

Update zur Durchführung der CT-Koronarangiografie

Evidenzbasierter Einsatz und technische Anleitung entsprechend den aktuellen Empfehlungen sowie praktische Tipps aus der Routine am eigenen Standort

Update for the Performance of CT Coronary Angiography

Evidence-Based Application and Technical Guidance According to Current Consensus Guidelines and Practical Advice from the Clinical Routine

Autoren

Martin Soschynski¹, Muhammad Taha Hagar¹, Jana Taron^{1,2}, Tobias Krauss¹, Philipp Ruile³, Manuel Hein³, Thomas Nührenberg³, Maximilian Frederik Russe¹, Fabian Bamberg¹, Christopher L Schlett¹

Institute

- 1 Department of Diagnostic and Interventional Radiology, Medical Center-University of Freiburg, Germany
- 2 Cardiac MR PET CT Program, Massachusetts General Hospital, Harvard Medical School, Boston, United States
- 3 Department of Cardiology & Angiology II, University Heart Center Freiburg-Bad Krozingen, Germany

Key words

coronary CT angiography, acquisition, technique, guidelines, cardiac CT, performance

eingereicht 31.05.2021

akzeptiert 20.12.2021

online publiziert 01.03.2022

Bibliografie

Fortschr Röntgenstr 2022; 194: 613–624

DOI 10.1055/a-1747-3554

ISSN 1438-9029

© 2022, Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14,
70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Herr Dr. Martin Soschynski
Radiology, University Hospital Freiburg, Hugstetter Straße 55,
79106 Freiburg, Germany
Tel.: +49/7 61/27 03 95 40
Fax: +49/7 61/27 03 95 00
martin.soschynski@uniklinik-freiburg.de

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund Die computertomografische Koronarangiografie (cCTA) hat in den aktuellen Leitlinien der European Society of Cardiology (ESC) einen hohen Stellenwert für den Ausschluss signifikanter Koronarstenosen. Für eine optimale Bildqualität bei niedriger Strahlenexposition stehen dem Untersucher verschiedene Scanverfahren zur Verfügung. Aktuelle

Konsensusempfehlungen der Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT) geben Hinweise für die Durchführung.

Methode Der Artikel gibt praktische Empfehlungen zum leitliniengerechten Einsatz und zur Durchführung der cCTA basierend auf der aktuellen Literatur und eigenen Erfahrungswerten.

Ergebnisse und Schlussfolgerung Gemäß den aktuellen Leitlinien der ESC wird die cCTA vor allem bei symptomatischen Patienten mit niedriger und intermediärer klinischer Wahrscheinlichkeit für eine koronare Herzkrankheit (KHK) empfohlen. Vor der Untersuchung empfehlen wir selbst an den modernsten Scannern weiterhin eine Prämedikation mit Beta-Blockern und Nitraten. Für die Akquisition stehen an aktuell verwendeten CT-Scannern 3 Scan-Modi zur Verfügung. Hauptfaktor für die Protokollauswahl ist die Herzfrequenz, Nebenfaktoren können Koronarkalk und Body-Mass-Index (BMI) sein.

Kernaussagen:

- Die cCTA kann zunehmend breit bei niedriger und intermediärer klinischer Wahrscheinlichkeit für eine KHK eingesetzt werden.
- Selbst an modernsten CT-Scannern kann die Verwendung von Beta-Blockern und Nitraten eine Verbesserung der Bildqualität bei Protokollen mit niedriger Strahlendosis bewirken.
- Aktuell verwendete CT-Scanner ermöglichen in der Regel ein retrospektives EKG-Gating sowie einen prospektiv EKG-getriggerten Scan. An Dual Source-Scannern besteht zusätzlich die Möglichkeit mit einem „High pitch“-Modus das gesamte Herz innerhalb eines Herzschlages abzubilden, bei Single-Source-Scannern mit breitem Detektor gelingt dies z. T. mit einem „Single-heart-beat“-Modus ebenfalls.
- Neben der verfügbaren CT-Scanner-Technologie ist die Wahl des Scan-Modus primär von der Herzfrequenz sowie der Herzfrequenzvariabilität bzw. dem Vorliegen von Arrhythmien abhängig.

Zitierweise

- Soschynski M, Hagar MT, Taron J et al. Update for the Performance of CT Coronary Angiography. *Fortschr Röntgenstr* 2022; 194: 613–624

ABSTRACT

Background Coronary CT angiography (cCTA) is a class 1 recommendation in the current guidelines by the European Society of Cardiology (ESC) for excluding significant coronary artery stenosis. To achieve optimal image quality at a low radiation dose, the imaging physician may choose different acquisition modes. Therefore, the consensus guidelines by the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT) provide helpful guidance for this procedure.

Method The article provides practical recommendations for the application and acquisition of cCTA based on the current literature and our own experience.

Results and Conclusion According to current ESC guidelines, cCTA is recommended in symptomatic patients with a low or intermediate clinical likelihood for coronary artery disease. We recommend premedication with beta blockers and nitrates prior to CT acquisition under certain conditions even with the latest CT scanner generations. The most current CT scanners offer three possible scan modes for cCTA acquisition. Heart rate is the main factor for selecting the scan mode. Other factors may be coronary calcifications and body mass index (BMI).

Einleitung

Die computertomografische Koronarangiografie (cCTA) ist ein anerkanntes diagnostisches Verfahren zum Ausschluss von Koronarstenosen mit einem hohen Grad an wissenschaftlicher und klinischer Evidenz. Gemäß den aktuellen, 2019 überarbeiteten Leitlinien der European Society of Cardiology (ESC), hat die cCTA bereits eine Klasse-1-Indikation zur Diagnostik der KHK [1]. Trotz eines mittlerweile hohen Maßes an Standardisierung ist die Aussagekraft der cCTA immer noch stark abhängig von einer optimalen Untersuchungsdurchführung und die Dosis auch an Scannern der neusten Generation abhängig vom verwendeten Protokoll. Dies ist eine Besonderheit im Vergleich zu vielen anderen CT-Untersuchungsprotokollen des radiologischen Spektrums und erfordert ein hohes Maß an direktem Patientenkontakt und personalisierter Anpassung.

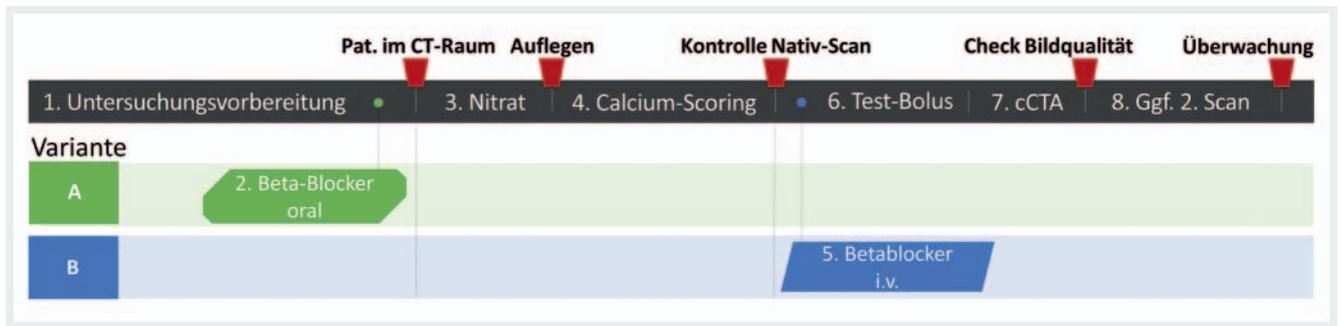
Ziel dieses Artikels ist es, dem Untersucher einen Überblick über den evidenzbasierten Einsatz, den Untersuchungsablauf und die Bildakquisitionstechniken der cCTA zu geben. Die Empfehlungen basieren hierbei auf den aktuellen Konsensusempfehlungen der Fachgesellschaften, der Fachliteratur zu diesem Thema, aktuellen Studien und auf Erfahrungswerten am eigenen Standort. Untersuchungsvorbereitung und Ablauf unterscheiden sich nicht wesentlich zwischen verschiedenen, häufig verwendeten Scannertypen. Die technische Durchführung, insbesondere die Erläuterung der Scan-Modi, fokussiert sich hierbei primär auf Dual-Source-Geräte der beiden neusten (2. und 3.) Generationen, für die auch Erfahrungswerte am eigenen Institut vorliegen. Der beschriebene Untersuchungsablauf ist als Vorschlag für eine mögliche Implementierung der cCTA am eigenen Standort zu verstehen. Er hat keinen Anspruch auf Verbindlichkeit oder Allgemeingültigkeit und stellt auch selbst keine Empfehlung einer Fachgesellschaft dar. Der Artikel ergänzt und aktualisiert unter anderem eine frühere Übersichtsarbeit zum Thema Untersuchungstechnik der CT-Koronarangiografie in der Röntgenstrahlung [2].

Aktuelle Leitlinien zum Einsatz der cCTA

Die European Society of Cardiology (ESC) veröffentlichte 2019 aktualisierte Leitlinien für die Diagnostik und das Management des chronischen symptomatischen Koronarsyndroms [1]. Diese

empfehlen zum Ausschluss einer koronaren Herzkrankheit (KHK) primär eine anatomische Bildgebung mittels cCTA oder eine nichtinvasive funktionelle Bildgebung (myokardialer Ischämie-Test). Die cCTA ist der bevorzugte Test bei niedriger klinischer Wahrscheinlichkeit für eine KHK, noch nicht vorbestehender KHK und wahrscheinlichem Erreichen einer guten Bildqualität [1]. Bei hoher Wahrscheinlichkeit für eine KHK oder bereits bekannter KHK wird ein nichtinvasiver funktioneller Ischämie-Test (z. B. Stress-MRT, SPECT oder Stress-Echokardiografie) bevorzugt. Für die Wahl des Tests (cCTA oder funktioneller Ischämie-Test) spielen jedoch auch die lokale Expertise, die Verfügbarkeit und patientenspezifische Charakteristika eine Rolle [1]. Bei intermediärer klinischer Wahrscheinlichkeit werden sowohl die cCTA als auch funktionelle Tests gleichberechtigt empfohlen. Grundlagen bildeten mehrere große Studien und Metaanalysen. Eine Metaanalyse mit 5332 Patienten aus 65 prospektiven Studien, welche die diagnostische Genauigkeit der cCTA untersuchten, zeigte, dass die cCTA bei Patienten mit stabiler Angina pectoris und einer klinischen Prätest-Wahrscheinlichkeit zwischen 7 und 67 % die beste diagnostische Genauigkeit erzielte [3]. Die häufig zitierte „Prospective Multicenter Imaging Study for Evaluation of Chest Pain“ (PROMISE-Studie) zeigte, dass die cCTA bei Patienten mit niedriger bis intermediärer Prätest-Wahrscheinlichkeit zur Diagnostik einer KHK als gleichwertige Alternative zu Stress-Untersuchungen eingesetzt werden kann.

Studien wie der SCOT-HEART Trial zeigten, dass die cCTA bei Patienten mit stabiler Angina pectoris gegenüber der alleinigen Standard-Behandlung ohne cCTA das Auftreten eines zukünftigen Koronarereignisses (Herzinfarkt, koronarer Herztod) senken konnte [4]. Die invasive Koronarangiografie wird bei chronischem symptomatischem Koronarsyndrom nur noch selten als primäre



► **Abb. 1** Der Untersuchungsablauf ist schematisch als Timeline dargestellt. Beta-Blocker können in Schritt 2 eine Stunde vor der Untersuchung oral (Variante A) oder in Schritt 5 direkt vor der cCTA intravenös (Variante B) oder kombiniert (Durchführung von Schritt 2 und 5) verabreicht werden. Zwischen den einzelnen Hauptabschnitten (1.–8.) sind in rot wichtige Zwischenaktionen markiert, z. B. die Überprüfung der Bildqualität nach der cCTA.

Diagnostik ohne vorherige nichtinvasive Bildgebung empfohlen, beispielsweise bei hoher Wahrscheinlichkeit für eine KHK mit typischer Angina bei schon geringer Belastung, bei schweren Symptomen einer KHK, welche nicht auf Medikamente ansprechen sowie einer linksventrikulären Dysfunktion, welche klinisch wahrscheinlich mit einer KHK assoziiert ist [1].

Ein weiteres Einsatzgebiet der cCTA gemäß den Leitlinien der ESC ist die Detektion von Verschlüssen koronarer Bypässe [1]. Die Darstellung der nativen Koronargefäße mittels cCTA ist im Falle einer Bypass-Situation nicht indiziert [5]. Eine diagnostische Alternative zum Nachweis einer Ischämie nach Bypass-Anlage ist ein nichtinvasiver Stress-Test [5].

Die Diagnostik von In-Stent-Restenosen mittels cCTA wird in den aktuellen Leitlinien noch nicht empfohlen [1, 6]. Grund ist, dass selbst bei modernen CT-Scannern die diagnostische Genauigkeit stark von der Breite des Stents und dem Stent-Typ (Material) abhängt [7, 8]. Für Stents über 3 mm Diameter, vor allem im linken Hauptstamm, zeigte die cCTA eine hohe diagnostische Genauigkeit bzgl. Re-Stenosen [8]. Eine weitere aktualisierte Leitlinie der ESC und der European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS) empfiehlt den Einsatz der cCTA zum KHK-Ausschluss als Alternative zur invasiven Koronarangiografie vor chirurgischem Klappenersatz bei Patienten mit geringer Prätest-Wahrscheinlichkeit und eröffnet somit ein weiteres großes Einsatzgebiet [9]. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es außer dem chronischen symptomatischen Koronarsyndrom noch weitere Einsatzgebiete und Indikationen für die cCTA gibt. Diese sind z. B. der Ausschluss eines akuten Koronarsyndroms bei akutem Thoraxschmerz (in bestimmten Konstellationen bei unauffälligem EKG und fehlender Erhöhung der Herzenzyme [10]), die Detektion und Einordnung einer Koronaranomalie, die Detektion von Koronaraneurysmen oder die anatomische Darstellung bei komplexen Fehlbildungen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Diagnostik des chronischen symptomatischen Koronarsyndroms. Die weiteren genannten Indikationen sind nicht Gegenstand dieses Artikels.

Update Untersuchungstechniken

Untersuchungsablauf

Um einen routinierten Untersuchungsablauf zu ermöglichen, sollten die einzelnen Schritte möglichst standardisiert hinterlegt sein, am besten in Form einer Standard Operating Procedure (SOP). Als Orientierungshilfe wurden von der SCCT Konsensusempfehlungen zur Vorbereitung und Akquisition der cCTA herausgegeben [11]. In Übereinstimmung mit den aktuellen Empfehlungen kann die Untersuchung folgende Schritte beinhalten:

Untersuchungsvorbereitung (Aufklärung, periphere Venenverweilkanüle, Blutdruckmessung [RR]), ggf. orale Beta-Blocker eine Stunde vor der Untersuchung, Isosorbiddinitrat (sublinguales Nitrat in Tablettenform), Topogramm, nativer Calcium-Scoring-Scan, Beta-Blocker intravenös (i.v.), Testbolus-Scan, eigentliche cCTA, falls nötig ggf. Wiederholungs-Scan. Der zeitliche Ablauf ist schematisch in ► **Abb. 1** dargestellt.

Einzelne Bausteine können hierbei auch weggelassen oder abgewandelt werden. Beispielsweise kann die Gabe von Beta-Blockern je nach Präferenz des Untersuchers und Integrationsmöglichkeit in die Arbeitsabläufe nur oral, nur i.v. oder als Kombination erfolgen. Die Gabe von Beta-Blockern kann bei niedriger Herzfrequenz (< 60/min) auch entfallen. Der Calcium-Scoring-Scan kann bei sehr jungen Patienten (z. B. bei Frage nach Koronaranomalien) ebenfalls ausgelassen werden. Auch bei Bypass-Darstellungen ist ein Calcium-Scoring-Scan nicht erforderlich. Statt eines Testbolus kann alternativ ein Bolus-Tracking mit einer Region of Interest (ROI) in der Aorta ascendens erfolgen.

Einzelne Schritte der Untersuchung

Untersuchungsvorbereitung

Die Aufklärung sollte neben den Risiken durch die Kontrastmittel (KM)-Gabe vor allem Nebenwirkungen und mögliche Kontraindikationen für Beta-Blocker und Nitrate gemäß Beipackzettel beinhalten. ► **Tab. 1** fasst Konstellationen zusammen, bei denen Beta-Blocker und Nitrate nicht oder nur mit Vorsicht und unter

► **Tab. 1** Warnhinweise/Kontraindikationen für die üblichen Wirkstoffklassen, die beim Kardio-CT verwendet werden. Darüber hinaus ist der Beipackzettel zu beachten.

Warnung bei Beta-Blockern (hier Metoprolol)	Warnung bei Nitraten (hier Isosorbiddinitrat)
Systolischer RR < 110 mmHg	
Hochgradige Aortenklappenstenose	
Hochgradige Aortenklappeninsuffizienz	
Dekompensierte Herzinsuffizienz	
Sinusbradykardie (HF < 45)	Hypertrophe Obstruktive Kardiomyopathie (HOCM)
AV-Block Grad 2 und 3	PDE-5-Hemmer: Sildenafil (Viagra), Tadalafil
Medikamente mit AV-Blockierung (z. B. Verapamil, Diltiazem)	
Asthma/COPD/Bronchospasmus (Aufgrund der Beta-1-Selektivität von Metoprolol meist unproblematisch. Keine Gabe bei Asthma/COPD unter Dauermedikation)	

Überwachung empfohlen werden [11–16]. Eine Vorgehensweise ist die Verwendung von Beta-Blockern intravenös, z. B. Metoprolol (Beloc i. v. 5 ml = 5 mg), die Alternative sind orale nicht retardierte Beta-Blocker (z. B. 50 mg Tabletten Metoprololtartrat). Zusätzlich wird Isosorbiddinitrat (Isoket) als sublinguale Tablette (5 mg) verabreicht. Aufgrund der Beta-1-Selektivität von Metoprolol ist die Auswirkung auf das Bronchialsystem eher gering. Bei schwerem Asthma oder COPD unter Dauermedikation sollte jedoch auf die Beta-Blocker-Gabe verzichtet werden.

Als intravenöser Zugang sollte eine möglichst großlumige Venenverweilkanüle (ideal 18 Gauge, oft grün gekennzeichnet), präferentiell in der rechten Ellenbeuge gelegt werden, um hohe Flussraten (5–6 ml/s) zu ermöglichen. Vor der Gabe von Beta-Blockern und Nitraten sollten Blutdruck und Puls gemessen werden.

Für Dual-Source-CT-Geräte der neuesten (3.) Generation ist anzumerken, dass es bis dato keine Evidenz dafür gibt, dass die Gabe von Beta-Blockern eine Verbesserung der diagnostischen Genauigkeit für signifikante Koronarstenosen bewirkt. Eine Studie, welche die Bildqualität an Dual-Source-Geräten der 3. Generation für unterschiedliche HF-Bereiche verglich, konnte zeigen, dass eine HF bis zu 80/min zu keiner signifikanten Abnahme der Bildqualität gegenüber einer HF ≤ 60/min führte [14]. Eine Metaanalyse, welche die diagnostische Genauigkeit der cCTA zur Detektion signifikanter Koronarstenosen an Dual-Source-Geräten mit und ohne Kontrolle der Herzfrequenz verglich, zeigte keinen signifikanten Unterschied in der diagnostischen Genauigkeit auf Patientenebene, jedoch einen signifikanten Unterschied in der Spezifität auf Segmentebene und einen signifikanten Unterschied in der Strahlendosis [15]. Die aktuellen Konsensusempfehlungen der Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT) empfehlen die Gabe von Beta-Blockern u. a. aus diesem Grund auch bei Scannern mit verbesserter zeitlicher Auflösung [11]. Aus unserer Sicht ist daher die Gabe von Beta-Blockern an Dual-Source-Geräten der neuesten (3.) Generation nicht mehr unabdingbar für alle HF-Bereiche nötig, aber zur Optimierung der Bildqualität und insbesondere zur Reduktion der Strahlendosis zu empfehlen.

► **Tab. 2** Mögliches Dosier-Schema oraler Beta-Blocker.

Herzfrequenz	Dosierung
≤ 65/min	Keine Beta-Blocker oral. Alternativ Metoprolol i. v. zu erwägen.
65–69/min	50 mg Metoprolol oral
≥ 70/min	100 mg Metoprolol oral

Orale Beta-Blocker

In den Konsensusempfehlungen der SCCT werden 50–100 mg Metoprololtartrat eine Stunde vor der Untersuchung als in der Praxis übliche Dosierung genannt [11]. Eine genaue Empfehlung der Dosierung in Abhängigkeit von der Herzfrequenz wird jedoch nicht gegeben. Wir haben daher einen Vorschlag für ein mögliches einfaches Dosier-Schema in Abhängigkeit von der Herzfrequenz in ► **Tab. 2** erstellt. Dieses wurde in unserem Institut etabliert und erwies sich als für die allermeisten Patienten sehr gut verträglich. Alternativ kann die Gabe gewichtsadaptiert erfolgen und/oder in Kombination mit einer i. v.-Gabe von Metoprolol im Anschluss [17]. Wird im weiteren Verlauf Metoprolol i. v. verabreicht, kann wie oben beschrieben fakultativ auf die orale Gabe verzichtet werden oder im Falle einer Kombination die orale Gabe reduziert werden.

Nitrate

Nitrate zur Koronargefäßdilatation können sowohl als Spray als auch als Tablette sublingual vor der Untersuchung verabreicht werden [11]. In Studien zeigte sich eine etwas stärkere Dilatation der Koronargefäße bei Verwendung eines sublingualen Sprays gegenüber der Darreichung als Tablette [18, 19]. Aus hygienischen Gründen und in Anbetracht der aktuellen COVID-19-Pandemie verwenden wir dennoch Isosorbiddinitrat als sublinguale Tabletten (5 mg Isoket, Aesica Pharmaceuticals GmbH), welche einzeln verpackt sind. Die Zeit bis zum maximalen Wirkeintritt beträgt hierbei ca. 8 Minuten.



► **Abb. 2** a Volume Rendering Technique (VRT) der koronaren Verkalkungen. b Axiales Schichtbild des nativen Calcium-Scoring-Scans auf Höhe des linken Hauptstamms und des proximalen Ramus interventricularis anterior (RIVA). Die Tabelle zeigt den Agatston-Score (Gesamt-Score 2920). Bei derart ausgeprägten Verkalkungen sind Sensitivität und Spezifität der cCTA zum Ausschluss einer relevanten Stenose in der Regel nicht mehr hoch genug, sodass hier ein alternatives Verfahren zum Ausschluss hämodynamisch relevanter Stenosen erwogen werden sollte (z. B. Stress-Test).

Bei Verwendung eines sublingualen Sprays, z. B. Glyceroltrinitrat (2 Hübe Nitrolingual N Spray, Pohl-Boskamp) betrug die Zeit bis zur maximalen Koronargefäßdilatation in Studien 3–5 Minuten [16, 20, 21].

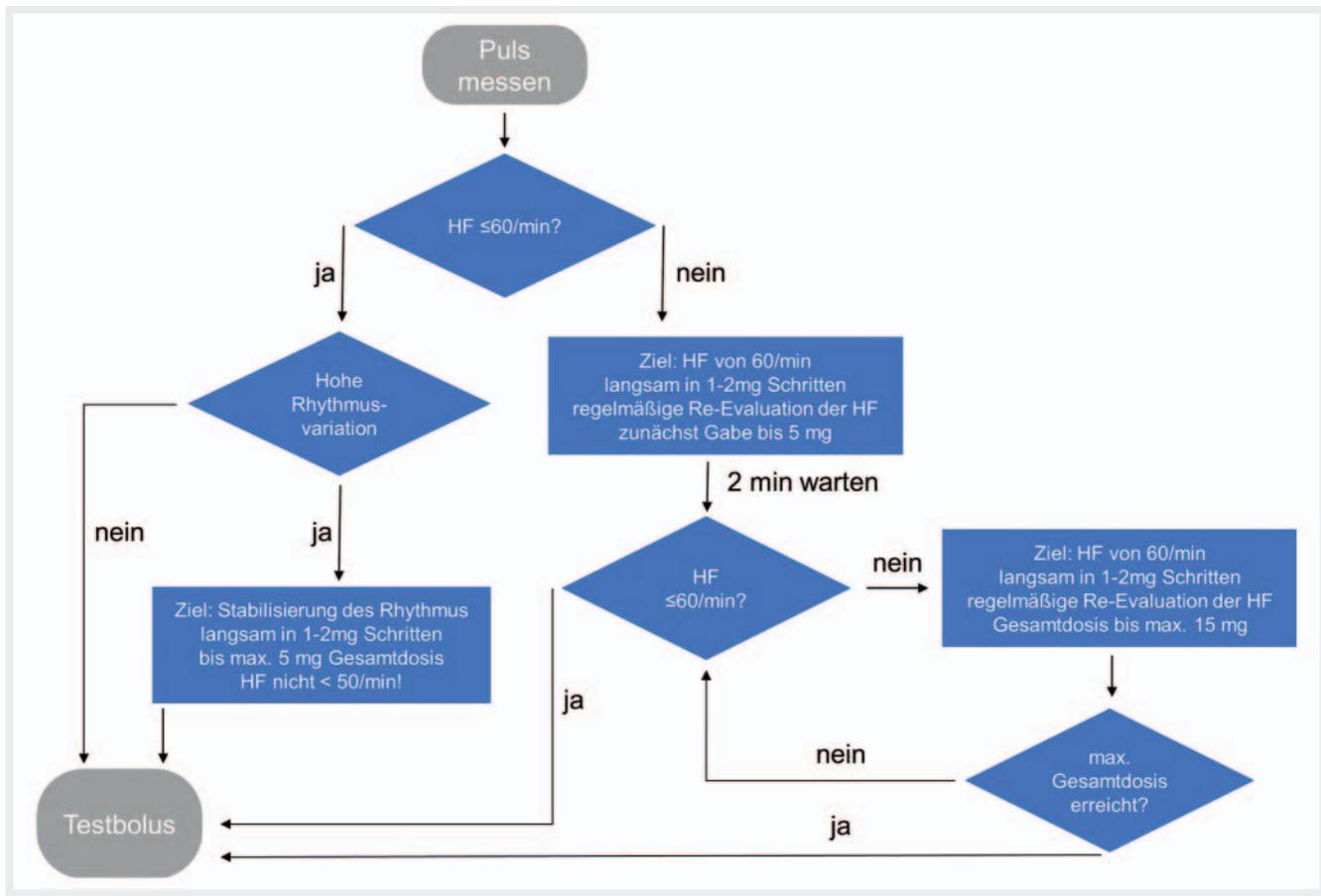
Topogramm, Calcium-Scoring

Das Topogramm reicht in der Regel von Lungenspitzen bis Zwerchfellrippenwinkel. Nach dem Topogramm erfolgt fast immer der Calcium-Scoring-Scan. Ausnahmen stellen evtl. sehr junge Patienten (aufgrund der zusätzlichen Strahlendosis) oder die Untersuchung koronarer Bypässe dar (da bei Bypässen der Calcium-Scoring-Scan weder auf die Untersuchungsplanung noch das klinische Management einen Einfluss hätte). In unserer Klinik verwenden wir für das Calcium-Scoring an den Dual-Source-Geräten der 2. und 3. Generation (Definition Flash und Force, Siemens Healthcare GmbH, Erlangen) immer eine High-Pitch-Spirale mit niedriger Strahlendosis. Hierzu kann an DSCTs der 3. Generation zur weiteren Dosisreduktion ein Protokoll mit Zinnfilter eingesetzt werden und um den Agatston-Score vergleichbar bestimmen zu können eine virtuelle 120kv-Rekonstruktion erstellt werden. Im Anschluss erfolgt eine erste schnelle Analyse des Calcium-Scoring-Scans. Bei schweren oder sehr schweren Verkalkungen kann erwogen werden, keine kontrastmittelgestützte Untersuchung durchzuführen, da die Wahrscheinlichkeit für eine relevante KHK – insbesondere bei typischer Klinik – deutlich ansteigt, aber Sensitivität und Spezifität deutlich sinken [22]. Dies ist jedoch bei modernen Dual-Source-Geräten nur noch selten der Fall und frühere Empfehlungen eines Agatston-Score von 400 als Obergrenze für die Durchführbarkeit/Beurteilbarkeit der cCTA [23, 24] ist für

Scanner der neuesten Generation (z. B. Dual Source [DSCT]-Geräte der 3. Generation) nicht mehr gültig [25]. ► **Abb. 2** zeigt einen Ausnahmefall sehr ausgeprägter koronarer Verkalkungen, aufgrund derer bei zu erwartender reduzierter diagnostischer Genauigkeit auf eine CT-Koronarangiografie mit Kontrastmittel verzichtet werden kann.

Klinisch ist das Calcium-Scoring vor allem von prognostischem Wert und kann eine Entscheidungshilfe für eine medikamentöse Atherosklerose-Prophylaxe sein. So konnten mehrere Studien, z. B. die Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA)-Studie, zeigen, dass der Agatston-Score stark mit der Menge koronarer Plaques insgesamt korreliert und einen unabhängigen Risikoprädiktor für das Auftreten eines zukünftigen Koronareignisses (Herzinfarkt, koronarer Herztod) sowie für die Gesamtmortalität darstellt [26, 27]. Eine Studie mit über 13 000 Patienten konnte zeigen, dass der Gesamt-Agatston-Score mit hoher Genauigkeit Patienten identifizieren konnte, welche von einer Statintherapie profitieren würden [28]. Die neuen klinischen Leitlinien des American College of Cardiology, der American Heart Association und weiterer Fachgesellschaften empfehlen nun das Calcium-Scoring bei bestimmten Patienten als Entscheidungshilfe für eine Statintherapie einzusetzen [29].

Mithilfe des Ca-Scoring-Scans lässt sich das Scan-Feld für die folgende cCTA (in z-Richtung) exakter einstellen als mit dem Topogramm. Obere Scanbegrenzung: 1–2 cm kranial des obersten Koronararterien-Anschnitts im Ca-Scoring (LM oder LAD). Untere Scanbegrenzung: 1–2 cm kaudal des untersten Apex-Anschnitts im Ca-Scoring.



► **Abb. 3** Algorithmus für die intravenöse Gabe von Metoprolol. HF: Herzfrequenz.

Intravenöse Beta-Blocker

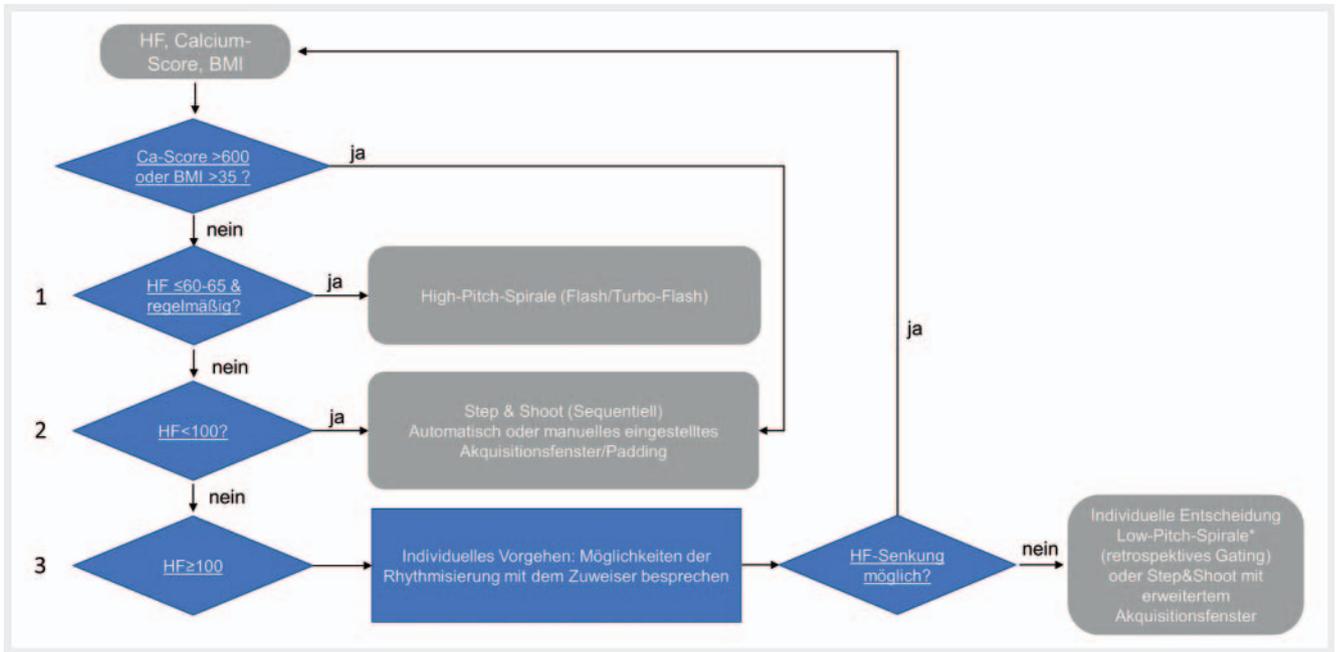
Die intravenöse Gabe von Beta-Blockern erfolgt idealerweise noch vor dem Testbolus und nicht erst danach, um Unterschiede in der Blutzirkulationsgeschwindigkeit zwischen Testbolus-Scan und cCTA zu vermeiden. Nach Überprüfen der Kontraindikationen kann die i. v.-Gabe von Metoprolol (z. B. Beloc 5 mg/5 ml Ampullen, Cenexi) langsam in 1–2mg-Schritten unter simultanem EKG-Monitoring und Beachtung der Herzfrequenz (HF) bis zu einer Gesamtdosis von 15 mg erfolgen. Nach jeder Gabe wird die Herzfrequenz in Inspiration kontrolliert. Die Zielfrequenz liegt bei 60/min [11]. Ein mögliches Vergabeschema zeigt ► **Abb. 3**.

Testbolus oder Bolus-Tracking:

Zur Bestimmung des Kontrastmittel (KM)-Delays haben sich 2 Methoden etabliert: Das Testbolus-Verfahren und das Bolus-Tracking-Verfahren. An unserem Institut setzen wir primär das Testbolus-Verfahren ein. Hierbei werden z. B. 10 ml KM (z. B. 90 % Imeron 400 oder 100 % Ultravist 370) mit einem Fluss von 6 ml/s appliziert. Es folgt ein Kochsalz-Bolus (NaCl-Chaser) von 60 ml mit identischem Fluss. Nach 9 Sekunden werden Einzelschichtbilder im Abstand von je 1 Sekunde auf Höhe der A. ascendens akquiriert. Über eine Region of Interest (ROI) werden die HU-Werte in

der Aorta ascendens im zeitlichen Verlauf gemessen und daraus die Zeit bis zum maximalen Enhancement abgelesen (Tmax). Das KM-Delay ab Injektionsstart für die eigentliche cCTA wird auf Tmax + 4 oder + 5 Sekunden festgelegt [11]. Bei Adipositas Grad II (BMI ≥ 35 kg/m²) applizieren wir als Testbolus 15 ml Kontrastmittel mit einem Fluss von 7–8 ml/s [30]. Hierbei ist darauf zu achten, die KM-Flussrate identisch zum Hauptbolus der nachfolgenden cCTA einzustellen.

Beim Bolus-Tracking-Verfahren wird erst bei Beginn der cCTA während der KM-Injektion das Enhancement in Form eines Anstiegs der HU-Werte in einer ROI der A. ascendens gemessen. Sobald ein vorgegebener HU-Schwellenwert (typischerweise 100–150 HU) erreicht ist, starten das Atemkommando und hiernach der Scan automatisch ca. 7–10 Sekunden nach Erreichen dieses Schwellenwertes [11, 31, 32]. Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile: Vorteil der Testbolus-Methode ist, dass der Testbolus selbst als Test-Lauf für die eigentliche cCTA dienen kann. So wird z. B. die korrekte Lage der Venenverweilkanüle bestätigt. Zudem ergeben sich Vorteile bei einer sehr langen oder extrem kurzen Kreislaufzeit [11]. Vorteil der Bolus-Tracking-Methode ist die Einsparung der 10 ml KM des Testbolus und die Zeitersparnis. Zudem ist die Bolus-Tracking-Methode für unerfahrene Untersucher in der Regel leichter anwendbar.



► **Abb. 4** Möglicher Algorithmus zur Auswahl des Scan-Protokolls. HF: Herzfrequenz; HV: Herzfrequenzvariabilität. Ab einem Agatston-Score > 600 oder einem BMI > 35 kg/m² empfehlen wir Step&Shoot. **1** Bei Dual-Source-Geräten (DSCTs) der 3. Generation kann der High-Pitch-Modus („Turbo-Flash“/„Flash“) bis HF ≤ 65/min und HV ≤ 2/min angewendet werden. Bei DSCTs der 2. Generation ohne Hardware-Update empfehlen wir ein Limit von HF ≤ 60/min und HV ≤ 1/min. **2** Für die Einstellung des Akquisitionsfensters in % oder ms des RR-Intervalls siehe Padding-Schema in Abhängigkeit von HF und HV in ► **Tab. 3**.

CT-Koronarangiografie

An modernen Scannern stehen im Wesentlichen folgende Scan-Modi zur Verfügung:

1. An Dual-Source-Geräten ab der 2. Generation ein helikaler „High pitch“-Scan mit Aufnahme des gesamten Herzens innerhalb eines Herzzyklus (RR-Intervall). An Single Source-Geräten mit einer Detektorbreite um 16 cm ist analog ein sogenannter „Single-heart-beat“-Modus möglich, wobei die zeitliche Auflösung bei Dual-Source-Geräten aktuell höher ist [33]. Da das Herz nur während eines Zeitpunktes im RR-Intervall (meist in der Diastole) gescannt wird, hat dieser Modus die geringste Strahlendosis.
2. Ein prospektiv EKG-getriggierter sequentieller Scan (sogenannte „Step&Shoot“-Technik). Hierbei lässt sich selektiv ein bestimmter Abschnitt des EKG-Zyklus scannen (sogenanntes „Padding“), z. B. nur die diastolische 66–74 %-Phase des RR-Intervalls oder eine systolische + diastolische 30–80 %-Phase des RR-Intervalls (sog. „Akquisitionsfenster“). Die Strahlendosis dieses Scan-Modus ist in der Regel niedriger als jene der „Low pitch“-Spirale, hängt jedoch stark vom Akquisitionsfenster („Padding“) ab [33].
3. Eine „Low pitch“-Spirale mit retrospektiver EKG-synchronisierter Bildrekonstruktion. Diese wird heute nur noch in Ausnahmefällen für die cCTA verwendet. Hierbei ist eine EKG-gesteuerte Röhrenstrommodulation (sogenanntes „Pulsing“) möglich, um die Dosis zu reduzieren. Trotz dessen ist dieser Scan-Modus auch an modernen Geräten meist mit der höchsten Strahlendosis assoziiert [25].

Die Wahl des Scan-Modus hängt hierbei primär von der Herzfrequenz (HF) und der Herzfrequenzvariabilität (HV) ab. In Einzelfällen können BMI und koronare Kalklast die Wahl des Scan-Protokolls zusätzlich beeinflussen.

► **Abb. 4** zeigt einen möglichen Entscheidungsalgorithmus für das Scan-Protokoll an einem Dual-Source-Gerät der 2. oder 3. Generation, welcher für die meisten Patienten gut angewendet werden kann. Ausnahmen von dieser Regel bilden z. B. junge Patienten, bei denen je nach Fragestellung (z. B. Frage nach Koronaromalie) ein Protokoll mit möglichst niedriger Dosis gewählt werden sollte. Bei allen Untersuchungen ist zu prüfen, ob die geplanten Strahlendosiswerte des jeweiligen Scan-Modus für die Untersuchung im Sinne des ALARA-Prinzips sinnvoll erscheinen.

1. „High pitch“-Scan

Diese Option besteht nur an Dual-Source-Geräten. Bei einer HF ≤ 65/min und einer geringen HV ≤ 2/min zeigten zahlreiche Studien an Dual-Source-Geräten der 3. Generation eine sehr gute Beurteilbarkeit der cCTA bei Akquisition mittels High-pitch-Modus („Flash“/„Turbo-Flash“-Scan) in der Diastole (Beginn bei ca. 65 % des RR-Intervalls) [34–37]. Bei Dual-Source-Geräten der 2. Generation empfehlen wir eher eine konservativere Wahl des High-pitch-Modus bei HF ≤ 60/min und HV ≤ 1/min [38].

Im Falle schwerer koronarer Kalzifikationen ab einem Agatston-Score von 600 zeigten Studien eine signifikante Abnahme der Bildqualität im High-Pitch-Modus unabhängig von der HF [37], wohingegen Studien an gleichen Geräten für den prospektiven sequentiellen Scan („Step&Shoot“) eine konstant hohe Bild-

► **Tab. 3** Beispiel für ein einfaches Padding-Schema (Akquisitionsfenster bei Step&Shoot), welches für Dual-Source-CT-Geräte (DSCTs) der 2. und 3. Generation angewendet werden kann. Die Parameter sind hier eher konservativ gewählt, um mit hoher Sicherheit eine sehr gute Bildqualität zu erhalten. An DSCTs der 3. Generation können Protokolle mit kürzerem Akquisitionsfenster mit immer noch relativ guter Sicherheit angewendet werden, beispielsweise ein rein diastolisches Gating bei regelmäßiger HF < 70–75-/min und ein rein systolisches Gating bei regelmäßiger HF > 70–75/min. Dies hat einen deutlichen Effekt auf die Strahlendosis, welcher vor allem bei jüngeren Patienten relevant ist.

HF, HV	Start	Ende	Einheit
HF ≤ 70/min, HV ≤ 10/min	60	80	%
HF ≤ 70/min, HV > 10/min	30	80	%
HF > 70/min, HV ≤ 10/min	30	80	%
HF > 70/min, HV > 10/min	120	600	ms

HF: Herzfrequenz; HV: Herzfrequenzvariabilität.

qualität bei einem deutlich höheren Agatston-Score zeigten [25]. Eine Erklärung hierfür könnte die höhere verwendete Strahlendosis beim sequentiellen Modus sein, zum anderen jedoch auch die Möglichkeit der Rekonstruktion mehrerer Zeitpunkte gegenüber dem High-Pitch-Modus mit nur einem möglichen Rekonstruktionszeitpunkt. Wir verwenden daher unabhängig von der HF bei hohem Agatston-Score den sequentiellen Modus („Step&Shoot“).

Analog wurde in Studien bei hohem BMI eher ein konservativer Scan-Modus mit der Möglichkeit mehrere Herzzyklusphasen zu rekonstruieren gewählt [25], weshalb wir bei Adipositas Grad II (BMI ≥ 35 kg/m²) ebenfalls eher auf den High-Pitch-Modus verzichten und stattdessen auf den sequentiellen Modus („Step&Shoot“) zurückgreifen.

2. Sequentieller Scan („Step&Shoot“)

An modernen Dual Source-Scannern kann auch bei hohen HF (ca. 70–100/min) der prospektiv EKG-getriggerte sequentielle Scan („Step&Shoot“-Technik) ohne wesentlichen Verlust der Bildqualität angewendet werden [14, 25]. Bis zu einer HF von 70/min ist in diesem Modus ein „enges“ Akquisitionsfenster („enges Padding“), welches sich allein auf die Diastole beschränkt (z. B. 60–80 % des RR-Intervalls) bei Dual-Source-Geräten der 2. und 3. Generation ausreichend, um mit hoher Sicherheit eine gute Bildqualität zu erreichen. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass das Akquisitionsfenster bei hoher Herzfrequenz erweitert („weites Padding“) oder von diastolischen auf endsystolische Herzphasen verschoben werden sollte („systolisches Padding“). Sowohl Studien an älteren [39–41] als auch an modernen Geräten [14, 42] zeigten, dass bei höheren Herzfrequenzen (> 70–75/min) endsystolische Rekonstruktionen (Akquisitionsfenster ca. 30–50 % des RR-Intervalls) weniger Bewegungsartefakte aufwiesen als diastolische Rekonstruktionen (Akquisitionsfenster ca. 30–50 % des RR-Intervalls). Im Falle einer stark schwankenden HF < 70/min sollte das Akquisitionsfenster ebenfalls erweitert werden (z. B. auf 30–80 % des RR-Intervalls bei Schwankungen von > 10 Herzschlägen/min). Im Falle einer Arrhythmie (bei HF 70–100/min) empfiehlt sich ein Wechsel von prozentualer Triggerung des RR-Intervalls (z. B. 35–55 %) auf ein festes systolisches Fenster in Millisekunden (ms) (z. B. 210–440 ms entsprechend bei HF 75–100/min) [43]. Grund ist, dass die systolische Phase bei hoher, unregelmäßiger

Herzfrequenz weitgehend konstant bleibt, wohingegen die Dauer der Diastole stark wechselt. Eine Triggerung in Prozent des RR-Intervalls führt somit zu stark schwankenden, unvorhersehbaren Akquisitionsphasen im Herzzyklus, eine Triggerung in ms ab der R-Zacke hingegen zu einer relativ vorhersehbaren, gleichbleibenden Akquisitionsphase. Ein mögliches Schema für die Padding-Einstellung an Dual-Source-Geräten der 2. und 3. Generation zeigt

► **Tab. 3.**

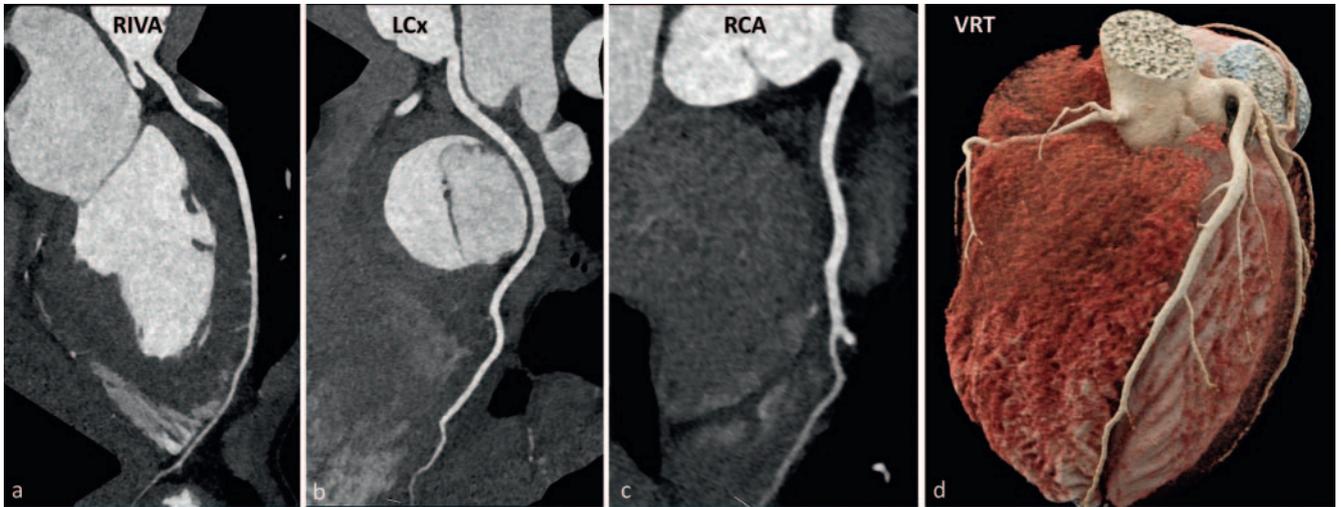
3. „Low pitch“-Spirale mit retrospektivem Gating

Bei ausgeprägter Tachykardie mit Arrhythmie (HF > 100/min) ohne Möglichkeiten einer Rhythmisierung oder einer medikamentösen Reduktion der HF besteht die Option einer „Low pitch“-Spirale mit retrospektiver EKG-synchronisierter Bildrekonstruktion. Die in diesem Scan-Modus relativ hohe Strahlendosis lässt sich durch eine EKG-synchronisierte Röhrenstrommodulation (sogenanntes „Pulsing“) reduzieren. Hierbei kann in den Anteilen des EKG-Zyklus, welche voraussichtlich nicht zur Diagnostik beitragen werden (z. B. 0–20 % und 80–100 % des RR-Intervalls), der Röhrenstrom reduziert werden (z. B. auf 20 % des Ausgangswertes). Ein Vorteil der retrospektiven Bildrekonstruktion besteht darin, dass bei schlechter Erkennung der Herzzyklen nachträglich EKG-Synchronisationspunkte verschoben oder neu gesetzt werden können, wodurch sich Artefakte bei Arrhythmie reduzieren lassen.

Kontrastmittel

Die KM-Menge liegt für den High-pitch-Modus z. B. bei 60 ml, für die anderen Scan-Modi bei 70 ml, KM-Fluss 6 ml/s (identisch zum Testbolus). Die KM-Menge lässt sich im High-Pitch-Modus bei schlanken Patienten und kleinerem Herzzeitvolumen (HZV) individuell deutlich reduzieren [34, 35]. In einer Studie konnte bei schlanken Patienten mit einem BMI < 25 kg/m² unter Erhalt der diagnostischen Bildqualität die Kontrastmittelmenge bei 70 kV auf 30 ml (370 mg Iod/ml) reduziert werden [34]. In einer anderen Studie konnte die KM-Menge bei Patienten mit einem BMI < 26 kg/m² auf 45 ml (400 mg Iod/ml) reduziert werden.

Bei Adipositas Grad II (BMI ≥ 35 kg/m²) und entsprechend hohem HZV sollte die KM-Menge erhöht werden (z. B. 90 ml, KM-Fluss über eine 16G/17G-Kanüle (grau/weiß) 7–8 ml/s) [29, 32].



► **Abb. 5** Erfolgreiche Untersuchung mit guter diagnostischer Bildqualität bei Einsetzen des High-Pitch-Modus („Turbo-Flash“) bei einem DSCT der 3. Generation. HF = 63/min, HV = 1/min. KM-Menge = 60 ml. **a** Curved planar Reconstruction (CPR) des Ramus interventricularis anterior (RIVA). **b** CPR des Ramus Circumflexus (LCx). **c** CPR der rechten Koronararterie (RCA). **d** Volume Rendering Technique (VRT) des Herzens.

Im Sinne eines bi-phasischen KM-Protokolls wird empfohlen, im direkten Anschluss an die KM-Gabe ein identisches Volumen NaCl-Lösung („Chaser“) zu applizieren, um das Kontrastmittel aus den peripheren Venen in den rechten Vorhof zu spülen.

Rekonstruktionen

Die Voxel-Größe und damit die räumliche Auflösung hängt von der Auflösung in Z-Richtung („through plane resolution“) und der Pixel-Größe in axialer Schichtebene („in plane resolution“) ab [44]. Letztere entspricht (innerhalb gewisser Grenzen) dem Quotienten aus Field of View (FOV) und Matrixgröße [44]. Um eine hohe räumliche Auflösung zu erreichen, empfiehlt sich daher zum einen die Verwendung einer geringen Schichtdicke (< 1 mm) und zum anderen die Rekonstruktion in einem kleineren, auf das Herz fokussierten FOV, welches noch die Koronargefäße enthält, anstelle eines FOV, welches den gesamten Thorax enthält. Die reale maximale „in-plane resolution“ ist allerdings gerätetechnisch limitiert. An manchen Geräten besteht zudem die Option, eine 1024 × 1024-Matrix für eine höhere Auflösung zu rekonstruieren.

Wir empfehlen, folgende Herzphasen zu rekonstruieren:

Für Step&Shoot (sequentiell):

1. Per Software automatische Detektion der diastolischen Herzphase mit den geringsten Artefakten (z. B. „Best Diastole“ bei Siemens Healthcare)
2. Per Software automatische Detektion der systolischen Herzphase mit den geringsten Artefakten (z. B. „Best Systole“ bei Siemens Healthcare)
3. Rekonstruktion des gesamten akquirierten Intervalls („Multi-phase“) in 5%-Schritten. Wir empfehlen dabei die Rekonstruktion ohne nachträgliche Überlappung der einzelnen Volumenschüsse („Stacks“), um Verschiebe-Artefakte zwischen den „Stacks“ auch als solche leicht erkennen zu können („True-Stack“ bei Siemens Healthcare).

Für die Low-Pitch-Spirale (retrospektiv):

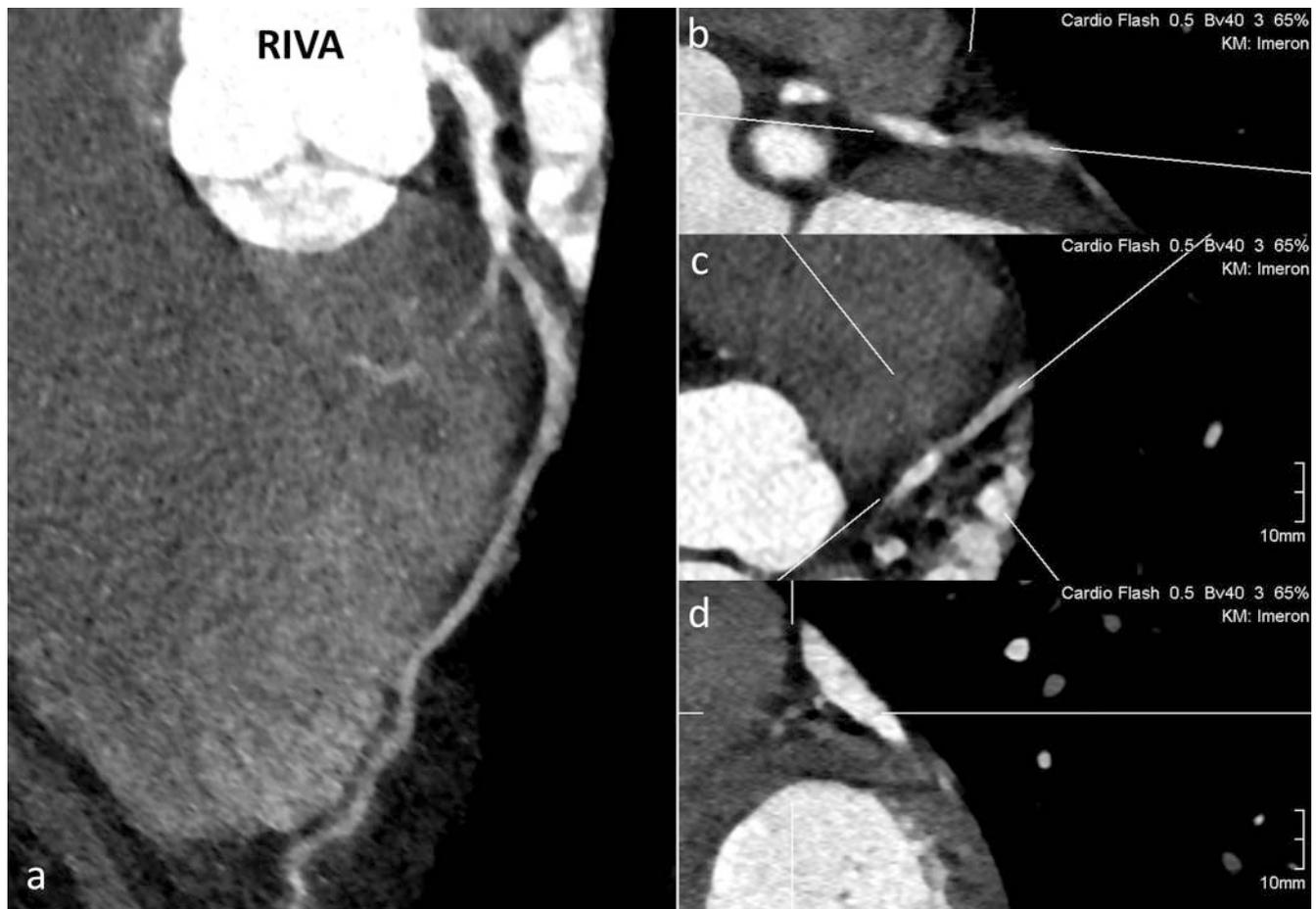
1. Synchronisationspunkte prüfen und ggf. verschieben, neu setzen oder löschen
2. Per Software automatische Detektion der diastolischen Herzphase mit den geringsten Artefakten (z. B. „Best Diastole“ bei Siemens Healthcare)
3. Per Software automatische Detektion der systolischen Herzphase mit den geringsten Artefakten (z. B. „Best Systole“ bei Siemens Healthcare)
4. Rekonstruktion des gesamten akquirierten Intervalls („Multi-phase“) in 5%-Schritten. Wir empfehlen die Rekonstruktion ohne nachträgliche Überlappung der einzelnen Volumenschüsse („TrueStack“ bei Siemens Healthcare).
5. Rekonstruktion des gesamten akquirierten Intervalls („Multi-phase“) in 50ms-Schritten. Rekonstruktion ohne nachträgliche Überlappung der einzelnen Volumenschüsse („TrueStack“ bei Siemens Healthcare).

Prüfen der Bildqualität

Am Ende der Untersuchung wird die Bildqualität direkt visuell überprüft. Hierbei wird folgendes beachtet:

- Ist das Herz inklusive der Koronararterien komplett erfasst?
- Besteht eine gute Kontrastierung der Zielgefäße?
- Ist die Untersuchung frei von signifikanten Bewegungsartefakten (Atemartefakte oder Artefakte durch Arrhythmie), welche die diagnostische Bildqualität einschränken?

Sollte einer dieser Punkte nicht gegeben sein, ist zu erwägen, den Teil der Untersuchung zu wiederholen, welcher artefaktbedingt die Diagnostik einschränkt. ► **Abb. 5** zeigt ein Beispiel einer cCTA mit ausreichender diagnostischer Bildqualität. Ein Beispiel für eine eingeschränkte diagnostische Bildqualität bei Artefakten ist in ► **Abb. 6** dargestellt.



► **Abb. 6** Bei HF = 67/min und HV = 5/min Anwendung des High-Pitch-Modus („Turbo-Flash“) bei einem DSCT der 3. Generation. Bewegungsartefakte und Kontrastierungssprung im proximalen bis mittleren Ramus interventricularis anterior (RIVA). **a** CPR des RIVA. **b–d** Multiplanare Rekonstruktion (MPR) des RIVA. Die diagnostische Qualität ist eingeschränkt. Eine relevante Koronarstenose lässt sich nicht sicher ausschließen.

Zur Wiederholung einzelner Untersuchungsabschnitte reicht in der Regel der Step&Shoot-Modus mit erweitertem Padding (z. B. 30–80% des RR-Intervalls) bei einer KM-Menge von 50–60 ml (bei 1–2 Steps). Eine erneute Gabe von Nitraten oder Beta-Blockern ist meist nicht nötig. ► **Abb. 7** zeigt eine Wiederholung des artefaktbehafteten Scanabschnitts aus ► **Abb. 6** mit nun guter, diagnostischer Bildqualität dieses Abschnitts.

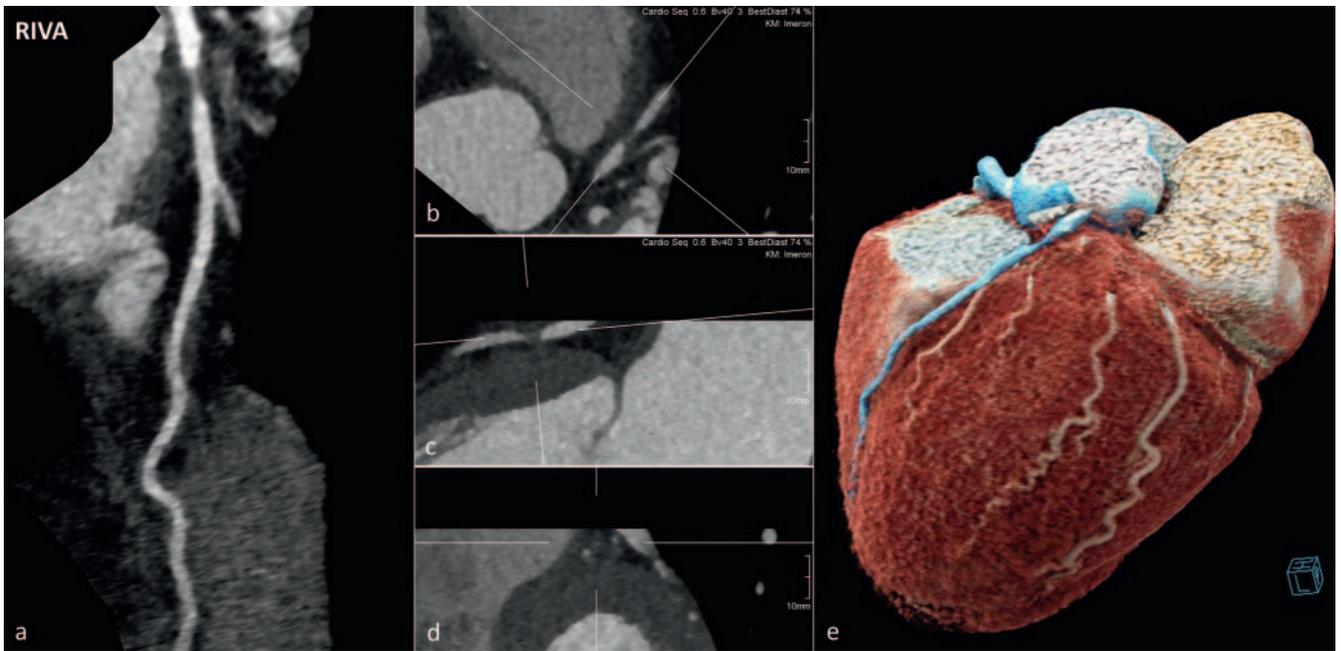
Entlassung und Befundung

Nach Gabe von Beta-Blockern oder Nitraten bleiben ambulante Patient_innen noch für 20–30 Minuten nach der Untersuchung zur Beobachtung in der Abteilung, um mögliche Nebenwirkungen zu erkennen. Eine erste Erfassung der relevanten Befunde durch die Ärzt_innen erfolgt direkt im Anschluss an die Untersuchung. Falls Patient_innen eine Befundbesprechung wünschen oder für den Fall, dass akut relevante Befunde bestehen, werden diese den Patient_innen und deren Zuweiser_innen demonstriert. Das weitere Vorgehen wird an unserem Standort in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit den Zuweiser_innen und/oder den Kolleg_innen der Kardiologie gemeinsam festgelegt. Eine mögliche Orientierung zur Einordnung des Schweregrades und bzgl. weiter-

gehender Empfehlungen basierend auf dem CT-Befund bietet die Einordnung entsprechend den CAD-RADS-Kriterien [45]. Die Empfehlungen sollten jedoch immer im klinischen Kontext individuell betrachtet werden [45].

FAZIT FÜR DIE PRAXIS

- Die cCTA wird in den aktuellen Leitlinien der ESC vor allem bei niedriger und intermediärer klinischer Wahrscheinlichkeit für eine KHK empfohlen.
- Als Orientierungshilfe für den praktischen Ablauf können diese Arbeit sowie Konsensempfehlungen der Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT) zur Vorbereitung und Akquisition der cCTA verwendet werden.
- Vor der Untersuchung kann selbst an modernsten Scanner-Generationen weiterhin eine Prämedikation mit Beta-Blockern und Nitraten hilfreich sein.
- Insgesamt hängen Bildqualität und Strahlendosis immer noch von der Untersuchungsvorbereitung und der Wahl des Scan-Protokolls ab.



► **Abb. 7** Selber Patient aus ► **Abb. 6**. Der Scan wurde wiederholt mit Eingrenzung auf den vormals artefaktbedingt nicht diagnostischen/unklaren Bereich. Hierzu wurde bei HF = 67/min und HV = 5/min der Step&Shoot-Modus mit einem diastolischen Akquisitionsfenster von 60–80 % entsprechend ► **Tab. 3** gewählt. Erfolgreiche Wiederholunguntersuchung mit nun guter diagnostischer Qualität. KM-Menge = 60 ml. Es demarkiert sich eine hochgradige Stenose des RIVA. **a** CPR des RIVA. **b–d** Multiplanare Rekonstruktion (MPR) des RIVA. **e** Volume Rendering Technique (VRT) des Herzens. Die hochgradige Stenose des RIVA wird deutlich abgrenzbar.

- Aktuell verwendete CT-Geräte ermöglichen in der Regel ein retrospektives EKG-Gating, einen prospektiv EKG-getriggerten Scan sowie einen „High pitch“-Modus (Dual-Source-Geräte) oder „Single-heart-beat“-Modus (Single-Source-Geräte).
- Die Wahl des Scan-Modus basiert primär auf der Herzfrequenz sowie der Herzfrequenzvariabilität und nur in Einzelfällen auf der Menge an Koronarkalk und dem BMI.
- Der High-Pitch-Modus bei Dual-Source-Geräten („Flash“/„Turbo-Flash“) wird vor allem bei niedriger und regelmäßiger Herzfrequenz verwendet und hat die niedrigste Dosisexposition.
- Der Step&Shoot-Modus kann über einen großen Bereich von Herzfrequenzen eingesetzt werden. Hierbei ist je nach Herzfrequenz (HF) und Herzfrequenzvariabilität (HV) das EKG-getriggerte Akquisitionsfenster in % oder ms des RR-Intervalls einzustellen („Padding“).
- Die Low-Pitch-Spirale (retrospektives Gating) wird nur noch in Einzelfällen, z. B. bei absoluter Tachyarrhythmie eingesetzt. Sie hat in der Regel die höchste Strahlendosis der 3 Scan-Modi.
- Vor Abschluss der Untersuchung sollte die Bildqualität der cCTA überprüft werden. Im Falle einer eingeschränkten diagnostischen Bildqualität wird die direkte Wiederholung der betroffenen Abschnitte empfohlen.

Interessenkonflikt

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- [1] Knuuti J, Wijns W, Saraste A et al. (2020) 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes. *European Heart Journal* 41: 407–477
- [2] Dewey M, Hamm B. CT-Koronarangiografie: Untersuchungstechnik, klinische Ergebnisse und Ausblick in zukünftige Entwicklungen [CT coronary angiography: examination technique, clinical results, and outlook on future developments]. *Rofo* 2007; 179: 246–260
- [3] Haase R, Schlattmann P, Gueret P et al. COME-CCT Consortium. Diagnosis of obstructive coronary artery disease using computed tomography angiography in patients with stable chest pain depending on clinical probability and in clinically important subgroups: meta-analysis of individual patient data. *BMJ* 2019; 365: 11945
- [4] Newby DE, Adamson PD, Berry C. SCOT-HEART Investigators et al. Coronary CT Angiography and 5-Year Risk of Myocardial Infarction. *N Engl J Med* 2018; 379: 924–933
- [5] Achenbach S, Barkhausen J, Beer M et al. Konsensempfehlungen der DRG/DGK/DGPK zum Einsatz der Herzbildgebung mit Computertomographie und Magnetresonanztomographie. *Kardiologie* 2012; 6: 105–125
- [6] Busse A, Cantré D, Beller E et al. Cardiac CT: why, when, and how. *Radio- logie* 2019; 59: 1–9
- [7] Mahnken AH. Imaging of Coronary Stents by Coronary CT-Angiography: Current Status. *Curr Cardiovasc Imaging Rep* 2012; 5: 274–281
- [8] Andreini D, Pontone G, Mushtaq S et al. Diagnostic accuracy of coronary CT angiography performed in 100 consecutive patients with coronary stents using a whole-organ high-definition CT scanner. *International Journal of Cardiology* 2019; 274: 382–387

- [9] Baumgartner H, Falk V, Bax JJ et al. 2017 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *European Heart Journal* 2017; 38: 2739–2791
- [10] Collet JP, Thiele H, Barbato E. ESC Scientific Document Group. et al. 2020 ESC Guidelines for the management of acute coronary syndromes in patients presenting without persistent ST-segment elevation. *Eur Heart J* 2021; 42: 1289–1367. Erratum in: *Eur Heart J*. 2021 May 14;42(19):1908. Erratum in: *Eur Heart J*. 2021 May 14;42(19):1925. Erratum in: *Eur Heart J*. 2021 May 13;; PMID: 32860058 doi:10.1093/eurheartj/ehaa575
- [11] Abbara S, Blanke P, Maroules CD et al. SCCT guidelines for the performance and acquisition of coronary computed tomographic angiography: A report of the society of Cardiovascular Computed Tomography Guidelines Committee: Endorsed by the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI). *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2016; 10: 435–449
- [12] Pannu HK, Alvarez W Jr, Fishman EK. Beta-blockers for cardiac CT: a primer for the radiologist. *Am J Roentgenol* 2006; 186: S341–S345
- [13] Khan M, Cummings KW, Gutierrez FR et al. Contraindications and side effects of commonly used medications in coronary CT angiography. *Int J Cardiovasc Imaging* 2011; 27: 441–449
- [14] Miller RJH, Eisenberg E, Friedman J et al. Impact of heart rate on coronary computed tomographic angiography interpretability with a third-generation dual-source scanner. *Int J Cardiol* 2019; 295: 42–47
- [15] Li M, Zhang GM, Zhao JS et al. Diagnostic performance of dual-source CT coronary angiography with and without heart rate control: systematic review and meta-analysis. *Clin Radiol* 2014; 69: 163–171
- [16] Takx RA, Suchá D, Park J et al. Sublingual Nitroglycerin Administration in Coronary Computed Tomography Angiography: a Systematic Review. *Eur Radiol* 2015; 25: 3536–3542
- [17] Jiménez-Juan L, Nguyen ET, Wintersperger BJ et al. Failed heart rate control with oral metoprolol prior to coronary CT angiography: effect of additional intravenous metoprolol on heart rate, image quality and radiation dose. *Int J Cardiovasc Imaging* 2013; 29: 199–206
- [18] Kim C, Ha M, Kim W et al. Nitrates administered by spray versus tablet: comparison of coronary vasodilation on CT angiography. *Eur Radiol* 2021; 31: 515–524
- [19] Pfister M, Seiler C, Fleisch M et al. Nitrate induced coronary vasodilatation: differential effects of sub-lingual application by capsule or spray. *Heart* 1998; 80: 365–369
- [20] Sato K, Isobe S, Sugiura K et al. Optimal starting time of acquisition and feasibility of complementary administration of nitroglycerin with intravenous beta-blocker in multislice computed tomography. *J Comput Assist Tomogr* 2009; 33: 193–198
- [21] Dewey M, Hoffmann H, Hamm B. Multislice CT coronary angiography: effect of sublingual nitroglycerine on the diameter of coronary arteries. *Röfo* 2006; 178: 600–604
- [22] Akers SR, Panchal V, Ho VB. Expert Panel on Cardiac Imaging et al. ACR Appropriateness Criteria Chronic Chest Pain-High Probability of Coronary Artery Disease. *J Am Coll Radiol* 2017; 14: S71–S80
- [23] Brodoefel H, Burgstahler C, Tsiplikas I et al. Dual-source CT: effect of heart rate, heart rate variability, and calcification on image quality and diagnostic accuracy. *Radiology* 2008; 247: 346–355
- [24] Raff GL, Gallagher MJ, O'Neill WW et al. Diagnostic accuracy of noninvasive coronary angiography using 64-slice spiral computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 2005; 46: 552–557
- [25] Ochs MM, Siepen FAD, Fritz T et al. Limits of the possible: diagnostic image quality in coronary angiography with third-generation dual-source CT. *Clin Res Cardiol* 2017; 106: 485–492
- [26] Busse A, Cantré D, Beller E et al. Cardiac CT: why, when, and how. *Radiologie* 2019; 59: 1–9
- [27] Osawa K, Nakanishi R, Budoff M. Coronary Artery Calcification. *Glob Heart* 2016; 11: 287–293. doi:10.1016/j.gheart.2016.08.001
- [28] Mitchell JD, Fergstrom N, Gage BF et al. Impact of Statins on Cardiovascular Outcomes Following Coronary Artery Calcium Scoring. *Journal of the American College of Cardiology* 2018; 72: 3233–3242
- [29] Grundy SM, Stone NJ, Bailey AL et al. 2018 AHA/ACC/AACVPR/AAPA/ABC/ACPM/ADA/AGS/APhA/ASPC/NLA/PCNA Guideline on the Management of Blood Cholesterol: Executive Summary. *Journal of the American College of Cardiology* 2019; 73: 3168–3209
- [30] Muhl C, Kok M, Altintas S et al. Evaluation of individually body weight adapted contrast media injection in coronary CT-angiography. *Eur J Radiol* 2016; 85: 830–836
- [31] Scholtz JE, Ghoshhajra B. Advances in cardiac CT contrast injection and acquisition protocols. *Cardiovasc Diagn Ther* 2017; 7: 439–451
- [32] Ramos-Duran LR, Kalafut JF, Hanley M et al. Current contrast media delivery strategies for cardiac and pulmonary multidetector-row computed tomography angiography. *J Thoracic Imaging* 2010; 25: 270–277
- [33] Meyer M, Henzler T. Stellenwert der Herz-CT in der Diagnostik der koronaren Herzerkrankung: Update 2017. *Radiologe* 2017; 57: 577–590
- [34] Zhang LJ, Qi L, Wang J et al. Feasibility of prospectively ECG-triggered high-pitch coronary CT angiography with 30 mL iodinated contrast agent at 70 kVp: initial experience. *Eur Radiol* 2014; 24: 1537–1546
- [35] Meyer M, Haubenreisser H, Schoepf UJ et al. Closing in on the K edge: coronary CT angiography at 100, 80, and 70 kV-initial comparison of a second- versus a third-generation dual-source CT system. *Radiology* 2014; 273: 373–382
- [36] Gordic S, Husarik DB, Desbiolles L et al. High-pitch coronary CT angiography with third generation dual-source CT: limits of heart rate. *Int J Cardiovasc Imaging* 2014; 30. doi:10.1007/s10554-014-0445-5
- [37] Ochs MM, Andre F, Korosoglou G et al. Strengths and limitations of coronary angiography with turbo high-pitch third-generation dual-source CT. *Clin Radiol* 2017; 72: 739–744
- [38] Goetti R, Baumüller S, Feuchtner G et al. High-pitch dual-source CT angiography of the thoracic and abdominal aorta: is simultaneous coronary artery assessment possible? *Am J Roentgenol* 2010; 194: 938–944
- [39] Leschka S, Scheffel H, Desbiolles L et al. Image quality and reconstruction intervals of dual-source CT coronary angiography: recommendations for ECG-pulsing windowing. *Invest Radiol* 2007; 42: 543–549
- [40] Araoz PA, Kirsch J, Primak AN et al. Optimal image reconstruction phase at low and high heart rates in dual-source CT coronary angiography. *Int J Cardiovasc Imaging* 2009; 25: 837–845
- [41] Bamberg F, Sommer WH, Schenzle JC et al. Systolic acquisition of coronary dual-source computed tomography angiography: feasibility in an unselected patient population. *Eur Radiol* 2010; 20: 1331–1336
- [42] Secinaro A, Curione D, Mortensen KH et al. Dual-source computed tomography coronary artery imaging in children. *Pediatr Radiol* 2019; 49: 1823–1839
- [43] Booiij R, Dijkshoorn ML, van Straten M et al. Cardiovascular imaging in pediatric patients using dual source CT. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2016; 10: 13–21
- [44] Ghekiere O, Salgado R, Buls N et al. Image quality in coronary CT angiography: challenges and technical solutions. *Br J Radiol* 2017; 90: 20160567
- [45] Cury RC, Abbara S, Achenbach S et al. CAD-RADS(TM) Coronary Artery Disease – Reporting and Data System. An expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT), the American College of Radiology (ACR) and the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI). Endorsed by the American College of Cardiology. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2016; 10: 269–281