

## 1 Einleitung

Die koronare Herzerkrankung (KHK) ist die häufigste Ursache für Erkrankung und Tod in den westlichen Industrienationen. Trotz zunehmender präventiver und therapeutischer Erfolge ist die KHK weiterhin eine der häufigsten und ökonomisch bedeutsamsten Erkrankungen unserer Gesellschaft [1, 2].

Der Verdacht auf eine koronare Herzerkrankung wird in der Anamnese erhoben. Hier werden typische Beschwerden, die Angina pectoris, von atypischen Beschwerden abgegrenzt. Außerdem wird in der Anamnese die stabile Angina pectoris (Einteilung nach Canadian Cardiovascular Society, CCS in vier Schweregrade) von der instabilen Angina pectoris unterschieden. Wobei die instabile Angina pectoris, d.h. jede innerhalb von zwei Monaten neu aufgetretene oder mit zunehmenden Beschwerden assoziierte Angina, eine absolute Herzkatheterindikation ist. Die weitere Diagnostik wird über den Ischämienachweis im EKG, der Ergometrie und meist in Kombination mit der Echokardiografie geführt. Bei fehlendem Ischämienachweis wird die Diagnostik ggf. mit der Stressechokardiografie und der Myokardszintigrafie erweitert. Mit diesen Untersuchungen erhält man indirekte Zeichen der Ischämie, z.B. Repolarisationsstörungen oder Wandbewegungsstörungen unter Belastung oder in Ruhe. Abbildungen der Koronargefäße und damit ein direkter Nachweis von Veränderungen an den Herzkranzgefäßen sind aber nicht möglich. Bei Ischämienachweis erfolgt dann in der Regel die Koronarangiografie und ggf. Interventionen [3-6].

Im Jahr 2003 wurden in Deutschland 650000 Herzkatheteruntersuchungen durchgeführt. In 210000 Fällen wurde interveniert. Zwei Drittel der Untersuchungen wurden zu rein diagnostischen Zwecken initialisiert [7].

Ein Vergleich der Kosteneffizienz der häufigsten diagnostischen Verfahren bei der koronaren Herzkrankheit zeigte: Ab einer Prätestwahrscheinlichkeit von 50 % ist die Koronarangiografie das kosteneffektivste Verfahren und einer Kombination aus

Ergometrie und Echokardiografie überlegen. Ein Patient mit belastungsabhängigem retrosternalem Brustschmerz und zwei Risikofaktoren der 1. Ordnung, wie Bluthochdruck und Nikotinabusus, hat eine Prätestwahrscheinlichkeit von mehr als 50 %. In diesem Fall ist die Koronarangiografie indiziert [8].

Der Ischämienachweis ist bei Patienten mit atypischen Beschwerden schwieriger. So kann zum Beispiel in der Ergometrie nur in etwa 6 von 10 Fällen und in der Stressechokardiografie nur in etwa 7 - 8 von 10 Fällen eine Ischämie nachgewiesen werden [9, 10].

Ein weiteres Problemfeld in der Diagnostik der koronaren Herzerkrankung ist das Patientenkollektiv mit bekannter KHK und Interventionen, z.B. Drug-Eluting-Stentanlage (DES), Bypassoperation und erneuten Beschwerden aber auch in der Nachsorge von Hochrisikoeingriffen, wie einem Bifurkations- oder Hauptstammstenting. Hier kann das Mehrzeilen-CT (MSCT) einen diagnostischen Herzkatheter ersetzen. Das MSCT wäre für diese Patienten ein nebenwirkungsarmes, schnelles und vor allem nicht invasives Verfahren. Für den Kliniker bietet es einen Einblick in die Koronarmorphologie und erleichtert die Entscheidung zur initialen Angiografie oder zur Reangiografie. Auch in der Nachsorge eines akuten Myokardinfarktes durch thrombotischen Verschluss eines Koronargefäßes und Rekanalisation durch intrakoronarer Lyse, Laserintervention oder einfach Gabe von GP IIb/IIIa-Antagonisten hat die CTA das Potenzial, einen diagnostischen Herzkatheter zu ersetzen.

## 1.1 Die koronare Herzerkrankung (KHK)

### 1.1.1 Definition

Die KHK ist die Manifestation der Atherosklerose in den Herzkranzgefäßen. Die Ablagerungen in den Koronarien führen zu flusslimitierenden Stenosen und zu einem Missverhältnis zwischen Sauerstoffbedarf und -angebot im Myokard. Im fortgeschrittenen Stadium tritt die KHK infolge zunehmender Einengung der Gefäße und dadurch Minderversorgung des Myokards in 40 % der Fälle mit Angina pectoris als Erstmanifestation auf. Chronisch im Zusammenhang mit Angina pectoris beschreibt einen klinisch stabilen meist reproduzierbaren Zustand mit aber auch ohne Beschwerden. In weiteren 40 % der Fälle manifestiert sich die KHK initial als akutes Koronarsyndrom (ACS). Das akute Koronarsyndrom umfasst die instabile Angina pectoris, den Nicht-ST-Streckenhebungsinfarkt (STEMI) und den ST-Streckenhebungsinfarkt. In der Regel ist das ACS Folge einer Plaqueruptur einer stenotischen oder auch nicht stenotischen Läsion, mit nachfolgender Thrombusbildung. Neben der Plaqueruptur können intrakoronare Entzündungsvorgänge oder Vasospasmen ein Ereignis hervorrufen. Komplikationen der koronaren Herzerkrankung sind Herzrhythmusstörungen und die Herzinsuffizienz, die mit einem erhöhten Risiko des plötzlichen Herztodes (SCD) einhergehen. Der plötzliche Herztod ist in 20 % der Fälle Erstmanifestation der koronaren Herzerkrankung [5, 11].

### 1.1.2 Epidemiologie

In den Industriestaaten ist die koronare Herzerkrankung die häufigste Todesursache. Die Lebenszeitprävalenz liegt bei 30 % bei Männern und 15 % bei Frauen. Pektanginöse Beschwerden sind in 40 % der Fälle die Erstmanifestation. Bei weiteren 40 % manifestiert sich das Geschehen mit einem Myokardinfarkt. Der plötzliche

Herztod ist in 20 % der Fälle die Erstmanifestation [5].

### 1.1.3 Ätiologie

Die folgende Tabelle zeigt die Risikofaktoren auf, welche die Inzidenz einer Gefäßerkrankung erhöhen. Sind zwei Risikofaktoren der 1. Ordnung vorhanden, ist das Infarktrisiko vierfach erhöht. Bei drei Risikofaktoren der ersten Ordnung ist mit einem zehnfach erhöhten Risiko zu rechnen [5, 12-15].

Unbeeinflussbare Risikofaktoren	Beeinflussbare Risikofaktoren	
	1. Ordnung	2. Ordnung
Familiäre Disposition	Fettstoffwechselstörungen	Lipoprotein(a)-Erhöhung
Lebensalter	Bluthochdruck	Hyperfibrinogenämie
Männliches Geschlecht	Diabetes mellitus	Hyperhomocysteinämie
	Gestörte Nüchtern glukose	Antiphospholipid-AK
	Gestörte Glukosetoleranz	t-PA Defekte
	Nikotinabusus	Erhöhte Level von CRP und PAI-1
		Bewegungsmangel
		Psychosoziale Faktoren
		Isolierte $\gamma$ -GT-Erhöhung

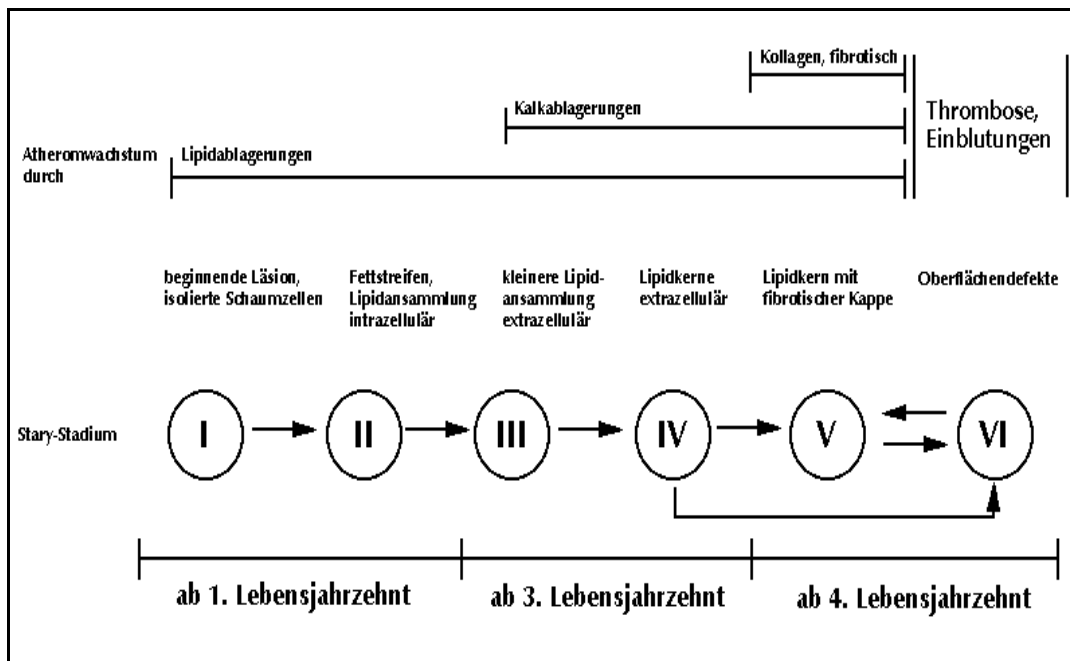
**Tabelle 1** Risikofaktoren für die Manifestation einer koronaren Herzerkrankung

Eine Kombination aus Risikofaktoren der ersten und zweiten Ordnung wird als metabolisches Syndrom definiert. Zu den klinischen Diagnosekriterien gehören ein erhöhter Bauchumfang, erhöhte Triglyceride, ein erniedrigtes HDL-C, ein erhöhter Bluthochdruck und eine erhöhte Nüchtern glukose. Sind drei dieser fünf Diagnosekriterien vorhanden, spricht man vom metabolischen Syndrom. Diese klinischen Diagnosekriterien orientieren sich an den Kriterien der WHO (1998), der European Group for Study of Insulin Resistance (1999), des Adult Treatment Panel III (2001), der American Association of Clinical Endocrinologists (2003) und der International Diabetes Foundation (2005) [16, 17]. Die Framingham-Studie konnte zeigen, dass das Neuauftreten einer kardiovaskulären Erkrankung in 25 % der Fälle mit dem metabolischen Syndrom assoziiert ist. Der Diabetes mellitus war dabei der stärkste Risikofaktor. Bei einem metabolischen Syndrom ohne Diabetes mellitus lag das 10-Jahresrisiko für eine kardiovaskuläre Erkrankung unter 20 % [16].

#### 1.1.4 Pathogenese

Die gängigste Hypothese zur Pathogenese der Atherosklerose ist die „reaction to injury“-Hypothese. Eine endotheliale Läsion oder Dysfunktion führt zum Einstrom von Lipoproteinen, vor allem dem LDL, in die Intima der Gefäße. Besonders Bluthochdruck, Nikotinabusus und Immunmechanismen begünstigen die Entstehung der Gefäßläsionen. Die gestörte Endothelfunktion erleichtert die Einwanderung von Monozyten in die Arterienwand. Diese phagozytieren die nun oxidierten Lipoproteine. Es entstehen die fettgefüllten Schaumzellen. Das Wachstum der Plaques schädigt die Gefäßwand weiter und begünstigt die Adhäsion von Thrombozyten, die verschiedene Blutplättchen assoziierte Wachstumsfaktoren sezernieren. Zusammen mit den von den Makrophagen gebildeten Interleukinen und Tumornekrosefaktoren werden nun die glatten Muskelzellen zur Proliferation angeregt. Die aktivierten Muskelzellen sezernieren Kollagene, Proteoglykane und elastische Fasern, dadurch kommt es zu

einer Fibrosierung und Hyalinisierung der Plaques. Es entstehen die sog. komplexen Läsionen. Sie enthalten eine atheromatöse Nekrose aus Zelldentritus, Lipiden, Cholesterinkristallen und einer lumenseitigen, kollagenreichen fibrösen Kappe. Des Weiteren können diese Läsionen Kalksalze enthalten. Histopathologisch werden 6 Läsionstypen unterschieden: initial lesions, fatty streaks, intermediate lesions, Atherom, Fibroatherom und die komplexe Läsion. Die komplexe Läsion entspricht dem Vollbild der Atherosklerose. Diese Ablagerungen in den Gefäßen führen zu einer Einengung des Lumens. Die Arterienwand wird starr und kann sich der Beanspruchung nicht mehr anpassen. Bei erhöhtem Sauerstoffbedarf kommt es zu Anpassungsschwierigkeiten und zu einer Einschränkung der Koronarreserve, klinisch manifest als Angina pectoris. Rupturen von atheromatösen Plaques, meist Folge ständiger inflammatorischer Prozesse, führen durch Thromben zu akuten Gefäßverschlüssen und dem Vollbild des Myokardinfarktes [18-28]. Eine weitere Einteilung der Läsionen erfolgt nach Aufbau und Ausprägung der Plaques in stenosierende und nicht stenosierende Läsionen. Die nicht stenosierenden Plaques haben eine dünnere und damit verletzlichere Kappe und manifestieren sich mit Ruptur und Thrombose. Im Gegensatz dazu sind die Erstsymptome der stenosierenden Läsionen im allgemeinen die Angina pectoris [29].



**Abbildung 1** Hypothese zur Entwicklung einer atheromatösen Plaque [18, 19, 22, 23, 30]

#### 1.1.5 Diagnostik

Die Anamnese hat eine herausragende Stellung in der Einschätzung einer relevanten KHK. Wichtig sind die genaue Feststellung der Beschwerden, der körperlichen Belastbarkeit, der Risikofaktoren sowie ein gründlicher internistischer Status. Mit einer genauen Anamnese wird z.B. bei Männern im Alter von 60 - 69 Jahren bei typischen Beschwerden eine Vortestwahrscheinlichkeit von bis zu 94 % erreicht. Eine Ergometrie verspricht bei diesen Patienten mit einer Sensitivität und Spezifität von 70 - 80 % kaum weiteren Nutzen [5, 31-33]. Die folgende Tabelle (Tabelle 2) gibt einen Überblick über weitere nichtinvasive Verfahren in der Diagnostik der koronaren Herzerkrankung [5, 10, 34-41].

	<b>Sensitivität</b> in %	<b>Spezifität</b> in %	<b>Prätestwahrscheinlichkeit</b> in %
Anamnese	-	-	76-82
Belastungs-EKG	67	84	73
Stressechokardiografie	80	84	81
Kontrastechokardiografie	86	88	86
Myokard-SPECT	88	77	85
Myokard-PET	91	82	85
EBT-Koronarangiografie	73-92	79-94	k.A.
MSCT-Koronarangiografie	82-95	76-93	86-91
MRT:			
-Stresswandbewegungsanalyse	86	86	86
-Stressperfusion	90	83	87
-MRT-Koronarangiografie	38-86	50-97	k.A.

**Tabelle 2** Aussagekraft der einzelnen Untersuchungstechniken in der KHK-Diagnostik [10]

Die Elektronenstrahltomografie (EBT) versprach eine zuverlässige Methode in der nicht invasiven Herzdiagnostik zu werden. Mit ihrer hohen zeitlichen Auflösung ließen sich Funktionsparameter im Vergleich zum MRT gleichwertig einschätzen. Außerdem ließ sich anhand eines koronaren Kalkscores das individuelle Risiko gut abschätzen [42-44]. Aufgrund der schlechten räumlichen Auflösung konnten kleinere Segmente der Herzkranzgefäße deutlich schlechter dargestellt werden. Bis zu 25 % der Koronararterien waren so nicht beurteilbar. Aktuell wird das EBT von einer



Expertengruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Weiterförderung nicht mehr empfohlen, wobei neue Entwicklungen im Bereich des EBT noch nicht berücksichtigt wurden [10, 45-49].

Die Myokardszintigrafie und andere nuklearmedizinische Verfahren eignen sich exzellent zur Risikostratifizierung. So haben Patienten mit stabiler Angina pectoris und unauffälliger 99mTC-Sestamibi-SPECT mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,6 % für das Auftreten eines schweren kardialen Ereignisses eine ausgezeichnete Prognose. Dagegen ist das Risiko bei pathologischem Befund mit einer Wahrscheinlichkeit von 7,4 % deutlich erhöht. In der Primärdiagnostik der KHK erreicht die Myokardszintigrafie mit einer Sensitivität von 88 % und einer Spezifität von 77 % Werte ähnlich der Stressechokardiografie [10, 50-53].

Die Vorteile des MRT sind der hohe Bildkontrast, die dreidimensionalen Datensätze und die fehlende Strahlenexposition. In einer Untersuchung lassen sich Wandkinetik und Myokardperfusion in Ruhe und unter pharmakologischem Stress abbilden. Im Vergleich zur Stressechokardiografie lassen sich Bewegungsstörungen aufgrund der besseren Darstellbarkeit der Endokardgrenzen besser beurteilen. Darüber hinaus lassen sich in der kontrastmittelgestützten MRT-Untersuchung vitales und avitales Muskelgewebe unterscheiden und somit kann eine exakte Infarktausdehnung bestimmt werden [54-58]. Durch die hohen Kosten, dem höheren Untersuchungsaufwand, der deutlich höheren Datenakquisitionszeit und der Verfügbarkeit wird die MRT-Untersuchung jedoch noch nicht flächendeckend zur KHK-Diagnostik eingesetzt [10].

## **1.2 Die Mehrzeilen-Computertomografie (MSCT) des Herzens**

Bereits 1953 gab es die Empfehlung fluoroskopische Bilder des Herzens in Schnittbild-Modellen zu erstellen, die eine systematische Untersuchung des Herzens ermöglichen [59]. Aber erst 1968 stellten Hounsfield und Cormack das Prinzip der CT vor und führten 1973 den ersten kommerziellen Scanner ein. Die Geräte der ersten und zweiten

Generation durchstrahlten den Körper in zwei Einzelbewegungen: Rotation und Translation. In den folgenden Generationen rotierte die Röntgenröhre. Aktuelle Scanner bestehen aus zirkulär angeordneten Detektoren und einer gegenüberliegenden Strahlenquelle. Beide rotieren um das Objekt. In der Einzelschicht-CT rollten sich die Kabel für die Hochspannungszufuhr und Messdatenableitung noch auf und wurden nach einer 360°-Umdrehung zurückgesetzt. Die Einführung des Schleifring-Systems des Spiral-CT machte die Rückführung unnötig und ermöglichte so eine dauerrotierende Röhre. Bei kontinuierlichem Tischvorschub beschreibt die Abtastbewegung eine Spirale und erzeugt so lückenlose Messdaten, die beliebige Rekonstruktionen erlauben [60]. Das erste Mehrzeilen-Spiral-CT wurde 1998 eingeführt. Dadurch war eine noch höhere zeitliche und räumliche Auflösung möglich.

Mit Hilfe der 16-Zeilen-MSCT kann das Herz innerhalb einer Atemanhaltephase abgebildet werden. Durch retrospektive EKG-getriggerte Rekonstruktionen liegen Daten zu jedem Zeitpunkt der Herzaktion vor. Durch spezielle Rekonstruktionsverfahren kann theoretisch die mögliche Belichtungszeit auf 0,063 s gesenkt werden. Dies ermöglicht neben der Beurteilung der Koronararterien, der Myokard- und Ventrikeldimensionen auch eine Beurteilung der Herzfunktionen, wie das Ejektions- und Schlagvolumen [61].

### **1.3 Die selektive Koronarangiografie**

Die selektive Koronarangiografie wurde erstmals von Werner Forssmann 1929 als Rechtsherzkatheter im Selbstversuch entwickelt und von André Coumand und Dickinson Richards als Methode zur Darstellung der Koronarien etabliert. Die selektive Koronarangiografie stellt den Goldstandard in der KHK-Diagnostik dar. Mit der hohen räumlichen Auflösung lassen sich Verengungen der Herzkranzgefäße von 20-35% des Lumens zuverlässig abbilden [62, 63].

Als invasives Verfahren bedarf der Herzkatheter einiger Voruntersuchungen und einer gründlichen Nachsorge des Patienten. Der Patient muss einen Tag vor der Untersuchung

in vollem Umfang aufgeklärt werden und sein Einverständnis schriftlich geben. Des Weiteren sollte der Patient am Tag der Untersuchung nüchtern sein. Es muss ein aktuelles Labor und ein Röntgenthorax der letzten Wochen vorliegen. Die Punktionsstelle sollte gut rasiert und gereinigt sein. Weiter wird bei agitierten Patienten eine Sedierung mit 10 mg Diazepam i.v. empfohlen. Nach der Untersuchung sollte der Patient bei liegendem Kompressionsverband für 4 h Bettruhe einhalten. Es werden ein EKG-Monitoring, eine Kontrolle der Herzenzyme und, soweit vertretbar, eine vermehrte Flüssigkeitszufuhr empfohlen. Nach Kontrolle der Punktionsstelle kann der Patient mobilisiert werden. Die Extremität sollte für weitere 12-24 h geschont werden. Im Vergleich zur MSCT sind allein die Patientenvorbereitung und die Nachbehandlung ein nicht unerheblicher Mehraufwand. Außerdem gehört der Herzkatheter, insbesondere die Cine-Angiografie, zu den radiologischen Verfahren mit der höchsten Strahlenexposition für den Patienten, Untersucher und Mitarbeiter [64].

In Zentren mit einer hohen Anzahl an Untersuchungen ist die konventionelle Koronarangiografie ein sicheres und schnelles Verfahren. Häufige, leichte Komplikationen stellen Komplikationen im Bereich der Punktionsstelle (großes Hämatom, Nachblutung, Aneurysma spurium, AV-Fistel) dar, die für den Patienten unter Umständen durch Schmerzen, einer operativen Versorgung und dadurch längerem Krankenhausaufenthalt mit hohem Leidensdruck verbunden sein können [65]. In der Regel sind diese Komplikationen aber durch lokale Maßnahmen gut therapierbar. Durch Verschlusssysteme, wie z.B. Kollagen-Anker-Systeme konnte die Kompressionszeit nach unkomplizierter Punktion der Arteria femoralis superficialis auf bis zu 4 Stunden reduziert und die Komplikationsrate im Vergleich zur manuellen Kompression und Druckverband gesenkt werden. In einzelnen Fällen ist eine Kompression gar nicht mehr erforderlich [66]. In seltenen Fällen kann es jedoch auch zu schweren Komplikationen wie Hirn-, Myokardinfarkt und Tod kommen. Die folgenden Tabellen (Tabelle 3-5) zeigen die Kontraindikationen, Risikofaktoren für schwerwiegende Ereignisse und die häufigsten Komplikationen während und nach einer Untersuchung auf.

<b>Absolute Kontraindikation</b>	<b>Relative Kontraindikation</b>
Ablehnung des Patienten	dekompenzierte Herzinsuffizienz unkontrollierte arterielle Hypertonie, systolischer Blutdruck >200 mmHg Kontrastmittelallergie Hyperthyreose Antikoagulation, Blutungsdiathese Schwere Niereninsuffizienz Arrhythmien Hypokaliämie, Anämie, Intoxikation (z.B. Digitalis) fieberhafte Erkrankungen

**Tabelle 3** Kontraindikationen für eine Herzkatheteruntersuchung [67, 68]

<b>Risikofaktoren</b>
Hohes Alter
Niedrige linksventrikuläre Ejektionsfraktion
Anzahl und Position (proximal, in der Nähe von Bifurkationen) von Stenosierungen über 70 %
IAPS
CCS-Klasse IV
Chronische Herzinsuffizienz
Akuter Myokardinfarkt oder früherer Infarkt
Dringlichkeit des Eingriffes
Kardiogener Schock
Notwendigkeit von Assisted Devices (IABP, CPS)
Klappeninsuffizienzen (höhergradige MI oder AI)
Diabetes mellitus mit vaskulären Komplikationen (z.B. pAVK, Apoplex)
Niereninsuffizienz
Reintervention
Art der Stenose (Typ C Läsion)
Geschützte oder ungeschützte Hauptstamminterventionen, Bypassinterventionen
Thrombus

**Tabelle 4** Klinische Risikofaktoren die ein höheres Risiko für schwerwiegende Ereignisse während der Hospitalisierung bedingen [63, 67]

<b>Komplikationen</b>	
<b>während der Untersuchung</b>	<b>nach der Untersuchung</b>
Mortalität (0,12-0,14 %)	Vasovagale Reaktion
Myokardinfarkt (0,7 %)	Extremitätenischämie
Arterielle Embolien (0,07 %)	Akute Blutung
Lokale Gefäßkomplikationen (0,57 %)	Aneurysma spurium
Perforation kardialer Strukturen (0,8 %)	Lokales Hämatom, Schmerzen
Vasovagale Reaktion	Thrombotischer Verschluss oder Spasmus
Allergien	Läsion des N. medianus (in Sones-
Erbrechen	Technik)
Herzrhythmusstörungen	Lungenembolie
Kardiale Dekompensation	Beinschwellung nach Kompression als
	Ausdruck einer venösen Stase oder
	Phlebothrombose

**Tabelle 5** Komplikationen der Katheteruntersuchung [64]

Die Richtlinien der einzelnen Fachgesellschaften zur Durchführung und Qualitätssicherung sind genau definiert und orientieren sich an internationalen Standards. Die häufigsten Indikationen zur invasiven Herzkatheteruntersuchung sind neben der Angiografie die Darstellung der Herzhöhlen, der Herzklappen und der herznahen Gefäße (z.B. Arteria-Pulmonalisangiografie) sowie die Darstellung und ggf. Intervention der elektrischen Leitungsbahnen des Herzens [62, 63, 68-70].

## 1.4 Vergleich der MSCT mit der invasiven Koronarangiografie

Die invasive Koronarangiografie stellt den Goldstandard zur Darstellung der Koronarien in der KHK-Diagnostik dar. Die neuesten Mehrzeilen-Geräte haben das Potential, eine diagnostische Alternative zu werden. Mit 4-Zeilen-Geräten konnten Veränderungen der Herzkranzgefäße mit Sensitivitäten und Spezifitäten zwischen 72-98 % erreicht werden. Der Anteil nicht darstellbarer Segmente war mit bis zu 42 % sehr hoch [71]. Neue 16-Zeilen-Geräte erreichen Sensitivitäten und Spezifitäten von 85-98 %. Der Anteil der nicht darstellbaren Segmente konnte somit teilweise unter 25 % gesenkt werden.

Referenz	Zeilen	Sensitivität, in %	Spezifität, in %	nicht darstellbare Segmente, in %
Niemann et al, 2001	4-MSCT	81	97	27 (-) <sup>1</sup>
Achenbach et al, 2001	4-MSCT	91	84	42 (30 %) <sup>1</sup>
Niemann et al, 2002	16-MSCT	95	86	<25 (-) <sup>1</sup>
Ropers et al, 2003	16-MSCT	92	93	12 (70 %) <sup>1</sup>

**Tabelle 6** Entwicklung der Mehrzeilen-Geräte im Vergleich zum Goldstandard, <sup>1</sup> Anteil der Patienten in denen alle Segmente darstellbar waren [38, 72-74]

## 1.5 Grenzen der 16-Zeilentechnik

Die Koronararterien verlaufen epikardial. Abhängig von der Lage und der Herzfrequenz bewegen sich dadurch die Herzkranzgefäße unterschiedlich schnell. Es wurden mittlere Geschwindigkeiten von 50 mm/s ermittelt [75]. Bei einer Belichtungszeit von 0,01 s ergibt sich eine theoretische Bewegung des Gefäßes mit 0,5 mm. Das bedeutet, dass sich proximale Segmente mit einem mittleren Durchmesser von 2,5 mm in dieser Zeit um 20 % ihres mittleren Durchmessers bewegen. Bei aktuellen Zeitauflösungen von 0,063 s ist

dieses Verhältnis noch größer. Daraus resultiert eine Unschärfe, die die Bildqualität mindern kann. Durch die Einführung von kleineren Detektorelementen wird eine örtliche Auflösung von 0,35 mm in der x-y-Ebene erreicht. Durch Interpolation und überlappenden Pitch bei kleinen Scanschichten werden vergleichbare Werte auch in der z-Richtung erzielt. Dadurch werden auch distale Segmente der Koronarien darstellbar [76]. Starke Kalzifizierungen der Koronararterien führen weiterhin zu vermehrt positiven Ergebnissen. Eine fehlerhafte EKG-Triggerung bei Herzrhythmusstörungen ist neben hohen Herzfrequenzen auch weiterhin eine der Hauptursachen für eine schlechte Bildqualität in der MSCT.

Bei einer hohen Prätestwahrscheinlichkeit für eine signifikante KHK oder Progression einer bekannten KHK ist die Koronarangiografie die Methode der Wahl, da sie neben einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung gleichzeitig auch die Möglichkeit zur Intervention bietet. Außerdem ermöglicht die Herzkatheteruntersuchung neben der Angiografie auch invasiv gemessene hämodynamische Werte, die zur Einschätzung von begleitenden Herzerkrankungen, wie z.B. Herzklappenerkrankungen, dienen. Die Angiografie bietet darüber hinaus anhand des Flusses im Gefäß und dem Anfärbeverhalten des Myokards weitere Dimensionen zur Einschätzung der Dignität von Stenosierungen. In Zentren mit einer hohen Anzahl an Untersuchungen ist die Herzkatheteruntersuchung auch ein schnelles und komplikationsarmes Verfahren [62]. Bei Patienten mit atypischen Beschwerden oder geringer Prätestwahrscheinlichkeit oder mit eingeschränkter Belastbarkeit bei den nicht invasiven Standardverfahren, z.B. der Ergometrie, könnte sich die MSCT zu einer Alternative entwickeln; bietet sie doch gegenüber den anderen nicht invasiven Standardverfahren einen direkten Einblick in die Koronarmorphologie. Außerdem wäre diese Untersuchung bei Patienten mit erhöhtem Risiko für Komplikationen eine Alternative zur diagnostischen Angiografie. Zu diesem Patientenkollektiv gehören Patienten mit erhöhtem medizinischem Risiko (z.B. Komorbiditäten, hohes Alter), mit erhöhtem kardialen Risiko (z.B. bekannte koronare Dreifgefäßerkrankung, Herzinsuffizienz, pulmonaler Hypertonie) oder erhöhtem vaskulären



Risiko (z.B. pAVK, Antikoagulation, Z.n. Schlaganfall) [62]. Die MSCT bietet die Möglichkeit zur Berechnung des Kalkscores und damit zur Abschätzung des kardiovaskulären Risikos. Außerdem ermöglicht sie einen Einblick in extrakardiale Strukturen (z.B. Ausschluss einer Lungenarterienembolie oder Aortendissektion bei atypischen Thoraxschmerzen). Des Weiteren könnte diese Untersuchung als nicht invasives Verfahren bei Patienten mit Vorbehalten gegenüber einem Herzkatheter eine Alternative sein.

<b>MSCT</b>	<b>Koronarangiografie</b>
Nicht invasives Verfahren	Invasives Verfahren mit Möglichkeit der Intervention
Hohe räumliche Auflösung	Hohe räumliche Auflösung
Geringere zeitliche Auflösung im Vergleich zur Angiografie	Hohe zeitliche Auflösung
120 ml Kontrastmittel (konstant nach Protokoll)	Ab 80 ml Kontrastmittel bei unkomplizierter Angiografie
Strahlenexposition (6,0 – 14,0 mSv, bei strahlungsarmen Protokollen ist eine Strahlenexposition von 1,9 mSv möglich)	Strahlenexposition (6,0 mSv)
Distale und verkalkte Gefäßabschnitte sowie Stents und Bypassanastomosen eingeschränkt beurteilbar	Gute Bildqualität auch distaler und verkalkter Segmente, Stents und Bypassanastomosen gut einsehbar
Eingeschränkte Bildqualität bei Herzrhythmusstörungen und hohen	Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung gute Bildqualität auch bei hohen

Herzfrequenzen	Herzfrequenzen und Arrhythmien
Punktion eines venösen Gefäßes mit geringerer Wahrscheinlichkeit für postoperative Komplikationen	Punktion eines arteriellen Gefäßes mit erhöhter Wahrscheinlichkeit für postoperative Komplikationen (z.B. Nachblutung, AV-Fistel, Aneurysma)
Im Vergleich zur Angiografie geringere Wahrscheinlichkeit für schwere Komplikationen (z.B. Embolie, Herzrhythmusstörungen, Herzinfarkt, Perforation Herzkammer, hämodynamische Komplikationen)	Im Vergleich zur MSCTA höhere Inzidenz schwerer Ereignisse (RR: 1,7 %)

**Tabelle 7** Vergleich von MSCTA mit der konventionellen Angiografie der Herzkranzgefäße [10, 62-64, 77-79]