e bzw. 5,2 Patient*innen von 1.000.000 Patient*innen, welche Strahlung ausgesetzt waren, an einem Karzinom erkranken könnten. Insgesamt besteht jedoch sowohl in unserer Studie, als auch in den anderen Studien ein insgesamt „vernachlässigbares“ Risiko, Krebs zu entwickeln. In unserer Studie waren es noch weniger, mit im Mittel nur $1,01 \cdot 10^{-6}$ Patient*innen nach einer einzelnen diagnostischen Strahlenexposition. Die Thoraxabdomenaufnahme führte zu einem leicht erhöhten Risiko, zurückzuführen auf das größere DFP. Werden die Werte der Risikoevaluation nun in Relation mit dem diagnostischen und daraus resultierenden therapeutischen Benefit gesetzt, ist dies ein durchaus akzeptables Risiko.

In Tabelle 43 stellen sich große Variationen innerhalb der einzelnen Kategorien der ED, ja sogar teilweise innerhalb der einzelnen Studien dar. Dieser Effekt, diese Variation lässt sich am ehesten mit den unterschiedlichsten Arten der ED-Annäherungen erklären und führen uns zu den Problemen und zu der Kritik an der ED. Martin et al.²⁷ befasste sich in seinem wissenschaftlichen Artikel „Effective dose: how should it be applied to medical exposures?“ eingehend mit dieser Problematik. Die ED sei zwar aktuell der einzig verfügbare quantitative Wert, um ein dosisabhängiges Risiko greifbarer zu machen und zu beurteilen, berge aber viele Unsicherheiten und würde in der Praxis immer wieder falsch angewendet²⁷. Den Ursprung der Unsicherheiten finden wir, indem wir den Ursprung der ED suchen. Das folgende Diagramm fasst die Unsicherheiten der ED-Werte zusammen^{67,19,27}.

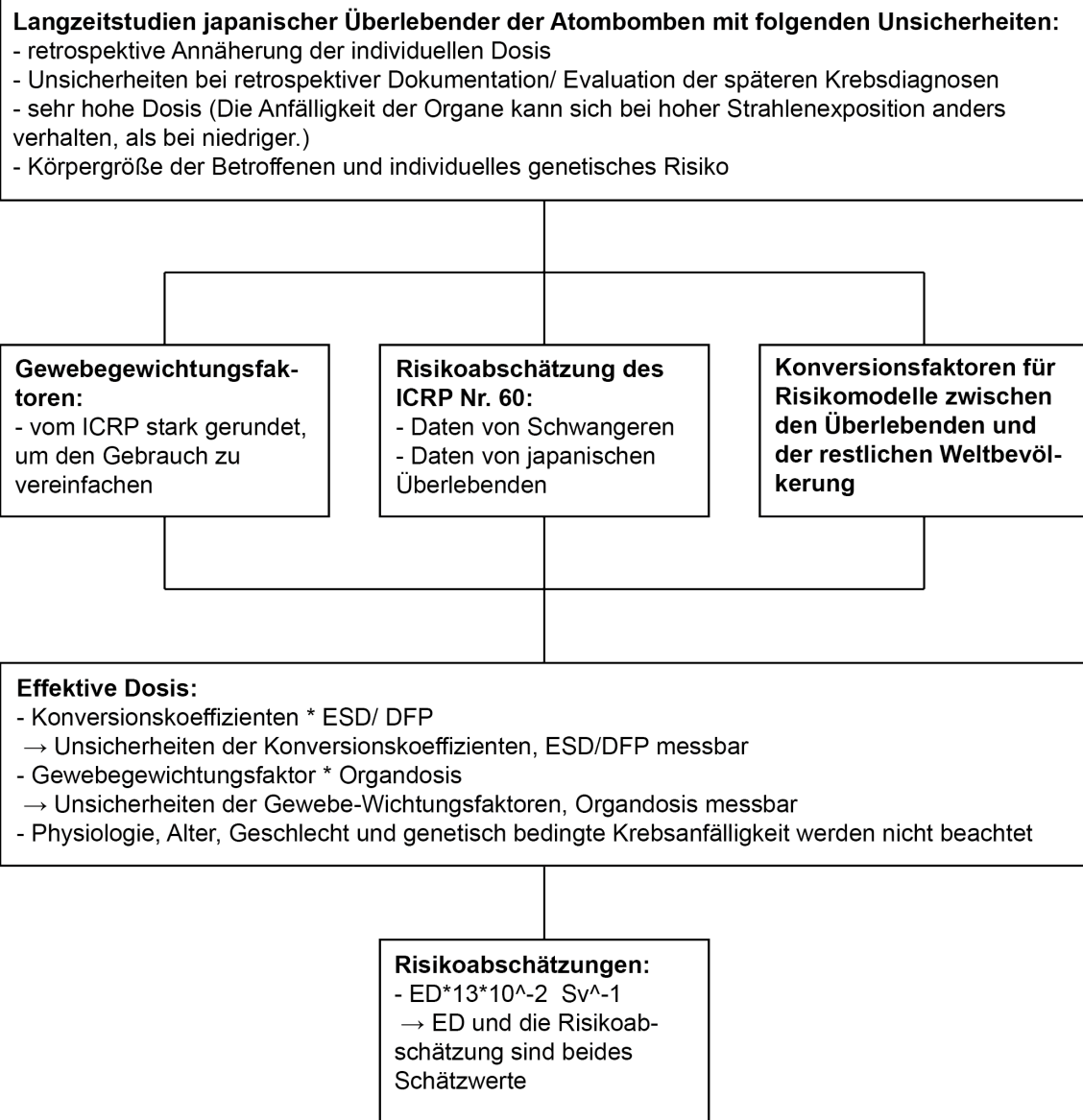


Abbildung 35: *Unsicherheiten in der Bestimmung der Effektiven Dosis und dem geschätzten Risiko*

Es wird unterschieden zwischen vergleichenden Untersuchungen, bei denen die ED eines/r Patient*in und eines/r Referenzpatient*in bestimmt und anschließend verglichen wird und den Untersuchungen mit ED-Evaluation eines einzelnen Individuums. Aufgrund der Unsicherheiten, die zu Variationen von $\pm 40\%$ der ED-Werte bei Referenzpatient*innen und der noch größerer Variation bei Werten eines Individuums führen, sollten absolute Zahlen vermieden werden²⁷. Die größere Variation liegt darin, dass Konversionskoeffizienten,

Gewebebewichtungsfaktoren etc. nicht von Faktoren wie Alter, Geschlecht, Physiologie, Herkunft usw. abhängig sind, diese aber für das tatsächliche Risiko ausschlaggebend sind. Vergleicht man nun beispielsweise die ED und das Risiko mehrerer deutscher Frühgeborener miteinander, entfällt durch die vergleichende Natur die Varianz einiger dieser Faktoren. Eine Angabe der ED in den Kategorien „niedrig“, „sehr niedrig“, „minimal“ und „vernachlässigbar“ wird empfohlen²⁷. Numerische Schätzungen, das Risiko von Krebs zu entwickeln, sollten sogar unterlassen werden, da das Risiko individueller Patienten um den Faktor 5 höher oder niedriger sein kann²⁷.

In unserem Fall bestimmten wir dennoch die ED und führten auch die Risikoabschätzung, Krebs zu entwickeln durch, um unsere Studie mit anderen Studien vergleichbarer zu machen. Die Untersuchung diene nicht der Wertebestimmung von ED und Risiko in absoluten Zahlen, sondern sollte einen Vergleich zwischen unseren neonatologischen Patient*innen mit ähnlichem Alter und Physiologie und zwischen verschiedenen Studien mit ebenfalls neonatologischem Klientel möglich machen. Zusammenfassend erlauben wir uns für alle Ergebnisse die Aussage, dass die ED und das damit einhergehende Risiko einer diagnostischen Bildgebung vernachlässigbar sind. Wir wollen diesen Werten, die Kritik beachtend²⁷, nicht zu viel Gewicht beimessen, da die Unsicherheit dieser Schätzwerte keine tiefgreifende Interpretation erlaubt und rechtfertigt. Schon gar nicht sollten sie als zukünftiger Entscheidungsparameter in klinischen Situationen dienen.

Wir werten und deuten vordergründig das DFP, welches eine messbare Größe ist. Neben seiner Exaktheit bietet es viele Vorteile, wie die einfache und kontinuierliche Messung, geographische Unabhängigkeit vom Abstand zwischen Körper und Röntgenquelle und der Berücksichtigung der bestrahlten Fläche. Dennoch muss auch berücksichtigt werden, dass das DFP pro Röntgenaufnahme meist über dem tatsächlichen Wert liegt, da die Patient*innen in den überwiegenden Fällen überstrahlt werden.^{22,21}

Das DFP variierte in dieser Studie für die verschiedenen Aufnahmetypen Thorax, Abdomen und Thoraxabdomen zwischen $1,8 \pm 1,5$, $1,5 \pm 1,4$ und $2 \pm 1,6$

mGy*cm². In der Arbeit von Jones NF et al.²¹ liegen die Werte 2001 mit 8,3 (Thorax), 11,5 (Abdomen) und 18,7 (Thoraxabdomen) mGy*cm² deutlich über unseren ermittelten Werten. Hierbei wurde jedoch ein Phantom verwendet, welches sich an einem 2,5 kg schweren Neugeborenen mit 7,96 cm Rumpfdurchmesser orientiert, und letztendlich zu einer Konstruktion aus sechs Lagen „Perplex“ mit 21,8 cm Länge, 13 cm Weite und 1 cm Dicke führte²¹. Mc Donald et al.²⁵ ermittelte 1996 ein DFP von 15 mGy*cm² für Thorax- und 19 mGy*cm² für Abdomenaufnahmen, ähnlich hoch sind die 1998 bestimmten Werte von Mooney et al. mit 12 mGy*cm² (Thorax) und 29 mGy*cm² (Abdomen). Dabin et al. (2014) ermittelte ein DFP zwischen 4,1-7,2 mGy*cm², Armpilia et al. (2002) 4,3 mGy*cm² (Thorax), 4,4 mGy*cm² (Abdomen) und 5,5 mGy*cm² (Thoraxabdomen) – beide Arbeiten sind im Vergleich aktuellere Erscheinungen und liegen näher an unseren Werten.

Es liegt insgesamt eine große Varianz der Werte des DFP vor, wobei die Werte unserer Studie im literarischen Vergleich sehr niedrig ausfallen. Das kann an unterschiedlicher Handhabung und Durchführung der Röntgenuntersuchungen, an präziser eingegrenzten strahlenexponierten Körperarealen oder aber an technischen Aspekten und Ausstattung liegen. Verschiedene Studien^{16,49,13,24} sowie nationale⁵⁶ und internationale⁶⁸ Leitlinien empfehlen zur Dosisreduktion bei gleichbleibender Bildqualität die Erhöhung der Aufnahmespannung bei kürzerer Belichtungszeit und die Verwendung von Röntgenfiltern. Duggan et al.⁶⁹ berichtet über eine 9%ige Reduktion der Strahlenbelastung, wenn die Aufnahmespannung von 50 auf 60 kVp angehoben werden kann. Nun können aber nicht alle Röntgeneinheiten die für die hohe Aufnahmespannung notwendige, kurze Belichtungszeit generieren. Gerade ältere Modelle, welche in Studien der späten 90iger Jahre und früheren 2000er benutzt wurden, sind dazu nicht in der Lage. Tabelle 43 zeigte die zu erwartenden Unterschiede der Aufnahmespannung und des Strom-Zeit-Produktes.

Die Aufnahmespannung mit einer mittleren Spannweite von 77,7-79,4 kV liegt über den in der Literatur verwendeten Aufnahmespannungen. Diese bewegen sich in einem Bereich von mindestens 48 kV für Abdomenaufnahmen²⁸ bis zu 70 kV für Thorax- und Abdomenaufnahmen⁷⁰.

Der mAs-Wert, welcher bei uns mindestens 0,63 mAs betragen sollte, wies eine mittlere Spannweite von 0,73 (Abdomen) bis 0,75 (Thorax) mAs auf. Trotz des Mindestwertes von 0,63 mAs, waren noch niedrigere Werte zu finden. Diese Werte, beruhen vermutlich auf manuellen Veränderungen des durchführenden Radiologen. Die Mittelwerte der mAs-Werte sind konstant unabhängig von der Aufnahmeart, zeigen bei steigendem Gewicht einen Anstieg von 0,69 mAs bei einem Gewicht von <500 g auf bis zu 0,79 mAs für Patient*innen, welche am Tag der Aufnahme ≥ 2500 g wogen. Somit liegen die im Universitätsklinikum ausgewählten Einstellungswerte deutlich unter denen, die im internationalen Vergleich ausgewertet wurden. Diese liegen bis auf eine Ausnahme >1 mAs (siehe Tabelle 43).

Tabelle 43: Aufnahmespannung, mAs-Wert, DFP, ED, geschätztes Risiko pro Aufnahme dieser Studie, literarischer Vergleich, Mittelwert±SD

Autor	Art der Röntgenaufnahme	Aufnahmespannung	Strom-Zeit-Produkt	Dosisflächenprodukt in mGy*cm ²	Eintrittsdosis in µGy pro Röntgenaufnahme	Effektive Dosis E in µSv pro Röntgenaufnahme	Risiko (*10 ⁻⁶ examinations) (ED*13*10 ⁻²)
Diese Studie (Werte in Klammer: nach 2. Beurteilung)	Thorax	79,2±4,6 (79,4±5)	0,74±0,08 (0,75±0,07)	1,9±1,5 (1,8±1,5)	-	8,3±6,2 (7,4±5,9)	1,1 (1)
	Abdomen	77,8±4,1 (77,7±4)	0,73±0,08 (0,73±0,09)	1,8±1,7 (1,5±1,4)	-	8,4±5,8 (6,7±5,1)	1,1 (0,9)
	Thorax abdomen	- (79±4,2)	- (0,74±0,08)	- (2±1,6)	-	- (8,8±5,3)	n.v (1,2)
Brindhaban A. et al. ³⁴	Thorax	57	1,6	-	60	26	-
	Abdomen	57	1,6	-	60	32	-
	Thorax abdomen	-	-	-	-	-	-
Jones et al. ²¹	Thorax	62	2	8,3	56,7±0,2	15,4	2
	Abdomen	62	2,5	11,5	73,6±0,2	21,9	2,8
	Thorax abdomen	62	2,5	18,7	71,5±0,2	35,5	4,6
Mc Donald et al. ²⁵	Thorax	62	8,6	15	60	-	-
	Abdomen	59	3,6	19	110	-	-
	Thorax abdomen	-	-	-	-	-	-
Mooney et al. ²⁴ *(Wert) = nach Erhöhung des Filters	Thorax	55	-	12 (7)*	60 (36)	-	-
	Abdomen	62	-	29 (20)	170 (120)	-	-
	Thorax abdomen	-	-	-	-	-	-
Puch-Kapst et al. ¹⁸	Thorax	-	-	-	-	14,4	1,9
	Abdomen	-	-	-	-	17,8	2,4
	Thorax abdomen	-	-	-	-	23,8	3,2
Armpilia et al. ¹⁶	Thorax	53,1	2	4,3	36	7,8	0,3-1,3
	Abdomen	53	2,1	4,4	39	10,2	0,3-1,3
	Thorax abdomen	52,2	2	5,5	35	9,2	-
Olgar et al. ¹⁷	Thorax	49	1,9	-	67	15	2
	Abdomen	48	2	-	65	22	2,9
	Thorax abdomen	-	-	-	-	-	-
Dabin et al. ²⁶	Thorax	-	-	4,1 -7,2	41-46	-	-
	Abdomen	-	-	-	-	-	-
	Thorax abdomen	-	-	-	47	-	-

Autor	Art der Röntgenaufnahme	Aufnahme Spannung	Strom-Zeit-Produkt	Dosis-flächen-produkt in mGy*cm ²	Eintrittsdosis in µGy pro Röntgenaufnahme	Effektive Dosis E in µSv pro Röntgenaufnahme	Risiko (*10 ⁻⁶ examinations) (ED*13*10 ⁻²)
Ono K. et al. ⁴	Thorax	55	1,2	-	21	10-20	-
	Abdomen	55	1,2	-	10-20	10-30	-
	Thorax abdomen	55	1,2	-	10-20	20-40	-
Wilson-Costello et al. ³⁵	Thorax	-	-	-	-	10-20	2,6
	Abdomen	-	-	-	-	10-30	3,9
	Thorax abdomen	-	-	-	-	20-40	5,2
Makri et al. ²⁸	Thorax	50±2	1,5±0,3	-	44±16	10±3,7	1,7
	Abdomen	-	-	-	-	-	-
	Thorax abdomen	49±2	1,5±0,3	-	43±19	14,7±7,6	2,9
Sutton et al. ⁵⁰	Thorax	-	-	-	31,9	-	-
	Abdomen	-	-	-	31,8	-	-
	Thorax abdomen	-	-	-	43,7	-	-
Robinson et al. ³⁹	Thorax	60	1	-	53	-	-
	Abdomen	60	1	-	57	-	-
	Thorax abdomen	-	-	-	-	-	-
McParland et al. ⁴⁹	Thorax	52-60	0,8	-	20±3,2	-	14
	Abdomen	52-60	0,8	-	20±4,2	-	17,1
	Thorax abdomen	-	-	-	19±2,7	-	21,6
Smith et al. ⁷⁰	Thorax	60-70	1	-	44	-	-
	Abdomen	60-70	1	-	49	-	-
	Thorax abdomen	-	-	-	-	-	-
Fletcher et al. ⁵³	Thorax	50	4	-	70	-	3,6
	Abdomen	50	4	-	70	-	3,6
	Thorax abdomen	-	-	-	-	-	-
Chapple et al. ⁵¹	Thorax	-	-	-	55	-	1,1 - 5,2
	Abdomen	-	-	-	-	-	-
	Thorax abdomen	-	-	-	-	-	-

6.4 Kumulative ED und die Risikoeinschätzung in der Literatur – Gewichtsklassen

Zum besseren Verständnis wird an dieser Stelle noch einmal die Risikoeinschätzung verdeutlicht. Wenn sich nach einer Strahlenexposition mit dem Risikofaktor von $13 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ein Risiko von beispielsweise $1 \cdot 10^{-6}$ ergibt, bedeutet dies, dass von 1.000.000 Patient*innen eine Person, das Risiko besitzt, Krebs zu entwickeln.

Viele Mitarbeiter mögen mitunter sorglos an die einzelnen Röntgenaufnahmen gehen, da die ED einer Röntgenaufnahme niedrig ist. Doch oftmals bleibt es nicht nur bei einer Röntgenaufnahme, mehr als die Hälfte unser Patient*innen erhielten mehr als nur eine Aufnahme. Die kumulative ED am Ende des Klinikaufenthalts kann so rasant ansteigen, wird insgesamt viel höher und variiert zudem in den unterschiedlichen Gewichtsklassen. Besonders belastet waren Patient*innen der Gewichtsklasse $<500 \text{ g}$ mit im Mittel 13,9 Röntgenaufnahmen. Dabei erhielten sie pro Röntgenaufnahme eine mittlere ED von $8,3 \pm 8,4 \text{ } \mu\text{Sv}$. Die kumulative ED während ihres Klinikaufenthaltes in dieser Kategorie betrug im Mittel $108,2 \pm 89,3 \text{ } \mu\text{Sv}$, damit ergab sich ein Risiko von $14,1 \cdot 10^{-6}$, Krebs zu entwickeln. Das Risiko ist zwar nicht mehr als „vernachlässigbar“, aber als „minimal“ einzustufen. Das Kind mit den meisten Röntgenaufnahmen, 38 Stück, erhielt sogar eine kumulative Dosis von $243 \text{ } \mu\text{Sv}$. Bei einem Risikofaktor von $13 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ergibt sich daraus das kumulative Lebenszeitrisko, Krebs zu entwickeln von $32 \cdot 10^{-6}$. Die höchste kumulative ED betrug $342 \text{ } \mu\text{Sv}$ nach 30 Aufnahmen bei einem Patienten mit einem Geburtsgewicht von 350 g – das Risiko war mit $44 \cdot 10^{-6}$ auch hier als „minimal“ zu werten. Folgend wurden auch die anderen Gewichtsklassen berechnet: $\geq 500 \text{ g}$ bis $<1000 \text{ g}$, $\geq 1000 \text{ g}$ bis $<1500 \text{ g}$, $\geq 1500 \text{ g}$ bis $<2500 \text{ g}$ und $\geq 2500 \text{ g}$, das kumulative Risiko war in allen Gruppen „vernachlässigbar“.

Auch andere Studien berichteten über ein kumulatives Lebenszeitrisko. Eine Studie aus Kuwait stellte 2004 ein Risiko von $9-114 \cdot 10^{-6}$ bei einem/r Patient*in fest, welche/r 25 Röntgenaufnahmen innerhalb seines/ ihres Aufenthaltes erhielt³⁴. Bei einer Studie mit 194 VLBW, welche eine mittlere Anzahl von 4

Röntgenaufnahmen (Spannweite 1 bis 62) erhielten, errechnete sich ein kumulatives Risiko von $17,5 \cdot 10^{-6}$ pro Patient*in¹⁸. Makri et al.²⁸ ermittelte ein kumulatives Lebenszeitrisko von $1 \cdot 10^{-4}$ für die untersuchten 67 Neugeborenen. 1998 wertete Sutton et al.⁵⁰ die Daten von 55 VLBW aus und kam auf ein Risiko von $9,1 \cdot 10^{-6}$, eine Studie mit 119 Neugeborenen 1994 mit einer mittleren Anzahl von 5,3 Röntgenbildern pro Patient*in auf $5,2 \cdot 10^{-6}$ ⁵¹.

Auch wenn diese Lebenszeitriskiken auseinanderweichen, mit unterschiedlichen Methoden bestimmt werden und nicht immer auf gleichen Untersuchungsbedingungen (Geburtsgewicht, Anzahl der Patient*innen, Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Aufenthalt) beruhen, lässt sich insgesamt jedoch feststellen, dass das Risiko „minimal“ ist – vor allem im Hinblick auf die schwer kranken Früh- und Neugeborenen als Patient*innenklientel.

6.5 Referenzwerte aus den Leitlinien

Das Universitätsklinikum Frankfurt am Main orientiert sich an Empfehlungen und Referenzwerten des Bundesamtes für Strahlenschutz²³, der Strahlenschutzkommission⁷¹ und der Bundesärztekammer⁵⁶. Im Zuge dieser Arbeit wurden außerdem die Leitlinien des ICRP Nr. 60¹⁹, Nr.79⁷², Nr.103⁷³ und Nr.105⁶⁷, der EurDir97⁷⁴ und EurDir13⁷⁵, des RP 109⁷⁶ und der ärztlichen und zahnärztlichen Stellen⁷⁷ evaluiert. Die Europäischen Leitlinien⁶⁸ und die Verordnung der Röntgenverordnung (RöV)⁷⁸ fanden ebenso Beachtung.

Der ICRP Nr.105⁶⁷ spricht sich gegen Dosislimits und für Referenzwerte aus, welche als obere Grenze für Dosismengen nach Strahlenexposition fungieren. Diese Referenz kann in bestimmten klinischen Situationen missachtet werden, da eine Röntgenuntersuchung nicht nur technischen Aspekten, sondern auch der individuellen Situation eines/r Patient*in mit unterschiedlicher Indikationsdringlichkeit und körperlicher Konstitution geschuldet ist.²³ Der ICRP Nr. 60¹⁹ beschreibt diesen Referenzwert, berechnet anhand eines Phantomes oder eines Standardwertes als denjenigen Wert, der anzeigen soll, ob die Strahlenbelastung auffallend niedrig oder hoch ist. Die Diagnostischen Referenzwerte (DRW) wurden 1997 im EurDir97⁷⁴ erstmalig erwähnt, im

EurDir13⁷⁵ verfestigt und auch im RP 109⁷⁶ der EC empfohlen – Mitgliedstaaten müssen die DRWs anwenden, einhalten und prüfen. Für medizinisch diagnostische Röntgenaufnahmen in Deutschland stellt das Bundesamt für Strahlenschutz²³ nach §16 Absatz 1 der RöV⁷⁸ DRWs zur Verfügung, welche teilweise nur für Patient*innen ab dem Alter von drei Monaten gelten und für unser Studienformat somit bedingt hilfreich waren .

Sind die beobachteten Werte stets unter den Referenzwerten, so müssen die Bilder hinsichtlich ihrer Qualität evaluiert werden¹⁹. Sind die Werte zu hoch, muss die als kontrollierendes Organ fungierende ärztliche Stelle (ÄS)⁷⁷ die Überschreitung an die zuständige Landesbehörde melden, welche den Vorfall überprüft und Abhilfemaßnahmen finden muss. Wichtig bei Überschreitung der DRWs ist, dass die gemittelte Dosis von 10 beliebigen Patient*innen bei zehn unabhängigen Untersuchungen die DRWs nicht überschreitet; dies muss für jedes Gerät und jede Untersuchungsart regelmäßig ausgewertet werden^{75,76}.

Eine Thoraxaufnahme AP/PA bei einem Frühgeborenen (<3000 g), ist mit einem DFP von 3 mGy*cm² und bei Neugeborenen (0 bis <3 Monate, 3 bis <5 kg) mit 5 mGy*cm² angegeben²³. 20 mGy*cm² ist der DRW für Neugeborene (0 bis <3 Monate, 3 bis <5 kg) bei AP/PA Abdomenaufnahmen²³. Im Mittel betrug das DFP gewichtsunabhängig in unserer Studie 1,8±1,5 mGy*cm² bei den Thoraxaufnahmen, 1,5±1,4 mGy*cm² bei den Abdomenaufnahmen und 2±1,6 mGy*cm² bei den Thoraxabdomenaufnahmen und liegt somit deutlich unter den Referenzwerten aus Leitlinien und Literatur. Für Patient*innen <3000 g errechnet sich ein Wert von 1,3 mGy*cm² für eine Thoraxaufnahme, dies entspricht weniger als der Hälfte des vorgegebenen DRW von 3 mGy*cm², das DFP von 3 mGy*cm² bei Thoraxaufnahmen für Patient*innen >3000 g und <5000 g liegt unter dem Referenzwert von 5 mGy*cm², das DFP von 3,9 mGy*cm² von Abdomenaufnahmen liegt deutlich unter dem DRW mit 20 mGy*cm². Genauso wie eine massive Überschreitung der DRW nicht zu empfehlen ist, ist auch die Unterschreitung zu hinterfragen, da die Bilder in ihrer Qualität beeinträchtigt werden können.

Tabelle 44: Vergleich des DFP pro Aufnahmeart mit den DRWs²³

Gewicht in g	Art der Aufnahme	DRW ²³ in mGy*cm ²	DFP in mGy*cm ²
<3000 g	Thorax AP/PA	3	1,3
	Abdomen AP/PA	n.v.	1,2
	Thoraxabdomen	n.v.	1,6
3000 g-5000 g	Thorax AP/PA	5	3
	Abdomen AP/PA	20	3,7
	Thoraxabdomen	n.v.	3,9

Die Leitlinien der Bundesärztekammer⁵⁶ und die Europäischen Leitlinien⁶⁸ geben Aufschluss über Qualifikationsvoraussetzungen, Dokumentation und korrekte Durchführung einer Thorax-/ Abdomenaufnahme. Die Aufnahmespannung liegt für die Thorax- und Abdomenaufnahmen im oberen Bereich der Referenzwerte von 60-80 kV; Zusatzfilter von 1 mmAl+0,1 mmCu wurden verwendet. Die Erhöhung der Aufnahmespannung bei entsprechend kurzer Belichtungszeit und der Einsatz von härteren Filtern, können Strahlendosis bei Patient*innen einsparen^{56,68}.

Die darzustellenden anatomischen Strukturen konnten bei AP Thoraxaufnahmen und den AP/ Seitenlage Abdomenaufnahmen nicht immer eingehalten werden. Die Gründe ließen sich retrospektiv nicht ermitteln, lassen sich aber vermutlich auf ungenügende Immobilisation zurückführen. Die Einstelltechnik im Früh- und Neugeborenenalter sollte jedoch unabhängig der Kooperation möglichst exakt sein – bei einem Kind, welches sich bewegt, notfalls mit einer atraumatischen Fixierhilfe, in Ausnahmefällen durch manuelle Fixierung von Eltern und Personal⁶⁸. Die Größe des Feldes ist insbesondere wichtig, da sowohl eine Verringerung als auch eine Vergrößerung Folgen nach sich ziehen. Eine zu kleine Feldgröße verschlechtert die Bildkriterien bei Ausschluss von wichtigen Diagnosen, ein zu großes Feld mindert den Kontrast und die Auflösung durch eine erhöhte Streustrahlung und erhöht die Strahlenexposition⁶⁸. Genaue Kenntnisse von anatomischen Verhältnissen in Normalsituationen und unter pathologischen Prozessen sind deshalb wichtig, Toleranzwerte der Größenzunahme sollten lediglich 1 cm betragen⁶⁸. Die ursprüngliche Größenzunahme von Arealen konnte retrospektiv nicht beurteilt werden, jedoch erlauben wir uns die Aussage, dass beispielsweise als

Thoraxaufnahme geplante Bilder bei Lungenpathologien, welche anschließend das komplette Abdomen mit abbildeten, mit Sicherheit einen Größenzuwachs von >1 cm aufwiesen.

Die Dokumentation der Bilder verlief meist regelhaft. Unvollständigkeit bestanden bei der Dokumentation der Indikation, obwohl nach §23 Absatz (Abs.) 1 Satz 1 RöV⁷⁸ verlangt, und bei der radiologischen Befundung. Die Angaben der Strahlenexposition, die in unserem NICU mittels Strom-Zeit-Produkt und DFP ausgedrückt wurde, waren nicht immer notiert, wobei das DFP seltener zu finden war. Die Dokumentation könnte in Zukunft noch gewissenhafter betrieben werden, um retrospektive Evaluierung der Strahlenexposition und der Röntgenbedingungen zu erleichtern und schneller auf Missstände reagieren zu können.

Indikationen für eine Röntgenaufnahme in der Pädiatrie finden sich in den Leitlinien der Strahlenschutzkommission⁷¹, von denen nur die am häufigsten Anfallenden aufgegriffen wurden. Als Indikationen werden genannt⁷¹:

- **Shuntfehlfunktion:** Das komplette Shuntsystem in frontaler Ebene mit Darstellung von Lage und Integrität des Shuntventils
- **Akuter Lungeninfekt:** In Abhängigkeit der Schwere der klinischen Symptomatik indiziert, primär bei einfacher Pneumonie nicht erforderlich
- **Chronische Lungendiagnostik:** Röntgen als Basisdiagnostik
- **Angeborene Lungenfehlbildungen:** Röntgen als Basisdiagnostik
- **Angeborener Herzfehler:** Kardiopulmonaler Status, Herzgröße, Lungendurchblutung
- **Invagination:** Nur zum Ausschluss von Perforation, Nachweis Ileus, Kontrolle nach Reposition
- **Atresie, Stenose, M. Hirschsprung:** Röntgen Abdomen zur Beurteilung der Darmmorphologie und Peristaltik, perianaler Zugang zur Beurteilung der Analatresie
- **Obstipation:** Höhe der Obstipation, ein Volvulus oder ein M. Hirschsprung können erkannt werden

Diese Indikationen deckten sich mit den Indikationen der ausgewerteten 4167 Röntgenaufnahmen. Hinzuzufügen sind die Aufnahmen nach iatrogenen Diagnosen, sprich Röntgenuntersuchungen nach Intubation, bei Verdacht auf Fehllage von Tubus, nach ZVK-, NVK- und NAK-Anlage.

6.6 Alternativen

Die konventionelle Röntgenuntersuchung ist gerade bei den Untersuchungen der Lunge meist immer noch die bevorzugte Untersuchungsmethode. Dabei gibt es Alternativen – auch für die Untersuchung des Thorax, welche in vielen in den letzten Jahren entstandenen Studien untersucht und hinterfragt wurden^{5,6,3,7,79,9-11}.

Kurepa et al.⁶ arbeitete 2018 in einem Review nicht nur die verschiedenen Indikationen des Ultraschalls heraus, sondern ermittelte auch die Sensitivität und die Spezifität bei der Diagnosefindung. Die anfängliche Luftnot der Früh- und Neugeborenen in der unmittelbaren perinatalen Zeit, verursacht durch rückständige Flüssigkeit (Wet Lung), führte bei uns in immerhin 703 der 4167 Röntgenaufnahmen zur letztendlichen Bildgebung. Der Review belegt, verweisend auf mehrere Studien, eine Spezifität von 100% und eine Sensitivität zwischen 70%-100% bei der Diagnosefindung der perinatalen Tachypnoe per Ultraschall⁶.

Das seltener gewordene Mekoniumaspirationssyndrom, dessen diagnostischer Goldstandard bis heute das konventionelle Röntgen ist, konnte ausnahmslos bei sechs Patient*innen mit dieser Diagnose per Ultraschall anhand typischer Zeichen nachgewiesen werden⁷. Die Pneumonie konnte anhand der klinischen Historie und typischer Befundung im Ultraschall ermittelt werden⁶. Auch für die Diagnosen des RDS, des Pneumothorax, der Atelektase, der BPD und den Pleuraerguss stellte Kurepa et al.⁶ den Ultraschall als sehr vielversprechende Alternative dar – beschrieb akribisch den zu erwartenden pathologischen Befund und stellte Beispielbilder zur Verfügung.

Eine chinesische Studie, welche eine hohe Signifikanz des Ultraschalls bei RDS insbesondere bei Grad III beschrieb, betonte zudem die allgemeinen Vorteile des Ultraschalls, im Sinne von Kostengünstigkeit, leichter Handhabung (direkt am Patient*innenbett), dem Vorteil, mehrmals am Tag Verlaufskontrollen durchführen zu können und hoher Sensitivität bezüglich Lungenerkrankungen⁷⁹. Der Ultraschall liefere einen dreidimensionalen Einblick und Bilder in Echtzeit, sowohl der Luftwege als auch des Lungenparenchyms⁷. Chen et al.⁷⁹ erachtete es als möglich, dass der Ultraschall in dieser Hinsicht den Goldstandard Röntgen ablösen könnte.

Sandig et al. beschäftigt sich in seinem Review 2021 mit der Sonographie als alternative Untersuchungsmethode bei einem Pneumothorax⁸⁰. Mehrere Studien führten vergleichende Untersuchungen mittels Röntgendiagnostik und sonographischer Diagnostik durch⁸¹⁻⁸⁷. Eine Studie beleuchtete zudem die Untersuchungssicherheit eines Transluminations-Testes⁸⁷. Dabei stellte sich eine insgesamt höhere Sensitivität der Sonographie gegenüber der Röntgenuntersuchung bei Diagnosestellung eines Pneumothorax heraus^{81,83,82}. Die Spezifität war ähnlich^{83,82}. Der Transluminations-Test mittels Kaltlichtdiode war hinsichtlich Sensitivität und Spezifität im Nachteil⁸⁷. Zu den Vorteilen der Sonographie bei Pneumothoraxdiagnostik gehörte die verkürzte Untersuchungszeit um den Faktor 4-5 (5,3 von 19 Minuten⁸⁶ und 9,5 von 50 min⁸⁴), das schnelle Erlernen der Sonographiemethodik, ein „geringer Personal- und Geräteaufwand“, Kostengünstigkeit, die Vermeidung einer Strahlenexposition und eine dynamische Untersuchung mit der Option mehrerer Verlaufskontrollen⁸⁰. Der Diagnostiker sei weiterhin in den meisten Fällen der behandelnde Arzt und könne im gleichen Atemzug mit der Ultraschalluntersuchung den gesundheitlichen, klinischen Zustand mitbeurteilen⁸⁰.

Nachteile entstünden durch Artefakte aufgrund des luftgefüllte Lungengewebes, welche die Diagnose eines mediastinalen Pneumothorax erschweren⁸⁰. Seltene Erkrankungen (Pleura-pulmonales Blastom) könnten als Spannungspneumothorax verkannt werden⁸⁸. Weiterhin bleibe die Diagnostik untersucherabhängig⁸⁰. Eine Untersuchung von Corsini et al. ergab jedoch,

dass bereits nach 31 Untersuchungen ein/e Anfänger*in nicht mehr von einem/r Sonographieexpert*in unterschieden werden könnte⁸⁴.

229 aller Röntgenaufnahmen dieser Studie wurden aufgrund eines akuten Abdomens, dem direkten Verdacht einer NEC oder der Verlaufskontrolle einer NEC angefertigt. In der frühen Phase sind lediglich dilatierte Darmschlingen sichtbar, während sich die mittlere Phase des Krankheitsbildes durch Pneumatosis intestinalis bildlich manifestiert. In der späten Phase der NEC kann radiologisch das Pneumoperitoneum sichtbar werden⁸⁹.

Doch auch hier gibt es zahlreiche Hinweise in der Literatur^{89,79,90-92}, die den Ultraschall als Alternative nennen und mehr noch, der Ultraschalluntersuchung eine größere Sensitivität zuweisen.

So formulierte de Bernardo et al.⁸⁹ in einem Studiendurchlauf 2016 klare diagnostische Kriterien der verschiedenen Stadien der NEC im Ultraschall. So sind in der frühen Phase eine erhöhte Darmwandperfusion, lokale Peristaltik sowie etwaige freie Flüssigkeit im Peritonealraum sichtbar, die mittlere Phase zeichnet sich durch Lufteinschlüsse in der Darmwand und hyperechogenen Strukturen zwischen Leber und Darmwand aus, in der späten Phase sind freie intraabdominelle Flüssigkeit, Lufteinschlüsse in den Portalvenen sowie Darmwandischämien sichtbar⁸⁹.

Im selben Jahr 2016 bezeichnete eine weitere Studie die radiologische Untersuchung zwar immer noch aktuell als Standardmethode der Diagnostik – nannte aber im gleichen Atemzug die Nachteile des Röntgens wie nicht-dynamische Bilder sowie die fehlende Darstellung von Nekrosen⁹⁰. Es wurden drei Kriterien beim Ultraschallbild genannt, die dabei helfen sollen, die Schwere der Krankheit einzuschätzen und die als Risikofaktoren für den Eintritt des Todes oder den chirurgischen Eingriff zählen: Erweiterung der Darmschlingen, Aszites und Verdickung der Darmwand⁹⁰.

Die NEC, die trotz enorm verbesserten Outcomes von Früh- und Neugeborenen^{1,12}, dennoch oft verheerende Ausgänge zeigt, kann mit dem Ultraschall womöglich schneller diagnostiziert und behandelt werden.

Dabei muss die Zusammenarbeit von Radiologen, Neonatologen und Chirurgen gefördert werden, weit verbreitete Wissenslücken über die Handhabung des Ultraschalls müssen abgeschafft werden, mehr Studien müssen den Benefit des Ultraschalls in direkte Korrelation mit dem Outcome der Krankheit setzen und es muss mehr geschultes Personal geben, welches mit dem Ultraschall qualitativ hochwertige Diagnostik leisten kann⁹¹.

7. Schlussfolgerung

Die Strahlenbelastung der Früh- und Neugeborenen konnte evaluiert werden und der Zusammenhang zwischen Unreife und Strahlenbelastung konnte bestätigt werden. Die Strahlenbelastung an der NICU des Universitätsklinikums Frankfurt fällt im internationalen Vergleich und in der Gegenüberstellung mit Referenzwerten niedrig aus. Es ist somit nicht von einem nachhaltigen gesundheitlichen Risiko durch diagnostische Bildgebung auszugehen. Das minimale Risiko der Strahlenexposition steht in keinem Verhältnis zum Nutzen der Diagnostik bei den Früh- und Reifgeborenen.

Das niedrige Risiko lässt sich durch moderne Technik mit kurzer Belichtungszeit sowie hoher Aufnahmespannung und durch die relativ niedrige Anzahl an angefertigten Röntgenbildern erklären. Da bei weiterer Minimierung der eingesetzten Dosis von einem Qualitätsverlust der Bilder auszugehen ist, ist das Einsparen von Röntgenuntersuchungen und die Ausweitung von Alternativen anzuraten.

Im Vergleich mit anderen internationalen Studien fiel auf, dass die Strahlenbelastung in einigen Ländern deutlich über der unseren liegt, was vordergründig durch den technischen Vorteil aber auch durch entsprechend geschulte Mitarbeiter*innen zu erklären ist.

Dem ALARA-Prinzip folgend, gibt es trotz niedriger Belastung dennoch ausbaufähige Aspekte:

- Beim Anordnen von Röntgenuntersuchungen sollten zukünftig Patient*innengruppen beachtet werden, bei denen in dieser Studie nachgewiesen werden konnte, dass sie ein erhöhtes DFP bzw. eine erhöhte ED erhielten. Zu nennen sind vordergründig Patient*innen <500 g, die eine erhöhte ED, ein erhöhtes kumulatives DFP und ED aufwiesen. Unter dem Wissen, dass bei diesen Patient*innen höchstwahrscheinlich viele Aufnahmen mit erhöhter ED anfallen werden, müssen unbedingt alle Indikationen dringend überprüft und muss insbesondere in dieser Gruppe nach Alternativen gesucht werden.

Patient*innen mit vielen Komplikationen (IVH, Fehlbildung) wiesen das höchste kumulative DFP auf, auch bei ihnen ist also eine Kontrolle und Hinterfragen von angeordneter Röntgendiagnostik angemessen.

- Thoraxabdomenaufnahmen gingen mit einem erhöhten DFP und einer erhöhten ED einher; wenn nicht absolut indiziert sollten sie unterlassen werden.
- Die Indikationen einer Verlaufskontrolle und einer respiratorischen Anpassungsstörung führten in vielen Fällen zu keiner therapeutischen Konsequenz. Ein Umstieg auf Alternativen oder das Auslassen von bildgebender Diagnostik sollte diskutiert werden. Aufnahmen zur Lagekontrolle von Tubus und Kathetern führten sehr oft zu einer Korrektur der Position und sind somit als notwendig und sinnvoll zu bewerten.
- Anstelle des konventionellen Röntgenbildes als Standard, sollen in Zukunft andere Diagnostikmethoden, wie etwa das Ultraschallgerät, in Betracht gezogen werden. Im Hinblick auf untersucherabhängige Qualität und ED der einzelnen Röntgenbilder, auf das teure Equipment und auf die Strahlenbelastung von Untersucher*in und Patient*innen sollte das Röntgen nicht widerspruchslos den Goldstandard der Diagnostik widerspiegeln. Zwar kann das Ultraschallgerät die Röntgenaufnahme nicht gänzlich ersetzen, doch auch einzelne Einsparungen werden zu einer Minimierung der Strahlenbelastung führen. Hierbei könnte zum Beispiel ein Protokoll (ähnlich einem Flussdiagramm, z.B im Rahmen einer Promotionsarbeit) bei diagnostischer Entscheidungssuche verwendet werden, welches es dem Kliniker leichter macht, das Röntgen als Mittel anzuwenden oder auf Alternativen zurückzugreifen.
- Eine Optimierung von strahlenexponierter Körperfläche sollte stattfinden. Das erwähnte Protokoll könnte passend zu den klinischen Fragestellungen, die meistens gut in klare Gruppen eingeteilt werden können, genau diejenigen Areale nennen, welche unbedingt auf dem Röntgenbild zu sehen sein müssen. So könnten die unnötig bestrahlten Röntgenareale verschont bleiben, all die Areale von Interesse würden qualitativ gut abgebildet sein. Die Gefahr für Wiederholungsaufnahmen

könnte so minimiert werden. Hierzu gibt es bereits Vorlagen, die den perfekten Ausschnitt eines Bildes abbilden¹³.

- Die klare Definition der verschiedenen Arten (Thorax, Abdomen, Thoraxabdomen) der Röntgenaufnahmen sollte erfolgen, um ein Bewusstsein von erhöhter Strahlenexposition zu schaffen und um die Evaluation in Zukunft zu vereinfachen.
- Indikation, DFP, Aufnahmespannung und Strom-Zeit-Produkt müssen gewissenhafter dokumentiert werden.
- Die Röntgeneinheit wird weiterhin von geschultem Personal bedient und ein Qualitätsmanagement des Röntgenequipments wird durchgeführt.

Dem Trend von 2013 bis 2018 mit einer abnehmenden Anzahl an Röntgenbildern, bei zunehmender Anzahl an stationär behandelten Kindern folgend, können die Röntgenuntersuchungen nach jetzigem Stand der Wissenschaft, Technik und Leitlinien fortgeführt werden.

8. Zusammenfassung

8.1 Deutschsprachige Zusammenfassung

Hintergrund

Gegenstand der wissenschaftlichen und klinischen Diskussion ist immer wieder das eventuell bestehende Risiko der einfallenden ionisierenden Röntgenstrahlung auf das Früh- oder Neugeborene, dennoch ist das Röntgen als diagnostisches Mittel notwendig. Es soll untersucht werden, wie hoch das gesundheitliche Risiko durch diagnostische Röntgenaufnahmen in der Praxis für die Früh- und Neugeborenen ist.

Material und Methoden

Alle Patient*innen des Schwerpunktes Neonatologie in der Klinik für Kinder- und Jugendmedizin aus dem Zeitraum vom 01.01.2013 bis 31.12.2018 im Universitätsklinikum Frankfurt wurden retrospektiv untersucht. Es wurden die Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Patient*in, die zugrunde liegende Indikation, das Dosisflächenprodukt (DFP), die Effektive Dosis (ED) und das geschätzte Risiko dokumentiert, bzw. errechnet. Die ED ist eine Schätzgröße, welche mittels Konversionskoeffizienten aus den Eingangsgrößen des DFP, der Eintrittsdosis oder dem Air Kerma (K_{ai}) berechnet wird. Im ICRP Bericht Nr. 60 finden sich Faktoren zur Risikoabschätzung von 2,8 bis $13 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. Diese Risikoeinschätzung nähert das durch Strahlung induzierte Risiko für Krebs in der ersten Lebensdekade an – vor allem für Leukämien, aber auch andere Krebsarten.

Ergebnisse

Von den insgesamt 3843 stationär in der Neonatologie behandelten Patient*innen (2013-2018) erhielten 1307 (34%) mindestens eine Röntgenaufnahme. Pro Jahr wurden in einer Abteilung für Neonatologie ca. 700 Röntgenaufnahmen angefertigt. Die mittlere Anzahl an Röntgenaufnahmen pro Patient*in betrug 3,19 Aufnahmen und korrelierte gegensinnig mit Geburtsgewicht und Gestationsalter. Am häufigsten wurden sehr kleine Frühgeborene untersucht, meistens in den ersten drei Lebenstagen. Im Laufe des Beobachtungszeitraums wurden weniger Röntgenaufnahmen angefertigt.

Die häufigsten Gründe für Röntgenaufnahmen waren Kontrollen von Tubus oder ZVK-Lage. Je reifer und schwerer die Neugeborenen waren, desto seltener wurde ein pathologischer Befund erhoben.

Bei niedrigem Geburtsgewicht war die Thoraxabdomenaufnahme die bevorzugte Röntgenart, bei reiferen Patient*innen die Thoraxaufnahme. Das kumulative DFP betrug im Mittel $5,95 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$ und die kumulative ED betrug im Mittel $23,7 \text{ } \mu\text{Sv}$ pro Aufenthalt. Damit errechnete sich ein Risiko von $3,1 \cdot 10^{-6}$, das bedeutet 3,1 von 1.000.000 Patient*innen entwickeln nach dieser kumulativen Strahlendosis in der ersten Lebensdekade womöglich Krebs. Das kumulative DFP und die ED pro Aufenthalt und somit auch das Risiko, nach einer gewissen Strahlenexposition Krebs zu entwickeln, sinken mit zunehmendem Geburtsgewicht und zeigen einen Höhepunkt bei einem Geburtsgewicht von $<500 \text{ g}$. Die maximale kumulative Strahlendosis betrug $342 \text{ } \mu\text{Sv}$ mit einem daraus resultierenden Risiko von $44 \cdot 10^{-6}$ und ist damit selbst bei diesem Patienten nach Martin et al. als „minimal“ zu werten.

Schlussfolgerung

Die Strahlenbelastung der Früh- und Neugeborenen konnte evaluiert werden und der Zusammenhang zwischen Unreife und Strahlenbelastung konnte bestätigt werden. Die Strahlenbelastung fiel im internationalen Vergleich minimal aus und es ist nicht von einem gesundheitlichen Risiko durch diagnostische Bildgebung auszugehen. Dies lässt sich vor allem durch moderne Technik mit kurzer Belichtungszeit und hoher Aufnahmespannungen und durch die relativ niedrige Anzahl an gemachten Röntgenbildern erklären. Da bei weiterer Minimierung der eingesetzten Dosis von einem Qualitätsverlust der Bilder auszugehen ist, ist die Einsparung von Röntgenuntersuchungen und die vermehrte Nutzung von Alternativen anzuraten. Die Indikationen müssen vor allem bei Patient*innen $<500 \text{ g}$ genauestens überprüft werden. Weiterhin sollte nach Alternativen (Sonographie, Kernspintomographie) gesucht werden.

8.2 Englischsprachige Zusammenfassung

Background

The possible risk to the newborn and premature babies caused by the incoming ionizing rays from x-rays often is subject of scientific and clinical discussion, nevertheless, it remains a diagnostic tool which is nearly indispensable in many situations. This study examines how severe the health threats of diagnostic exposure to x-rays are to newborn and premature babies.

Material and Methods

All hospitalized neonates in the University Clinic Frankfurt were examined in the period from 01.01.2013 to 31.12.2018 retrospectively. The amount of x-ray examinations per patient, the underlying indication, the Dose Area Product (DAP), the Effective Dose (ED) and the estimated risk were documented or calculated. The ED is an estimative value, which is calculated using the measurable values of DAP, entrance skin dose or Air Kerma (K_{ai}) and certain conversion coefficients. The ICRP report Nr. 60 defines the factors ranging from 2.8 to $13 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ to calculate the estimated risk for radiation-induced cancer in the first decade of life.

Results

Of the total of 3843 patients treated in the neonatal unit, 1307 (34%) received at least one x-ray (2013-2018). Each year about 700 x-ray examinations are performed in the Department of Neonatology. The mean-number of x-ray examinations per patient was 3.19 and correlated in opposite directions with birthweight and gestational age. Very small, prematurely born children were examined the most, predominately in the first three days of their life. As the age increased, the number of x-rays decreased. The most common reasons for x-rays were inspection of the tube or CVC position. With increasing maturity and weight of the patients, pathological findings were made less frequently. For patients with a low birthweight, thorax-abdominal images were preferred. For more mature patients however, thorax images were preferred. The mean cumulative DAP was $5.9 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$ and the mean cumulative ED was $23,7 \mu\text{Sv}$ per hospital stay. This corresponds to a risk of $3,1 \cdot 10^{-6}$, which means, that

statistically 3,1 out of 1.000.000 patients develop cancer in the first decade of life, after being exposed to this cumulative dose. The cumulative DAP and ED per stay, and as such, the risk to develop cancer after an exposure to x-rays were lower the higher the weight with a peak at a birthweight of <500 g. The maximum cumulative dose was 342 μSv with a resulting risk of $44 \cdot 10^{-6}$ and therefore even for this patient the risk is to be estimated as minimal according to Martin et al.

Conclusion

The exposure to radiation by diagnostic x-ray has been evaluated for newborn and premature babies. We confirmed the correlation of immaturity with exposure. However, the total exposure was found to be minimal in comparison to international documentation of the same subject, and diagnostic imaging in neonatal care does not seem to pose a health risk as it was expected. This can be explained with the modern technology which uses short exposure time and high voltage along with a relatively low amount of x-ray images needing to be taken. Following the ALARA-principle, there are still aspects that can be improved despite the low risk. Since any further reduction in used dose would likely lead to a loss of image quality, the reduction of x-ray images taken or usage of alternatives is recommended. Images of light-weight patients <500 g and thorax-abdominal images must be checked very carefully with alternatives (sonography, magnetic resonance tomography) being sought here in particular.

9. Literaturverzeichnis

1. Patel RM. Short- and Long-Term Outcomes for Extremely Preterm Infants. *Am J Perinatol*. 2016;33(3):318-328. doi:10.1055/s-0035-1571202
2. Glass HC, Costarino AT, Stayer SA, Brett CM, Cladis F, Davis PJ. Outcomes for extremely premature infants. *Anesth Analg*. 2015;120(6):1337-1351. doi:10.1213/ANE.0000000000000705
3. Liu J, Cao HY, Wang H-W, Kong XY. The Role of Lung Ultrasound in Diagnosis of Respiratory Distress Syndrome in Newborn Infants. *Iran J Pediatr*. 2015;25(1):e323. doi:10.5812/ijp.323
4. Ono K, Akahane K, Aota T, et al. Neonatal doses from X ray examinations by birth weight in a neonatal intensive care unit. *Radiat Prot Dosimetry*. 2003;103(2):155-162. doi:10.1093/oxfordjournals.rpd.a006127
5. Martino L de, Yousef N, Ben-Ammar R, Raimondi F, Shankar-Aguilera S, Luca D de. Lung Ultrasound Score Predicts Surfactant Need in Extremely Preterm Neonates. *Pediatrics*. 2018;142(3). doi:10.1542/peds.2018-0463
6. Kurepa D, Zaghloul N, Watkins L, Liu J. Neonatal lung ultrasound exam guidelines. *J Perinatol*. 2018;38(1):11-22. doi:10.1038/jp.2017.140
7. Piastra M, Yousef N, Brat R, Manzoni P, Mokhtari M, Luca D de. Lung ultrasound findings in meconium aspiration syndrome. *Early Hum Dev*. 2014;90 Suppl 2:S41-3. doi:10.1016/S0378-3782(14)50011-4
8. Liu J, Chen S-W, Liu F, Li Q-P, Kong X-Y, Feng Z-C. The diagnosis of neonatal pulmonary atelectasis using lung ultrasonography. *Chest*. 2015;147(4):1013-1019. doi:10.1378/chest.14-1306
9. Cattarossi L. Lung ultrasound: its role in neonatology and pediatrics. *Early Hum Dev*. 2013;89 Suppl 1:S17-9. doi:10.1016/S0378-3782(13)70006-9
10. Sharma D, Farahbakhsh N. Role of chest ultrasound in neonatal lung disease: a review of current evidences. *J Matern Fetal Neonatal Med*. 2019;32(2):310-316. doi:10.1080/14767058.2017.1376317
11. Chavez MA, Shams N, Ellington LE, et al. Lung ultrasound for the diagnosis of pneumonia in adults: a systematic review and meta-analysis. *Respir Res*. 2014;15(1):50. doi:10.1186/1465-9921-15-50
12. Ron E. Cancer risks from medical radiation. *Health Phys*. 2003;85(1):47-59. doi:10.1097/00004032-200307000-00011

13. Yu C-C. Radiation safety in the neonatal intensive care unit: too little or too much concern? *Pediatr Neonatol*. 2010;51(6):311-319. doi:10.1016/S1875-9572(10)60061-7
14. Boice JD, JR. Cancer following irradiation in childhood and adolescence. *Med Pediatr Oncol Suppl*. 1996;1:29-34.
15. Richardson RB. Past and revised risk estimates for cancer induced by irradiation and their influence on dose limits. *Br J Radiol*. 1990;63(748):235-245. doi:10.1259/0007-1285-63-748-235
16. Armpilia CI, Fife IAJ, Croasdale PL. Radiation dose quantities and risk in neonates in a special care baby unit. *Br J Radiol*. 2002;75(895):590-595. doi:10.1259/bjr.75.895.750590
17. Olgar T, Onal E, Bor D, et al. Radiation exposure to premature infants in a neonatal intensive care unit in Turkey. *Korean J Radiol*. 2008;9(5):416-419. doi:10.3348/kjr.2008.9.5.416
18. Puch-Kapst K, Juran R, Stoeber B, Wauer RR. Radiation exposure in 212 very low and extremely low birth weight infants. *Pediatrics*. 2009;124(6):1556-1564. doi:10.1542/peds.2008-1028
19. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP*. 1991;21(1-3):1-201.
20. Seibt W. *Physik Für Mediziner*. 7., unveränd. Aufl. Thieme; 2015.
21. Jones NF, Palarm TW, Negus IS. Neonatal chest and abdominal radiation dosimetry: a comparison of two radiographic techniques. *Br J Radiol*. 2001;74(886):920-925. doi:10.1259/bjr.74.886.740920
22. Elbakri IA. Estimation of dose-area product-to-effective dose conversion factors for neonatal radiography using PCXMC. *Radiat Prot Dosimetry*. 2014;158(1):43-50. doi:10.1093/rpd/nct192
23. Bundesamt für Strahlenschutz. *Bekanntmachung Der Aktualisierten Diagnostischen Referenzwerte Für Diagnostische Und Interventionelle Röntgenanwendungen*. 22. Juni 2016.
24. Mooney R, Thomas PS. Dose reduction in a paediatric X-ray department following optimization of radiographic technique. *Br J Radiol*. 1998;71(848):852-860. doi:10.1259/bjr.71.848.9828798

25. McDonald S, Martin CJ, Darragh CL, Graham DT. Dose-area product measurements in paediatric radiography. *Br J Radiol.* 1996;69(820):318-325. doi:10.1259/0007-1285-69-820-318
26. Dabin J, Struelens L, Vanhavere F. Radiation dose to premature new-borns in the Belgian neonatal intensive care units. *Radiat Prot Dosimetry.* 2014;158(1):28-35. doi:10.1093/rpd/nct184
27. Martin CJ. Effective dose: how should it be applied to medical exposures? *Br J Radiol.* 2007;80(956):639-647. doi:10.1259/bjr/25922439
28. Makri T, Yakoumakis E, Papadopoulou D, et al. Radiation risk assessment in neonatal radiographic examinations of the chest and abdomen: a clinical and Monte Carlo dosimetry study. *Phys Med Biol.* 2006;51(19):5023-5033. doi:10.1088/0031-9155/51/19/019
29. Smans K, Struelens L, Smet M, Bosmans H, Vanhavere F. Patient dose in neonatal units. *Radiat Prot Dosimetry.* 2008;131(1):143-147. doi:10.1093/rpd/ncn237
30. Smans K, Tapiovaara M, Cannie M, et al. Calculation of organ doses in x-ray examinations of premature babies. *Medical physics.* 2008;35(2):556-568. doi:10.1118/1.2828183
31. Damlakis J, Stratakis J, Raissaki M, Perisinakis K, Kourbetis N, Gourtsoyiannis N. Normalized dose data for upper gastrointestinal tract contrast studies performed to infants. *Medical physics.* 2006;33(4):1033-1040. doi:10.1118/1.2181297
32. Karambatsakidou A, Sahlgren B, Hansson B, Lidegran M, Fransson A. Effective dose conversion factors in paediatric interventional cardiology. *Br J Radiol.* 2009;82(981):748-755. doi:10.1259/bjr/57217783
33. Schmidt PW, Dance DR, Skinner CL, Smith IA, McNeill JG. Conversion factors for the estimation of effective dose in paediatric cardiac angiography. *Phys Med Biol.* 2000;45(10):3095-3107. doi:10.1088/0031-9155/45/10/323
34. Brindhaban A, Al-Khalifah K. Radiation dose to premature infants in neonatal intensive care units in Kuwait. *Radiat Prot Dosimetry.* 2004;111(3):275-281. doi:10.1093/rpd/nch338
35. Wilson-Costello D, Rao PS, Morrison S, Hack M. Radiation exposure from diagnostic radiographs in extremely low birth weight infants. *Pediatrics.* 1996;97(3):369-374.

36. Donadieu J, Zeghnoun A, Roudier C, et al. Cumulative effective doses delivered by radiographs to preterm infants in a neonatal intensive care unit. *Pediatrics*. 2006;117(3):882-888. doi:10.1542/peds.2005-0817
37. Rosenstein M, Beck TJ, Warner GG. *Handbook of Selected Organ Doses for Projections Common in Pediatric Radiology*; 1979. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:11517306.
38. Tapiovaara M, Lakkisto M, Servomaa A. *PCXMC a PC-Based Monte Carlo Program for Calculating Patient Doses in Medical X-Ray Examinations*; 1997; 951-712-176-8. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:28049612.
39. Robinson A, Dellagrammaticas HD. Radiation doses to neonates requiring intensive care. *Br J Radiol*. 1983;56(666):397-400. doi:10.1259/0007-1285-56-666-397
40. Faulkner K, Barry JL, Smalley P. Radiation dose to neonates on a Special Care Baby Unit. *Br J Radiol*. 1989;62(735):230-233. doi:10.1259/0007-1285-62-735-230
41. D. Hart, D. G. Jones, B. Wall. Coefficients for estimating effective doses from paediatric x-ray examinations. *undefined*. 1996.
42. Hart D, Jones DG, Wall BF. *Estimation of Effective Dose in Diagnostic Radiology from Entrance Surface Dose and Dose-Area Product Measurements*. HMSO; 1994.
43. Le Heron JC. Estimation of effective dose to the patient during medical x-ray examinations from measurements of the dose-area product. *Phys Med Biol*. 1992;37(11):2117-2126. doi:10.1088/0031-9155/37/11/008
44. Lakkisto M. *Child Dose: A User Guide*. Christchurch, National Radiation Laboratory, 1997. 1997.
45. PCXMC - A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. PCXMC - A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. Published December 23, 2020. Accessed December 23, 2020. <https://www.stuk.fi/palvelut/pcxmc-a-monte-carlo-program-for-calculating-patient-doses-in-medical-x-ray-examinations>
46. ICRP. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4). *Annals of the ICRP*. Published December 23, 2020. Accessed

- December 23, 2020.
- <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>.
47. Weiss C. *Basiswissen Medizinische Statistik*. 5. überarbeitete Aufl. Springer Medizin Verlag; 2010.
48. Arrøe M. The risk of X-ray examinations of the lungs in neonates. *Acta Paediatr Scand*. 1991;80(5):489-493. doi:10.1111/j.1651-2227.1991.tb11891.x
49. McParland BJ, Gorka W, Lee R, Lewall DB, Omojola MF. Radiology in the neonatal intensive care unit: dose reduction and image quality. *Br J Radiol*. 1996;69(826):929-937. doi:10.1259/0007-1285-69-826-929
50. Sutton PM, Arthur RJ, Taylor C, Stringer MD. Ionising radiation from diagnostic x rays in very low birthweight babies. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed*. 1998;78(3):F227-9. doi:10.1136/fn.78.3.f227
51. Chapple CL, Faulkner K, Hunter EW. Energy imparted to neonates during X-ray examinations in a special care baby unit. *Br J Radiol*. 1994;67(796):366-370. doi:10.1259/0007-1285-67-796-366
52. Wraith CM, Martin CJ, Stockdale EJ, McDonald S, Farquhar B. An investigation into techniques for reducing doses from neo-natal radiographic examinations. *Br J Radiol*. 1995;68(814):1074-1082. doi:10.1259/0007-1285-68-814-1074
53. Fletcher EW, Baum JD, Draper G. The risk of diagnostic radiation of the newborn. *Br J Radiol*. 1986;59(698):165-170. doi:10.1259/0007-1285-59-698-165
54. Generaldirektion Wissenschaft, Forschung und Entwicklung. EUROPÄISCHE LEITLINIEN ÜBER QUALITÄTSKRITERIEN FÜR RÖNTGENAUFNAHMEN IN DER MEDIZINISCHEN DIAGNOSTIK IN DER PÄDIATRIE. Accessed December 20, 2020.
55. Rational use of diagnostic imaging in paediatrics. Report of a WHO Study Group. *World Health Organ Tech Rep Ser*. 1987;757:1-102.
56. Bundesärztekammer. *Leitlinie Zur Qualitätssicherung in Der Röntgendiagnostik*. 23. November 2007.
57. Soboleski D, Theriault C, Acker A, Dagnone V, Manson D. Unnecessary irradiation to non-thoracic structures during pediatric chest radiography. *Pediatr Radiol*. 2006;36(1):22-25. doi:10.1007/s00247-005-0016-y

58. Bader D, Datz H, Bartal G, et al. Unintentional exposure of neonates to conventional radiography in the Neonatal Intensive Care Units. *J Perinatol.* 2007;27(9):579-585. doi:10.1038/sj.jp.7211792
59. Datz H, Ben-Shlomo A, Bader D, et al. The additional dose to radiosensitive organs caused by using under-collimated X-ray beams in neonatal intensive care radiography. *Radiat Prot Dosimetry.* 2008;130(4):518-524. doi:10.1093/rpd/ncn090
60. Kato H. Mortality in children exposed to the A-bombs while in utero, 1945-1969. *Am J Epidemiol.* 1971;93(6):435-442. doi:10.1093/oxfordjournals.aje.a121277
61. Preston DL, Cullings H, Suyama A, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors exposed in utero or as young children. *J Natl Cancer Inst.* 2008;100(6):428-436. doi:10.1093/jnci/djn045
62. Pierce DA, Preston DL. Radiation-Related Cancer Risks at Low Doses among Atomic Bomb Survivors. *Radiat Res.* 2000;154(2):178-186. doi:10.1667/0033-7587(2000)154[0178:RRCRAL]2.0.CO;2
63. Ritenour ER. Health effects of low level radiation: carcinogenesis, teratogenesis, and mutagenesis. *Semin Nucl Med.* 1986;16(2):106-117. doi:10.1016/s0001-2998(86)80024-1
64. Naumburg E, Bellocco R, Cnattingius S, Hall P, Boice JD, JR, Ekblom A. Intrauterine exposure to diagnostic X rays and risk of childhood leukemia subtypes. *Radiat Res.* 2001;156(6):718-723. doi:10.1667/0033-7587(2001)156[0718:ietdxr]2.0.co;2
65. Meinert R, Kaletsch U, Kaatsch P, Schüz J, Michaelis J. Associations between childhood cancer and ionizing radiation: results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 1999;8(9):793-799.
66. Kaatsch P, Kaletsch U, Meinert R, et al. German case control study on childhood leukaemia--basic considerations, methodology and summary of the results. *Klin Padiatr.* 1998;210(4):185-191. doi:10.1055/s-2008-1043877
67. ICRP 2. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105. *Ann ICRP.* 2007;37(6). Accessed December 28, 2020.
68. Generaldirektion Wissenschaft, Forschung und Entwicklung.
EUROPÄISCHE LEITLINIEN ÜBER QUALITÄTSKRITERIEN FÜR

RÖNTGENAUFNAHMEN IN DER MEDIZINISCHEN DIAGNOSTIK IN DER PÄDIATRIE. Accessed December 20, 2020.

69. Duggan L, Warren-Forward H, Smith T, Kron T. Investigation of dose reduction in neonatal radiography using specially designed phantoms and LiF:Mg,Cu,P TLDs. *Br J Radiol.* 2003;76(904):232-237. doi:10.1259/bjr/79291075
70. Smith WL, Gresham E, Berg R, Hobson L, Franken EA, JR, Smith JA. A practical method for monitoring diagnostic radiation dosage in the newborn nursery. *Radiology.* 1979;132(1):189-191. doi:10.1148/132.1.189
71. Strahlenschutzkommission. Orientierungshilfe für bildgebende Verfahren: 3. überarbeitete Auflage, Empfehlung der Strahlenschutzkommission. [verabschiedet in der 300. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 27. Juni 2019]. 2019:1-194. Accessed December 28, 2020.
72. ICRP. 1998. Genetic Susceptibility to Cancer. ICRP Publication 79. *Ann ICRP.* 1998;28(1-2). Accessed December 28, 2020.
73. ICRP 2. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann ICRP.* 2007;37(2-4). Accessed December 28, 2020.
74. *Richtlinie 97/43/Euratom Des Rates Vom 30. Juni 1997, Gesundheitschutz Von Personen Gegen Die Gefahren Ionisierender Strahlung Bei Medizinischer Exposition Und Zur Aufhebung Der Richtlinie 84/466/Euratom.*
75. *Office P. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying down Basic Safety Standards for Protection Against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation, and Repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom.*
76. European Commission. *Radiation Protection 109, Guidance on Diagnostic Reference Levels (DRLs) for Medical Exposures, Luxembourg; Office for Official Publications of the European Communities, 1999.*
77. *Qualitätssicherung Durch Ärztliche Und Zahnärztliche Stellen, Richtlinie Zur Röntgenverordnung Und Strahlen Schutzverordnung; Bundesministerium Für Umwelt, Naturschutz, Bau Und Reaktorsicherheit, 23. Juni 2015 (GMBL. 2015 S. 1026).*

78. *Verordnung Über Den Schutz Vor Schäden Durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung – RöV) in Der Fassung Der Bekanntmachung Vom 30. April 2003 (BGBl. I S. 604), Die Zuletzt Durch Artikel 6 Der Verordnung Vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010) Geändert Worden Ist.*
79. Chen S-W, Fu W, Liu J, Wang Y. Routine application of lung ultrasonography in the neonatal intensive care unit. *Medicine (Baltimore)*. 2017;96(2):e5826. doi:10.1097/MD.0000000000005826
80. Sandig J, Bühner C, Czernik C. Lungensultraschall in der Neonatologie zur Diagnostik eines Pneumothorax (Teil 1): Eine Evidenzanalyse – Zeit für einen neuen Goldstandard. *Z Geburtshilfe Neonatol.* 2021;225(1):15-18. doi:10.1055/a-1312-7773
81. Alrajab S, Youssef AM, Akkus NI, Caldito G. Pleural ultrasonography versus chest radiography for the diagnosis of pneumothorax: review of the literature and meta-analysis. *Critical care (London, England)*. 2013;17(5):R208. doi:10.1186/cc13016
82. Ding W, Shen Y, Yang J, He X, Zhang M. Diagnosis of pneumothorax by radiography and ultrasonography: a meta-analysis. *Chest*. 2011;140(4):859-866. doi:10.1378/chest.10-2946
83. Alrajhi K, Woo MY, Vaillancourt C. Test characteristics of ultrasonography for the detection of pneumothorax: a systematic review and meta-analysis. *Chest*. 2012;141(3):703-708. doi:10.1378/chest.11-0131
84. Corsini I, Parri N, Gozzini E, et al. Lung Ultrasound for the Differential Diagnosis of Respiratory Distress in Neonates. *Neonatology*. 2019;115(1):77-84. doi:10.1159/000493001
85. Liu J, Chi J-H, Ren X-L, et al. Lung ultrasonography to diagnose pneumothorax of the newborn. *The American journal of emergency medicine*. 2017;35(9):1298-1302. doi:10.1016/j.ajem.2017.04.001
86. Raimondi F, Rodriguez Fanjul J, Aversa S, et al. Lung Ultrasound for Diagnosing Pneumothorax in the Critically Ill Neonate. *The Journal of pediatrics*. 2016;175:74-78.e1. doi:10.1016/j.jpeds.2016.04.018
87. Cattarossi L, Copetti R, Brusa G, Pintaldi S. Lung Ultrasound Diagnostic Accuracy in Neonatal Pneumothorax. *Canadian respiratory journal*. 2016;2016:6515069. doi:10.1155/2016/6515069

88. Ploenes T, Schildhaus H-U, Theegarten D, et al. Pleuropulmonary Blastoma Misinterpreted as Spontaneous Pneumothorax in an Infant. *The Annals of thoracic surgery*. 2020;110(1):e79. doi:10.1016/j.athoracsur.2020.03.033
89. Bernardo G de, Sordino D, Chiara C de, et al. Management of NEC: Surgical Treatment and Role of Traditional X-ray Versus Ultrasound Imaging, Experience of a Single Centre. *Curr Pediatr Rev*. 2019;15(2):125-130. doi:10.2174/1573396314666181102122626
90. Wang L, Li Y, Liu J. Diagnostic value and disease evaluation significance of abdominal ultrasound inspection for neonatal necrotizing enterocolitis. *Pak J Med Sci*. 2016;32(5):1251-1256. doi:10.12669/pjms.325.10413
91. van Druten J, Khashu M, Chan SS, Sharif S, Abdalla H. Abdominal ultrasound should become part of standard care for early diagnosis and management of necrotising enterocolitis: a narrative review. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed*. 2019;104(5):F551-F559. doi:10.1136/archdischild-2018-316263
92. Yikilmaz A, Hall NJ, Daneman A, et al. Prospective evaluation of the impact of sonography on the management and surgical intervention of neonates with necrotizing enterocolitis. *Pediatr Surg Int*. 2014;30(12):1231-1240. doi:10.1007/s00383-014-3613-8

12. Schriftliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main zur Promotionsprüfung eingereichte Dissertation mit dem Titel

**Röntgenbelastung und Röntgenuntersuchungen
bei
Frühgeborenen und kranken Neugeborenen**

in der Klinik für Kinder- und Jugendmedizin unter Betreuung und Anleitung von Prof. Dr. Rolf Schlößer mit Unterstützung durch Prof. Dr. Martin Beeres ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe. Darüber hinaus versichere ich, nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlung in Anspruch genommen zu haben.

Ich habe bisher an keiner in- oder ausländischen Universität ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht*. Die vorliegende Arbeit wurde bisher nicht als Dissertation eingereicht.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

*) im Falle des Nichtzutreffens entfernen