

Medizinische Strahlenexposition in der Schweiz

Teil 2: Die Rolle dosisintensiver Untersuchungen, insbesondere der Computertomographie (CT)

Exposition médicale aux radiations en Suisse. Partie 2: Rôle des examens à dose intensive, en particulier de la tomodensitométrie (CT)

Peter Vock, J. Müller-Brand, Jean-François Valley

(im Auftrag der Eidgenössischen Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität, KSR)

Quintessenz

- Röntgenuntersuchungen am Körperstamm, durchleuchtungsgestützte Untersuchungen (inkl. Angiographien und Interventionen) sowie Computertomographien bedingen effektive Dosen pro Untersuchung von $\geq 300 \mu\text{Sv}$ und werden zu den dosisintensiven Untersuchungen gezählt.
- Röntgenuntersuchungen am Körperstamm (ohne Thoraxröntgen) stellen nur 11% der Röntgenuntersuchungen dar, verursachen aber 33% der effektiven Kollektivdosis.
- Die Computertomographie verursacht mit 3% Untersuchungsanteil 28% der effektiven Kollektivdosis.
- Für die Lungenembolie-Diagnostik ist unter 50 Jahren und bei fehlenden anderen Lungenerkrankungen die Szintigraphie der CT wegen der Strahlenexposition grundsätzlich vorzuziehen.
- Dosisreferenzwerte entsprechen der untersuchungsspezifischen 75-Perzentile einer Dosiserhebung; sie sollen im Normalfall der entsprechenden Untersuchung nicht überschritten werden.

Quintessence

- *Les examens radiodiagnostiques du tronc, les examens sous radioscopie (y compris les angiographies et les interventions) et les tomodensitométries comptent parmi les examens à dose intensive, le sujet recevant une dose effective de $\geq 300 \mu\text{Sv}$ à chaque examen.*
- *De tous les examens radiodiagnostiques, seuls 11% (à part les radiographies thoraciques) sont réalisés au niveau du tronc, mais ils représentent 33% de la dose effective collective.*
- *Avec une part d'examens de 3%, la tomodensitométrie produit 28% de la dose effective collective.*
- *Pour le diagnostic d'embolie pulmonaire, la scintigraphie est préférable au CT chez les patients de moins de 50 ans ne présentant pas d'autres maladies pulmonaires, afin de limiter leur exposition aux radiations.*
- *Les valeurs dosimétriques de référence correspondent au 75^e percentile spécifique d'une étude de dose; elles ne doivent pas être dépassées sans raison dans un examen normal du même type.*



CME zu diesem Artikel finden
Sie auf S. 886 oder im Internet
unter www.smf-cme.ch

Vous trouverez les questions à choix multiple
concernant cet article à la page 887 ou sur internet
sous www.smf-cme.ch

Einleitung

Im ersten Teil dieser zweiteiligen Übersicht wurden die Bedeutung der medizinischen Exposition mit ionisierenden Strahlen, der Begriff der effektiven Dosis, die Gesamtergebnisse der Schweizerischen Erhebung im Jahre 1998 und deren generelle Schlussfolgerungen vorgestellt [1]. In diesem zweiten Teil soll im besonderen auf die Rolle der verschiedenen dosisintensiven Untersuchungen eingetreten werden.

Definition dosisintensiver Untersuchungen

Im Gegensatz zu den häufigen Röntgenuntersuchungen der Extremitäten und des Thorax sind dosisintensive Untersuchungen in der Regel mit einer minimalen Exposition von ca. 300 bis 500 μSv verbunden. Sie umfassen – mit Ausnahme des Thorax – sämtliche Röntgenuntersuchungen des Körperstammes, sämtliche CT-Untersuchungen und – mit Ausnahme der peripheren Extremitäten – sämtliche unter Durchleuchtung durchgeführten Untersuchungen und Eingriffe. Diese Klassierung des Bundesamtes für Gesundheit (BAG [2]) macht Sinn, auch wenn in wenigen Einzelfällen Expositionen bei Durchleuchtungen – etwa der Zwerchfellbeweglichkeit – und bei CT-Protokollen – etwa von Hand oder Fusswurzel – durchaus unter der genannten

Schwelle liegen können. Auch nuklearmedizinische Untersuchungen überschreiten mehrheitlich den Wert von 300 μSv [3–5], und in der Radioonkologie, wo die Exposition den primären Zweck und nicht den sekundären Begleiteffekt darstellt, werden bewusst wesentlich höhere Dosen in Kauf genommen. Da aber sowohl der nuklearmedizinische (Populationsdosis ca. 0,09 mSv/Jahr [4] / 0,15 mSv/Jahr [5]) als auch der therapeutische Einsatz ionisierender Strahlung wegen der geringen Zahl exponierter Individuen für die Gesamtbevölkerung weniger ins Gewicht fällt, sollen hier gezielt die auf dem Einsatz von Röntgenstrahlung basierenden Anwendungen betrachtet werden.

Röntgenuntersuchungen des Körperstammes

Tabelle 1  zeigt – bewusst unter Berücksichtigung verschiedener Quellen – die mit den häufigsten Untersuchungen dieser Gruppe verbundenen effektiven Dosen [6–9]. Diese werden in wesentlich kürzerer Zeit, also mit viel höherer Dosisleistung erreicht als die fast kontinuierlich einwirkende natürliche Strahlenexposition von 2,9 mSv/Jahr [10], welcher ein Individuum in der Schweiz ausgesetzt ist.

Schon bei einer oder zwei senkrechten Projektionen werden dabei um 1 mSv (Brustwirbelsäule, Becken-Übersicht) oder mehr (Lendenwirbelsäule) erreicht; bei Untersuchungen mit mehreren sequentiellen Aufnahmen addieren sich deren Expositionen, so dass z.B. für eine Urographie etwa 2,5 mSv resultieren. Tabelle 2  gibt einen Überblick über die Häufigkeit von 11% und den Anteil an der Populationsdosis von 33% dieser Gruppe sowie deren regionale Verteilung [6]. Man beachte etwa die relative Häufigkeit von 27% und den relativen Dosisbeitrag von 48% der Lendenwirbelsäulen-Untersuchungen.

Generell werden, auch ohne Durchleuchtung, bei einzelnen Röntgenaufnahmen am Körperstamm gegenüber den Extremitäten meist *grössere Direktstrahl-Felder* gewählt, die *grössere Körpertiefe* erfordert wegen der höheren Absorption eine höhere lokale Dosis, und die *Streuung* in die Umgebung ist erheblich. Hinzu kommt aber auch, dass die meisten *empfindlicheren Gewebe* [1] beim Erwachsenen am Körperstamm lokalisiert sind: die Gonaden, das Knochenmark, der Dickdarm, die Lunge, der Magen, aber auch Brust, Harnblase, Schilddrüse, Leber und Ösophagus. Alle diese Faktoren wirken zusammen in Richtung einer höheren effektiven Dosis.

Die Bedeutung dieser Gruppe liegt vor allem darin, dass einige Untersuchungen häufig und bei *jungen Patienten* eingesetzt werden, etwa Wirbelsäulen-Untersuchungen bei Lumbalgie oder M. Scheuermann. Dabei handelt es sich um die an die untersuchende Medizinalperson die

Tabelle 1. Ungefähre Expositionen (effektive Dosen) typischer Untersuchungen.

Untersuchung	Effektive Dosis [mSv] *	Anzahl Thorax-Röntgen für gleiche effektive Dosis
Extremitäten (exkl. Hüfte/Schulter)	<0,02 / <0,01 / <= 0,01	<0,2
Thorax p.a./seitlich, [p.a.]	0,06 / 0,1 / [0,02] / (0,1)	1
Rippenthorax	0,27 / 0,5	3–5
Schädel	0,49 / 0,5 / 0,06	0,6–5
Hüfte	0,75 / 2,2 / 0,35	3,5–22
Mammographie	0,2 / 0,2 / 0,37 / (0,7)	2–7
Becken	0,63–1,3 / 1,8 / 0,7	6–18
Halswirbelsäule	0,53 / 1 / 0,07	0,7–10
Brustwirbelsäule	3,4 / 3,5 / 0,7	7–35
Abdomen	1,2 / 2,3 / 0,76	8–23
Lendenwirbelsäule	3,1 / 4,1 / 1,0	10–40
Ösophagus-Magen	7,4–21,3 / 8–8,8 / 4,1	40–200
Intravenöse Urographie	2,5 / 4 / 2,4 / (1,6)	16–40
Magendarmpassage	37,4 / 10–25 / 5,6 / (2)	20–>300
Kolon (Doppelkontrast)	5,7 / 10 / 7,2 / (4)	40–100
CT Kopf	2,44 / 2,2 / 2 / (2)	20–24
CT Thorax	9,7 / 8,8 / 8 / (8)	80–100
CT ganzes Abdomen	12,1 / 8,4 / 10 / (10)	80–120
Koronardilatation-Herzkatheter	12,3–22,5 / – / 14–7	70–220
Nierenangiographie	13,4 / 13 / 12,7–23,9	130–240
Pulmonalisangiographie	32,1 / – / 5,6	56–320

* Erste Zahlen aus [6] für weibliche Patienten; die Dosen für männliche Patienten sind mehrheitlich etwas tiefer, ausnahmsweise (Kolon, Becken) jedoch auch höher.

Zweite Zahlen aus [7], dritte Zahlen aus [8], vierte kursive Zahlen in Klammern aus [9]. Die z.T. starken Divergenzen unter den Quellen sollen die Bedeutung der Grössenordnung und nicht der genauen Zahl herausstreichen, wirken sich doch Gräteunterschiede, Protokollunterschiede mit verschiedener Technik, verschiedener Aufnahmezahl und verschiedener Habitus auf die effektive Dosis stark aus.

Tabelle 2. Häufigkeit und Populationsdosen dosisintensiver Untersuchungen (1998 Schweiz [6]).

Methode	Untersuchungen/ Jahr	% Unter- suchung	% effektive Kollektivdosis
Röntgen total	1 017 613	11	33
davon:			
Halswirbelsäule	156 869	15	7
Thorax Rest, Brustwirbelsäule	97054	10	12
Abdomen	144 197	14	14
Lendenwirbelsäule	272 967	27	48
Becken	346 526	34	20
Röntgen + Durchleuchtung	155 799	2	17
davon:			
Myelographie		3	2
Magen-Darm-Trakt		32	63
Urogenital-Trakt		42	28
Arthrographie		7	0,1
Nativ-Durchleuchtungen		16	1
Angiographie/Intervention	96 817	1	11
davon:			
Angiographie	70 070	72	68
Intervention	26 747	28	32
CT	328 484	3	28
davon:			
Kopf, Hals	121 052	37	14
Thorax	51 227	16	23
(Ober-)Bauch	88 559	27	39
Lendenwirbelsäule	37 744	11	18
Becken, Unterbauch	18 112	6	6
Extremitäten	11 790	4	0,4

höchsten *technischen Anforderungen* stellenden Abklärungen, sind doch richtige Zentrierung, Einblendung, Parameterwahl und Exposition schwieriger als etwa bei der CT. Nicht selten führt eine suboptimale technische Durchführung zu einem Informationsverlust, zur Wiederholung einer Projektion oder gar zu einer Folgeuntersuchung mit erneuten Kosten und oft zusätzlicher Strahlenexposition. Diese Gründe rechtfertigen eine gegenüber der Durchleuchtung ähnlich gründliche Ausbildung zur technischen Durchführung dieser Röntgenuntersuchungen.

Durchleuchtungen, Angiographien und durchleuchtungsgestützte Interventionen

Kann die *Durchleuchtung* zur dynamischen, funktionellen Analyse, zur Lokalisation und zur Sonden- bzw. Katheterplatzierung (auch im Rahmen einer selektiven Dünndarstdarstellung, Endoskopie oder Angiographie) unerlässlich sein, so liefern die in den meisten Fällen damit verbundenen *Übersichtsaufnahmen* eine hohe Ortsauflösung und damit eine hohe Bildqualität. Bezüglich der Strahlenexposition können indessen beide Komponenten kritisch sein, und selbstverständlich addieren sie sich, so dass in der Mehrzahl der Fälle eine effektive Dosis von mehreren mSv oder gar cSv resultiert (Tab. 1); ja, in dieser Gruppe sind die höchsten diagnostischen

Expositionen pro Untersuchung zu verzeichnen, die durchaus die Schwellen für deterministische Effekte, etwa Hautrötung oder Ulzeration, überschreiten können. Ähnliches gilt für durchleuchtungsgestützte Interventionen, bei welchen lange Durchleuchtungszeiten und – im Falle der Angiographie – in verschiedenen Phasen und verschiedenen Stromgebieten Aufnahmeserien erforderlich sind. Noch mehr als bei den standardisierten diagnostischen Untersuchungen kann die Dosis hier in einem breiten Bereich variieren, wie dies in Tabelle 1 für die Magen-Darm-Passage illustriert wird.

Von der Population aus betrachtet (Tab. 2), sind diese Untersuchungen mit zusammen 3% eher selten, liefern aber 28% (17% + 11%) der effektiven Dosis. Unter den Durchleuchtungen stehen urogenitale und gastrointestinale Untersuchungen zahlenmässig mit 42% und 32% der Untergruppe im Vordergrund und tragen mit 28% und 63% auch klar am meisten zur Strahlenexposition bei. Die vor allem an älteren Patienten zum Einsatz gelangenden Angiographien und Interventionen stehen in der Frequenz und damit trotz der hohen Einzeldosen in der Populationsdosis hinter den Durchleuchtungen zurück. Nativdurchleuchtungen inklusive der Koloskopie-Steuerung stellten in der Schweizer Erhebung nur 16% der Durchleuchtungen mit 1% der Dosis dieser Gruppe dar; da in grossen Spitälern Nativdurchleuchtungen durch chirurgische und internistische Spezialisten oft ausserhalb der Radiologie durchgeführt werden, könnten diese in die Erhebung unvollständig eingeflossen sein. In der Schweiz werden zur Zeit in einem vom Bundesamt für Gesundheit initiierten Projekt an grösseren Spitälern in der Routine mittels Dosisflächenprodukt(DFP)-Messungen die sogenannten *diagnostischen Referenzwerte* [11, 12] dieser Gruppe bestimmt. Die mit minimalem Aufwand zu messenden DFP-Referenzdosen entsprechen bei einem bestimmten Untersuchungstyp der *dritten Quartile* (75. Perzentile) der Dosisverteilung innerhalb einer Population und dienen als Richtwert, der nicht regelmässig und ohne spezifischen Grund überschritten werden soll; sie helfen mit, Dosisabweichungen nach oben prospektiv zu erfassen und damit auch zu vermeiden.

Die technische Entwicklung bringt dank der seit einigen Jahren verfügbaren, aber an Anlagen mit einem Alter von mehr als ca. 5 Jahren mehrheitlich noch nicht vorhandenen *gepulsten Durchleuchtung* eine wesentliche Dosisersparung. Ein elektronischer Bildspeicher vermittelt trotz unterbrochener Strahlung ein kontinuierliches Monitorbild; je weniger Bilderneuerungen pro Sekunde von der Dynamik der Untersuchung her erforderlich sind, um so wirksamer ist die Dosisreduktion. Auch lohnt es sich, wenn eine hohe geometrische Auflösung nicht erforderlich ist, das *Durchleuchtungsbild* als Dokument zu

speichern und auf eine zusätzliche Zielaufnahme zu verzichten. Eine weitere Neuerung ist erst für Kleinformat, etwa in der Kardiologie, in Einführung: Dank hochempfindlicher *Flachdetektoren* wird es möglich sein, die Dosis bei gleicher Bildqualität zu senken.

Von der klinischen Indikation her wird in naher Zukunft die Häufigkeit diagnostischer Durchleuchtungs- und Angiographie-Untersuchungen wegen Endoskopie und nichtinvasiver Angiographie tendenziell abnehmen. Andererseits werden komplexe therapeutische Eingriffe, etwa die eine offene Operation ersetzende Rohrprotheseneinlage bei Aortenaneurysmen, zahlenmässig zunehmen. Trotzdem sollte es möglich sein, die durch diese Untersuchungsgruppe bedingte Populationsdosis mittelfristig zu senken.

Computertomographie (CT)

Weltweit ist eine *Zunahme des Beitrages der CT zur medizinischen Strahlenexposition* zu beobachten: In den USA vermehrte sich von 1980 bis 1998 die Untersuchungszahl um mehr als den Faktor 9 [13], und relativ nahm sie von rund 2% auf rund 13% der Untersuchungen zu, ihr Dosisanteil jedoch von 5% auf ca. 30%; in Grossbritannien nahm der Untersuchungsanteil der CT von 2,4% 1991 auf ca. 5% Ende der 90er Jahre zu [14], der Dosisanteil im gleichen Zeitraum von 20% auf über 40%, und in Deutschland trug die CT mit 4,2% der Untersuchungen 38% der medizinischen Dosis bei [15]. Die entsprechenden Daten der Schweizer Erhebung 1998 lauteten auf 3% und 28% (Tab. 2, [6]) und dürften in der Zwischenzeit zugenommen haben. Wie erklärt sich dieser Trend?

Seit ihrer Einführung in die klinische Diagnostik galt die CT als ein mit einer eher hohen Strahlenexposition verbundenes Verfahren (Tabelle 1) mit einer zuvor nicht erreichten Qualität der Querschnittsdarstellung. Die eher schlechte Auflösung in der Körperlängsachse und die Untersuchungsdauer beschränkten die Zahl der Indikationen. Zwei methodische Entwicklungen – die Einführung der Volumenmessung mit *Spiral- bzw. Helicaltechnik* ab 1989 [16] und der Übergang von Einzeilen- zu *Mehrzeilendetektoren* ab 1999 [17] steigerten das Potential sprunghaft, so dass *grössere Körperteilvolumina rascher und mit dünneren Schichten* erfasst werden konnten. Bewegungsartefakte fallen damit kaum noch ins Gewicht. Die mit modernen 4-16-Zeilengeräten erreichte typische Dimension der Bildpunkte [«voxels»] von zirka einem Millimeter in allen drei Raumrichtungen (*isotroper Datensatz*) ist zur digitalen *Nachverarbeitung* geeignet. So können heute CT-Resultate nicht mehr nur in der Querschnittsebene, sondern durch Umformatierung auch koronar, sagittal, in einer anderen, auch gekrümmten Ebene oder gar 3-dimensio-

nal betrachtet werden. Für die klinische Anwendung brachte diese Entwicklung eine raschere Messung grösserer Körperabschnitte und damit als *neue Indikationen* das Polytrauma und ein auf grössere Körperabschnitte erweitertes Staging bzw. Verlaufskontrollen bei Malignomen; aber auch Mehrphasenuntersuchungen nach Kontrastmittelgabe, etwa der Leber oder der Niere, wurden erst jetzt für ganze Organe möglich.

Die Abdeckung grösserer Körpervolumina bzw. die mehrfache Abdeckung des gleichen Volumens erhöhten zwangsläufig die *Strahlenexposition pro Untersuchung*, auch wenn heute dank technischer dosissparender Massnahmen in der Grössenordnung von 30% der früheren Dosis (Tabelle 1) eingespart werden können. Das erweiterte Indikationsspektrum – als weiteres Beispiel sei die eine invasive diagnostische Katheterangiographie substituierende CT-Angiographie angeführt – führte zusätzlich über eine höhere *Untersuchungsfrequenz* zu einem *Anstieg der CT-bedingten Populations-Exposition*, wie er in verschiedenen Ländern beobachtet werden konnte. Da die letzten Schweizer Daten aus dem Jahre 1998 stammen, also noch vor der Einführung der Mehrzeilentechnik, muss auch in unserem Land von einer parallelen Entwicklung ausgegangen werden, welche angesichts der verzögerten klinischen Einführung im Rahmen des Geräteersatzes und der Weiterentwicklung der Methode noch nicht abgeschlossen ist. Nicht ganz von der Hand zu weisen ist in diesem Zusammenhang die Hypothese, dass die Verfügbarkeit der technischen Ausrüstung zu deren vermehrtem Einsatz führt: Würden für Deutschland bzw. die Schweiz mit Dichten von 21,5 bzw. 22,8 Geräten und jährlichen Untersuchungsfrequenzen von 64 000 bzw. 43 000 pro Million Einwohner CT-Populationsdosen von 0,6 bzw. 0,3 mSv pro Jahr erhoben, so lagen die entsprechenden Werte für Schweden und Grossbritannien mit 10,4 / 5,2 Geräten und 39 000 / 21 000 Untersuchungen pro Million deutlich tiefer, dies verbunden mit CT-Populationsdosen von je 0,1 mSv pro Jahr [6, 18].

Analysiert man die Schweizer Daten nach der untersuchten Körperregion, so trugen innerhalb der CT-Statistik Kopf- und Extremitätenuntersuchungen unterproportional, *Thorax- bzw. Abdomenuntersuchungen* leicht bzw. deutlich überproportional zur effektiven Dosis bei (Tabelle 2, [6]); wiederum stellt dies die Folge der Tatsache dar, dass die empfindlichen Gewebe vor allem im Körperstamm liegen und bei Direktstrahlung wesentlich höhere Dosen erfahren.

Wie in Teil 1 gezeigt, ist das *Alter* der medizinisch strahlenexponierten Population höher als jenes der Gesamtbevölkerung, und die mit CT untersuchten Individuen sind als Gruppe sogar noch älter, werden doch 89% der CT-Untersuchungen bei mindestens 30jährigen und 62% bei mindestens 50jährigen durchgeführt. Dieser

Umstand relativiert die Bedeutung der CT-Exposition; er darf aber keineswegs zum kritiklosen Einsatz der immerhin in 38% bei unter 50jährigen eingesetzten Methode verleiten.

CT versus Lungenszintigraphie bei der Lungenemboliediagnostik

Am häufig vorkommenden klinischen Beispiel der Lungenemboliediagnostik sollen die Überlegungen zum Einsatz der CT im Vergleich zur Lungenszintigraphie diskutiert werden.

Mit einer Prävalenz von jährlich 1‰ und einer Mortalität 15–18% in den ersten drei Monaten ist die Lungenembolie eine häufige und potentiell tödliche Erkrankung [19]. Bei verpasster Diagnose und ohne adäquate Behandlung ist ihre Mortalität gar erheblich höher. Die klinischen Zeichen und Symptome sind unspezifisch. Beim Nachweis einer tiefen Venenthrombose (klinische Untersuchung, Sonographie, Erhöhung der D-Dimere) werden die Patienten in der Regel antikoaguliert, und es wird auf eine weitere Diagnostik verzichtet. In bestimmten risikobehafteten klinischen Situationen muss indessen vor der Einleitung der Antikoagulation die Diagnose der Lungenembolie gesichert werden. Die folgende Diskussion befasst sich mit dieser konkreten Aufgabe und dem Einsatz der zur Verfügung stehenden diagnostischen Methoden.

Bis vor wenigen Jahren wurde für die Diagnostik einer Lungenembolie vorwiegend die *kombinierte Ventilations-Perfusions-Lungen-Szintigraphie* eingesetzt. Eine unauffällige Lungenperfusionsszintigraphie schliesst eine Lungenembolie mit praktisch 100% Wahrscheinlichkeit aus [20]. Umgekehrt weisen multiple segmentäre bzw. lobäre Perfusionsausfälle bei normaler Lungenbelüftung mit einer Wahrscheinlichkeit von über 95% auf das Vorliegen von Lungenembolien hin. Bei einer Vielzahl von Patienten (insbesondere bei älterer Population und beim gleichzeitigen Vorliegen von diffusen oder umschriebenen Lungenparenchymerkrankungen, etwa einer chronisch obstruktiven Lungenerkrankung), bleibt die kombinierte Lungenperfusionsszintigraphie in Bezug auf die Lungenemboliediagnostik diagnostisch nicht konklusiv. Die Anzahl der diagnostisch nicht konklusiven Lungenszintigramme lässt sich zwar durch die konsequente Verwendung der Lungen-SPECT deutlich verringern [22], beträgt in bestimmten Studien indessen bis zu 40–50% aller untersuchten Patienten [23].

Zur Diagnosesicherung müsste hier die *Pulmonalisarteriographie* als Referenzverfahren eingesetzt werden, was in der Praxis aus verschiedenen Gründen oft unterbleibt, vor allem wegen der Invasivität, den Risiken und der limitierten Verfügbarkeit der Methode. Seit etwa zehn Jahren wird in dieser Situation, oft aber auch primär die *Spiral-CT-Angiographie* der Pulmonal-

arterien zunehmend häufig eingesetzt [24]. Die Methode stellt den Embolus nicht indirekt in Form seiner Auswirkungen auf die lokale Lungenphysiologie, sondern wie die invasive Arteriographie direkt in Form eines das Kontrastmittel aussparenden Füllungsdefektes im Arterienlumen dar. Sie ist für grosse, zentrale Embolien bis etwa auf Segmenthöhe zuverlässig und bringt zudem den Vorteil einer morphologischen Thorax-Diagnostik, welche über die Hauptfragestellung hinaus eine ganze Reihe von Differentialdiagnosen (Pneumonie, Neoplasma, Pleuraerguss, Perikarderguss, Pneumothorax, Aortendissektion), aber auch Begleiterkrankungen (Emphysem, Narben) erkennen oder weitgehend ausschliessen kann und durch letztere in der Ausschlusskraft nicht wesentlich eingeschränkt wird [25]. Ja, im Anschluss an die Thorax-Untersuchung kann sogar ohne weitere Kontrastmittelgabe mit minimalem Zeitaufwand eine Venenthrombose im Abdomen, Becken und den unteren Extremitäten in der gleichen CT-Untersuchung nachgewiesen werden [26].

Die *Grenzen und Nachteile der CT* liegen klar in drei Bereichen, dem Nachweis subsegmentaler Embolien, der obligaten Anwendung von iodierten Röntgen-Kontrastmitteln und der Strahlenbelastung. Isoliert subsegmentale LE wurden in 6–30% beschrieben [27], und die Sensitivität der CT (53–91%) war wegen der Nichterfassung peripherer Embolien in verschiedenen Studien eingeschränkt. Neuere Untersuchungen mit Mehrzeilen-CT-Geräten zeigen, dass die Darstellung der peripheren Lungenarterien mittels dünner Bilder von 1–2 mm Schichtdicke wesentlich verbessert werden kann [25]. Der zweite Nachteil, die obligate Bolusinjektion eines Kontrastmittels, muss auch heute im Hinblick auf eine Unverträglichkeit und eine potentielle Verschlechterung einer bereits eingeschränkten Nierenfunktion beachtet werden und kann eine Kontraindikation darstellen. Der dritte Faktor, die Strahlenexposition, wiegt bei lebensgefährlicher zentraler LE zwar gering; angesichts der Häufigkeit LE-verdächtiger, nach Abklärung jedoch LE-freier Patienten kommt ihm indessen wesentliche Bedeutung zu. Leider stellt die Magnetresonanztomographie (MR)-Angiographie, welche ohne die erwähnten Kontrastmittel und ohne Strahlenbelastung auskommt, heute noch keine valable Alternative dar, da ihre diagnostische Treffsicherheit noch zu wenig gesichert ist und die Methode in der Notfallsituation schlecht verfügbar und viel zeitaufwendiger ist. Beträgt die effektive Dosis einer Ventilations-Perfusions-Szintigraphie ca. 1,5–3 mSv, so liegt sie für die CT-Angiographie bei 3–20 mSv [3, 4, 28]. Die hohen Werte können fast nur bei suboptimaler Protokollwahl vorkommen und müssen heute vermieden werden [28, 29], indem auf die Nativuntersuchung vor der Kontrastmittelinjektion und auf Spätaufnahmen verzichtet wird. Eine Reduktion der Röhrenspannung von

120 kV auf 100 kV kann bei schlanken Patienten einen weiteren Beitrag leisten. Zu hinterfragen ist die gekoppelte Venenthrombosen-Suche mittels CT, da sie – wieder abhängig vom Protokoll – die Exposition mehr als verdoppeln kann [28]. Auch nach Optimierung des CT-Protokolls bleibt eine effektive Dosis von 2–6 mSv [29], mehr als bei der nuklearmedizinischen Diagnostik; dabei ist die effektive Dosis bei der Frau konstant etwa 10–20% höher als beim Mann, vor allem bedingt durch die Exposition der Brustdrüse und die grössere Streustrahlung in die Gonaden.

Aus diesen Ausführungen ergeben sich die nachfolgenden Überlegungen zur *individuellen Wahl des geeigneten Abklärungsprozedere* ([28, 30, 31], Tab. 3 ): Bei über 50jährigen Patienten,

Tabelle 3. Lungenembolie(LE)-Diagnostik mittels CT und Szintigraphie.

Methode	CT-Angiographie	Perfusions-Ventilations-Szintigraphie
Sensitivität/Spezifität	ca. 85% / ca. 90%	98%/10% oder 41%/97%*
nicht-diagnostischer Anteil	ca. 10%	40–50%
Vorteile	direkter LE-Nachweis Nachweis weiterer akuter Thoraxerkrankungen und von Begleiterkrankungen evtl. Venenthrombosen-Diagnostik in gleicher Sitzung	hohe negative prädiktive Aussagekraft, also LE-Ausschluss bei normalem Resultat geringere Strahlenbelastung
Nachteile	beschränkte Sensitivität für subsegmentale LE höhere effektive Dosis	hoher Anteil nicht diagnostischer Resultate
Indikation	Alter >50 Jahre Verdacht auf andere Thoraxerkrankung	zuvor «gesunde» Lunge Alter <50 Jahre

* [33]

einer schlechten Langzeitprognose und bei bekannten Lungenparenchymerkrankungen soll primär die Thorax-CT-Untersuchung erfolgen. Bei jüngeren Personen mit guter Prognose und ohne anamnestische und klinische Hinweise auf eine Lungenparenchymerkrankung (unauffälliges Thoraxröntgenbild), sollte der Lungenszintigraphie, sofern diese Methode verfügbar ist, der Vorzug gegeben werden. Bei jungen, nicht schwangeren Frauen im fortpflanzungsfähigen Alter soll grundsätzlich die Lungenszintigraphie als Untersuchungsmethode der ersten Wahl gewählt werden. Beim Vorliegen einer Schwangerschaft ergibt sich eine noch strengere Pflicht zur Überprüfung der Indikation, ist doch generell und insbesondere in der Phase der Organogenese die kindliche Strahlenempfindlichkeit hoch [32]; hier empfehlen wir die Rücksprache mit einem Experten zwecks Diskussion der individuellen Situation. Ob sich in Zukunft bei dieser Fragestellung die MR-Angiographie als unbedenkliche Alternative anbieten wird, kann heute noch nicht entschieden werden.

Praktische Konsequenzen und Schlussfolgerung

Auch wenn die *Risikoabschätzung* – am konkretesten das Auftreten eines strahleninduzierten letalen Krebsleidens bei 50 Individuen einer mit 1 mSv exponierten Population von einer Million – zum grossen Teil auf den Daten japanischer Atombombenopfer und auf tierexperimentellen Erfahrungen beruhen, auch wenn sich selbst Experten im Bereich kleinster Dosen über das richtige Modell der Dosis-Wirkungsbeziehung streiten, und selbst wenn der Nachweis der Tumorinduktion durch radiodiagnostische Massnahmen wegen der langen Latenz und der bedeutend höheren Zahl nicht radiogener Malignome schwierig zu erbringen ist, so muss das Risiko ernst genommen und in eine *Nutzen-Kosten-Risiko-Analyse* eingebracht werden [28, 30, 31]. Diese wird nicht streng mathematisch erfolgen können, da uns viele dabei wichtige statistische und individuelle Daten noch fehlen. Zu ihr soll aber qualitativ sowohl vom behandelnden, die Untersuchung indizierenden Arzt wie auch vom die Untersuchung durchführenden Arzt beigetragen werden, in dem auch die in Tabelle 4  und Abbildung 1  aufgeführten und für das Beispiel der Lungenembolie vertieft diskutierten Fragen zu Indikationsstellung und Durchführung gestellt werden, also individuell bei der Indikationsstellung Nutzen, Kosten und Risiken hinter-

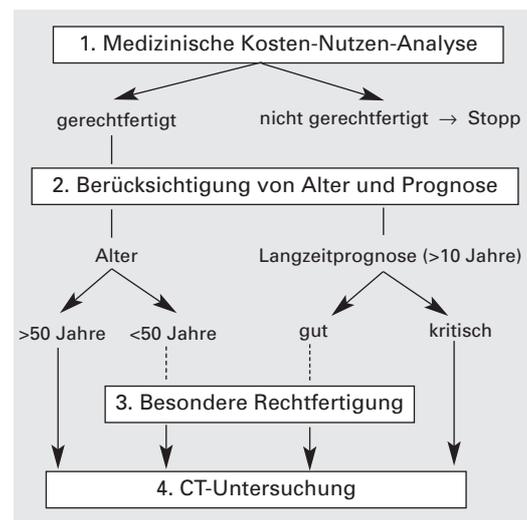


Abbildung 1.

Indikation zur CT-Untersuchung nach Alter und Langzeitprognose. Der Indikationsstellung zur CT-Untersuchung soll eine medizinische, auch ökonomische Aspekte berücksichtigende Kosten-Nutzen-Risiko-Analyse vorangehen: Übersteigen die Kosten den Nutzen, so soll auf die Untersuchung verzichtet werden. Im Alter unter 50 Jahren steigt das Risiko für den Patienten, allfällige Folgen der Exposition zu erleben, weshalb hier die Rechtfertigung strenger zu erfolgen hat. Ähnlich kommt dem Aspekt der Strahlenexposition eine grössere Bedeutung zu, wenn ein Patient eine gute Langzeitprognose aufweist.

Tabelle 4. Generelle Fragen zu Indikationsstellung und Durchführung dosisintensiver Abklärungen.

Zeit	Verantwortung	Fragen
bei Indikation	behandelnder und untersuchender Arzt	1. Schweregrad der vermuteten Erkrankung? 2. Therapeutische Konsequenzen bei positiver/negativer Diagnose? 3. Nutzen (Heilung, Überleben, Lebensqualität)/Kosten der Diagnostik? 4. Wahrscheinlichkeit korrekter Diagnose? (Sensitivität/Spezifität?) 5. Um welche effektive Dosis geht es in dieser individuellen Situation? 6. Wahrscheinlichkeit, dass Expositionsfolgen an Patienten bzw. Nachkommen manifest werden (Alter, Schwangerschaft, Lebenserwartung)? 7. Nutzen und Aufwand (Zeit, Kosten) von Alternativverfahren (Ultraschall, Magnetresonananz-Bildgebung, Diagnostik ohne Bildgebung)? 8. Zeitpunkt der Untersuchung / Verlaufskontrolle: warum nicht später? 9. Präzise Fragestellung an Untersuchung? (Dosis oft reduzierbar).
bei Durchführung	untersuchende Medizinalperson (Arzt, MTRA, MPA)	1. Optimales Protokoll? 2. Nötige Vorbereitung des Patienten? (Aufklärung, Kontrastmittelgabe und evtl. Prämedikation/Hydrierung, Sedation, Analgesie). 3. Minimal zu untersuchende Körpervolumina/ Phasen? 4. Erforderliche Bildqualität? (Maximal vs. diagnostisch erforderlich). 5. Individuelle Anpassung der Protokollparameter? (Alter, Habitus, Fragestellung).

fragt und indizierte Abklärungen dank richtiger Planung und kompetenter Ausbildung auf Anhieb qualitativ und bezüglich der Strahlenexposition optimal vorgenommen werden.

Zusammenfassung

Dass dosisintensive Untersuchungen – Röntgen am Körperstamm, Durchleuchtung und CT – einzeln mit effektiven Dosen von mindestens 300 μ Sv einhergehen und zusammen den Grossteil der medizinischen Strahlenbelastung ausmachen, zeigen für unser Land die Daten der 1998 durchgeführten Erhebung. Ist bei den Röntgenuntersuchungen des Stammes die Häufigkeit von Becken- und Lendenwirbelsäulenuntersuchungen bei Jungen bedenkenswert, so sind es bei den mit einer Durchleuchtung verbundenen, z.T. interventionellen Untersuchungen die hohen Einzeldosen, welche neben der schon bei kleinen Dosen möglichen Kanzerogenese lokal sogar somatische Schäden verursa-

chen können. Extremwerte können dadurch vermieden werden, dass anhand der landesüblichen Praxis untersuchungsspezifische Referenzwerte ermittelt und diese prospektiv als nur begründet zu überschreitende Richtlinien eingesetzt werden. Referenzwerte entsprechen der 75. Perzentile der Verteilung des einfach messbaren Dosisflächenprodukts.

Grösste Bedeutung verdient die CT, welche bei unbestrittenem diagnostischem Nutzen wegen des Wachstums der Indikationen und der Leichtigkeit der Untersuchung grosser Körperabschnitte in den Industrieländern mit gegen 50% zur medizinischen Strahlenbelastung beiträgt. Jede Indikationsstellung verlangt hier eine Kosten-Nutzen-Risiko-Abwägung, insbesondere unter Berücksichtigung von Alter und Gefährlichkeit der vermuteten Erkrankung. Am Beispiel der Lungenembolie-Diagnostik werden im Vergleich zur Szintigraphie Nutzen und Strahlenbelastung diskutiert und allgemeine Konsequenzen für den Einsatz dosisintensiver Röntgenverfahren gezogen.

Literatur

- 1 P. Vock, J.F. Valley. Medizinische Strahlenexposition in der Schweiz. Teil 1: Frequenzen, Dosen, Konsequenzen. *Swiss Medical Forum* 2004;4:845–850.
- 2 Schweizerische Eidgenossenschaft. Dosisintensive Untersuchungen. Bundesamt für Gesundheit. Bern, 2002. http://www.bag.admin.ch/strahlen/formation/definition/examen/d/examen_d.php.
- 3 Shrimpton PC, Wall BF, Hart D. Diagnostic medical exposures in the U.K. *Appl Radiat Isot* 1999;50:261–9.
- 4 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. Volume I: Sources. New York: United Nations; 2000.
- 5 Regulla D, Griebel J, Nosske D, Bauer B, Brix G. Erfassung und Bewertung der Patientenexposition in der diagnostischen Radiologie und Nuklearmedizin. *Z Med Phys* 2003; 13:127–35.
- 6 Aroua A, Vader JP, Valley JF. Enquête sur l'exposition par le radiodiagnostic en Suisse. Lausanne: IRA/IMSP; 2000. www.hospvd.ch/public/instituts/ira/.
- 7 Roth J. Strahlenschutz. In: Trueb PR (ed.). *Kompodium für ärztliche Strahlenschutzsachverständige*. Bern, Stuttgart, Wien: Verlag Paul Haupt; 2002. p. 127–57.
- 8 Hart D, Wall BF. Radiation exposure of the UK population from medical and dental X-ray examinations. National Radiological Protection Board NRPB-W4, Chilton 2002. http://www.nrp.org/publications/w_series_reports/2002/nrpb_w4.htm.
- 9 Radiological Society of North America (RSNA). Radiation exposure in X-ray examinations. http://www.radiology-info.org/content/safety/xray_safety.htm, 1.05.2002.
- 10 Völkle H. Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2002: Überblick. Sektion Überwachung der Radioaktivität, BAG, Fribourg; 2003. http://www.bag.admin.ch/strahlen/ionisant/radio_env/documentation/d/document2002.php.
- 11 Wall BF. Diagnostic reference levels – the way forward. *Commentary. Brit J Radiology* 2001;74:785–8.

- 12 Schweizerische Eidgenossenschaft. Diagnostische Referenzwerte (DRW) für Röntgenuntersuchungen vom 7. April 2003. Merkblatt R-08–04. Bundesamt für Gesundheit BAG, Sektion Strahlenschutz. Bern, 2003. <http://www.bag.admin.ch/strahlen/lois/pdf/R-08-04-md.pdf>.
- 13 Nickoloff EL, Alderson PO. Radiation exposures to patients from CT. Reality, public perception, and policy. *Am J Roentgenol* 2001;177:285–7.
- 14 Shrimpton PC, Wall BF, Hart D. Diagnostic medical exposures in the U.K. *Appl Radiat Isot* 1999;50:261–9.
- 15 Regulla D, Griebel J, Nosske D, Bauer B, Brix G. Erfassung und Bewertung der Patientenexposition in der diagnostischen Radiologie und Nuklearmedizin. *Z Med Phys* 2003;13:127–35.
- 16 Kalender WA, Seissler W, Klotz E, Vock P. Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. *Radiology* 1990;176:181–3.
- 17 Hu H, He HD, Foley WD, Fox SH. Four multidetector-row helical CT: Image quality and volume coverage speed. *Radiology* 2000;215:55–62.
- 18 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. Volume I: Sources, Annex D. New York: United Nations; 2000.
- 19 Goldhaber SZ. Pulmonary embolism. *N Engl J Med* 1998;339:93–104.
- 20 Worsley DF, Alavi A. Comprehensive analysis of the results of the PIOPED study. Prospective investigation of pulmonary embolism diagnosis study. *J Nucl Med* 1995;36:2380–7.
- 21 Van Beek EJ, Browsers EM, Song B, Bongaerts AH, Oudkerk M. Lung scintigraphy and helical computed tomography for the diagnosis of pulmonary embolism: a meta-analysis. *Clin Appl Thromb Hemost* 2001;7:87–92.
- 22 Bargouth G, Aujeski D, Schnyder P, Bischof Delaloye A. Comparison of perfusion SPECT scan versus helical computed tomography for diagnosis of pulmonary embolism. *Eur J Nucl Med* 2002;29:168.
- 23 Worsely DK, Kim CK, Alavi A, Palevsky HI. Detailed analysis of patients with matched ventilation-perfusion defects and chest radiographic opacities. *J Nucl Med* 1993;34:1851–3.
- 24 Remy-Jardin M, Remy J, Watinne L, Giraud F. Central pulmonary thromboembolism: diagnosis with spiral volumetric CT with the single-breath-hold technique – comparison with pulmonary angiography. *Radiology* 1992;185:381–7.
- 25 Remy-Jardin M, Tillie-Leblond I, Szapiro D, Ghaye B, Cotte L, Mastora I, et al. CT angiography of pulmonary embolism in patients with underlying respiratory disease: impact of multislice CT on image quality and negative predictive value. *Eur Radiol* 2002;12:1971–8.
- 26 Richman PB, Wood J, Kasper DM, Collins JM, Petri RW, Field AG, et al. Contribution of indirect computed tomography venography to computed tomography angiography of the chest for the diagnosis of thromboembolic disease in two United States emergency departments. *J Thromb Haemost* 2003;1:652–7.
- 27 Stein PD, Henry JW. Prevalence of acute pulmonary embolism in central and subsegmental arteries and relation to probability interpretation of ventilation/perfusion lung scans. *Chest* 1997;111:1246–8.
- 28 Diederich S. Radiation dose in helical CT for detection of pulmonary embolism. *Eur Radiol* 2003;13:1491–3.
- 29 Mayo JR, Aldrich J, Müller NL. Radiation exposure at chest CT: a statement of the Fleischner Society. *Radiology* 2003;228:15–21.
- 30 Paterson DI, Schwartzman K. Strategies incorporating spiral CT for the diagnosis of acute pulmonary embolism, a cost-effectiveness analysis. *Chest* 2001;119:1791–1800.
- 31 British Thoracic Society Standards of Care Committee Pulmonary Embolism Guideline Development Group. British Thoracic Society guidelines for the management of suspected acute pulmonary embolism. *Thorax* 2003;58:470–84.
- 32 Vock P. CT-Exposition beim Kind: Geht das Erwachen der Amerikaner auch uns Europäer an? *Radiologie* 2002;42:697–702.
- 33 The PIOPED investigators. Value of the ventilation/perfusion scan in acute pulmonary embolism. Results of the prospective investigation of pulmonary embolism diagnosis (PIOPED). *JAMA* 1990;263:2753–9.

Korrespondenz:
Prof. Peter Vock
Institut für Diagnostische
Radiologie der Universität
Inselspital
DRNN
CH-3010 Bern
peter.vock@insel.ch