

Pulmonale Struktur und Funktion

Hochauflösende und dynamische Computertomographie bei Lungenemphysem und Erkrankungen der Atemwege

H.-U. Kauczor
K. Markstaller
C. P. Heussel

Pulmonary Structure and Function. High-resolution and Dynamic Computed Tomography in Pulmonary Emphysema and Airway Diseases

Zusammenfassung

Die Computertomographie (CT) ist das Verfahren der Wahl zur morphologischen Darstellung der Struktur der Lunge. Sie stellt Atemwege, Lungenparenchym und deren pathologische Veränderungen mit hoher räumlicher Auflösung dar. Atemwegserkrankungen zeigen sich mit Dilatation der Bronchien, Verdickung der Wand und vermehrter Sichtbarkeit in der Peripherie. Die CT ist auch der bildgebende Goldstandard für Nachweis und Charakterisierung des Emphysems, da eine hohe Übereinstimmung mit pathologischen Untersuchungen besteht. Zentrilobuläres, panlobuläres und paraseptales Emphysem können unterschieden werden. Zusätzlich kann die CT funktionelle Informationen liefern. Vergleichende Aufnahmen in In- und Expiration mit oder ohne Spirometertriggerung erlauben die Beurteilung einer Obstruktion der kleinen Atemwege (Airtrapping). Aus CT-Daten kann das Lungenvolumen segmentiert werden. Mit der Cine-CT werden die Wandbeweglichkeit der großen Atemwege, z. B. bei Tracheomalazie, dargestellt, der regionale Ventilationszustand beurteilt, pulmonale Zeitkonstanten bestimmt und die koordinierte oder dissoziierte Bewegung von Thoraxwand und Zwerchfell abgebildet. Der Einsatz dieser Untersuchungsstrategien ermöglicht, nicht nur die Struktur der Lunge mittels CT mit hoher Auflösung abzubilden, sondern diese auch mit einer regionalen Beurteilung der Funktion zu verbinden.

Abstract

Computed tomography (CT) is the method of choice for the morphological assessment of pulmonary structure. Airways, pulmonary parenchyma and their pathologies are shown with high spatial resolution. Airway diseases exhibit bronchial dilatation, wall thickening and an increased visibility in the lung periphery. CT is also the imaging gold standard for the detection and the characterisation of emphysema because a high degree of concordance with histopathological studies. Centrilobular, panlobular and paraseptal emphysema can be differentiated. CT can also provide functional information. Paired inspiratory and expiratory scans with or without spirometric triggering allow to evaluate obstruction of the small airways (airtrapping). On the basis of CT-data lung volumes can be segmented. Cine-CT allows to visualise motion of the central airways, e.g. in tracheomalacia, to assess regional ventilation to calculate pulmonary time constants, and to display the co-ordinated or dissociated motion of the thoracic wall and the diaphragm. Beyond the mere high-resolution visualisation of the structure of the lung the application of these CT-strategies makes a regional assessment of pulmonary function possible.

Einleitung

Die Computertomographie (CT) hat als Schnittbildverfahren mit überlagerungsfreier Darstellung gegenüber der Thoraxübersichtsaufnahme erhebliche Vorteile für die Beurteilung pulmonaler Veränderungen. In den letzten Jahren hat sie sich neben

der Tumordiagnostik insbesondere als Spiral-CT, Mehrschicht-CT, hochauflösende CT (HRCT) und dynamische CT (Cine-CT) als Verfahren der Wahl zur morphologischen Beurteilung der pulmonalen Struktur (Atemwege und Parenchym) etabliert [1–4]. Zusätzlich bieten sich durch spezielle Untersuchungstechniken bzw. Auswertestrategien neue Möglichkeiten zur Beurteilung

Institutsangaben

Klinik für Radiologie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (Direktor: Prof. Dr. M. Thelen)

Korrespondenzadresse

PD Dr. H.-U. Kauczor · Klinik für Radiologie der Universität Mainz ·
Langenbeckstr. 1 · 55131 Mainz · E-mail: kauczor@radiologie.klinik.uni-mainz.de

Bibliografie

Pneumologie 2002; 56: 24–30 © Georg Thieme Verlag Stuttgart · New York · ISSN 0934-8387

der funktionellen Auswirkungen der bereits morphologisch gefassten Veränderungen der pulmonalen Struktur.

Die systematische Bildanalyse wird in der CT in Analogie zur Thoraxübersichtsaufnahme vorgenommen. Bei der Beurteilung des Lungenparenchyms steht zunächst die Erkennung des normalen Lungengerüsts mit Tracheobronchialbaum, Gefäßbaum, Lappen und lobulären Strukturen im Vordergrund. Darüber werden pathologische Veränderungen erkannt, zugeordnet, benannt und erklärt.

Während eines Atemstillstands in tiefer Inspiration zeigt die Lunge eines Lungengesunden eine homogen niedrige Dichte von -800 bis -900 Hounsfield-Einheiten (HE). Diese Dichte wird weitgehend von vier Faktoren bestimmt: Luft, Blut, Bindegewebe und Flüssigkeit (interstitiell, alveolär, intrazellulär). Der Luft kommt dabei der größte Stellenwert zu, denn sie macht knapp $\frac{2}{3}$ der Dichte aus. Das Blut in Pulmonalarterien und Lungenvenen trägt zu knapp einem Sechstel zur Lungendichte bei. Ein weiteres knappes Sechstel macht die interstitielle, alveoläre oder intrazelluläre Flüssigkeit aus. Das Bindegewebe des Lungengerüsts macht nur ca. 5% der normalen Dichte aus.

Das normale Lungengerüst besteht aus den bronchovaskulären Bündeln mit den Pulmonalarterien, Bronchien und dem sie umgebenden Bindegewebe, den inter- und intralobulären Septen mit den Lungenvenen und den Lymphgefäßen (Abb. 1), der Basalmembran der Alveolen und dem subpleuralen Bindegewebe. Mit der anatomischen Einteilung in Lappen, Segmente und Lobuli weist die Lunge einen klar vorgegebenen und regelmäßigen, hierarchischen anatomischen Aufbau auf. Dieser spiegelt sich in der normalen, gleichmäßigen und gut erkennbaren Darstellung des Parenchyms in der CT wider. Hiervon müssen pathologische Veränderungen unterschieden werden, die sich mit der CT frühzeitig

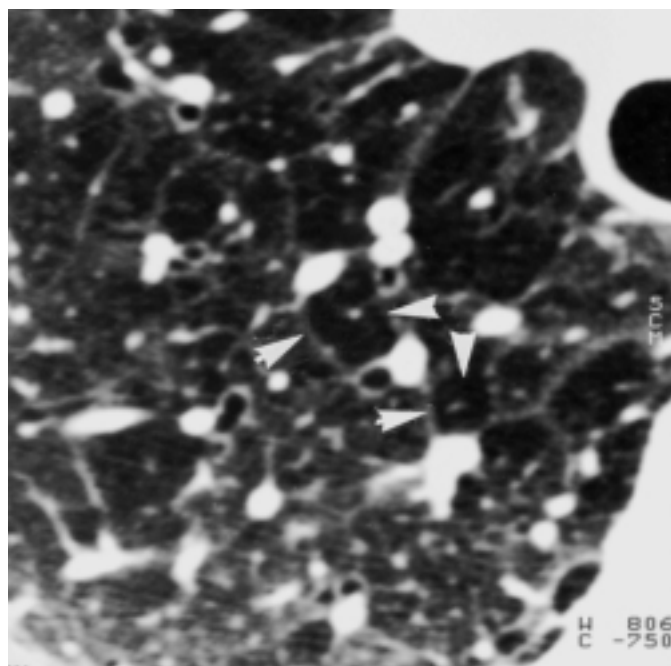


Abb. 1 Erkennbarkeit der lobulären Struktur der Lunge in der HRCT: paralleler Verlauf von Pulmonalarterie und Bronchus, zentrale Position der peripheren Pulmonalarterie im Lobulus mit umgebenden perilobulären Septen (Pfeile), in denen u. a. auch die kräftigen Venen verlaufen.

ausmachen und den einzelnen Strukturen des Lungengerüsts exakt zuordnen lassen. Diese Kompartimentierung der Lunge ist eine wesentliche Hilfestellung bei der Diagnosestellung.

Atemwege

Die CT erlaubt die Darstellung normaler Bronchien bis zur 8. Generation (Wanddicke ca. 0,3 mm). Erkrankungen der Atemwege, z. B. im Rahmen von chronischer Bronchitis, COPD oder Bronchiektasen, führen zu Verdickungen der Bronchialwand und nachfolgend zu einer irreversiblen Erweiterung des Bronchuslumens (Bronchiektasie). Diese Bronchusdilatationen, Bronchiektasen und Bronchuswandverdickungen lassen sich in der CT wesentlich einfacher erkennen und genauer ausmessen als auf der Übersichtsaufnahme (Abb. 2). Die CT hat daher die Bronchographie in der Beurteilung des Tracheobronchialbaums und des Durchmessers der Atemwege vollständig verdrängt [5]. Zur Diagnostik wird der Durchmesser des Bronchuslumens mit dem Durchmesser der begleitenden Pulmonalarterie verglichen (bronchoarterielles Verhältnis). Ist der Durchmesser des Bronchuslumens größer als die begleitende Arterie, liegt eine pathologische Bronchusdilatation vor [6,7]. Die Bronchuswanddicke kann in der CT direkt gemessen werden. Die normale Wanddicke eines segmentalen Bronchus beträgt zwischen 0,92 und 1,12 mm [8]. Der Bildeindruck des gemeinsamen Auftretens von Bronchusdilatation und angrenzender normal weiter Pulmonalarterie führt zum Siegelring-Zeichen. Dabei bildet der Bronchus die Ringstruktur, während die Pulmonalarterie als kleine rundliche weichteildichte Struktur das Siegel darstellt [9]. Das Siegelring-Zeichen ist typisch für Bronchiektasen. Es kann aber auch beim

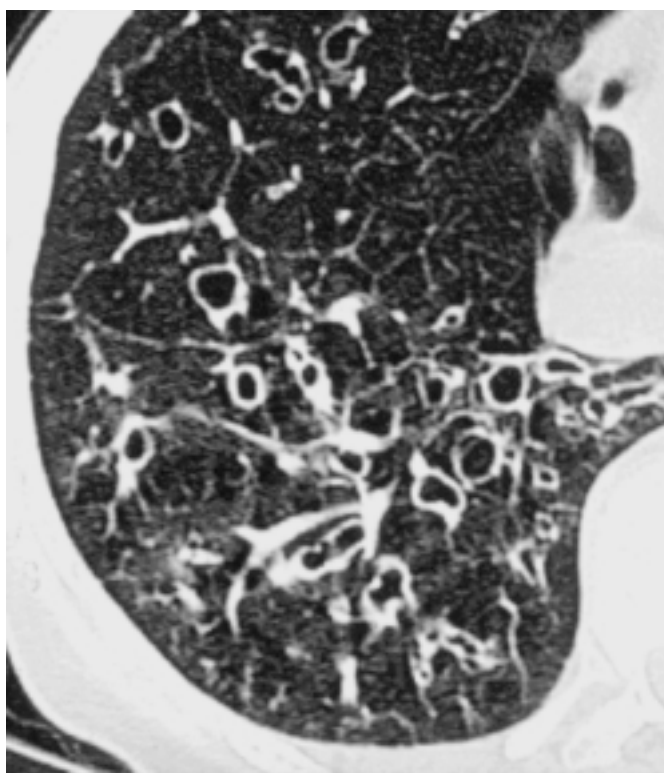


Abb. 2 HRCT: Bronchiektasen mit deutlicher Bronchusdilatation (Siegelring-Zeichen), teilweise geringer Wandverdickung und Sichtbarkeit der Bronchien bis weit in die Peripherie.

multifokalen bronchioloalveolären Karzinom auftreten [10]. Bronchiektasen, die im Rahmen von Lungenfibrosen auftreten, werden als Traktionsbronchiektasen bezeichnet. Hierbei handelt es sich um unregelmäßige Bronchuserweiterungen, die in Verbindung mit angrenzenden generalisierten oder streifenförmigen Verdichtungen des umgebenden fibrotischen Lungenparenchyms auftreten. In dieser Situation besteht fast immer eine restriktive Ventilationsstörung.

Die Bronchiolen sind normalerweise in der CT nicht erkennbar. Bei einer Bronchiolitis mit Verdickung der Wand und Füllung des Lumens mit weichteildichten Strukturen können die kleinen Atemwege computertomographisch sichtbar werden. Sie zeigen sich als zarte, verzweigte, V-förmige oder mercedessternartige Verdichtungen in der Lungenperipherie. Das Exsudat in den dilatierten Bronchiolen führt auch zum typischen Baumknospens- oder Blütenbaumzeichen („tree-in-bud“). Dabei lässt sich eine noduläre Dilatation der sich verzweigenden zentrilobulären Strukturen des Lobulus, die an einen knospenden Baum oder einen Zweig mit Blüten erinnert, erkennen (Abb. 3) [11].

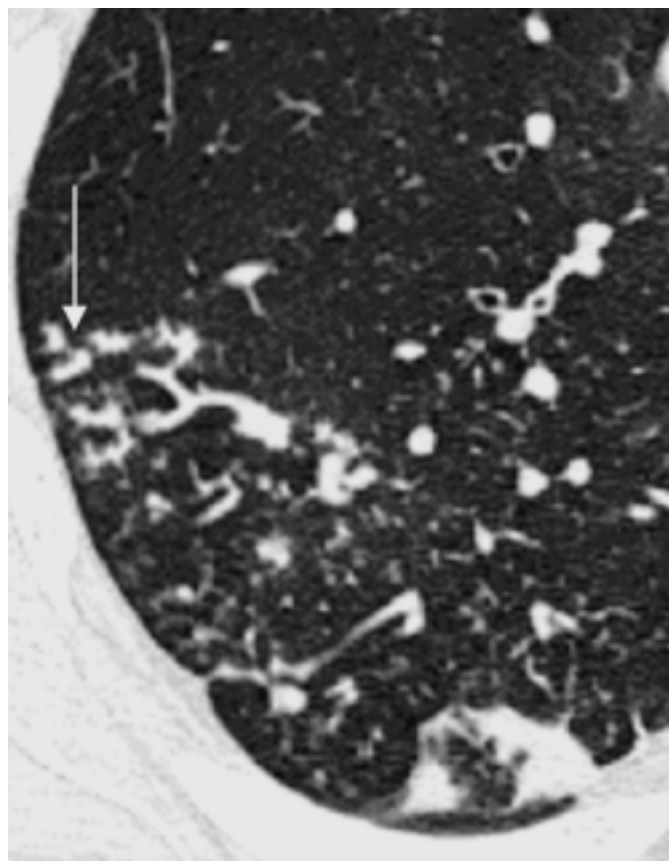


Abb. 3 HRCT: Bronchiolitis mit Baumknospenszeichen (Pfeil) und zentrilobulären Noduli.

Emphysem

Das Emphysem ist histologisch als konstante, also irreversible, abnorme Erweiterung der Alveolarräume distal der terminalen Bronchiolen definiert [12]. Es geht mit der Zerstörung des Interstitiums innerhalb der Lobuli und der perilobulären Septen einher, ohne dass es zu einer vermehrten Bildung von Bindegewebe kommt. Die CT ist in der Lage, den Alveolarraum und seine ab-

norme Erweiterung direkt abzubilden. Das Emphysem führt durch den erhöhten Luftgehalt und den Verlust an Lungengerüst zu einer Dichteminderung. Die Erkennung einer Dichteminderung ist einfach, wenn sie inhomogen ist und gegenüber weniger stark betroffenen Lungenabschnitten kontrastiert, wie dies beim zentrilobulären Emphysem der Fall ist. Die emphysematösen Gebiete verminderter Dichte zeigen dabei keine sichtbare Begrenzung oder Wand gegenüber dem dichteren Parenchym. Die Dichteminderung kann allerdings auch generalisiert auftreten, wie beim panlobulären Emphysem. Sie ist dann visuell schwer zu erkennen, kann aber durch eine Dichtemessung belegt und quantifiziert werden. Die Dichtemessung erfolgt entweder lokal mittels einer „Region-of-interest“ (ROI) oder über die gesamte Lunge nach Segmentierung.

In vielen Arbeiten mit pathologisch anatomischer Korrelation und auch mit Vergleich zur Lungenfunktionsprüfung wurde untersucht, welche Dichtebereiche in der CT emphysematös durchsetztes und zerstörtes Lungenparenchym am besten repräsentieren. Es wurden verschiedene obere Schwellenwerte – 900 HE, – 910 HE [13 – 15], und auch – 950 HE [16] angegeben. Der untere Schwellenwert liegt bei – 1024 HE. Der so definierte Dichtebereich (Dichtemaske) kann auch zur Bestimmung des Flächenanteils des Emphysems an der Gesamtlunge (Emphysemindex) eingesetzt werden. Trotz der unterschiedlichen Schwellenwerte konnte gezeigt werden, dass die CT ein sehr hohes Maß an Übereinstimmung mit pathologisch anatomischen Untersuchungen aufweist. Sie ist dabei der Übersichtsaufnahme im Nachweis beginnender emphysematöser Veränderungen weit überlegen, denn diese zeigt vorwiegend indirekte Zeichen bei ausgeprägten Befunden [17]. Gleichzeitig muss festgestellt werden, dass kleinste, histologisch bereits nachweisbare emphysematöse Veränderungen der computertomographischen Darstellung entgegen können, wenn sie unterhalb des Auflösungsvermögens liegen [18].

Die CT kann daneben auch die Auswirkungen des Emphysems auf das Gefäßsystem abbilden. Bei geringer Ausprägung des Emphysems bleibt die Gefäßarchitektur der Lunge normal. Bei fortschreitender Erkrankung kommt es, insbesondere in der Peripherie, zur Gefäßrarefizierung, die mit der CT leicht erfasst werden kann [19]. Auch Änderungen des Verlaufs der pulmonalen Gefäße durch lokale Überblähungen oder Bullae lassen sich eindeutig abbilden. Im Gegensatz zur Übersichtsaufnahme kann die CT die unterschiedlichen, makroskopisch und mikroskopisch definierten Formen des Emphysems differenzieren, was zu diagnostischen und therapeutischen Konsequenzen führen kann.

Zentrilobuläres Emphysem

Durch eine chronisch destruktive Bronchiolitis kommt es zu einer Zerstörung und Dilatation der respiratorischen Bronchiolen im proximalen Azinus. Die Erweiterung dieser Lufträume nennt sich zentrilobuläres Emphysem. Es ist klassischerweise eng mit Nikotinabusus und einer COPD assoziiert. Im weiteren Verlauf kommt es zu einer von den zentralen Anteilen des Lobulus nach peripher fortschreitenden, zunächst partiellen, später vollständigen Destruktion der Lufträume. Es entsteht das Bild des destruierenden Emphysems. Die Veränderungen sind typischerweise in den Oberlappen betont und gehen frühzeitig mit einer Obstruktion der Atemwege einher. Die CT weist das zentrilobuläre Emphysem als Areal verminderter Dichte in den zentralen Anteilen

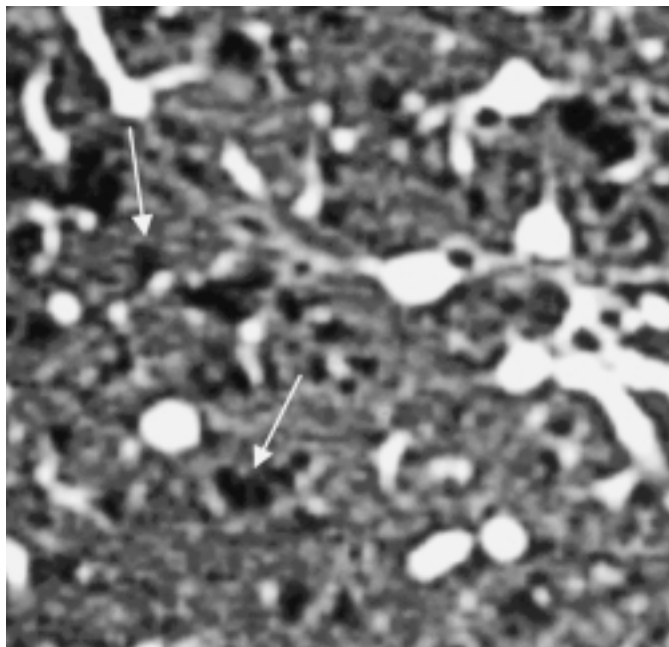


Abb. 4 Vergrößerung einer HRCT bei zentrilobulärem Emphysem: nur die zentralen Anteile der Lobuli sind in der Dichte gemindert (Pfeile).

der Lobuli nach (Abb. 4). Es kommen nebeneinander emphysematöse Areale und normales Lungenparenchym zur Darstellung. Grenzlamellen oder Wandstrukturen finden sich nicht. Die Struktur des normalen Lungengerüsts bleibt zunächst erhalten. Die Vergleiche von In-vivo- und In-vitro-CT-Untersuchungen mit der histologischen Beurteilung von Lungenpräparaten haben gezeigt, dass die CT das zentrilobuläre Emphysem mit hoher Zuverlässigkeit nachweisen kann (signifikante Korrelationen in vitro $r = 0,91$) [20–22].

Panlobuläres Emphysem

Das panlobuläre Emphysem betrifft relativ gleichmäßig alle Anteile des Lobulus. Es ist typischerweise in den basalen Lungenabschnitten betont und hat eine geringe, spät auftretende obstruktive Komponente. Klassische Beispiele für das panlobuläre Emphysem sind das senile Emphysem und das Emphysem im Rahmen eines α_1 -Antitrypsinmangels [23]. In der CT zeigt sich das panlobuläre Emphysem als eine homogene Dichteminderung des gesamten Lobulus, meist sogar ganzer Segmente oder Lappen (Abb. 5). Aufgrund der Homogenität kann ein gering ausgeprägtes panlobuläres Emphysem bei der rein visuellen Befundung leicht übersehen werden [19]. Die Dichtemessung mit Werten < -900 oder -950 HE und die Gefäßrarefizierung weisen dann das Emphysem nach. Die Dichtemessung kann auch einfach zur Verlaufsbeurteilung der Erkrankung ohne oder mit Therapie eingesetzt werden.

Paraseptales Emphysem

Beim paraseptalen Emphysem handelt es sich um eine Sonderform des panlobulären Emphysems. Dabei werden die an die viszerale Pleura oder an die Interlobulärsepten grenzenden peripheren Lobuli befallen. Die anderen Lungenabschnitte sind nor-

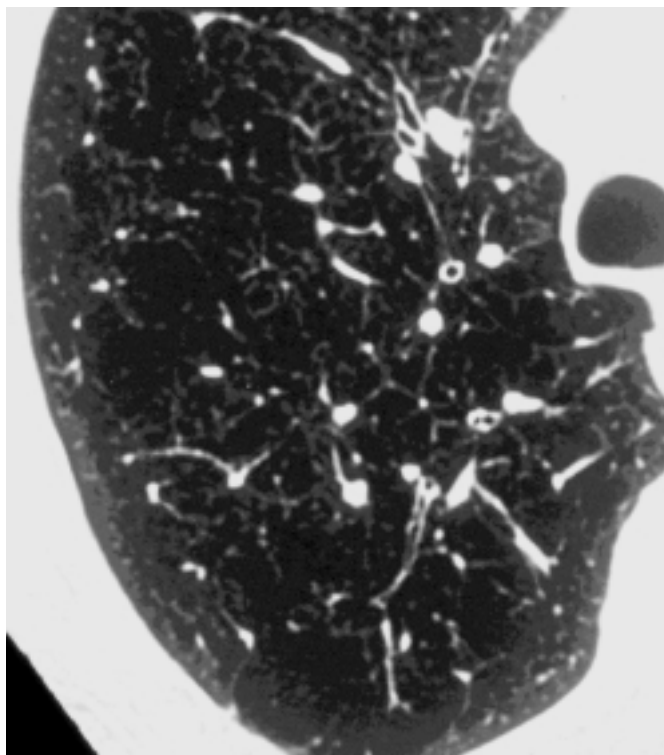


Abb. 5 HRCT: Panlobuläres Emphysem mit generalisiert erniedrigter Dichte, Vergrößerung (Überblähung) der Lobuli und Gefäßrarefizierung.

mal. Da sich das paraseptale Emphysem nur subpleural manifestiert, führt es nicht zu einer Überblähung der gesamten Lunge. Die CT zeigt die betroffenen Lobuli mit erniedrigter Dichte deutlich, da sie einen starken Kontrast gegenüber dem normalen angrenzenden Parenchym bilden (Abb. 6). Das paraseptale Emphysem respektiert die Grenzen der normalen Lobuli; die normalen interlobulären Septen sind deutlich sichtbar. Eine weiterreichende Destruktion des Lungengerüsts besteht nicht.

Funktionelle Untersuchungsstrategien

Inspiration – Expiration, Spirometertriggerung

Die Dichtemessung der Lunge in der CT erlaubt eine Abschätzung von Lungenfunktionsparametern [24]. Ein Hauptfaktor ist die Atemlage und somit der Luftgehalt der Lunge. Grundsätzlich werden CT-Aufnahmen in maximaler Inspiration, also bei maximalem intrapulmonalen Luftgehalt, angefertigt. Unter funktionellen Aspekten, insbesondere beim Vorliegen von Atemwegsobstruktionen, ist die zusätzliche Durchführung von CT-Aufnahmen in Expiration, also bei minimalem pulmonalen Luftgehalt, zur visuellen Beurteilung von Airtrapping (Abb. 7) und zur Dichtemessung sinnvoll [25,26]. In der klinischen Routine wird die CT nach automatischer Ansage eines Atemkommandos durchgeführt. Eine exakte Kontrolle des pulmonalen Luftgehalts und damit eine intra- oder interindividuelle Standardisierung ist dabei jedoch nicht möglich. Es wurde daher die Möglichkeit der Spirometertriggerung [27] und bei Patienten mit Lungenerkrankungen erfolgreich eingesetzt [28,29]. In einer vergleichenden Studie zeigte die Dichteausswertung von Aufnahmen, die in In- und Expiration mittels Spirometertriggerung aufgenommen wurden, keinen signifikanten Unterschied zu Aufnahmen, die ohne

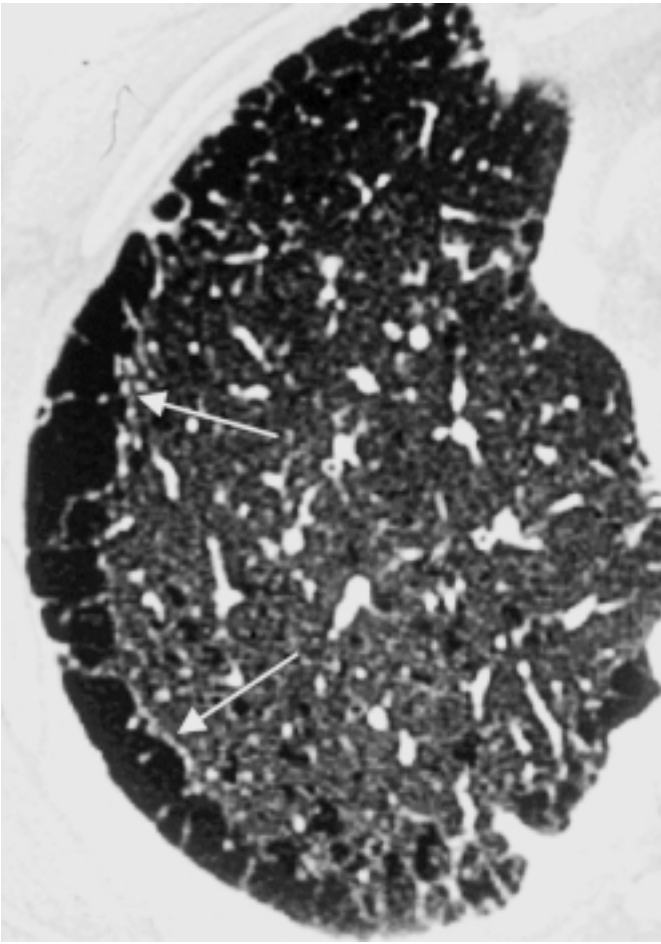


Abb. 6 HRCT: Paraseptales Emphysem mit erniedrigter Dichte in den subpleural gelegenen Lobuli (Pfeile).

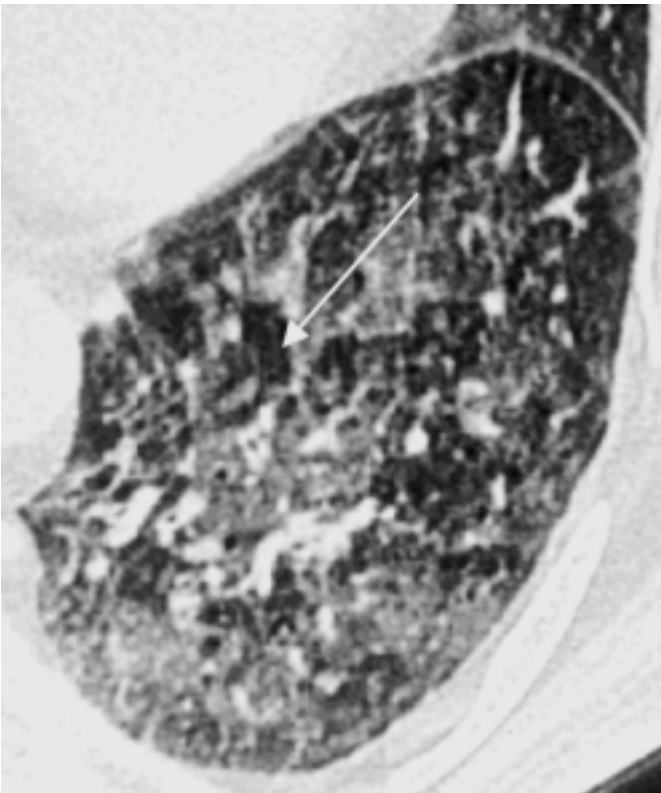


Abb. 7 Airtrapping (Pfeil) in einer HRCT-Expirationsaufnahme als Zeichen einer Affektion der kleinen Atemwege.

Spirometertriggerung aufgenommen wurden [30]. In zahlreichen Arbeiten wurde mittlerweile die funktionelle Bedeutung von CT-Aufnahmen in Expiration untersucht und nachgewiesen. Das Auftreten von multiplen Arealen mit einem fehlenden oder unzureichenden Dichteanstieg in Expiration [26] ist ein deutlicher diagnostischer Hinweis auf das Vorliegen einer obstruktiven Affektion der kleinen Atemwege, z. B. bei einer postinfektiösen Bronchiolitis oder einer Bronchiolitis obliterans als Zeichen einer chronischen Abstoßungsreaktion nach Lungentransplantation [31,32].

Volumetrie

Die Spiral- oder Multislice-CT mit Akquisition eines Volumendatensatzes ermöglicht die dreidimensionale Rekonstruktion des Lungenvolumens. Aus Aufnahmen, die in Inspiration angefertigt werden, kann die totale Lungenkapazität nach Angleichung der unterschiedlichen Patientenlagerung mit $r = 0,89$ bei einer systematischen Unterschätzung von 12% gut abgeschätzt werden. Aus Aufnahmen in Expiration kann die funktionelle Residualkapazität ohne systematische Unter- oder Überschätzung besonders gut bestimmt werden ($r = 0,88$) [33].

Multiscan CT/Cine-CT

Mittels Multitrotationsaufnahmen innerhalb einer Schicht (dynamic multiscan CT) wird eine dynamische Untersuchung mit kontinuierlicher Bildakquisition ohne Tischverschiebung über den gesamten Atemzyklus möglich (Spiral-CT auf der Stelle). Die Dauer dieser Cine-CT wird dabei dem Atemzyklus des Patienten angepasst, der langsam tief ein- und ausatmet. Aus dem akquirierten Datensatz lassen sich retrospektiv Bilder mit einer minimalen Rekonstruktionszeit von ca. 0,25 s und einem minimalen Zeitintervall von 0,1 s (zeitliches Inkrement) berechnen. Die rekonstruierten Bilder können zur Illustration des Atemvorganges in einer Cine-Darstellung präsentiert werden. Diese Multitrotationsaufnahmen sollten gezielt im interessierenden Bereich transversal oder auch koronar durchgeführt werden. Mittels dieser Aufnahmen können verschiedene funktionelle Aspekte der Atmung untersucht werden:

(1) Trachea und zentrale Atemwege bei Verdacht auf Tracheomalazie oder Kollaps. Die oft eingesetzte gepaarte Spiral-CT in einem inspiratorischen und expiratorischem Atemstillstand spiegelt nicht die tatsächlichen funktionellen individuellen Bewegungen von Trachea und Bronchien wider. Erst die funktionelle Untersuchung des Tracheobronchialbaums mittels der Cine-CT ermöglicht eine signifikant bessere funktionelle Darstellung des Wandverhaltens während der Atmung (Abb. 8). Sie erzielt vergleichbare Ergebnisse wie die Bronchoskopie, jedoch ohne invasive Irritation der Patienten. Zudem können distale Stenosen und kollabierende Abschnitte sich der bronchoskopischen Begutachtung entziehen, wohingegen diese Bereiche mit der Cine-CT gleichermaßen problemlos untersucht werden können [4,34] (siehe auch www.uni-mainz.de/~heussel/cine-rofo.html und www.uni-mainz.de/~heussel/cine-er.html).

(2) Lungendichte über den gesamten Atemzyklus. Da die Lungendichte mit bestimmten Ventilationszuständen assoziiert ist, können funktionelle Zuordnungen getroffen werden: Anteil gut ventiliertes Lungengewebe, schlecht ventiliertes Lungengewebe, kollabiertes Lungengewebe mit Shunt und überblähtes Lungengewebe [35,36]. Wird die Änderung des Anteils gut ventilierten Lungengewebes wäh-

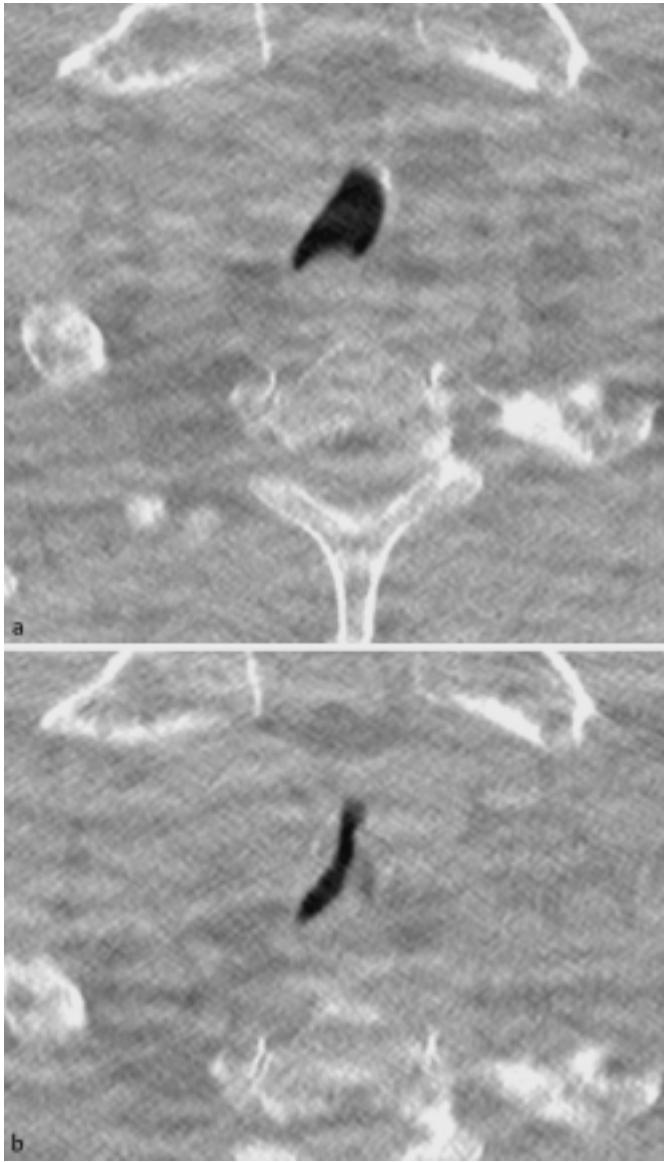


Abb. 8 Hochaufgelöste Cine-CT bei malazischer Trachealstenose nach Langzeitbeatmung. **a)** Inspiration: irreguläres, noch normales, weites Lumen. **b)** Expiration: filiforme Stenose.

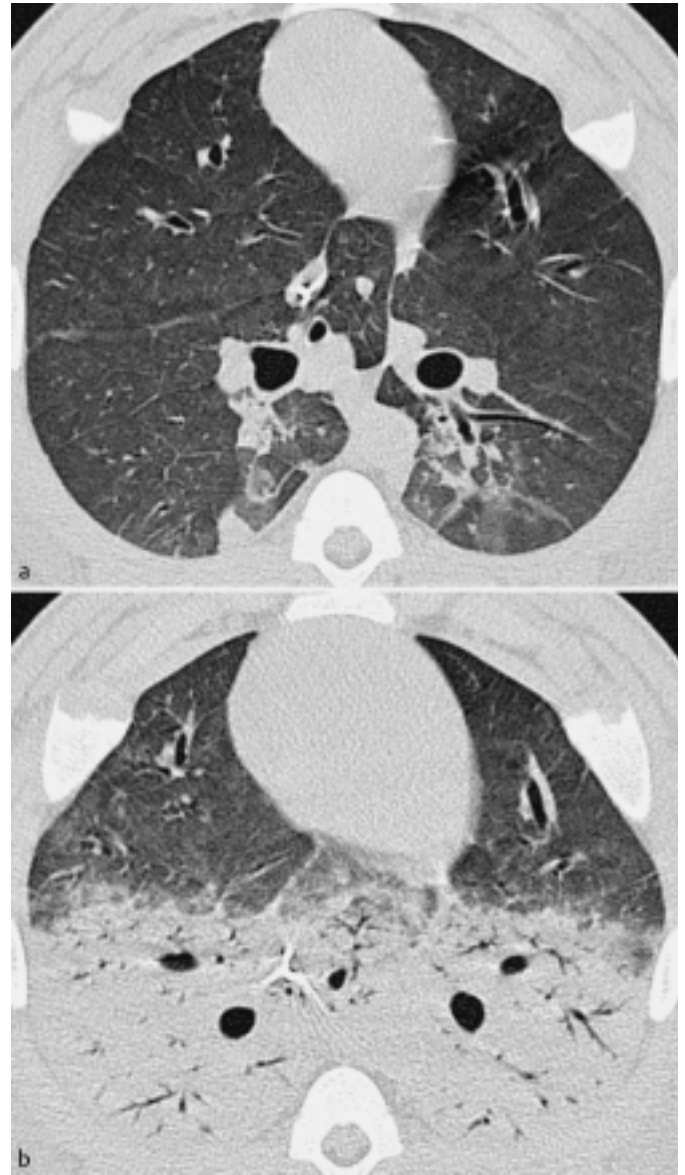


Abb. 9 Hochaufgelöste Cine-CT im ARDS-Schweinmodell zur Beatmungsoptimierung. **a)** maximale Inspiration: Atemwegsdruck 33 cm H₂O. **b)** Expiration: Atemwegsdruck 13 cm H₂O.

rend eines in- bzw. expiratorischen Atemmanövers, z.B. unter Beatmung, über die Zeit aufgetragen, kann der Kurvenverlauf unter Annahme eines Zweikompartimentmodells gefittet werden. Man erhält in- bzw. expiratorische pulmonale Zeitkonstanten, die unterschiedliche Reaktionsmuster des Lungenparenchyms auf Änderungen des Atemwegsdrucks widerspiegeln [37]. Darüber hinaus kann der Flächenanteil einer solchen Zeitkonstante berechnet werden. Die einzigartigen funktionellen Informationen werden in Zukunft zur Optimierung von Beatmungsstrategien bei Patienten im akuten Lungenversagen eingesetzt (Abb. 9).

(3) Bewegung von Zwerchfell, Thoraxwand und Mediastinum. Die dynamische Untersuchung ermöglicht, die dissoziierte Bewegung von Zwerchfell und Thoraxwand beim Emphysem abzubilden und zu berechnen. In Einzelfällen konnte auch die Kompression einer einseitig transplantierten Lunge durch die verbliebene emphysematös überblähte kontralaterale Lunge nachgewiesen werden [38].

Schlussfolgerung

Weiterentwicklungen der CT bieten heute viele Möglichkeiten zur Darstellung der pulmonalen Struktur und zur Beurteilung der funktionellen Auswirkungen pathologischer Veränderungen von Atemwegen und Parenchym. Diese Techniken müssen gezielt entsprechend der klinischen Fragestellung und der Strahlenbelastung [34, 39, 40] eingesetzt werden. Die Perspektiven bestehen in zunehmender Verfügbarkeit, räumlicher Zuordnung funktioneller Veränderungen und ihrer Quantifizierung. Die Herausforderung der interdisziplinären Zusammenarbeit von Pneumologen und Radiologen besteht in der Validierung und der Bestimmung des Stellenwerts der neuen Parameter.

- 1 Mayo JR, Webb WR, Gould R, Stein MG, Bass I, Gamsu G, Goldberg HI. High-resolution CT of the lungs: an optimal approach. *Radiology* 1987; 163: 507–510
- 2 Müller NL. Clinical value of high-resolution CT in chronic diffuse lung disease. *AJR* 1991; 157: 1163–1170
- 3 Kauczor H-U, Heussel C-P, Mildnerberger P, Thelen M. Was heißt wie? Ansatz und Glossar zu Befundung und Verständnis in der HRCT der Lunge. *Fortschr Röntgenstr* 1996; 165: 428–437
- 4 Heussel C, Hafner B, Lill J, Thelen M, Kauczor H-U. Diagnostik der trachealen Instabilität Spiral-CT in Inspiration und Expiration und respiratorische Cine-CT. *Fortschr Röntgenstr* 2000; 172: 115–121
- 5 Grenier P, Maurice F, Musset D, Menu Y, Nahum H. Bronchiectasis: assessment by thin-section CT. *Radiology* 1986; 161: 95–99
- 6 Kang EY, Miller RR, Müller NL. Bronchiectasis: comparison of preoperative thin-section CT and pathologic findings in resected specimens. *Radiology* 1995; 195: 649–654
- 7 Diederich S, Roos N, Thomas M, Peters P. Bildgebende Diagnostik bei Bronchiectasen. *Radiologe* 1996; 36: 550–559
- 8 Kim J, Müller N, Park C, Lynch D, Newman L, Grenier P, Herold C. Bronchoarterial ratio at thin section CT: comparison between high altitude and sea level. *J Comput Assist Tomogr* 1997; 21: 306–311
- 9 Müller-Leisse C, Bussmann A, Mayer O, Genth E, Günther RW. Hochauflösende Computertomographie der Lunge (HRCT) bei Kollagenosen: eine prospektive Untersuchung an 73 Patienten. *Fortschr Röntgenstr* 1994; 161: 12–18
- 10 Gaeta M, Caruso R, Blandino A, Bartiromo G, Scribano E, Pandolfo I. Radiolucencies and cavitation in bronchioalveolar carcinoma: CT – pathologic correlation. *Eur Radiol* 1999; 9: 55–59
- 11 Teel GS, Engeler CE, Tashjian JH, duCret RP. Imaging of small airway disease. *Radiographics* 1996; 16: 27–41
- 12 Snider GL, Kleinerman J, Thurlbeck WA, Bengali ZH. The definition of emphysema. *Am Rev Respir Dis* 1985; 132: 182–185
- 13 Archer DC, Coblentz CL, deKemp RA, Nahmias C, Norman G. Automated in vivo quantification of emphysema. *Radiology* 1993; 188: 835–838
- 14 Müller NL, Staples CA, Miller RR, Abboud RT. „Density mask“: an objective method to quantitate emphysema using computed tomography. *Chest* 1988; 94: 782–787
- 15 Kinsella M, Müller NL, Abboud RT, Morrison NJ, DyBuncio A. Quantification of emphysema by computed tomography using a density mask program and correlation with pulmonary function tests. *Chest* 1990; 97: 315–321
- 16 Gevenois PA, Vuyst PD, Littani M, Zanen J, Franquen PD, Yernault JC, Struyven J. CT Quantification of Pulmonary Emphysema – correlation with Pulmonary Function Tests: Preliminary results on 15 Patients, in *Advances in CT II*. In: Felix R, Langer M (Hrsg). Heidelberg: Springer, 1992: 3–7
- 17 Klein JS, Gamsu G, Webb WR, Golden JA, Müller NL. High-resolution CT diagnosis of emphysema in symptomatic patients with normal chest radiographs and isolated low diffusing capacity. *Radiology* 1992; 182: 817–821
- 18 Miller RR, Müller NL, Vedal S, Morrison NJ, Staples CA. Limitations of computed tomography in the assessment of emphysema. *Am Rev Respir Dis* 1989; 139: 980–983
- 19 Spouge D, Mayo JR, Cardoso W, Müller NL. Panacinar emphysema: CT and pathologic findings. *J Comput Assist Tomogr* 1993; 17: 710–713
- 20 Foster Jr WL, Pratt PC, Roggli VL, Godwin JD, Halvorsen Jr RA, Putman CE. Centrilobular emphysema: CT-pathologic correlation. *Radiology* 1986; 159: 27–32
- 21 Foster Jr WL, Gimenez EI, Roubidoux MA, Sherrier RH, Shannon RH, Roggli VL, Pratt PC. The emphysemas: radiologic-pathologic correlations. *Radiographics* 1993; 13: 311–328
- 22 Hruban RH, Meziane MA, Zerhouni EA, Khouri NF, Fishman EK, Wheeler PS, Dumler JS, Hutchins GM. High resolution computed tomography of inflation-fixed lungs: pathologic-radiologic correlation of centrilobular emphysema. *Am Rev Respir Dis* 1987; 136: 935–940
- 23 Guest PJ, Hansell DM. High resolution computed tomography (HRCT) im emphysema associated with alpha-1-antitrypsin deficiency. *Clin Radiol* 1992; 45: 260–266
- 24 Gevenois PA, Scillia P, Maertelaer VD, Michils A, DeVuyst P, Yernault J-C. The effect of age, sex, lung size, and hyperinflation on CT lung densitometry. *AJR* 1996; 167: 1169–1173
- 25 Gevenois PA, DeVuyst P, Sy M, Scillia P, Chaminade L, DeMaertelaer V, Zanen J, Yernault J-C. Pulmonary emphysema: quantitative CT during expiration. *Radiology* 1996; 199: 825–829
- 26 Kauczor H-U, Hast J, Heussel C, Schlegel J, Mildnerberger P, Thelen M. Focal airtrapping at expiratory high-resolution CT: comparison with pulmonary function tests. *Eur Radiol* 2000; 10: 1539–1546
- 27 Kalender WA, Rienmüller R, Seissler W, Behr J, Welke M, Fichte H. Measurement of pulmonary parenchymal attenuation: use of spirometric gating with quantitative CT. *Radiology* 1990; 175: 265–268
- 28 Reuter M, Holling I, Emde L, Brinkmann G, Bettinghausen E, Szadkowski D, Heller M. Die quantitative Computertomographie der Lunge in der Frühdiagnose: erste Erfahrungen an asbestexponierten Mariensoldaten. *Fortschr Röntgenstr* 1995; 162: 288–295
- 29 Beinert T, Behr J, Mehner F, Kohz P, Seemann M, Reiser M. Quantitative Computertomographie der Lunge – Respiratorisch kontrollierte Diagnostik diffuser Lungenerkrankungen. *Pneumologie* 1995; 49: 678–683
- 30 Kauczor H-U, Heussel C, Fischer B, Hast J, Mildnerberger P, Thelen M. Stellenwert der Spirometertriggerung für die hochauflösende Computertomographie der Lunge in Inspiration und Expiration. *Fortschr Röntgenstr* 1998; 169: 658–661
- 31 Loubeyre P, Revel D, Delignette A, Wiesendanger T, Philit F, Bertocchi M, Loire R, Mornex J-F. Bronchiectasis detected with thin-section CT as a predictor of chronic lung allograft rejection. *Radiology* 1995; 194: 213–216
- 32 Kazerooni EA, Cascade PN, Gross BH. Transplanted lungs: nodules following transbronchial biopsy. *Radiology* 1995; 194: 209–212
- 33 Kauczor H-U, Klamm R, Heussel C, Fischer B, Mildnerberger P, Thelen M. Assessment of lung volumes using spiral CT in inspiration and expiration: comparison with pulmonary function tests. *AJR* 1998; 171: 1091–1095
- 34 Heussel C, Hafner B, Lill J, Schreiber W, Thelen M, Kauczor H-U. Paired inspiratory/expiratory spiral-CT and continuous respiration cine-CT in the diagnosis of tracheal instability. *Eur Radiol* 2001; 11: 982–989
- 35 Markstaller K, Kauczor H-U, Eberle B, Weiler N, Siebertz D, Birkenkamp K, Heinrichs W, Thelen M. Multirotations-CT während kontinuierlicher Beatmung: Vergleich unterschiedlicher Dichtebereiche bei gesunden Lungen und im Lavage-ARDS-Modell. *Fortschr Röntgenstr* 1999; 170: 575–580
- 36 Bink A, Markstaller K, Birkenkamp K, Karmrodt J, Stepniak A, Heussel C, Eberle B, Thelen M, Kauczor H-U. Multirotations-CT und ARDS: Tierexperimentelle Studien. *Radiologe* 2001; 41: 195–200
- 37 Markstaller K, Eberle B, Kauczor H-U, Scholz A, Bink A, Thelen M, Heinrichs W, Weiler N. Temporal dynamics of lung aeration determined by dynamic CT in a porcine model of ARDS. *Brit J Anesth* 2001; 87: 459–468
- 38 Kauczor H-U, Buchenroth M, Heußel C-P, Mayer E. Funktionelle Computertomographie nach einseitiger Lungentransplantation mit axialer und koronarer Akquisition. *Fortschr Röntgenstr* 1996; 164: 441–444
- 39 Heinz-Peer G, Weninger F, Nowotny R, Herold CJ. Strahlendosis der verschiedensten CT-Verfahren in der Lungendiagnostik. *Radiologe* 1996; 26: 470–474
- 40 Galanski M, Nagel HD, Stamm G. CT-Expositionspraxis in der Bundesrepublik Deutschland. *Fortschr Röntgenstr* 2001; 173: R1–R66