

Aus der Klinik für Strahlenheilkunde
der Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Methodische und klinische Evaluation eines
modernen Flachbettdetektors und des Dual Energy
Verfahrens**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät Charité
der Humboldt-Universität zu Berlin

von
Torsten Freund
aus Cottbus

Gutachter:

1. Prof. Dr. med. J. Ricke

2. Prof. Dr. med. K. J. Klose

3. Prof. Dr. med. M. Galanski

Datum der Promotion:

23.06.2006

Zusammenfassung

Ziel der Dissertation war, einen experimentellen Prototyp der Dual Energy Technik (XQi revolution, GE Medical Systems, Milwaukee, Wisc, USA) zu evaluieren. Bei diesem Verfahren werden ein Hartstrahl (120 kV) und ein 60 kV Bild geschossen. Im Anschluß werden diese beiden Bilder voneinander subtrahiert und es entsteht ein Knochenbild, in dem die Weichteilstrukturen, und ein Weichteilbild, indem die knöchernen Strukturen mathematisch herausgerechnet wurden.

In einer initialen Studie verglichen wir das XQi Revolution, welches auf indirektem CsI (Cäsium Iodit) / a: Si (amorphes Silizium) basiert mit einem direkten Digitalröntgengerät a: SE (amorphes Selen) an einem CDRAD-Phantom bei vier unterschiedlichen Eintrittsdosen und an einem TRG-Phantom bei zwei unterschiedlichen Eintrittsdosen. Mittels des berechneten Bildqualitätsfaktors des CDRAD-Phantoms konnten wir zeigen, daß das indirekte im Vergleich zum direkten System bei niedrigeren Dosen eine bessere Detail-erkennungsrate aufweist. Ein positiver Trend läßt sich auch beim TRG-Phantom darstellen.

In einer weiteren Studie untersuchten wir anhand von Patientenbildern die Bildqualität des Dual Energy Systems bei zwei unterschiedlichen Dosisniveaus, der Standarddosis sowie einer doppelten Dosis, was einem Speed-Äquivalent von 400/1000 bzw. 200/500 entspricht. Bei hoher Dosis konnten wir eine signifikante Reduktion des Rauschens im Knochen- und Weichteilbild feststellen, gleichzeitig nahmen die Störungen durch Bewegungsartefakte signifikant zu.

Im Anschluß verglichen wir die Erkennbarkeit verkalkter Lungenpathologien im Standard P/A Bild mit zusätzlichem Einsatz von Dual Energy. Als Goldstandard erfolgte der sichere Nachweis der Pathologien im CT. Bei zusätzlichem Einsatz von Dual Energy konnten wir eine signifikante Steigerung der Sensitivität erkennen. Dieses Ergebnis wurde durch den Qualitätsfaktor, der die Bildeigenschaften kumulativ beschreibt, bestätigt.

Weiterhin untersuchten wir analog die Erkennbarkeit von nichtverkalkten Lungenrundherden. Auch bei diesen Pathologien ließ sich ein positiver Trend der Sensitivität und Spezifität bei zusätzlichem Einsatz von Dual Energy erkennen. Zusätzlich stieg die durchschnittliche Entscheidungssicherheit der Gutachter signifikant an. Damit bietet die Dual Energy Subtraktionstechnik eine wertvolle Ergänzung in der Diagnostik verkalkter und nichtverkalkter Lungenpathologien eine wertvolle

Ergänzung zum Standardröntgen, bei einem gemessenen Dosisanstieg durch Verwendung des Dual Energy Verfahrens um 14 % zu den Standardaufnahmen in zwei Ebenen.

Abstract

First study assess and quantify the image quality at two dose levels for an amorphous Silicon (a:Si) Cesium Iodide (CsI) flat panel system compared with a direct amorphous Selenium (a:Se) digital radiography system. Image quality of a:Si flat panel digital radiography proved to be superior to a:Se drum digital radiography using low-dose settings.

Second study assess the image quality of subtracted soft tissue and bone images of a CsI detector-based dual-energy system for chest radiography at varying dose levels. Radiation dose did not significantly influence the perception of dual-energy image quality.

Next study assess the value of dual-energy chest radiography obtained using a cesium iodide flat-panel detector in addition to standard posteroanterior chest radiography for the detection of calcified chest abnormalities. When dual-energy images were added, sensitivity increased significantly. Brunner and Langer's test revealed a highly significant difference between posteroanterior chest radiography and dual-energy imaging in the detection of calcified chest abnormalities. Dual-energy images added to standard posteroanterior chest radiographs significantly improve the detection of calcified chest lesions.

Last study compare the sensitivity and specificity of digital chest radiography alone with digital chest radiography combined with dual-energy chest radiography in the detection of small non-calcified pulmonary nodules. Standard and dual-energy radiographs were obtained with a flat-panel digital chest system. The increase of nodule detection overall as well as for different size categories was significant. The increase of the confidence level rating was also significant. Dual energy added to standard posteroanterior chest radiography significantly improves the sensitivity, specificity, and confidence in detection of small non-calcified pulmonary nodules. Dual-energy subtraction has the potential to become a future routine application in chest radiography.

Schlagwörter: Digitale Radiologie, amorphes Selen, amorphes Silizium, Thoraxröntgen, Dual-Energy-Subtraktion, Dual Energy, Flachbettdetektoren, Digitale Detektoren, Lungenrundherde, verkalkte Pathologien

Keywords: digital radiography, amorphous selenium, amorphous silicon, chest radiography, dual-energy subtraction, dual energy, flat panel radiography, digital detector radiography, pulmonary nodule, calcified chest abnormalities

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung und Zielstellung | 7 |
| 2 | Material und Methoden | 8 |
| 2.1 | Phantomstudie | 8 |
| 2.1.1 | CDRAD-Phantom | 8 |
| 2.1.2 | TRG-Phantom | 9 |
| 2.2 | Dosisstudie | 9 |
| 2.3 | Klinischer Vergleich verkalkter Pathologien anhand von Dual Energy und Standardröntgen | 10 |
| 2.4 | Klinischer Vergleich nichtverkalkter Lungenrundherde anhand von Dual Energy und Standardröntgen | 11 |
| 3 | Ergebnisse | 12 |
| 3.1 | Phantomstudie | 12 |
| 3.1.1 | CDRAD-Phantom | 12 |
| 3.1.2 | TRG-Phantom | 13 |
| 3.2 | Dosistudie | 13 |
| 3.3 | Klinischer Vergleich verkalkter Pathologien anhand von Dual Energy und Standardröntgen | 15 |
| 3.4 | Klinischer Vergleich nichtverkalkter Lungenrundherde anhand von Dual Energy und Standardröntgen | 15 |
| 4 | Diskussion | 17 |
| 4.1 | Phantomstudie | 17 |
| 4.2 | Dosisstudie | 17 |
| 4.3 | Klinischer Vergleich verkalkter Pathologien anhand von Dual Energy und Standardröntgen | 17 |
| 4.4 | Klinischer Vergleich nichtverkalkter Lungenrundherde anhand von Dual Energy und Standardröntgen | 18 |
| | Literaturverzeichnis | 19 |
| | Publikationsverzeichnis | 20 |
| | Danksagung | 21 |
| | Eidestättliche Erklärung | 22 |

1 Einleitung und Zielstellung

In den vergangenen Jahren sind verschiedenste Versuche durchgeführt worden, die Entdeckung und Klassifikation von Lungenrundherden in der Bildgebung zu verbessern. Einer der vielversprechenden Ansätze ist der Gebrauch von zwei unterschiedlichen Photonenergien in der Bildgebung des Röntgenthorax, um spezifische Gewebeeigenschaften zu extrahieren. Die damit verbundene Trennung des abgebildeten Gewebes in Knochen- und Weichteil-Informationen könnte die Erkennung von Lungenpathologien erleichtert werden. Jedoch haben sich die bisher angewandten Bildgebungstechniken noch nicht in der täglichen klinischen Routine etablieren können. Grund dafür ist, die bisher nur unvollständige Trennung von Knochen- und Weichteilgewebe. Diese Trennung konnte mittels digitaler Bildverarbeitungsverfahren verbessert werden. Bisher kommen zwei unterschiedliche Techniken zum Einsatz: Einzelschuß- und Zweischußtechnik.[10]

Bei der Einzelschußtechnik wird der Projektionsstrahl durch einen Filter zwischen den beiden Detektoren in einen hohen und einen niedrigen Energiebestandteil getrennt [5]; in der Zweischußtechnik (Dual-Energy-System) wird diese Trennung durch zwei zeitlich kurz versetzte Belichtungen mit jeweils hoher und niedriger Röntgenspannung durchgeführt.[8] In der Bildnachbearbeitung beider Methoden entstehen jeweils eine Knochen- und eine Weichteilabbildung.

In der Studie untersuchen wir ein experimentelles Dual-Energy-System (XQi revolution, GE Medical Systems, Milwaukee, Wisc, USA). Angewandt wird eine digitale Subtraktionstechnik, die knochendichte und weichteildichte Strukturen eines Bildes voneinander trennt. Dafür werden eine niedrigenergetische und eine hochenergetische Aufnahme mit 60 bzw. 120 kV erzeugt. Durch die Subtraktion der beiden Bilder voneinander entstehen ein Knochen- und ein Weichteilbild.

Durch die Technik erwarten wir eine verbesserte Detektion von verkalkten und nicht verkalkten Lungenrundherden. Einerseits da die Überlagerung der Rundherde durch Rippen wegfällt und andererseits da mögliche kalkdichte Binnenstrukturen eines entdeckten Herdes im Knochenbild deutlicher hervorgehoben werden können.[4]

Weiterhin erwarteten wir eine im Vergleich zum etablierten konventionellen Röntgen höhere Sensitivität und Spezifität für Pathologien des Lungengerüsts und des knöchernen Thorax, wie zum Beispiel in der Diagnostik frischer Rippenfrakturen.[2]

2 Material und Methoden

Alle Untersuchungen wurden am Dual-Energy-System (XQi revolution, GE Medical Systems, Milwaukee, Wisc, USA) durchgeführt. Das Dual-Energy-System wendet eine hohe und eine niedrige Energie von 120 kV bzw. 60 kV an, um Knochen- und Weichteilinformation zu trennen. Die dabei entstandenen Weichteil-, Knochen- und p.a. Bilder wurden entweder digital oder als Filmkopie ausgewertet.

[Details siehe Publikation Nr. 2, S. 42, Fig. 1. A – C]

Alle Patienten wurden anhand ihres p.a. Thoraxdurchmessers in eine kleine (weniger als 22 cm), eine mittlere (23 cm bis 35 cm) und eine große (größer als 36 cm) Gruppe eingeteilt.

2.1 Phantomstudie

In dieser Studie verglichen wir indirekte [CsI (Cäsium Iodit) /a: Si (amorphes Silizium)] und direkte [a: SE (amorphes Selen)] Digitalröntgenografie mittels CDRAD- und TRG-Phantom bei unterschiedlichen Eintrittsdosen.

[Details siehe Publikation Nr. 1, S. 617, Fig. 1 und 2]

Direkte Systeme wandeln Röntgenstrahlen unmittelbar in eine elektrische Ladung um.[7] Indirekte Systeme wandeln Röntgenstrahlen zuerst über einen Zwischenschritt (CsI) in sichtbares Licht und dann durch eine Photodiode (amorphes Silizium) in elektrische Ladungen um.[3] Bisherige Studien kommen zu dem Ergebnis, daß das indirekte System gegenüber dem direkten System einen Vorteil bei der Informationstrennung hat.[4] In unserer Studie wollen wir untersuchen, ob sich dieser physikalische Vorteil auch auf die Bildqualität auswirkt.

Als indirektes System nutzten wir das oben beschriebene Dual-Energy-System, als direktes das Thoravision Selenium drum (Philips Medical Systems, Hamburg, Germany).

Nach mehreren Testdurchläufen legten wir für beide Systeme Eintrittsdosen fest, die mittels Radcal (Model 2026c, Radcal Corporation, Monrovia, CA, USA) gemessen wurden.

2.1.1 CDRAD-Phantom

Für das direkte und indirekte System wurden Eintrittsdosen von 41,4; 57,9; 75,1; 120,8 μGy bzw. 39,9; 58,4; 75,6; 117,9 μGy gemessen.

Zu Beurteilen waren Röntgenbilder von Löchern unterschiedlichen Durchmessers

und unterschiedlicher Lochtiefe, die jeweils vier unabhängigen Gutachtern präsentiert wurden.[1] Die kleinsten wahrnehmbaren Details wurden in einem Graphen verbunden.[13] Aus den entstandenen Daten berechneten wir den Bildqualitätsfaktor und führten eine statistische Analyse mittels Korrelation nach Pearson und dem Wilcoxon-Test durch. Der Bildqualitätsfaktor ist definiert als die Summe der kleinsten noch erkannten Lochtiefen der jeweiligen Lochdurchmesser, d.h. je besser die Bildqualität, desto kleiner der Qualitätsfaktor.

[Details siehe Publikation Nr. 1, S. 620, Table 2]

2.1.2 TRG-Phantom

Für das TRG-Phantom wählten wir eine hohe und eine niedrige Einstellung. Dabei wurden Eintrittsdosen von 126,2 bzw. 35 μGy für das direkte und 125,9 bzw. 34,4 μGy für das indirekte System ausgewählt.

Fünf von zehn Ringen enthielten ein simuliertes kritisches Detail, wobei wir die Reihenfolge der Ringe insgesamt fünfmal veränderten. Die Gutachter mußten entscheiden in welchem der Ringe jeweils das kritische Detail enthalten ist, und ihre Entscheidung anhand einer Skala bewerten. Als Skala wählten wir fünf Kategorien: 1 sicher positiv, 2 wahrscheinlich positiv, 3 unsicher positiv oder negativ, 4 wahrscheinlich negativ, 5 sicher negativ. Die Ergebnisse wurden mittels ROC-Analyse ausgewertet, hierfür nutzten wir ROCFITTM Software durch Charles Metz (Chicago, IL, USA). Eine statistische Analyse wurde mittels des Wilcoxon-Tests durchgeführt.

2.2 Dosisstudie

Ziel dieser Studie war es die Bildqualität des indirekten Systems bei Verwendung der Dual-Energy-Technik und unterschiedlichen Dosen zu bewerten. Die drei Thoraxdurchmessergrößengruppen wurden randomisiert in zwei Dosisgruppen mit den erwarteten Empfindlichkeitsgruppen von 400/1000 und 200/500 Speed verteilt. Die wirklichen Geschwindigkeiten wurden mittels eines Hauteintrittsdosisdetektors ermittelt.

[Details siehe Publikation Nr. 2, S. 44, Table 1 und 2]

Untersucht wurden 126 Patienten, 64 mit einem erwarteten Speed von 400/1000 und 62 Patienten mit 200/500. Patienten der größten Thoraxdurchmessergruppe wurden aus Strahlenschutzgründen nicht mit der erhöhten Dosis untersucht. Die Bildbeurteilung wurde doppelblind von zwei erfahrenen Radiologen durchgeführt. Eingeschätzt

wurden: (1) Rauschen im Weichteilbild, (2) Rauschen im Knochenbild und Bewegungsartefakte (3) Anteil der nicht rausrechenbaren Knochen im Weichteilbild, (4) Beurteilbarkeit der Lungengefäßzeichnung, (5) Beurteilung der Herzkontur und der Aorta. Folgender Bewertungsskala wurde dabei verwendet: 1 = stark störend; 2 = störend; 3 = annehmbar; 4 = minimal; 5 = nicht erkennbar.

Für die Darstellung der (6) Wirbelsäule und der Rippen, der (7) retrokardialen Rippen, der (8) Lungenspitze und der Darstellung der (9) prä- und retrokardialen Lungenanteile wurde eine dreistufige Bewertungsskala angewendet: 1 = schlecht; 3 = nicht entscheidbar; 5 = gut. Für die statistische Analyse wurden ein χ^2 -Test in einem 95% KI durchgeführt.

2.3 Klinischer Vergleich verkalkter Pathologien anhand von Dual Energy und Standardröntgen

Studienziel war es zu vergleichen, ob die zusätzliche Verwendung der Dual Energy Technik Verkalkungen im Thoraxröntgenbild besser darzustellen vermag als das Standardröntgenverfahren.[6] Als Goldstandard verwendeten wir CT-Untersuchungen mit KM-Gabe am Somatom Plus 4 Volume Zoom (Siemens, Erlangen, Deutschland).

Untersucht wurden 20 Patienten mit insgesamt 37 Verkalkungen. Wiederum erfolgte die Auswertung der Thoraxröntgenbilder durch vier unabhängige Radiologen. Als Negativkontrollen dienten dabei 28 Lokalisationen des gleichen Patientenkollektivs, die im CT definitiv nicht verkalkt waren. Die randomisierte Begutachtung von Standardröntgenbildern und Standardröntgenbildern inklusive der Knochen- und Weichteilbilder erfolgte im Abstand von einer Woche. Die Ergebnisse wurden ausgewertet, Sensitivität, Spezifität, Positiver Vorhersagewert und Negativer Vorhersagewert berechnet. Zusätzlich wurde ein Qualitätsfaktor für die statistische Analyse berechnet. Er entspricht der Summe der richtig positiven Entscheidungen und richtig negativen Entscheidungen, dividiert durch die Anzahl aller theoretischer Pathologiefelder (37 Verkalkungen + 28 Negativkontrollen = 65). Für die statistische Analyse nutzten wir den Wilcoxon-Test und den Test nach Brunner und Langer. Um die Dosiserhöhung des zusätzlichen Energieschusses des DE-Gerätes zu ermitteln, wurde die Hauteintrittsdosis mittels eines Phantoms (Alderson-Rando-Phantom) und eines Dosimeter (Radcal, Model 2026c, Radcal Co., Monrovia, California) gemessen.

[Details siehe Publikation Nr. 3, S. 1521, Table 1]

2.4 Klinischer Vergleich nichtverkalkter Lungenrundherde anhand von Dual Energy und Standardröntgen

Ziel dieser Studie war es herauszufinden, inwieweit die Dual Energy Technik nichtverkalkte Rundherde im Thoraxröntgenbild besser darzustellen vermag als das Standardröntgenverfahren allein. Wir untersuchten 20 Patienten mit insgesamt 59 im CT nachgewiesenen Lungenrundherden der Größe von 0,3 – 2,5 cm.

Die Lungenrundherde wurden anhand ihrer Größe in Subgruppen eingeteilt: Gruppe 1 (größer als 1 cm), Gruppe 2 (0,5 – 1 cm) und Gruppe 3 (kleiner 0,5 cm). Als Einschätzung der Erkennungssicherheit dieser Lungenpathologien wurde dabei folgende Skalierung verwendet:

(1) sicher kein Rundherd, (2) wahrscheinlich kein Rundherd, (3) nicht sicher positiv oder negativ [indifferent], (4) wahrscheinlich ein Rundherd, (5) sicher ein Rundherd.[12]

21 Lokalisationen wurden als Negativkontrolle bestimmt. Die Röntgenuntersuchungen wurden mit dem oben beschriebenen XQI Revolution Gerät, die CT Untersuchungen plus Kontrastmittelgabe mit Somatom Plus 4 Volume Zoom, Siemens, Erlangen, Germany durchgeführt. Vier erfahrene Radiologen begutachteten randomisiert die Standardröntgenbilder und im Abstand von einer Woche die Knochen- und Weichteilbilder zusätzlich zu den Standardröntgenbildern. Zusätzlich gruppieren wir die Gutachter in zwei Gruppen: Gruppe 1 - erfahrene DE-Gutachter und Gruppe 2 - unerfahrene DE-Gutachter. Die unerfahrenen DE-Gutachter wurden mittels 20 Test-DE-Bildern an die neue Technik herangeführt.

Die Ergebnisse wurden ausgewertet, Sensitivität, Spezifität, Positiver Vorhersagewert und Negativer Vorhersagewert berechnet. Die statistische Analyse führten wir mit dem Test nach Brunner und Langer durch. Um die Dosiserhöhung des zusätzlichen Energieschusses des DE-Gerätes zu ermitteln, wurde die Hauteintrittsdosis mittels eines Phantoms (Alderson-Rando-Phantom) und eines Dosimeter (Radcal, Model 2026c, Radcal Co., Monrovia, California) gemessen.

3 Ergebnisse

3.1 Phantomstudie

3.1.1 CDRAD-Phantom

Das indirekte System zeigte bei niedrigeren Dosen eine bessere Detailerkennungsrate mit einem kleineren Bildqualitätsfaktor.

[Details siehe Publikation Nr. 1, S. 619, Fig. 3]

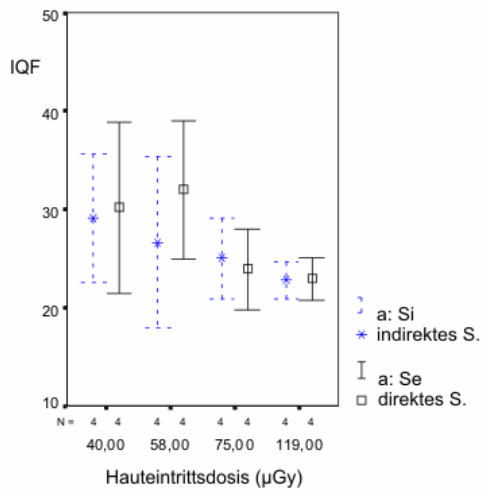


Abb. 1: IQF Fehlerbalken

Die grafische Darstellung des Bildqualitätsfaktors bei niedrigen Dosen zeigt eine Verschlechterung der Bildqualität beim direkten System, bei einer nur geringfügigen Verschlechterung des indirekten Systems.

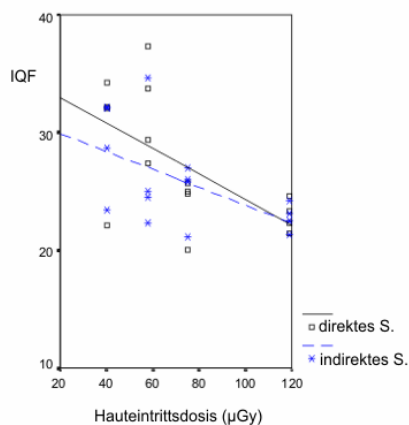


Abb. 2: IQF Regressionsgeraden

Die Korrelation nach Pearson und die Darstellung der Regressionsgeraden bestätigt dieses Ergebnis.

3.1.2 TRG-Phantom

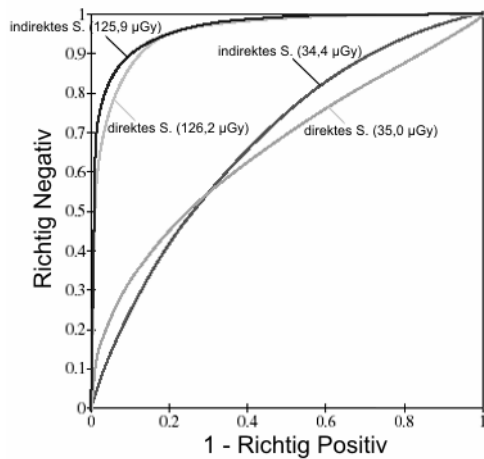


Abb. 3: ROC – Analyse

Die Darstellung der ROC-Analyse für das TRG-Phantom zeigt eine geringfügig bessere Bildqualität des indirekten Systems. Die Fläche unter der Kurve beträgt für die niedrige Dosis für das direkte System 0,66 und für das indirekte System 0,68, für die hohe Dosis 0,96 für beide Systeme.

3.2 Dosistudie

Nach Berechnung der linearen Korrelation und des χ^2 Tests erfolgte die grafische Darstellung der jeweiligen Bewertungsskalen in Abhängigkeit von den Geschwindigkeiten.

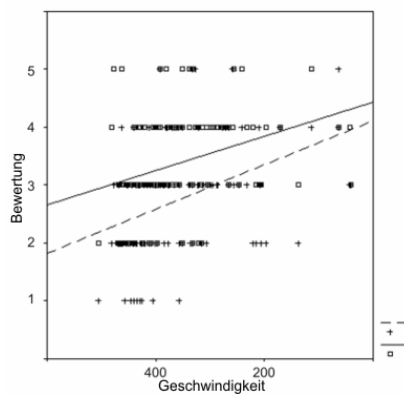


Abb. 4: Rauschen

Das Rauschen scheint bei höherer Dosis (200) signifikant abzunehmen. Für das Rauschen im Weichteilbild (+) ermittelten wir eine lineare Regressionsgerade $y = 5,9^{-4} x + 2,7$ und einen signifikanten χ^2 -Test ($p < 0,05$), für das Rauschen im Knochenbild (□) eine Regressionsgerade $y = 7,7^{-4} x + 1,8$ und ebenfalls einen signifikanten χ^2 -Test ($p < 0,05$).

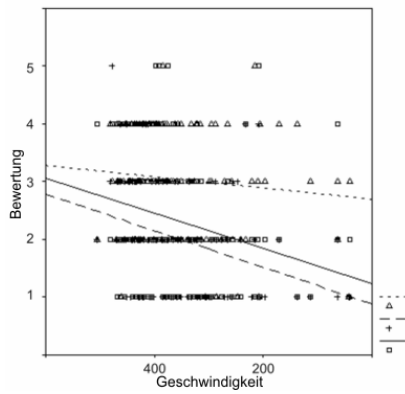


Abb. 5: Bewegungsartefakte

Bis auf die Beurteilbarkeit der Lungengefäßzeichnung nehmen die Bewegungsartefakte mit steigender Dosis signifikant zu. Für den Anteil der residuellen Knochenstrukturen im Weichteilbild (□) ermittelten wir eine Regressionsgerade $y = -6,2^{-4} x + 3,1$ und einen χ^2 -Test ($p < 0,05$), für die Beurteilbarkeit der Herzkontur und der Aorta (+) $y = -6,4^{-4} x + 2,8$ ($p < 0,05$), und für die Beurteilbarkeit der Lungengefäßzeichnung (△) $y = -2,0^{-4} x + 3,3$ ($p > 0,05$)

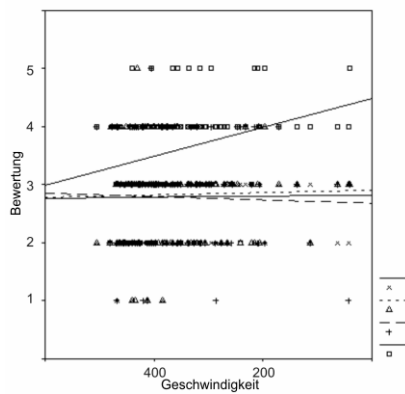


Abb. 6: Andere Qualitätsfaktoren

Bis auf die Darstellbarkeit der Wirbelsäule und Rippen, die signifikant von einer Dosiserhöhung profitierten, scheint die Dosis keinen signifikanten Einfluß auf die oben genannten Qualitätsfaktoren zu haben. Für die Darstellung der Wirbelsäule und Rippen (□) ermittelten wir die Funktion $y = 5,0^{-4} x + 3,0$ ($p < 0,05$), für die retrokardialen Rippen (+) $y = -5,7^{-5} x + 2,9$ ($p > 0,05$), die Lungenspitze (△) $y = 4,0^{-5x} + 2,8$ ($p > 0,05$) und die prä- / retrokardialen Lungenanteile (x) $y = 1,9^{-5} x + 2,8$ ($p > 0,05$).

3.3 Klinischer Vergleich verkalkter Pathologien anhand von Dual Energy und Standardröntgen

In den untersuchten Standardröntgenbildern errechneten wir eine Sensitivität von 36%, eine Spezifität von 73%, einen positiven und negativen Vorhersagewert von 64% bzw. 47%. Der zusätzliche Einsatz von Dual Energy Bildern ergab eine Sensitivität von 66%, eine Spezifität von 73%, einen positiven und negativen Vorhersagewert von 76% bzw. 62%.

Was einer signifikanten Verbesserung der Sensitivität für die Detektion verkalkter Pathologien entspricht ($p < 0,059$).

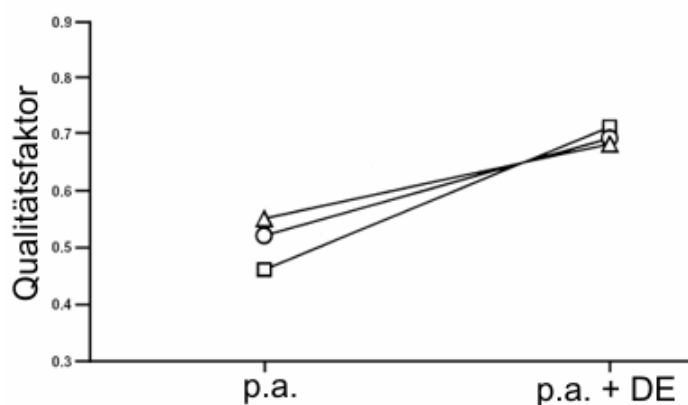


Abb. 7: Qualitätsfaktor verkalkte Lungenpathologien

Der durchschnittliche Qualitätsfaktor stieg bei zusätzlicher Verwendung der Dual Energy Technik von 0,52 auf 0,69. Der berechnete Test nach Brunner und Langer zeigte ebenfalls eine statistisch signifikante Qualitätssteigerung ($p < 0,01$). Die Verbesserung der Beurteilbarkeit war von den Gutachtern unabhängig, da alle vier von einem zusätzlichen Einsatz der Dual Energy Technik profitierten und keine signifikanten Unterschiede innerhalb der Gruppe auftraten ($p > 0,05$).

3.4 Klinischer Vergleich nichtverkalkter Lungenrundherde anhand von Dual Energy und Standardröntgen

Im Standardröntgenverfahren wurden von den 59 im CT nachgewiesenen nicht-verkalkten Lungenrundherden im Durchschnitt 20 erkannt, mit den zusätzlichen DE-Bildern stieg diese Zahl auf durchschnittlich 25 an. Die Sensitivität im Standardröntgenverfahren lag bei 33%, die Spezifität bei 81%, der positive und negative Vorhersagewert bei 83% bzw. 30%. Der zusätzliche Einsatz von Dual Energy Bildern ergab eine Sensitivität von 42%, eine Spezifität von 85%, einen positiven und negativen Vorhersagewert von 88% bzw. 34%. Die durchschnittliche Sicherheit

der Entscheidung lag für das Standardröntgenverfahren bei 2,75 und für die zusätzlichen DE-Bilder bei 3,02.

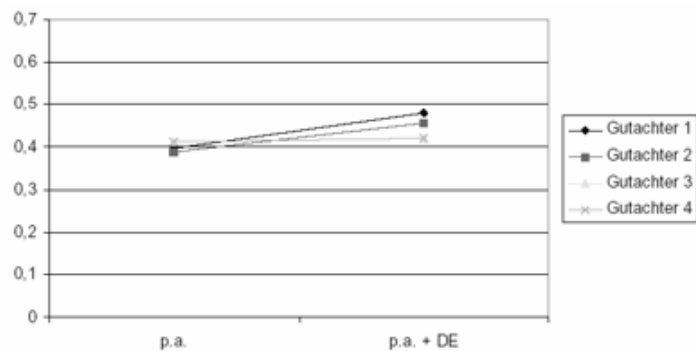


Abb. 8: Ergebnisse nichtverkalkter Rundherde aller Subgruppen gemeinsam

Der Test nach Brunner und Langer zeigt die signifikante Steigerung der Erkennungsrate von Lungenpathologien ($p < 0,001$). Die Subgruppe 1 mit insgesamt 15 Rundherden und die Subgruppen 2 und 3 mit 14 bzw. 30 Rundherden zeigten ebenfalls eine signifikante Steigerung der Erkennungsrate bei Verwendung der zusätzlichen DE-Bildern ($p < 0,05$).

[Details siehe Publikation Nr. 4, S. 2580, Table 1]

Bei der Verbesserung der Erkennbarkeit nichtverkalkter Lungenrundherde ist eine Abhängigkeit von den Gutachtern feststellbar, während die Gruppe 1 (mit DE-Bildern erfahrene Radiologen) signifikant vom zusätzlichen Einsatz der DE-Bilder profitiert, zeigt Gruppe 2 nur einen positiven Trend ($p < 0,001$ bzw. $p = 0,08$). Die gemessenen Hauteintrittsdosen bei einem Speed - Äquivalent von 400 für das Standardröntgenverfahren lagen bei $110 \mu\text{Gy}$ für die p.a.-Aufnahme und bei $680 \mu\text{Gy}$ für die laterale Aufnahme. Das zusätzliche 60 kV Bild der Dual Energy Technik erhöhte die Gesamtdosis der Aufnahmen, mit einer gemessenen Eintrittsdosis von $110 \mu\text{Gy}$, um 14%.

4 Diskussion

4.1 Phantomstudie

Die Bildqualität und die Detailerkennbarkeit des indirekten Systems war bei niedrigeren Dosen besser als die des direkten Systems. Da eines der Hauptziele der Radiologie die Dosisminimierung bei gleichbleibender oder nur unwesentlich verschlechterter Bildqualität ist, kann das indirekte System im Vergleich zu dem direkten System hierzu einen Beitrag leisten.

4.2 Dosisstudie

Um die Erkennbarkeit von Lungenpathologien zu erhöhen, ist die Möglichkeit der digitalen Subtraktion von störenden anatomischen Strukturen insbesondere der Rippen ein vielversprechender Ansatz. In dem von uns untersuchten Dual Energy Prototyp bei unterschiedlichen Dosen nahm das Rauschen im Knochen-, wie auch im Weichteilbild mit steigender Dosis signifikant ab, gleichzeitig nahmen jedoch Bewegungsartefakte signifikant zu, weitere beobachtete Qualitätsfaktoren profitierten nicht von einer Dosiserhöhung. Eine Dosiserhöhung hat somit keinen positiven Gesamteffekt auf die beobachtete Bildqualität.

4.3 Klinischer Vergleich verkalkter Pathologien anhand von Dual Energy und Standardröntgen

Radiologen haben oft die Aufgabe, solitäre Rundherde im Thoraxröntgen einzuschätzen. Dabei spielt es eine entscheidende Rolle, ob dieser Rundherd verkalkt ist oder nicht, da ein verkalkter Rundherd eher für einen benignen Prozeß spricht, wohingegen ein nicht verkalkter Rundherd oft der weiteren Abklärung bedarf. Die bessere Unterscheidung von benignen und malignen Prozessen würde nicht nur den Patienten weitere, wahrscheinlich nicht erforderliche, teilweise belastende Untersuchungen ersparen, sondern auch zur Kostensenkung im Gesundheitswesen beitragen. Die von uns durchgeführte Studie zeigt eine signifikant verbesserte Erkennung dieser Verkalkungen mit Dual Energy Technik im Vergleich zum alleinigen Standardröntgenverfahren, auch wenn insgesamt die Erkennungsrate weit unterhalb der des CTs bleibt.

[Details siehe Publikation Nr. 3, S. 1522ff, Fig. 2. A – E, Fig. 3. A – E]

4.4 Klinischer Vergleich nichtverkalkter Lungenrundherde anhand von Dual Energy und Standardröntgen

Unsere Studie zeigte eine signifikante Verbesserung von Sensitivität, Spezifität, positivem und negativem Vorhersagewert bei zusätzlicher Nutzung der DE-Technik.

Desweiteren steigt die Entscheidungssicherheit der Gutachter signifikant.

Die von uns gemessene relativ geringe Sensitivität der Erkennung von Lungenrundherden sowohl im Standardröntgenverfahren, als auch mit Dual Energy Technik ist vergleichbar mit Publikationen anderer Autoren. Gleichzeitig sollte berücksichtigt werden, daß die Anzahl der Rundherde kleiner 0,5 cm in unserer Studie mit 30 von 59 Rundherden sehr groß war.[9, 11]

Im Standardröntgenverfahren können durch überlappende anatomische Strukturen fehlerhaft positive und fehlerhaft negative Ergebnisse von Lungenpathologien entstehen. Mit dem Dual Energy Verfahren und dem Separieren von Knochen- und Weichteilbild können diese Probleme vermindert und Sensitivität und Spezifität gesteigert werden. Obwohl die Ergebnisse auch mit Dual Energy Verfahren dem CT deutlich unterlegen bleiben, stellt die Dual Energy Technik ein wertvolles Verfahren dar, um die Standardscreeningmethode Thoraxröntgen mit gering höherer Dosis zu verbessern. Voraussetzung ist eine weiter optimierte Technik und eine verbesserte, benutzerfreundliche Software des Systems.

Literaturverzeichnis

- 1 Aufrechtig R.: Comparison of low contrast detectability between a digital amorphous silicon and a screen-film based imaging system for thoracic radiography. *Med Phys.* 1999, *26*, S. 1349-1358
- 2 Barnes GT, Sones RA, Tesic MM, Morgan DR, Sanders JN.: Detector for dual energy digital radiography. *Radiology.* 1985, *Aug;156(2)*, S. 537-40
- 3 Granfors PR, Aufrechtig R, Possin GE, Giambattista BW, Huang ZS, Liu J, Ma B.: Performance of a 41 x 41 cm² amorphous silicon flat panel x-ray detector designed for angiographic and R&F imaging applications . *Med Phys.* 2003, *Oct;30(10)*, S. 2715-26
- 4 Ho JT, Kruger RA.: . Comparison of dual and single exposure techniques in dual energy chest radiography. *Med Phys.* 1989, *16*, S. 202-208
- 5 Jacobson B.: Dichromatic absorption radiography: dichromography. *Acta Radiol.* 1953, *39*, S. 436-452
- 6 Kruger RA, Amstrong JD, Sorenson JA, Niklason LT.: Dual energy film subtraction technique for detecting calcification in solitary pulmonary nodules. *Radiology.* 1981, *14*, S. 213
- 7 Launders JH, Kengyelics SM, Cowen AR.: A comprehensive physical image quality evaluation of a selenium based digital x-ray imaging system for thorax radiography . *Med Phys.* 1998, *Jun;25(6)*, S. 986-97
- 8 Lehmann LA, Avarez RE, Macovski A, Brod WR.: Generalized image combinations in dual kVp digital radiography. *Med Phys.* 1981, *5*, S. 659-667
- 9 Naidich DP, Marshall CH, Gribbin C, Arams RS, McCauley DI.: . Low-dose CT of the lungs: preliminary observations. *Radiology.* 1990, *Jun;175(3)*, S. 729-31
- 10 Oestmann JW, Greene R, Rhea JT, Rosenthal H, Koenker RM, Tillotson CL, Pearson KD, Hill JW, Velaj RH.: Single exposure Dual Energy Digital Radiography in the detection of pumonary nodules and calcifications. *Invest Radiol.* 1989, *24*, S. 517-521
- 11 Rusinek H, Naidich DP, McGuinness G, Leitman BS, McCauley DI, Krinsky GA, Clayton K, Cohen H.: Pulmonary nodule detection: low-dose versus conventional CT. *Radiology.* 1998 , *Oct;209(1)*, S. 243-9
- 12 Strotzer M, Gmeinwieser JK, Volk M, Frund R, Seitz J, Feuerbach S.: Detection of simulated chest lesions with normal and reduced radiation dose: comparison of conventional screen-film radiography and a flat-panel x-ray detector based on amorphous silicon. *Invest Radiol.* 1998, *33*, S. 98-103
- 13 Thijssen MA, Thijssen HO, Merx JL, van Woensel MP.: Quality analysis of DSA equipment. *Neuroradiology.* 1988, *30(6)*, S. 561-8

Publikationsverzeichnis

- Publikation Nr. 1:
Fischbach F, Freund T, Pech M, Werk M, Bassir C, Stoever B, Felix R, Ricke J.
Comparison of indirect CsI/a:Si and direct a:Se digital radiography. An assessment of contrast and detail visualization.
Acta Radiol. 2003 Nov;44(6):616-21.
DOI:10.1046/j.1600-0455.2003.00137.x
PMID: 14616206 [PubMed - indexed for MEDLINE]
- Publikation Nr. 2:
Freund T, Fischbach F, Teichgraeber U, Haenninen EL, Eichstaedt H, Felix R, Ricke J.
Effect of dose on image quality in a detector-based dual-exposure, dual-energy system for chest radiography.
Acta Radiol. 2005 Feb;46(1):41-7.
DOI 10.1080/02841850510016081
PMID: 15841739 [PubMed - indexed for MEDLINE]
- Publikation Nr. 3:
Fischbach F, Freund T, Rottgen R, Engert U, Felix R, Ricke J.
Dual-energy chest radiography with a flat-panel digital detector: revealing calcified chest abnormalities.
AJR Am J Roentgenol. 2003 Dec;181(6):1519-24.
PMID: 14627567 [PubMed - indexed for MEDLINE]
- Publikation Nr. 4:
Ricke J, Fischbach F, Freund T, Teichgraber U, Hanninen EL, Rottgen R, Engert U, Eichstadt H, Felix R.
Clinical results of CsI-detector-based dual-exposure dual energy in chest radiography.
Eur Radiol. 2003 Dec;13(12):2577-82. Epub 2003 Jun 19.
DOI: 10.1007/s00330-003-1913-9
PMID: 12819915 [PubMed - indexed for MEDLINE]

Danksagung

Diese Dissertation ist meinem verstorbenen Opa in großer Dankbarkeit gewidmet.

Ebenfalls möchte ich an dieser Stelle allen Personen danken, die dazu beigetragen haben, daß ich mich mit diesem Thema so intensiv beschäftigen konnte.

Prof. Dr. med. Dr. h.c. R. Felix danke ich für die Möglichkeit, die Räumlichkeiten und Geräte in der Klinik für Strahlenheilkunde des Universitätsklinikums Charité nutzen zu dürfen.

Besonderen Dank gebührt meinem Doktorvater, Prof. Dr. med. J. Ricke für die Überlassung des Themas und die große Kompetenz mit der er mich durch das Labyrinth der wissenschaftlichen Arbeit begleitet und geführt hat.

Im Hinblick auf die Erstellung der vorliegenden Doktorarbeit danke ich meinem Betreuer Herrn Dr. Fischbach. Bedanken möchte ich mich auch bei Frau Dr. Schink, die mit bei der statistischen Auswertung zur Seite stand.

Ganz besonders danke ich meiner Freundin für ihre stetige Hilfsbereitschaft und umfassende Unterstützung.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben auch die viele weitere Ärzte und Mitarbeiter der Klinik für Strahlenheilkunde wesentlich beigetragen, für deren Hilfe ich mich herzlich bedanken möchte.

Eidstattliche Erklärung

„Ich, Torsten, Freund, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: *Methodische und klinische Evaluation eines modernen Flachbettdetektors und des Dual Energy Verfahrens* selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“