



Verändert die Koronar-CT den klinischen Alltag des Kardiologen?

Einführung in die kardiale Computertomographie

Die kardiale Computertomographie (CT) hat in den vergangenen Jahrzehnten eine rasante Entwicklung erfahren. Standen zu Beginn der 1990er-Jahre Elektronenstrahl- oder Einschnitt-computertomographen zur Verfügung, gehört die Verwendung von Multidetektortomographen (MDCT) mit 256, 320 oder 640 Schichten oder Dual-Source Computertomographen (DSCT), welche zwei um 90° versetzte Röhren-Detektoreinheiten besitzen, heute zum klinischen Alltag. Mit der verbesserten räumlichen Auflösung können auch kleine Strukturen wie Koronararterienplaques mit hoher Präzision dargestellt werden und die verringerten Akquisitionzeiten ermöglichen zunehmend die Untersuchung tachykarder oder arrhythmischer Patienten. Der gegenwärtige technische Stand sowie der zunehmende Einsatz der nichtinvasiven Bildgebung in der Kardiologie zur Diagnostik und Interventionsplanung führen zu einer Ausweitung des Indikationsspektrums für die kardiale CT. Angesichts der aktuellen technischen Entwicklungen und der Ergebnisse klinischer Studien ist davon auszugehen, dass der Stellenwert der CT in der ambulanten und klinischen Kardiologie weiter zunehmen wird.

Im Rahmen dieses Artikels werden der aktuelle Stand der Technik, gegenwärtige Entwicklungen sowie die Bedeutung der kardialen CT für den Kardiologen dargestellt.

Grundtechniken der kardialen Computertomographie

Das Herz stellt als sich ständig bewegendes Organ eine besondere Herausforderung an die Bildgebung dar. Während bei den meisten anderen computertomographischen Aufnahmen im Bereich des Thorax das Anhalten des Atems ausreicht, um Bewegungsartefakte zu vermeiden, ist bei der kardialen CT zusätzlich eine Synchronisation der Akquisition mit der Herzaktion mittels Elektrokardiogramm (EKG) erforderlich. Prinzipiell gibt es hierfür zwei Verfahren. Beim retrospektiven EKG-Gating erfolgt die Bildakquisition während des gesamten Herzzyklus, wobei gegebenenfalls eine herzphasenadaptierte Dosismodulation zum Einsatz kommt. Dieses Verfahren weist eine hohe Robustheit gegenüber arrhythmiebedingten Artefakten auf und erlaubt zudem die Durchführung dynamischer Messungen wie beispielsweise der Bestimmung der Ejektionsfraktion. Allerdings ist es mit einer deutlich höheren Strahlenbelastung verbunden als prospektive Verfahren. Bei Letzteren erfolgt die Bildakquisition nur in einer Phase minimaler Herzbewegung, was meist der Enddiastole oder der Endsystole entspricht. Während dieses Verfahren keine dynamischen Messungen erlaubt, beträgt die Strahlenbelastung nur einen Bruchteil derer retrospektiver Protokolle.

Zur Darstellung der Gefäße einschließlich der Koronararterien ist die Gabe von iodhaltigem Kontrastmittel erforderlich. Da dessen Anflutungs-geschwindigkeit und Verteilung von individuellen Faktoren wie beispiels-

weise dem Herzzeitvolumen abhängig sind, wird meist eine Bolus-Triggerung durchgeführt. Dabei erfolgen nach der peripheren Kontrastmittelgabe wiederholt Messungen der Röntgendichte des Blutes an einer definierten Lokalisation wie beispielsweise der Aorta descendens auf Höhe der Pulmonalisbifurkation. Führt das anflutende Kontrastmittel zum Überschreiten eines zuvor definierten Grenzwertes, wird die eigentliche Bildakquisition gegebenenfalls mit einer bestimmten Verzögerung (Delay) ausgelöst. Da meist nur die Kontrastierung bestimmter Abschnitte des kardiovaskulären Systems erforderlich ist, kann durch die Kombination von Bolus-Triggerung mit spezifischen Untersuchungsprotokollen eine Optimierung der benötigten Kontrastmittelmenge erreicht werden.

Kalziumscoring

Beim Kalziumscoring wird mittels einer nativen kardialen CT das Ausmaß kalzifizierter Plaques in den Koronararterien bestimmt. Bereits in den 1990er-Jahren wurden mittels Elektronenstrahl-CT erste Koronarkalkmessungen durchgeführt, wobei heutzutage überwiegend Niedrigdosis-Protokolle in MDCT beziehungsweise DSCT verwendet werden. Bei der semiautomatischen Analyse der Bilddaten werden Dichteanhebungen in den Koronararterien im Regelfall ab einem Schwellenwert von ab 130 Hounsfield Units (HU) als Koronarkalk klassifiziert, sofern diese nicht Implantaten wie beispielsweise Stents oder Clips entsprechen (**Abb. 1**).

Zur Quantifizierung der kalzifizierten Plaques stehen mit dem Agatston-,



Abb. 1 ▲ Kalziumscoring bei einem 54-jährigen Patienten mit Verdacht auf eine koronare Herzkrankheit. Der Agatston-Score betrug 1754 und liegt damit über der 99. Perzentile. Aufgrund der stark kalzifizierten Plaques, welche die Auswertung deutlich beeinträchtigt hätten, wurde von der Durchführung einer computertomographischen Koronarangiographie (CCTA) abgesehen. In den aktuellen europäischen Leitlinien kann bei einem Agatston-Score über 400 aufgrund der damit verbundenen hohen Prävalenz von Stenosen und der eingeschränkten Spezifität auf eine CCTA verzichtet werden [3]

dem Volume- und dem Mass-Score drei verschiedene Verfahren zur Verfügung. Während für den Agatston-Score derzeit die beste Datenlage hinsichtlich der Risikostratifizierung besteht, weisen die beiden anderen Scores eine höhere Reproduzierbarkeit und eine geringere Artefaktanfälligkeit auf. Zur Interpretation werden nicht nur die erlangten Messwerte, sondern auch die alters- und geschlechtsadaptierten Perzentilen herangezogen. Die koronare Kalklast stellt einen unabhängigen Risikofaktor zu den traditionellen Risikofaktoren dar, sodass dem Kalziumscoring ein additiver Nutzen für die Risikostratifizierung zukommt. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass bei Fehlen einer signifikanten Koronarkalzifizierung die Prävalenz stenosierender jedoch nicht verkalkter Plaques um die 5 % betragen kann, sodass das Kalziumscoring allein nicht zum sicheren Ausschluss einer koronaren Herzkrankung (KHK), insbesondere bei jungen oder symptomatischen Patienten, herangezogen werden kann [1–3].

Computertomographische Koronarangiographie

Die computertomographische Koronarangiographie (CCTA) stellt derzeit die häufigste Anwendung der kardialen CT dar. Bereits mit der Einführung von Computertomographen mit 64 Schichten vor über zehn Jahren wurde eine verlässliche Darstellung der Koronararterien möglich. Neuere Systeme mit höherer Volumenabdeckung, verbesserten Detektoren und verringerten Akquisitionszeiten haben zu einer weiteren Verbesserung der Diagnostik geführt. Computertomographen der neuesten Generation erreichen eine räumliche Auflösung $< 0,25$ mm bei einer nativen zeitlichen Auflösung < 70 ms, sodass sie sich diesbezüglich der invasiven Koronarangiographie weiter annähern. Zur Darstellung der Koronararterien werden meist prospektive Protokolle mit Bolus-Triggerung genutzt, sodass die kontrastmittelgefüllten Koronararterien in der Herzphase minimaler Bewegung aufgenommen werden. Zur besseren Darstellung der Koro-

nararterien erfolgt im Regelfall die Applikation von Nitraten unmittelbar vor der Untersuchung. Zudem kann, wenn erforderlich, eine Reduktion der Herzfrequenz mittels oraler sowie intravenöser Gabe von Betablockern oder seltener Verapamil erfolgen. Für die Berechnung der Bilder aus den Rohdaten kommen herzspezifische Rekonstruktionsalgorithmen, welche häufig iterative Verfahren zur Verbesserung der Bildqualität beinhalten, zum Einsatz. Insbesondere bei der Befundung der Koronararterien werden spezielle Softwarepakete verwendet. Diese bieten besondere Möglichkeiten der Koronardarstellung beispielsweise mittels multiplanarer Rekonstruktionen oder dreidimensionalem Rendering, welche die Evaluation der Koronararterienanatomie und gegebenenfalls vorhandener Plaques vereinfachen (▣ Abb. 2). Ferner sind häufig Werkzeuge zur Stenosequantifizierung oder Plaquecharakterisierung enthalten. Aufgrund der präzisen Darstellung der Koronararterien erreicht die CCTA eine Sensitivität und einen negativen prädiktiven Wert von über 95 % und übertrifft somit alle anderen nichtinvasiven Modalitäten hinsichtlich der diagnostischen Sensitivität für die KHK. Allerdings können eine eingeschränkte Bildqualität sowie kalzifizierte Plaques die Befundung deutlich erschweren, sodass die CCTA eine vergleichsweise geringe Spezifität aufweist. In den europäischen Leitlinien wird daher ihre Anwendung bei Patienten mit einer im unteren Bereich liegenden mittleren Vortestwahrscheinlichkeit (15–50 %) oder nach einem Stresstest mit unklarem Ergebnis empfohlen, wenn von einer diagnostischen Bildqualität ausgegangen werden kann [3]. Als nichtinvasives Verfahren geht die CCTA dabei mit einem deutlich geringeren prozeduralen Risiko als die invasive Koronarangiographie einher.

Aufgrund ihres dreidimensionalen Charakters können mittels CCTA atypische Verläufe der Koronararterien dargestellt werden, was sich in der konventionellen Koronarangiographie häufig als schwierig erweist. Ferner können chronisch verschlossene Koronararterien untersucht und die Daten zur Interventionsplanung herangezogen werden.

Obgleich mittels CCTA Koronararterienstenosen dargestellt werden, ist die Einschätzung der funktionellen Relevanz einer Stenose lediglich anhand des Ausmaßes der durch sie verursachten Reduktion des Gefäßlumens beziehungsweise der Verringerung der Querschnittsfläche möglich. Neue Techniken könnten eine Funktionsdiagnostik sowie eine Gewebecharakterisierung ermöglichen und somit die diagnostische Aussagekraft der kardialen CT weiter steigern.

Virtuelle Fractional Flow Reserve

Die Bestimmung der koronaren Flussreserve (Fractional Flow Reserve, FFR) mittels invasiver Druckdrahtmessung im Katheterlabor ist der gegenwärtige Referenzstandard zur Evaluation der hämodynamischen Relevanz von Koronararterienstenosen. Mittels numerischer Strömungsmechanik (computational fluid dynamics, CFD) kann allerdings anhand von Bilddaten aus der invasiven Koronarangiographie oder der CCTA versucht werden, den koronaren Blutfluss zu simulieren und somit eine virtuelle FFR (vFFR) zu errechnen. Erste klinische Studien zeigten eine Verbesserung der diagnostischen Genauigkeit hinsichtlich hämodynamisch relevanter Stenosen bei der Verwendung der computertomographischen vFFR im Vergleich zur konventionellen CCTA, wobei die invasiv ermittelte FFR als Referenzstandard diente [4, 5]. Auch die computertomographische vFFR ist auf eine gute Bildqualität angewiesen, sodass ihre Anwendbarkeit bei ausgeprägten Artefakten limitiert ist. Obwohl die U.S. Food and Drug Administration bereits eine Software zur vFFR-Bestimmung anhand von CCTA-Bildern zugelassen hat, sind noch einige Hürden bis zur Anwendung in der klinischen Routine zu überwinden [6].

CT-Perfusion

Einen weiteren Ansatz zur computertomographischen Evaluation der hämodynamischen Signifikanz von Koronararterienstenosen stellt die myokardiale Perfusion-CT dar. Hierbei erfolgt neben einer Ruheaufnahme eine Bildakquisi-

Herz 2016 · 41:405–412 DOI 10.1007/s00059-016-4452-2
© Springer Medizin Verlag 2016

F. André · S. J. Buß · H. A. Katus

Verändert die Koronar-CT den klinischen Alltag des Kardiologen?

Zusammenfassung

Die technischen Entwicklungen in der Computertomographie (CT) haben zu einer deutlichen Ausweitung des Indikationsspektrums und einer Zunahme der Untersuchungen in der Kardiologie geführt. Dies hat Eingang in die kardiologische Praxis sowie in aktuelle Leitlinien gefunden. Im Rahmen dieses Artikels werden der aktuelle Stand der Technik, gegenwärtige Entwicklungen sowie die klinische Bedeutung der kardialen CT dargestellt. Die Indikationsstellung, Durchführung und Beurteilung der Koronar-CT betreffen zentrale Inhalte kardiologischer Fachkompetenz. Aufgrund der zu erwartenden weiteren Zunahme von Koronar-CT-Untersuchungen müssen Kardiologen mit dieser Modalität vertraut sein. Dem wurde

mit der Einführung des Curriculums kardiale Computertomographie zur Erlangung der kardiologischen Zusatzqualifikation Rechnung getragen. Die Durchführung und Interpretation von kardialen CT bedarf der Kompetenz von Kardiologen und Radiologen, um den diagnostischen Wert und die Patientensicherheit optimal zu gewährleisten. Dies erfordert den Aufbau entsprechender Kooperationsstrukturen im ambulanten und stationären Bereich.

Schlüsselwörter

Kardiale Computertomographie · Koronarangiographie · Kardiologie · Radiologie · Curriculum

Does coronary CT change the cardiologist's clinical practice?

Abstract

Technological advances in computed tomography (CT) resulted in an expansion of (the spectrum of) indications and numbers of examination in cardiology. Thus, CT found its way into cardiological clinical practice as well as in current guidelines. This article describes the state of the technology, current developments, and the clinical significance of cardiac CT. Determination of indications, conduct, and assessment of coronary CT affect the core content of cardiological expertise. On the basis of the expected further increase in coronary CT examinations, cardiologists need to be familiar with this modality. Hence, the curriculum "Cardiac CT"

for the additional qualification of cardiologists has been introduced. The conduct and interpretation of cardiac CT require the expertise of cardiologists and radiologists to ensure its diagnostic value and patient safety in the best possible way. Therefore, structures for cooperation between the two disciplines need to be established in outpatient and in inpatient care.

Keywords

Cardiac computed tomography · Coronary angiography · Cardiology · Radiology · Curriculum

tion unter pharmakologischem Stress, wozu Vasodilatoren wie Adenosin, Regadenoson oder Dipyridamol verwendet werden. Für die Perfusionsaufnahmen kann ein statisches oder ein dynamisches Protokoll gewählt werden. Beim statischen Protokoll erfolgt die Bildakquisition nur zu einem bestimmten Zeitpunkt nach der Kontrastmittelgabe, sodass unter Umständen die maximale Kontrastmittelanflutung nicht exakt getroffen wird. Bei dynamischen Protokollen erfolgen mehrere sequenzielle Aufnahmen, sodass neben dem myokardialen Blutfluss auch weitere hämodynamische

Parameter aus den Bilddaten abgeleitet werden können. Durch die mehrfachen Aufnahmen ist dieses Verfahren jedoch mit einer höheren Strahlenexposition verbunden. Ferner besteht die Möglichkeit, eine dritte Aufnahme ohne erneute Kontrastmittelgabe zu machen, um anhand der myokardialen Kontrastmittelverteilung avitales Myokard zu identifizieren. Die Analyse der Bilddaten kann visuell erfolgen, jedoch bieten quantitative Methoden die Möglichkeit, hämodynamische Parameter zu bestimmen. Die Evaluation der Perfusions-CT in mehreren multizentrischen Stu-

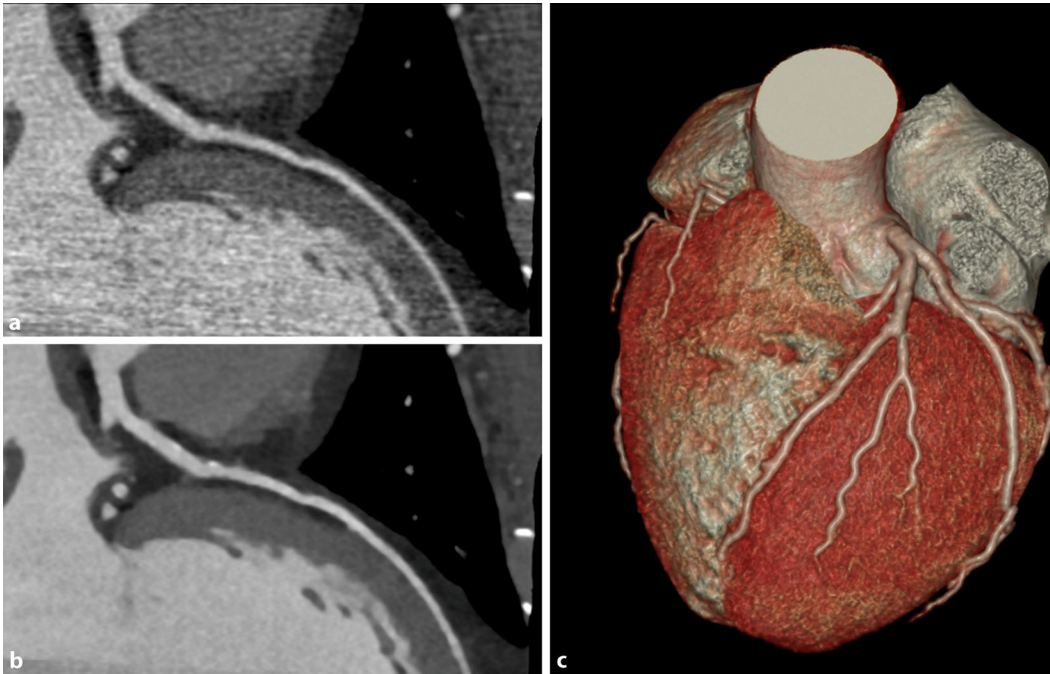


Abb. 2 ◀ CCTA mit Darstellung der LAD (Ramus interventricularis anterior, engl.: left anterior descending) in einer multiplanaren Rekonstruktion mittels **a** gefilterter Rückprojektion (Filtered Back Projection) und **b** einem iterativen Rekonstruktionsverfahren. Ferner erfolgte ein dreidimensionales Rendering des Herzens einschließlich des Koronarbaums (**c**)

dien ergab vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Identifikation hämodynamisch relevanter Koronararterienstenosen, wobei die Single-Photon-Emissions-CT (SPECT) als Referenzstandard diente [7, 8]. Die Rolle, die die CT-Perfusion im Vergleich zu anderen Bildgebungsmodalitäten spielen wird, ist derzeit noch nicht abschließend geklärt und es gilt, noch einige Probleme wie die Standardisierung der Protokolle zu lösen, bis es zu einer Verwendung in der klinischen Routine kommen kann [9].

Dual Energy-CT und Spektral-CT

Die Dual Energy- (DECT) sowie die Spektral-CT sollen zu einer Charakterisierung der koronaren Plaquekomposition und somit zu einer verbesserten Risikostratifizierung und Therapieplanung beitragen. Hierbei werden Aufnahmen derselben Struktur mit Röntgenstrahlen verschiedener Wellenlänge akquiriert und kombiniert. Da das Absorptionsspektrum, also die Abschwächung von Röntgenstrahlung verschiedener Energielevel, von der Art des untersuchten Gewebes abhängt, kann anhand des kombinierten Bildes auf die Zusammensetzung der Plaque rückgeschlossen werden. Zur Realisierung der Technik verfolgen die Hersteller unterschiedliche

Konzepte, wie der schnelle Wellenlängenwechsel der Röntgenstrahlung, zweischichtige Detektoren oder DSCT-Systeme, bei denen die beiden Röhren mit unterschiedlichen Spannungen betrieben werden. Ferner kann die Verwendung polychromatischer Röntgenstrahlung zu einer Verbesserung der diagnostischen Genauigkeit der Perfusion-CT sowie zu einer Reduktion von Artefakten beitragen. Während bei der DECT nur zwei Energiestufen der Röntgenstrahlung Verwendung finden, werden bei der Spektral-CT mehrere Energiestufen genutzt – vergleichbar mit einer Farbfotografie. Sie bietet daher umfangreichere Möglichkeiten als die DECT, befindet sich derzeit aber noch im präklinischen Entwicklungsstadium [10].

Triple Rule Out

Neben der Darstellung der Koronararterien bietet die kardiale CT die Möglichkeit sogenannter Triple Rule Out-Protokolle. Bei diesem Verfahren wird nicht nur das Herz, sondern der gesamte Thorax dargestellt, wobei eine Kontrastierung sowohl der Koronararterien als auch des Lungen- und Systemkreislaufs erreicht wird. Somit ist es möglich, innerhalb kürzester Zeit alle akut lebensbe-

drohlichen thorakalen Pathologien, wozu primär der Myokardinfarkt, die Lungenarterienembolie und die Aortendissektion und sekundär der Pneumothorax, das Boerhaave-Syndrom sowie traumatische Verletzungen zählen, zu detektieren. Somit kommt Triple Rule Out-Protokollen eine besondere Bedeutung in der Notfallmedizin und dabei insbesondere bei Patienten mit akutem Thoraxschmerz zu (▣ **Abb. 3**). Ihrer klinischen Bedeutung entsprechend ist die ständige Verfügbarkeit der CT Voraussetzung für die Akkreditierung einer Chest Pain Unit [11]. Neben einer schnellen Diagnostik und konsekutiven klinischen Versorgung spielen auch sozioökonomische Überlegungen eine Rolle, da das Triple Rule Out zur Vermeidung unnötiger Untersuchungen und zur Verkürzung des stationären Aufenthaltes beitragen könnte. Während für einige Verdachtsdiagnosen, wie beispielsweise der Lungenarterienembolie oder der Aortendissektion, klare Empfehlungen für den Einsatz der CT bestehen, ist der klinische Stellenwert von spezifischen Triple Rule Out-Protokollen noch nicht abschließend geklärt [12–14]. In den aktuellen US-amerikanischen Leitlinien zur Bildgebung bei Notfallpatienten gilt das Triple Rule Out bei Patienten mit unklarer Hauptverdachtsdiagnose und relevantem Risiko für die

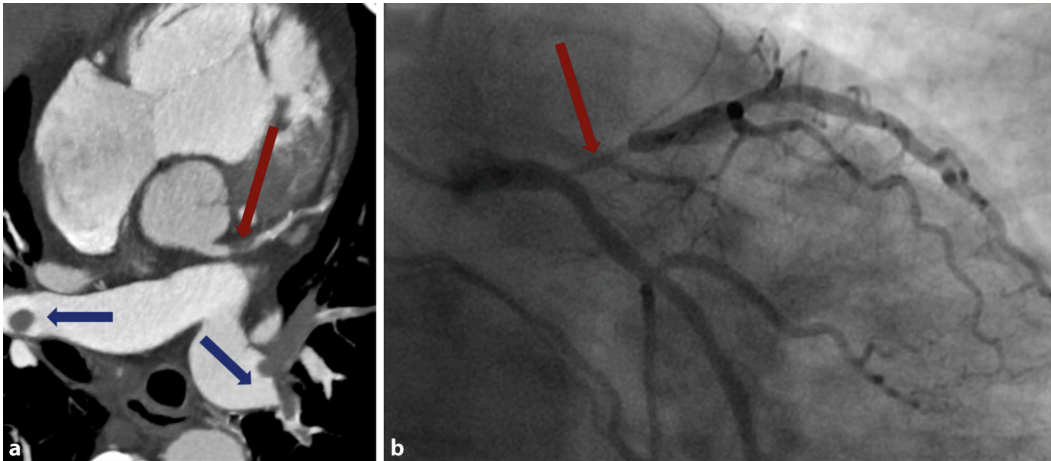


Abb. 3 ▲ Triple Rule Out-Untersuchung bei einem 72-jährigen Patienten, der sich mit plötzlich beim Sport aufgetretenen pectanginösen Beschwerden und Dyspnoe in der Chest Pain Unit vorstellte. Aufgrund der nicht eindeutig einem Krankheitsbild zuordenbaren Symptomatik und dem klinischen Verdacht auf eine Lungenarterienembolie (D-Dimere 14,3 mg/dl, hscTnT 65 pg/ml) erfolgte eine Triple Rule Out-Untersuchung (a), in welcher sich eine beidseitige, zentrale Lungenarterienembolie (blaue Pfeile) zeigte. Ferner fand sich eine hochgradige Stenose der proximalen LAD (roter Pfeil), die sich in der invasiven Koronarangiographie (b) bestätigte. Die Bildqualität ist bei einer Herzfrequenz von 78/min leicht eingeschränkt, lässt aber dennoch eine sichere Diagnose zu



Abb. 4 ◀ Planungs-CT vor interventionellem Aortenklappenersatz. Darstellung einer trikuspiden, deutlich verkalkten Aortenklappe im Rahmen eines Planungs-CTs vor interventionellem Aortenklappenersatz. Aus didaktischen Gründen sind hier die Aortenklappentaschen und nicht der für die Interventionsplanung benötigte Aortenannulus dargestellt

oben genannten primären Pathologien als angemessen [15]. Ferner verweisen die Autoren ausdrücklich auf die technische Weiterentwicklung der CT, welche zu einer Verbesserung des diagnostischen Werts des Triple Rule Out führen kann.

Erwachsene mit angeborenen Herzfehlern

Einen weiteren Anwendungsbereich stellen die Untersuchung komplexer Pa-

thologien bei Patienten mit angeborenen Herzfehlern sowie die Verlaufskontrolle nach erfolgter Korrektur dar [16]. Dies gilt insbesondere für die Darstellung der Anatomie zur Planung von Interventionen und Operationen. Da die kardiale CT mit einer Strahlenbelastung einhergeht und nur begrenzt zur Quantifizierung der kardialen Funktion oder von Shunts geeignet ist, bildet die kardiale Magnetresonanztomographie bei dieser Patientengruppe das nichtinvasive diagnostische Referenzverfahren.

Interventionelle Kardiologie

Die Einführung neuer Methoden in der interventionellen Kardiologie führt zu einer Erweiterung des Indikationsspektrums der kardialen CT. Für den kathetergestützten perkutanen Aortenklappenersatz ist eine präzise Darstellung des Aortenklappenannulus sowie dessen Abstands zu den Ostien der Koronararterien erforderlich, sodass die CT hierfür die wichtigste präinterventionelle Bildgebungsmodalität ist [16]. Im Rahmen der Untersuchung können ferner die für einen transluminalen Zugang erforderlichen Gefäße (Aorta, Aa. iliacae, Aa. femorales bzw. A. subclavia sinister) sowie der linke Ventrikel und der Brustkorb für den transapikalen Zugang dargestellt werden (Abb. 4). Des Weiteren können bis dato unbekannte Pathologien wie beispielsweise prognoselimitierende Malignome durch die CT präinterventionell erfasst und in die Therapieplanung des Patienten einbezogen werden.

Der präinterventionellen Bildgebung mittels kardialer CT kommt zudem für eine Reihe weiterer kathetergestützter kardialer Implantationen wie beispielsweise dem Verschluss linksventrikulärer Aneurysmata sowie zahlreichen elektrophysiologischen Interventionen wie der Pulmonalvenenisolation oder der Referenzbildgebung bei Mapping-Ver-

fahren ein großer Stellenwert zu. Auch wenn in zunehmendem Maße spezielle Softwarepakete die Planung einer Intervention unterstützen, ist es für eine optimale Eingriffsplanung und -durchführung unerlässlich, dass neben dem mit der kardialen CT primär betrauten Arzt auch der Interventionalist selbst die Bilddaten auswerten und interpretieren kann.

Strahlenreduktion und iterative Rekonstruktionstechniken

Bei der modernen kardialen CT kommen verschiedene Techniken zum Einsatz, die zu einer signifikanten Reduktion der Strahlenexposition führen. Dazu gehört beispielsweise die Verwendung prospektiver Protokolle mit axialer Bildakquisition („Step and Shoot“) oder hohem Pitch. Hiermit ist die Durchführung einer CCTA im Sub-Millisievert-Bereich möglich. Durch die Verbesserung bestehender und die Einführung neuer Techniken kann in Zukunft eine weitere Reduktion der Strahlenexposition erzielt werden. Eine besondere Rolle kommt hier den iterativen Rekonstruktionstechniken zu, die bereits jetzt im klinischen Alltag verwendet werden. Bei diesen Verfahren dient eine Korrekturschleife dazu, das Bildrauschen zu reduzieren und die Bildqualität zu verbessern. Somit eröffnen iterative Verfahren die Möglichkeit, die zur Bildakquisition erforderliche Strahlenmenge zu reduzieren, ohne dabei die diagnostische Qualität zu verringern [17]. Eine aktuelle Weiterentwicklung der statistischen iterativen Verfahren stellen sogenannte „model/knowledge“-basierte iterative Rekonstruktionsalgorithmen dar, die zunehmend in der klinischen Routine Verwendung finden.

Bedeutung der kardialen Computertomographie für den Kardiologen

Die schnelle technologische Entwicklung der CT hat innerhalb eines Jahrzehnts zu einer deutlichen Ausweitung des Indikationsspektrums und einer Zunahme der Untersuchungen in der Kardiologie geführt. Computertomographen, die die technischen Anforderungen für

die Herzbildgebung erfüllen, sind in Deutschland inzwischen annähernd flächendeckend vorhanden. Während die kardiale CT zur Darstellung der Anatomie bei Patienten mit angeborenen Herzfehlern oder zur Planung komplexer Interventionen meist an spezialisierten Zentren vorgenommen wird, stellt die Diagnostik der KHK den überwiegenden Anteil der Indikationen dar. Laut den Daten des Deutschen Registers kardiale Computertomographie wurden die meisten Untersuchungen elektiv und ambulant vorgenommen [18]. Mit der weiteren Reduktion der Strahlenexposition und der zunehmenden Robustheit gegenüber Artefakten ist davon auszugehen, dass die CCTA eine wachsende Bedeutung bei der Diagnostik der KHK erlangen wird. Diese Entwicklung wird zudem durch den hohen Stellenwert getragen, den nichtinvasive Verfahren in den aktuellen Leitlinien haben [3]. Verstärkt durch die Berichterstattung in den Medien werden zudem von Patientenseite häufiger Alternativen zur diagnostischen Herzkatheteruntersuchung gewünscht. Des Weiteren bietet die anhaltend vergleichsweise geringe Interventionsquote bei invasiven Koronarangiographien Raum für ein diagnostisches Verfahren, welches die „Ausschluss-Koronarangiographie“ ersetzen kann [19]. Während bildgebende Stresstests derzeit die nichtinvasive Referenz zum Ischämienachweis darstellen, kann die CCTA aufgrund ihrer hohen Sensitivität und des hohen negativen prädiktiven Werts eine signifikante KHK annähernd sicher ausschließen. Damit kommt ihr gerade im ambulanten Bereich ein wachsender Stellenwert zu. Bis vor einigen Jahren bestanden für den ambulant tätigen Kardiologen im Wesentlichen nur zwei diagnostische Möglichkeiten bei Verdacht auf eine KHK. Er konnte einen Ischämienachweis, meist in Form einer Belastungs-EKG-Untersuchung oder einer Stress-Echokardiographie, durchführen oder eine Herzkatheteruntersuchung veranlassen. Nun steht mit der CCTA eine dritte Möglichkeit zur Verfügung, die eine nichtinvasive Darstellung der Koronararterien und einen annähernd sicheren KHK-Ausschluss ermöglicht.

Somit kann sie nicht nur als primäres diagnostisches Verfahren bei Patienten mit einer intermediären Vortestwahrscheinlichkeit im niedrigen Bereich, sondern auch sekundär bei Patienten mit unklarem Ergebnis des Stresstests eingesetzt werden [3]. Aufgrund des diagnostischen Werts und dem für die Patienten subjektiv wenig belastenden Untersuchungsablauf wird der Anteil der CCTA zulasten der Herzkatheteruntersuchung voraussichtlich zunehmen. Dies wird durch Daten des Deutschen Registers kardiale Computertomographie unterstrichen, bei dem in 42 % der Fälle angegeben wurde, dass durch die kardiale CT eine invasive Koronarangiographie vermieden wurde [18]. Eine abschließende Bewertung des Stellenwerts der kardialen CT für die Diagnostik der KHK lässt die derzeitige Studienlage nicht zu. Während in der PROMISE-Studie die Verwendung der CCTA zwar zu einer präziseren Zuweisung der Patienten zur invasiven Koronarangiographie jedoch nicht zu einer Risikoreduktion führte, zeigte sich in der SCOT-HEART- und der CRESCENT-Studie eine signifikante Reduktion der unerwünschten Ereignisse (wie beispielsweise Myokardinfarkte) durch den Einsatz der kardialen CT [20–22]. Die Auswirkung der zunehmenden Verwendung der kardialen CT auf die – meist ambulant durchgeführten – Stresstests lässt sich daher derzeit nicht abschätzen. Sicher scheint jedoch, dass sowohl klinisch als auch ambulant tätige Kardiologen in Zukunft mit dieser Technik vertraut sein müssen. Neben der Interpretation der Ergebnisse einer Untersuchung ist bereits die Zuordnung des Patienten zum individuell optimalen diagnostischen Verfahren integraler Bestandteil der kardiologischen Tätigkeit. Dies betrifft insbesondere die Zuweisung des Patienten zu diagnostischen Verfahren wie der invasiven Koronarangiographie oder der kardialen CT, welche die Verwendung ionisierender Strahlung beinhalten.

Anforderungen an die Anwendung der kardialen CT

Die kardiale CT befindet sich im Grenzgebiet zwischen Kardiologie und Radio-

logie. Die CT selbst stellt eine klassisch radiologische Untersuchungsmodalität dar und annähernd alle Computertomographen werden von Radiologen betrieben. In der Kardiologie, zu deren Kernaufgaben die Darstellung des Herzens und dabei insbesondere der Koronararterien gehört, hat sich über Jahrzehnte ein großer Erfahrungsschatz in der Diagnostik und Befundbeurteilung gebildet, welcher für eine klinische Interpretation der Ergebnisse und die Therapieplanung unverzichtbar ist. Dies kommt insbesondere bei der Kombination des CT-Befundes mit der klinischen Präsentation des Patienten sowie den Befunden anderer Untersuchungsmodalitäten wie beispielsweise den bildgebenden Ischämienachweisen zum Tragen. Besondere Bedeutung erlangt die kardiologische Fachkompetenz bei der Planung von Interventionen auf Grundlage einer zuvor erfolgten Bildgebung. Wie auch in anderen Fachrichtungen muss der interventionell tätige Kardiologe für die optimale Eingriffsplanung die Bilddaten selbst interpretieren können. Bereits für eine optimale Bildakquisition sind kardiologische Kenntnisse hilfreich, da für die CCTA meist die Gabe von Antiarrhythmika zur Herzfrequenzkontrolle sowie von Vasodilatoren zur Koronardarstellung erforderlich ist. Dies gilt in verstärktem Maße für CT-Perfusionsuntersuchungen, bei denen der Patient einem pharmakologischen Stressor ausgesetzt ist. Die Interpretation des Herzrhythmus und der Herzfrequenz sowie die Überwachung des Blutdruckverhaltens sind hierbei ebenfalls von Bedeutung. Während dies sowie die Verwendung ionisierender Strahlen und angiographischer Verfahren Bestandteil der kardiologischen Ausbildung sind, gehören Schnittbildverfahren klassischerweise nicht dazu. Um deren wachsender Bedeutung für die Kardiologie Rechnung zu tragen, wurde daher neben dem bereits bestehenden „Curriculum kardiale Magnetresonanztomographie“ das „Curriculum kardiale Computertomographie“ für die Erlangung der entsprechenden Zusatzqualifikation geschaffen [23, 24]. Im Rahmen dessen dreistufigen Aufbaus erlangen Kardiologen die Qualifikation zur optimalen Indikationsstellung, Durchführung und Beurteilung

der kardialen CT. Es muss dennoch berücksichtigt werden, dass im Rahmen der kardialen CT eine Vielzahl anatomischer Strukturen wie beispielsweise das Lungengewebe abgebildet werden, deren Befundung radiologischer Kompetenz bedarf. Daher ist die Durchführung und Interpretation kardialer computertomographischer Untersuchungen in Kooperation beider Fachrichtungen erforderlich, um deren diagnostischen Wert sowie die Patientensicherheit zu gewährleisten. Während an Kliniken meist beide Fachdisziplinen unter einem Dach vertreten sind, müssen im ambulanten Bereich vielerorts noch Strukturen für eine indikationsgerechte Zuweisung, eine interdisziplinäre Untersuchung sowie eine Befundung durch beide Fachrichtungen geschaffen werden. Angesichts des diagnostischen Potenzials dieser Methoden erscheinen die damit verbundenen Anstrengungen jedoch notwendig und lohnenswert.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. med. H. A. Katus

Klinik für Kardiologie, Angiologie und Pneumologie, Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 410, 69120 Heidelberg, Deutschland
hugo.katus@med.uni-heidelberg.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. F. André, S.J. Buß und H.A. Katus erklären eine Forschungs Kooperation mit Philips Healthcare.

Dieser Beitrag beinhaltet keine von den Autoren durchgeführten Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

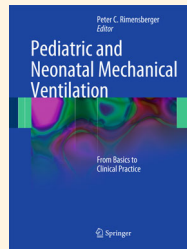
- Kelly JL, Thickman D, Abramson SD et al (2008) Coronary CT angiography findings in patients without coronary calcification. *Am J Roentgenol* 191(1):50–55. doi:10.2214/ajr.07.2954
- Marwan M, Ropers D, Pflederer T et al (2009) Clinical characteristics of patients with obstructive coronary lesions in the absence of coronary calcification: an evaluation by coronary CT angiography. *Heart* 95(13):1056–1060. doi:10.1136/hrt.2008.153353
- Montalescot G, Sechtem U, Achenbach S et al (2013) 2013 ESC guidelines on the management of stable coronary artery disease: the Task Force on the management of stable coronary artery disease

- of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J* 34(38):2949–3003. doi:10.1093/eurheartj/ehs296
- Koo BK, Erglis A, Doh JH et al (2011) Diagnosis of ischemia-causing coronary stenoses by non-invasive fractional flow reserve computed from coronary computed tomographic angiograms. Results from the prospective multicenter DISCOVERFLOW (Diagnosis of Ischemia-Causing Stenoses Obtained Via Noninvasive Fractional Flow Reserve) study. *J Am Coll Cardiol* 58(19):1989–1997. doi:10.1016/j.jacc.2011.06.066
- Norgaard BL, Leipsic J, Gaur Setal (2014) Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: the NXT trial (Analysis of Coronary Blood Flow Using CT Angiography: Next Steps). *J Am Coll Cardiol* 63(12):1145–1155. doi:10.1016/j.jacc.2013.11.043
- Morris PD, Vosse FN van de, Lawford PV et al (2015) „Virtual“ (computed) fractional flow reserve: current challenges and limitations. *JACC Cardiovasc Interv* 8(8):1009–1017. doi:10.1016/j.jcin.2015.04.006
- Rochitte CE, George RT, Chen MY et al (2014) Computed tomography angiography and perfusion to assess coronary artery stenosis causing perfusion defects by single photon emission computed tomography: the CORE320 study. *Eur Heart J* 35(17):1120–1130. doi:10.1093/eurheartj/ehs488
- Cury RC, Kitt TM, Feaheny K et al (2015) A randomized, multicenter, multivendor study of myocardial perfusion imaging with regadenoson CT perfusion vs single photon emission CT. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 9(2):103–112.e2. doi:10.1016/j.jcct.2015.01.002
- Rossi A, Merkus D, Klotz E et al (2014) Stress myocardial perfusion: imaging with multidetector CT. *Radiology* 270(1):25–46. doi:10.1148/radiol.13112739
- Danad I, Fayad ZA, Willemink MJ, Min JK (2015) New applications of cardiac computed tomography: dual-energy, spectral, and molecular CT imaging. *JACC Cardiovasc Imaging* 8(6):710–723. doi:10.1016/j.jcmg.2015.03.005
- Post F, Giannitsis E, Darius H et al (2015) Kriterien der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz und Kreislaufforschung für „Chest Pain Units“. *Kardiologie* 9(2):171–181. doi:10.1007/s12181-014-0646-0
- Erbel R, Aboyans V, Boileau C et al (2014) 2014 ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases: Document covering acute and chronic aortic diseases of the thoracic and abdominal aorta of the adult. The Task Force for the Diagnosis and Treatment of Aortic Diseases of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Heart J* 35(41):2873–2926. doi:10.1093/eurheartj/ehu281
- Konstantinides SV, Torbicki A, Agnelli G et al (2014) 2014 ESC guidelines on the diagnosis and management of acute pulmonary embolism. *Eur Heart J* 35(43):3033–3069. doi:10.1093/eurheartj/ehu283
- Burris AC 2nd, Boura JA, Raff GL, Chinnaiyan KM (2015) Triple rule out versus coronary CT angiography in patients with acute chest pain: results from the ACIC consortium. *JACC Cardiovasc Imaging* 8(7):817–825. doi:10.1016/j.jcmg.2015.02.023
- Rybicki FJ, Udelson JE, Peacock WF et al (2016) 2015 ACR/ACC/AHA/AATS/ACEP/ASNC/NASCI/SAEM/SCCT/SCMR/SCPC/SNMMI/STR/STS appropriate utilization of cardiovascular imaging in emergency department patients with chest pain: A joint document of the American College of Radiology Appropriateness Criteria Committee and the

- American College of Cardiology Appropriate Use Criteria Task Force. *J Am Coll Cardiol* 67(7):853–879. doi:10.1016/j.jacc.2015.09.011
16. Achenbach S, Barkhausen J, Beer M et al (2012) Konsensusempfehlungen der DRG/DGK/DGPK zum Einsatz der Herzbildgebung mit Computertomographie und Magnetresonanztomographie. *Kardiologie* 6(2):105–125. doi:10.1007/s12181-012-0417-8
 17. Geyer LL, Schoepf UJ, Meinel FG et al (2015) State of the art: iterative CT reconstruction techniques. *Radiology* 276(2):339–357. doi:10.1148/radiol.2015132766
 18. Achenbach S (2015) Deutsches Register kardiale Computertomographie: Indikationen, prozedurale Daten und Ergebnisse bei 7061 Patienten (Presstext DGK 09/2015). Deutsche Gesellschaft für Kardiologie – Herz und Kreislaufforschung e. V., Düsseldorf
 19. Buuren F van (2010) 25. Bericht über die Leistungszahlen der Herzkatheterlabore in der Bundesrepublik Deutschland. *Kardiologie* 4(6):502–508. doi:10.1007/s12181-010-0297-8
 20. Douglas PS, Hoffmann U, Patel MR et al (2015) Outcomes of anatomical versus functional testing for coronary artery disease. *New Engl J Med* 372(14):1291–1300. doi:10.1056/NEJMoa1415516
 21. Williams MC, Hunter A, Shah AS et al (2016) Use of coronary computed tomographic angiography to guide management of patients with coronary disease. *J Am Coll Cardiol* 67(15):1759–1768. doi:10.1016/j.jacc.2016.02.026
 22. Lubbers M, Dedic A, Coenen A et al (2016) Kalzium imaging and selective computed tomography angiography in comparison to functional testing for suspected coronary artery disease: the multicentre, randomized CRESCENT trial. *Eur Heart J* 37(15):1232–1243. doi:10.1093/eurheartj/ehv700
 23. Hombach V, Kelle S, Gebker R et al (2014) Curriculum Kardiale Magnetresonanztomographie (CMR). *Kardiologie* 8(6):451–461. doi:10.1007/s12181-014-0623-7
 24. Schmermund A, Achenbach S, Leber A et al (2015) Curriculum kardiale Computertomographie. *Kardiologie* 9(5):363–374. doi:10.1007/s12181-015-0024-6

P. Rimensberger (Hrsg.)
Pediatric and Neonatal Mechanical Ventilation
From Basics to Clinical Practice

Berlin Heidelberg: Springer-Verlag
 2015, 1. Aufl., 1642 S., 405 Abb., (ISBN 978-3-642-01219-8), als E-Book 166.59 EUR, 213.99 EUR



Die maschinelle Beatmung gilt noch immer als die „Königsdisziplin“ unter den speziellen Techniken in der neonatologischen und pädiatrischen Intensivmedizin.

Daran hat auch die unumkehrbare Tendenz zur nichtinvasiven Beatmung nichts geändert. Je breiter das Spektrum der Möglichkeiten ist, das moderne Beatmungsgeräte bieten, umso mehr ist eine subtile Kenntnis dieser differenzierten Techniken erforderlich.

Wer zu einem spezifischen beatmungs-technischen Thema Hintergrundwissen benötigt, war bisher auf die Suche nach möglichst aktuellen Übersichtsartikeln angewiesen. Diese Lücke füllt das Handbuch „Pediatric and Neonatal Mechanical Ventilation“ von Peter Rimensberger (Genf). Mit einer Vielzahl von meist amerikanischen Koautoren hat Rimensberger ein neues Standardwerk herausgebracht, das angesichts der englischen Sprache dem deutschen Leser vielleicht nicht unmittelbar ins Auge sticht. Zu Unrecht, wie man schnell feststellen wird, denn erstens ist der Herausgeber ein exzellenter Kenner dieser speziellen Materie mit einer Vielzahl von eigenen Publikationen in diesem Bereich, und entsprechend handverlesen ist die Liste der Koautoren. Zweitens gibt es ein deutsches Handbuch, das diesen Namen verdient hätte, ohnehin nicht; und drittens tut dem Werk die deutlich erkennbare Ausrichtung auf eine internationale Vermarktung durchaus gut.

Das Buch ist sinnvoll aufgebaut, beginnend mit der embryo-fetalen Entwicklung der Lunge, die vielleicht angesichts des Gesamtumfangs etwas kurz abgehandelt ist. Weiter geht es mit der Lungenmechanik, dem Gasaustausch und der Anatomie der Atmungsorgane. Die weiteren Kapitel

orientieren sich an der Pathophysiologie, bevor aktuelle Therapiekonzepte zu einzelnen Erkrankungsgruppen abgehandelt werden. Hilfreich sind die in allen Kapiteln wiederkehrenden Kästchen zu den inhaltlichen Zielen, der Zukunftsperspektive und den essenziellen „Merksätzen“. Es gibt eine Vielzahl von Grafiken, Abbildungen und Tabellen, das Register ist umfangreich, ebenso die Literaturzitate. Die gängigsten Beatmungsgeräte auf dem internationalen Markt werden ebenso ausführlich beschrieben, wie eine Vielzahl seltener Beatmungsmodifikationen (z.B. „Continuous tracheal gas insufflation“ (CTGI)), daneben wird ein extrem breites Spektrum an „verwandten“ Themen abgehandelt: Absaugen, Atemgasbefeuchtung, Inhalationen, pulmonale Vasodilatoren und vieles mehr. Kurz: es gibt nichts zum Thema Lunge und Beatmung, was man in diesem Buch nicht findet. Mit einem Umfang von 1642 Seiten hat es eher den Charakter einer Enzyklopädie. Darin liegt zugleich ein Nachteil dieses Buches: die Aufteilung des Gesamtwerks und die Zuordnung eines Themas ist – wie häufig bei Werken mit vielen Autoren – nicht immer schlüssig: so taucht die INSURE-Technik sowohl unter „Surfactant replacement therapy“, als auch, zusammen mit anderen „LISA“-Techniken, unter „Adjunct therapies“ auf; über das Register ist beides nicht leicht zu finden.

Das Werk lohnt sich für jeden, der auf diesem so wichtigen Gebiet den gegenwärtigen wissenschaftlichen und klinischen Standard kennen möchte oder kennen muss – also Neonatologen, pädiatrische Intensivmediziner, Kinderkardiologen, besonders aber auch (Kinder-)Anästhesisten, sowie alle, die auf dem Gebiet der Beatmungstherapie forschen oder lehren (z.B. Physiologen). Denn viele der Erkenntnisse, die dieses Buch zusammenfasst, sind durchaus nicht exklusiv pädiatrische „Grundgesetze“.

Es wäre schade, wenn dieses Buch eher in Kliniks- oder Stationsbibliotheken, als im privaten Buchbestand auftauchen würde. Sicher ist, dass eine interessierte Leserschaft regelmäßig nach diesem exzellenten, „alternativlosen“ Nachschlagewerk greifen wird.

R. Hentschel (Freiburg)