



DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NUKLEARMEDIZIN e.V.

DGN-Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie)

Myokard-Perfusions-Szintigraphie

Stand: 4/2012 – AWMF-Registernummer 031-006

F. Bengel

Klinik für Nuklearmedizin, Medizinische Hochschule Hannover

W. Burchert

Institut für Radiologie, Nuklearmedizin und Molekulare Bildgebung,
Herz- und Diabeteszentrum NRW, Bad Oeynhausen

M. Hacker

Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Ludwig-Maximilian's-Universität München

O. Lindner

Institut für Radiologie, Nuklearmedizin und Molekulare Bildgebung,
Herz- und Diabeteszentrum NRW, Bad Oeynhausen

W. Schäfer

Klinik für Nuklearmedizin, Kliniken Maria Hilf GmbH, Mönchengladbach

M. Schäfers

European Institute of Molecular Imaging, Westfälische Wilhelms Universität Münster

M. Schmidt

Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Köln

O. Schober

Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Münster

M. Schwaiger

Nuklearmedizinische Klinik, Klinikum rechts der Isar, Technische Universität München

J. vom Dahl

Klinik für Kardiologie, Kliniken Maria Hilf GmbH, Mönchengladbach

R. Zimmermann

Medizinische Klinik, Klinikum Pforzheim GmbH

Federführender Autor:

O. Lindner

Institut für Radiologie, Nuklearmedizin und Molekulare Bildgebung,
Herz- und Diabeteszentrum NRW, Bad Oeynhausen

Herausgeber/Korrespondenzadresse:

Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V.

Nikolaistraße 29

37073 Göttingen

Inhalt und Gliederung

1 Zielsetzung

2 Hintergrundinformationen und Definitionen

2.1 Beschreibung des Verfahrens

2.1.1 Grundlagen

2.1.2 Gated SPECT

2.1.3 Absorption und Absorptionskorrektur

2.1.4 Diagnostische Genauigkeit

2.1.5 Bewertung der Prognose und therapeutische Entscheidungen

2.1.6 Bewertung eines „falsch-positiven Myokard-Perfusions-Szintigramms“

2.1.7 Vitalitätsdiagnostik

3 Indikationen

3.1 Indikationen nach der Nationalen Versorgungsleitlinie „Chronische KHK“

3.2 Indikationskatalog „Appropriate Use“

3.2.1 Indikationen bei der KHK Diagnostik symptomatischer Patienten

3.2.2 Indikationen bei der KHK-Diagnostik und Risikobeurteilung asymptomatischer Patienten

3.2.3 Indikationen zur Risikobeurteilung bei Vordiagnostik

3.2.4 Indikationen vor nicht-kardialer OP

3.2.5 Indikationen nach akutem Koronarsyndrom

3.2.6 Indikationen zur Risikobeurteilung nach Revaskularisation

3.2.7 Indikation zur Vitalitätsdiagnostik

4 Untersuchungsmethode, Vorgehensweise, Verfahren

4.1 Vorbereitung

4.1.1 Aufklärung und Patienteninformation

4.1.2 Patientenvorbereitung

4.2 Durchführung der Untersuchung

4.2.1 Vorbereitende Maßnahmen

4.2.2 Belastungsverfahren

4.2.2.1 Ergometrie

4.2.2.2 Pharmakologische Belastungsverfahren

4.2.2.2.1 Vasodilatoren

4.2.2.2.1.1 Adenosin

4.2.2.2.1.2 Dipyridamol

4.2.2.2.1.3 Regadenoson

4.2.2.2.2 Katecholamine (Dobutamin)

- 4.3 Vorsichtsmaßnahmen
- 4.4 Radiopharmaka
 - 4.4.1 Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka (Sestamibi und Tetrofosmin)
 - 4.4.2 Thallium-201
 - 4.4.3 Strahlenexposition
- 4.5 Datenakquisition
 - 4.5.1 Protokolle für Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka
 - 4.5.2 Protokolle für Tl-201
 - 4.5.3 Hybridprotokolle
 - 4.5.4 Kameraakquisition
 - 4.5.4.1 Qualitätskontrolle von Gammakameras und Hybridgeräten
 - 4.5.4.2 Patientenlagerung
 - 4.5.4.3 Kameraorbit
 - 4.5.4.4 Zirkuläre und nicht-zirkuläre Orbits
 - 4.5.4.5 Pixel-Größe und Matrix
 - 4.5.4.6 EKG-Triggerung (gated SPECT)
 - 4.5.4.7 Step-and-Shoot- vs. Continuous-Mode
 - 4.5.4.8 Anzahl der Projektionen
 - 4.5.4.9 Aufnahmezeit pro Projektion, Dauer der Aufnahme
- 4.6 Datenauswertung
 - 4.6.1 Begutachtung der planaren Projektionsdaten
 - 4.6.2 Rekonstruktion (Gefilterte Rückprojektion und iterative Rekonstruktion)
 - 4.6.3 Reorientierung
 - 4.6.4 Gated SPECT
 - 4.6.4.1 Qualitätskontrolle
 - 4.6.4.2 Auswertung
 - 4.6.5 Schwächungskorrektur
 - 4.6.5.1 Qualitätskontrolle
 - 4.6.5.2 Artefakte
- 4.7 Befundung und Dokumentation
 - 4.7.1 Tomographische Darstellung
 - 4.7.2 Polartomogramm
 - 4.7.3 Befundung der Belastungs- und Ruheaufnahmen
 - 4.7.4 Quantitative Bewertung der Perfusion
 - 4.7.5 Nebenbefunde
 - 4.7.5.1 Transitorische ischämische Dilatation

4.7.5.2 Lungen-Herz-Quotient

4.7.6 Gated SPECT: LVEF und Volumina

4.7.7 Befundbericht

4.8 Qualitätssicherung und Fehlerquellen

5 Literaturverzeichnis

1 Zielsetzung

Es ist Ziel dieser Leitlinie, den gegenwärtigen Erkenntnisstand der Myokard-Perfusions-Szintigraphie darzulegen, den Anwender bei der Indikationsstellung, Durchführung, Auswertung, Interpretation und Dokumentation zu unterstützen und die Standards für die Anwendung und den Einsatz der Myokard-Perfusions-Szintigraphie zu beschreiben. Darüber hinaus soll zuweisenden Ärzten bei der Indikationsstellung und der Interpretation des Untersuchungsergebnisses Hilfestellung gegeben werden. Diese Leitlinie ersetzt die Leitlinie zur Myokard-Perfusions-Szintigraphie aus dem Jahr 1999 (52). Die Radionuklid-Ventrikulographie (RNV) wird in dieser Leitlinie nicht berücksichtigt.

2 Hintergrundinformationen und Definitionen

2.1 Beschreibung des Verfahrens

2.1.1 Grundlagen

Die Myokard-Perfusions-Szintigraphie ist ein nicht-invasives Untersuchungsverfahren, das die Durchblutung des Myokards bildlich darstellt. Als funktionelles bildgebendes Verfahren unterscheidet es sich daher grundlegend von der morphologisch basierten Bildgebung wie der Koronarangiographie oder der koronaren Angio-CT, deren Zielstruktur die Koronararterie ist. Das Ergebnis der Myokard-Perfusions-Szintigraphie, genauer gesagt Ausmaß und Ausdehnung von szintigraphisch nachweisbaren Perfusionsstörungen und Vernarbungen im Myokard, ist von hoher prognostischer Relevanz und für die Therapieplanung (medikamentöse Therapie vs. Revaskularisation) bedeutsam.

Das Haupteinsatzgebiet der Myokard-Perfusions-Szintigraphie ist die koronare Herzerkrankung (KHK). Die KHK resultiert aus einer Atherosklerose der Herzkranzarterien und manifestiert sich klinisch in einer chronisch stabilen Ausprägung als Angina pectoris oder Ischämie-Äquivalent (klinische Symptomatik, die auf eine stenosierende KHK hinweisen kann) oder als akutes Koronarsyndrom. Die KHK kann auch asymptomatisch verlaufen, häufig im Zusammenhang mit einem Diabetes mellitus.

Die Bildgebung erfolgt in 3-dimensionaler Schnittbildtechnik als SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) mit einer rotierenden Ein- oder bevorzugt mit einer Mehrkopfgammakamera oder als PET (Positron Emission Tomography). Die planare Myokard-Perfusions-Szintigraphie wurde von der Tomographie abgelöst und kommt heute nur noch in Ausnahmefällen zur Anwendung.

Hybridgeräte (SPECT-CT oder PET-CT) erlauben die CT-Komponente, als Low-dose-CT durchgeführt, für die Schwächungskorrektur der SPECT-Aufnahme einzusetzen. Geräte mit Mehrschicht-CT (64-Zeiler) ermöglichen neben der Perfusionsdarstellung mit der SPECT die Darstellung der Koronararterien mit einer CT-Angiographie und durch die Fusion beider Komponenten die genaue Zuordnung einer Perfusionsstörung zu einer Koronarstenose und umgekehrt. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Anzahl solcher Geräte im deutschsprachigen Raum wird diese Technik zukünftig an Bedeutung gewinnen.

Die Myokard-Perfusions-Szintigraphie erfolgt nach i.v. Injektion eines Radiopharmakons, das perfusionsabhängig von den Kardiomyozyten aufgenommen wird. Zur Anwendung kommen die Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka Sestamibi und Tetrofosmin und seltener Tl-201. Letzteres hat günstigere biokinetische Eigenschaften als die Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka, ist aber mit einer deutlich höheren Strahlenexposition verbunden und daher nur noch eingeschränkt zu empfehlen.

Um eine Koronarstenose zu diagnostizieren oder die Auswirkungen einer bekannten Koronarstenose auf die myokardiale Perfusion nachzuweisen, werden nach Injektion eines geeigneten Radiopharmakons unter körperlicher Belastung (Fahrradergometrie oder Laufband) und im Ruhezustand Aufnahmen erstellt. Sofern eine adäquate ergometrische Belastung nicht möglich ist (Trainingsmangel, schmerzhafte Bewegungseinschränkungen, mangelnde Kooperation des Patienten), kann alternativ die Perfusionssteigerung

medikamentös mit einem Vasodilatator oder mit dem Sympathomimetikum Dobutamin erfolgen.

Bei Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka erfolgt die Akquisition 15 bis 60 min nach der Belastungs- bzw. der Ruheinjektion. Bei der TI-201 Myokard-Szintigraphie wird die SPECT unmittelbar nach der Belastungsphase und 3 bis 4 h nach der Injektion aufgenommen. Belastungstest und Kameraaufnahme erfolgen bei der Myokard-Szintigraphie unabhängig vom verwendeten Radiopharmakon immer zeitlich getrennt.

Normal perfundiertes Myokard zeigt sowohl unter Belastung als auch im Ruhezustand eine gleichmäßige Aufnahme des Radiopharmakons. Unter Belastung führen hämodynamisch relevante Koronarstenosen zu regionalen Perfusionsstörungen mit einer verminderten Aufnahme des Radiopharmakons im nachgeschalteten Myokard. Im Ruhezustand findet sich in diesen Arealen eine normale oder nur gering verminderte Anreicherung des Radiopharmakons. Zu einer Verminderung der Perfusion im Ruhezustand kommt es erst bei hochgradigen Koronarstenosen > 90 %.

Die Konstellation einer verminderten Anreicherung unter Belastung und einer normalen Anreicherung in Ruhe wird als *reversible Perfusionsstörung* beschrieben und entspricht einer *belastungsinduzierten Ischämie*. Bei einem koronaren Steal kann auch ein benachbartes Areal betroffen sein. Der Ischämie gegenüber steht die *nicht-reversible Perfusionsstörung* (verminderte Anreicherung unter Belastung und in Ruhe), deren pathologisches Korrelat eine *Vernarbung* ist.

Ein Sonderfall liegt vor, wenn das versorgende Gefäß hochgradig stenosierte (> 90 %) oder verschlossen ist und bereits in Ruhe eine Minderperfusion vorliegt, ohne dass es zu einer Vernarbung gekommen ist. Dann kann als Folge des herabgesetzten Blutflusses eine adaptive Minderung der kontraktile Funktion eintreten (endogene Protektion). Dieser Zustand wird als *hibernierendes Myokard* bezeichnet.

Die normale Perfusion, die reversible und die nicht-reversible Perfusionsstörung stellen die Eckpunkte dar, zwischen denen das Ergebnis eines Myokard-Perfusions-Szintigramms liegt.

Da sowohl die Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka als auch TI-201 abhängig vom Funktionszustand der Kardiomyozyten intrazellulär akkumulieren, sind die Substanzen zur Differenzierung zwischen einer Narbe und vitalem Myokard einsetzbar. Hierfür gibt es spezielle Untersuchungsprotokolle (s. 2.1.7).

2.1.2 Gated SPECT

Standard der Myokard-Perfusions-Szintigraphie ist die EKG-getriggerte SPECT-Akquisition (sogenannte „gated SPECT“). Mit der gated SPECT wird ein repräsentativer Herzzyklus über die Aufnahmezeit erzeugt. Hieran werden globale und regionale linksventrikuläre Funktionsparameter (enddiastolisches und endsystolisches Volumen, Ejektionsfraktion (LVEF), regionale Wanddickenzunahme und Wandbewegung) ermittelt.

Es wird empfohlen, sowohl die Belastungs- als auch die Ruheaufnahme als gated SPECT durchzuführen. Sofern die LVEF der Belastungsaufnahme, welche 15 bis 60 min nach der eigentlichen Belastung akquiriert wird, > 5 % unter der LVEF der Ruheaufnahme liegt, deutet das auf ein *myokardiales Stunning* (passagere ischämieinduzierte ventrikuläre Funktionsstörung) hin. Ein myokardiales Stunning kann auch längere Zeit nach der Belastung nachweisbar sein und sowohl bei ergometrischen als auch bei pharmakologischen Belastungen auftreten (20). Das Ausmaß des LVEF-Abfalls korreliert mit der Schwere der Ischämie. Je früher die Aufnahmen nach der Belastung durchgeführt werden, desto größer ist der ischämieinduzierte Abfall der LVEF (17, 41). Daher sollte das Zeitintervall zwischen Injektion und Post-Belastungsaufnahme dokumentiert werden. Bei koronaren Mehrgefäß-erkrankungen mit globaler Minderperfusion und nur geringen regionalen Perfusionsstörungen im Szintigramm kann der Abfall der LVEF eine richtungsweisende Zusatz-

information liefern (74). Darüber hinaus liefern die mit der gated SPECT ermittelten Funktionsparameter Informationen zur Risiko- und Prognoseabschätzung (s. 2.1.5).

Weiterhin können mit der gated SPECT Schwächungsartefakte in den Perfusionsaufnahmen erkannt werden, wodurch sich die Spezifität der Myokard-Perfusions-SPECT verbessert. Myokardwandabschnitte mit einer absorptionsbedingten Minderbelegung weisen eine normale Wandbewegung und Wandverdickung auf, Abschnitte mit einer Minderbelegung infolge einer Vernarbung eine verminderte oder fehlende Wandbewegung und Wandverdickung (18). Die Ruheaufnahme ist für diese Differenzierung ausschlaggebend, denn in den Post-Stressaufnahmen kann eine Minderbelegung mit erhaltener Wandbewegung durch eine Absorption hervorgerufen sein, aber auch ischämischem Myokard entsprechen, dessen Funktion sich nach der Belastung bereits wieder vollständig erholt hat (20, 50).

2.1.3 Absorption und Absorptionskorrektur

Die Photonenstrahlung aus dem linksventrikulären Myokard wird durch das umliegende Gewebe je nach Emissionsort unterschiedlich geschwächt (Compton-Streuung oder Absorption). In der Bildgebung resultieren hieraus „scheinbare“ Aktivitätsminderbelegungen, die die diagnostische Genauigkeit vermindern. Auf Grund der geringeren Photonenenergie sind die Schwächungsphänomene bei Tl-201 ausgeprägter als bei Tc-99m.

Durch Aufnahmen in Bauch- und Rückenlage können Schwächungsartefakte detektiert werden. Allerdings verdoppelt sich die Untersuchungsdauer (80). Mit der gated SPECT können ebenfalls Schwächungsartefakte bis zu einem gewissen Grad erkannt werden (18) (s. 2.1.2).

Das Problem der Absorptionsartefakte ist nur durch eine individuell gemessene Schwächungskorrektur grundlegend lösbar. Hierbei wird die Strahlenabsorption durch das Körpergewebe mit radioaktiven Transmissionsquellen oder mit einer CT (Hybrid-Systeme) ermittelt. Mit den errechneten regionalen Absorptionskoeffizienten erfolgt dann die Korrektur der Emissionsaufnahmen. Die Strahlenexposition für eine Transmissionsmessung liegt bei CT-basierten Systemen bei 0,4 bis 0,9 mSv, bei Systemen mit Transmissionsquellen deutlich niedriger (69, 73). Eine Schwächungskorrektur erhöht die Spezifität und die Trennschärfe der Myokard-Perfusions-SPECT (44).

2.1.4 Diagnostische Genauigkeit

Die diagnostische Genauigkeit der Myokard-Perfusions-SPECT bei der koronaren Herzkrankheit wird allgemein als Fähigkeit beschrieben, signifikante Stenosen richtig nachzuweisen oder richtig auszuschließen. Als Maßzahlen werden üblicherweise Sensitivität und Spezifität gegenüber dem Referenzverfahren Koronarangiographie angegeben.

Die Koronarangiographie selbst ist als Referenzverfahren allerdings nicht uneingeschränkt geeignet, da mikrovaskuläre Gefäßerkrankungen und endotheliale Dysfunktionen, welche die Perfusion beeinträchtigen können und sich dann szintigraphisch darstellen, nicht erfasst werden. Im Genauigkeitsvergleich mit der Myokard-Perfusions-SPECT werden koronarangiographische Stenosen je nach Studiendesign bereits ab 50 % oder erst ab 75 % als hämodynamisch signifikant gewertet. Entsprechend ändern sich die ermittelten „Gütekriterien“ Sensitivität und Spezifität der Myokard-Perfusions-SPECT.

Die Sensitivität und Spezifität der Myokard-Perfusions-SPECT für den Nachweis einer $\geq 50\%$ igen Stenose ist in Tabelle 1 aufgeführt. Mit der gated SPECT und/oder einer Schwächungskorrektur erhöht sich die Spezifität des Verfahrens. Durch die gated SPECT ergibt sich eine Zunahme der Spezifität um 8 %, mit der Schwächungskorrektur um 17 % und mit der Kombination um 22 %. Demzufolge kann eine Spezifität von 80 bis 85 % erreicht werden (5, 44, 83).

	Sensitivität	Spezifität
Ergometrische Belastung (33 Studien, 3425 Patienten)	87 %	73 %
Pharmakologische Belastung (17 Studien, 1963 Patienten)	89 %	75 %

Tabelle 1: Sensitivität und Spezifität der Myokard-Perfusions-SPECT (ohne gated SPECT oder Schwächungskorrektur) zum Nachweis einer $\geq 50\%$ -igen Koronarstenose (51).

Die Normalcy Rate (Anteil Patienten mit KHK-Wahrscheinlichkeit $< 5\%$ und normalem Befund) der Myokard-Perfusions-SPECT beläuft sich auf 91 % (12 Studien, 721 Patienten) (51).

Bei der diffusen, hochgradigen 3-Gefäß-KHK mit global verminderter Perfusion ist die Genauigkeit der Myokard-Perfusions-SPECT eingeschränkt. In diesem KHK-Stadium fehlt das normal perfundierte Referenzareal, so dass bei balancierten globalen Ischämien das Ausmaß der Ischämie unterschätzt werden kann. Allerdings verbessert die Hinzunahme der Ruhe- und Post-Stress-LVEF die Erkennung einer Mehr-Gefäß-Erkrankung substantiell (74). Da die kardiale Perfusions-PET eine quantitative Perfusionsmessung erlaubt, ist sie gerade bei der 3-Gefäß-KHK oder diffusen Gefäßveränderungen genauer als die Perfusions-SPECT.

Sensitivität und Spezifität sind als alleinige Deskriptoren der Myokard-Perfusions-Szintigraphie nur bedingt geeignet. Bei vielen publizierten Studien liegt ein Referral Bias vor, der zu einer Überschätzung der Sensitivität und einer Unterschätzung der Spezifität führt. Der Grund liegt darin, dass bei einem pathologischen Myokard-Perfusions-Szintigramm häufiger eine Koronarangiographie durchgeführt wird als bei einem normalen Ergebnis.

2.1.5 Bewertung der Prognose und therapeutische Entscheidungen

Die Myokard-Perfusions-SPECT liefert relevante prognostische Informationen. Bei einem unauffälligen Untersuchungsergebnis ist das Risiko für die kardialen Ereignisse Herztod oder nicht-tödlicher Infarkt mit dem der Normalbevölkerung vergleichbar. Bei einem pathologischen Resultat liegt das Risiko deutlich höher (0,85 vs. 5,9 %/Jahr, 69.655 Patienten, 39 Studien) (77). Bestimmte Untergruppen, wie zum Beispiel Diabetiker, haben sowohl bei einem normalen als auch bei einem pathologischen Befund ein höheres Risiko.

Die kardiale Mortalität und das Infarktrisiko steigen mit dem Ausmaß belastungsinduzierter Perfusionsstörungen (34).

Die LVEF (aus der gated SPECT) liefert unabhängig von der Perfusion einen weiteren Informationsbaustein zur Risiko- und Prognoseeinschätzung. Das Mortalitätsrisiko steigt mit sinkender LVEF und gleichzeitig mit der Ischämiebelastung (36).

Über das gesamte Ausprägungsspektrum der KHK, d. h. vom Verdacht auf eine KHK bis zur Mehrgefäßerkrankung, können mit der Myokard-Perfusions-SPECT Niedrig-Risiko- und Hoch-Risiko-Patienten identifiziert werden (77).

Das Ausmaß der Ischämie kann für therapeutische Entscheidungsprozesse herangezogen werden. Bei einer Ischämiebelastung < 10 bis 12% , anhand des Summed Difference Score (SDS, s. 4.7.4) ermittelt, ist die kardiale Sterblichkeit bei einer medikamentösen Therapie geringer als bei einer Intervention. Oberhalb dieses Schwellenwertes, d.h. $SDS > 10$ bis 12% , kehrt sich dieses Verhältnis um. Aus dem Ergebnis der Myokard-Perfusions-SPECT ist auf der Basis der Risiko- und Prognosedaten orientierend das weitere diagnostische und therapeutische Konzept in Tabelle 2 ableitbar. Zu betonen ist, dass für jeden Patienten, von der klinischen Situation und der Symptomatik abhängig, individuelle Entscheidungen zu treffen sind.

Ergebnis	Risiko	Behandlung
Normal	Kein erhöhtes Risiko (Risiko entspricht der Normalbevölkerung)	Risikofaktormodifikation
Gering pathologisch	Niedriges Mortalitätsrisiko, mittleres Herzinfarktrisiko	Risikofaktormodifikation, medikamentöse Behandlung, Koronarangiographie nur bei Symptomen
Mäßig bis deutlich pathologisch	Mittleres bis hohes Risiko eines Herzinfarktes und eines Herztodes	Koronarangiographie, Revaskularisation, Risikofaktormodifikation

Tabelle 2: Risikobeurteilung und therapeutisches Konzept anhand des Ergebnisses der Myokard-Perfusions-SPECT (33).

2.1.6 Bewertung eines „falsch-positiven“ Myokard-Perfusions-Szintigramms

In der Diagnostik fallen immer wieder „falsch-positive“ Myokard-Perfusions-SPECT Ergebnisse auf, bei denen sich kein Korrelat in der Koronarangiographie findet. Ein derartiges Resultat ist (ein technisches Artefakt ausgeschlossen) nicht fehlerhaft, sondern diagnostisch relevant. Wiederholt konnte nachgewiesen werden, dass positive Befunde auch bei Ausschluss einer höhergradigen Koronarstenose in der Angiographie auf eine mikrovaskuläre Erkrankung oder eine endotheliale Dysfunktion hinweisen und mit einer schlechteren Prognose als Normalbefunde einhergehen (2, 92).

2.1.7 Vitalitätsdiagnostik

Vor Koronarinterventionen (PTCA oder Bypass) ist die Vitalitätsdiagnostik von kontraktionsgestörtem Myokard essentiell, da nur vitales Myokard potentiell erholungsfähig ist. Findet sich vitales Myokard, das technisch revaskularisierbar ist, kann die Mortalität durch eine Revaskularisation im Vergleich zur medikamentösen Therapie deutlich gesenkt werden. Somit liegt der Hauptindikationsbereich für die Vitalitätsdiagnostik bei Patienten mit stabiler chronischer KHK, myokardialer Dysfunktion und klinischen Zeichen der Herzinsuffizienz (12).

Ein hohes Erholungspotential nach einer Revaskularisation besitzen Myokardsegmente mit > 55 % der maximalen Radiopharmakon-Aufnahme und noch nachweisbarer Wandbewegung (3). Sind ≤ 20 % des Ventrikels vernarbt, ist die Mortalitätsrate nach einer Revaskularisation niedriger als bei einer alleinigen medikamentösen Therapie (37).

Für die Vitalitätsdiagnostik – als Myokard-Perfusions-SPECT durchgeführt – sollte eine optimale Ruhe-Perfusions-Situation vorliegen, d. h. Injektion unter kompletter antianginöser Medikation, ggf. ergänzt durch eine vorherige (5 bis 10 min) sublinguale Nitratgabe (400 bis 800 µg, 2 Sprühstöße) (1). Für die TI-201 Myokard-SPECT mit Injektion in Ruhe und Redistributionsaufnahmen nach 3 bis 4 h, ggf. nach 24 h, ergibt sich trotz der hohen Strahlenexposition bei dieser speziellen Fragestellung ebenfalls eine Indikation.

Die F-18-FDG PET zeigt bei der Vitalitätsdiagnostik eine höhere Genauigkeit als die Myokard-Perfusions-SPECT und ist besonders bei Patienten mit schlechter LVEF (< 30 bis 40 %) - sofern verfügbar - als nuklearkardiologisches Verfahren heranzuziehen (6). In Kombination mit einer Ruheperfusions-SPECT oder –PET gelingt so auch in Segmenten mit einer Ruheperfusionsstörung durch eine hochgradige Stenose aber nachgeschaltet vitalem Myokard (hibernierendes Myokard) ein Vitalitätsnachweis. Es zeigt sich bei dieser Konstellation ein sog. Perfusions-Vitalitäts-Mismatch.

Alternative Verfahren stellen die low-dose Dobutamin Stress-Echokardiographie und die MRT dar.

3 Indikationen

3.1 Indikationen nach der Nationalen Versorgungsleitlinie „Chronische KHK“

Die Indikation für eine KHK-Diagnostik mit einem bildgebenden Verfahren und damit für die Myokard-Perfusions-SPECT ergibt sich nach der der Nationalen Versorgungsleitlinie (NVL) „Chronische KHK“ (12) in der Vorfelddiagnostik nach dem Schema in Abb. 1 bei:

Patienten mit mittlerer Vortestwahrscheinlichkeit (10 bis 90 %, Tabelle 3) und

- nicht ausreichender Belastbarkeit (Herzfrequenz $< 0,85 \times (220 - \text{Alter})$) oder fehlender Belastbarkeit,
- einem fraglichem Befund im Belastungs-EKG,
- einem Ruhe-EKG mit Zeichen der linksventrikulären Hypertrophie, Digitalis-Medikation mit ST-Senkungen > 1 mm, WPW-Syndrom, ST-Senkungen > 1 mm,
- oder einem Ruhe-EKG mit Linksschenkelblock oder Schrittmacher-Stimulation.

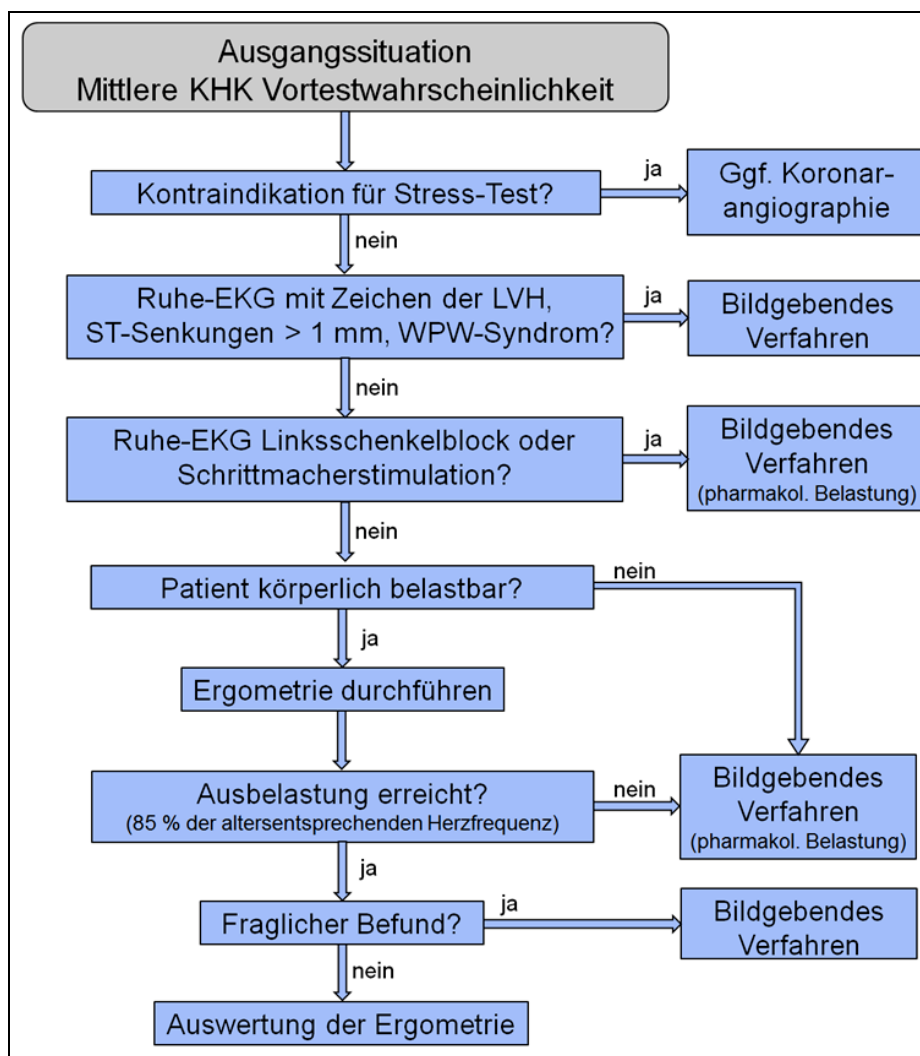


Abb. 1: Entscheidungspfad für den Einsatz bildgebender Verfahren bei der Diagnostik der chronischen KHK (12)

Alter (Jahre)	Nichtanginöse Brustschmerzen		Atypische Angina		Typische Angina	
	Männer	Frauen	Männer	Frauen	Männer	Frauen
45	9-47 %	2-22 %	21-70 %	5-43 %	51-92 %	20-79 %
55	23-59 %	4-25 %	45-79 %	10-47 %	80-95 %	38-82 %
65	49-69 %	9-29 %	71-86 %	20-51 %	93-97 %	56-84 %

Tabelle 3: Vortestwahrscheinlichkeiten für eine stenosierende KHK nach Alter, Symptomen und Risikofaktoren (12).

Erläuterungen zur Tabelle 3: Die erste Zahl steht für die Vortestwahrscheinlichkeit von Patienten ohne kardiovaskuläre Risikofaktoren, die zweite Zahl bei Vorliegen mit Risikofaktoren (Diabetes mellitus, Hyperlipoproteinämie, Nikotinkonsum).

Die Angaben gelten für Patienten mit unauffälligem Ruhe-EKG. Bei ST-Streckenveränderungen oder Q-Zacken ist die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen einer KHK höher.

Graduierungen:

sehr niedrig: < 5 % niedrig: 5-10 % mittel: 10-90 % hoch: > 90 %.

Kriterien der typischen Angina pectoris:

1. Retrosternale Schmerzen oder Beschwerden, durch
2. körperliche Belastung oder emotionalen Stress provozierbar.
3. Besserung der Symptome durch Ruhe und/oder Nitrat.

Atypische Angina pectoris:

Zwei der Kriterien der typischen Angina pectoris treffen zu.

Nichtanginöse Brustschmerzen:

Nur ein Kriterium der typischen Angina pectoris trifft zu.

Bei bekannter KHK ergeben sich ähnliche Konstellationen wie bei der Vorfelddiagnostik. Zusätzlich ist die Myokard-Perfusions-SPECT einsetzbar:

- bei Veränderungen der Symptome und Befunde von Patienten, die nicht so weit belastungsfähig sind, dass sich im Belastungs-EKG ein relevanter Befund ergeben würde oder
- bei Patienten, die trotz Therapie nach symptomfreiem Intervall erneut symptomatisch werden und bei denen die Ischämie-region, die funktionelle Relevanz einer Stenose und/oder die Vitalität von Bedeutung ist.

Hinzu kommt die Risikostratifizierung vor Beginn eines Fitnessprogramms und bei Hochrisiko-Patienten die Risikostratifizierung und das Monitoring. Zur Hochrisikogruppe zählen Patienten mit chronischer KHK und eingeschränkter LV-Funktion, mit Mehrgefäßerkrankung, proximaler RIVA-Stenose, überlebtem plötzlichen Herztod, Diabetes mellitus, suboptimalem Interventionsergebnis oder mit gefahrgeneigten Tätigkeiten.

Die Indikation für eine Vitalitätsdiagnostik ist bei Patienten mit myokardialer Dysfunktion und Dyspnoe gegeben (12, 72).

Bei der Wahl des bildgebenden Verfahrens (Stressechokardiographie, kardiale MRT mit Dobutamin oder Adenosin, Myokard-Perfusions-SPECT) ist die jeweilige Verfügbarkeit und Expertise vor Ort in Betracht zu ziehen. Mit dem gewählten bildgebenden Verfahren soll die bestmögliche Bildqualität erreicht werden (12). Für den Vergleich der verschiedenen bildgebenden Verfahren unter klinischen Bedingungen und mit aktueller Technik sind derzeit entsprechende Studien in der Datenerhebung. Erste Ergebnisse sind 2012 zu erwarten.

3.2 Indikationskatalog „Appropriate Use“

Eine detaillierte Analyse und Katalogisierung verschiedener Indikationen unter Berücksichtigung klinischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte wurde vom ACCF (American College of Cardiology Foundation) in überarbeiteter Form im Mai 2009 vorgelegt (42). Die Bewertung erfolgte mit einem Score (Werte von 1 bis 9). Bei einem Wert von 7 bis 9 wurde eine Indikation als *geeignet*, bei 4 bis 6 als *bedingt geeignet* und darunter als *nicht geeignet* eingestuft.

Geeignet besagt, dass die Myokard-Perfusions-Szintigraphie für die jeweilige Indikation allgemein anerkannt und sinnvoll ist und der Nutzen das Untersuchungsrisiko deutlich übersteigt.

Bedingt geeignet bedeutet, dass die Myokard-Perfusions-Szintigraphie für die jeweilige Indikation allgemein anerkannt und sinnvoll sein kann, die Datenlage derzeit jedoch nicht eindeutig ist. Eine bedingt geeignete Indikation ist nicht grundsätzlich abzulehnen.

Die Indikationen gelten sowohl für die Myokard-Perfusions-Szintigraphie als SPECT als auch als PET. Eine EKG Triggerung wurde als „geeignet“ eingestuft und mit einem Score von 9 bewertet.

Die als *geeignet* und als *bedingt geeignet* bewerteten Indikationen sind im Folgenden zusammen mit den Empfehlungen aus der ACC/AHA-Leitlinie aufgeführt und in Flussdiagrammen (Abb. 2 bis 6) veranschaulicht (42).

Erläuterungen und Definitionen zu den Indikationen

Ischämie-Äquivalent:

Jede klinische Symptomatik, die auf eine stenosierende KHK hinweisen kann, wie z. B. Thoraxschmerz, thorakales Engegefühl, (retrosternales) Brennen, Schulter-, Kiefer-schmerzen, Palpitationen, Dyspnoe, Verminderung der Leistungsfähigkeit, neu aufgetretene EKG-Veränderungen.

Nicht-beurteilbares EKG:

ST-Streckensenkungen in Ruhe $\geq 0,1$ mV, kompletter Linksschenkelblock, Schrittmacher-rhythmus, Präexitationssyndrom (Wolff-Parkinson-White Syndrom).

Empfehlungsklassen:

- I: Evidenz und/oder allgemeine Übereinkunft, dass eine Therapieform oder eine diagnostische Maßnahme effektiv, nützlich oder heilsam ist.
- IIa: Evidenzen/Meinungen favorisieren den Nutzen bzw. die Effektivität einer Maßnahme.
- IIb: Nutzen/Effektivität einer Maßnahme ist weniger gut durch Evidenzen/Meinungen belegt
- III: Evidenz und/oder allgemeine Übereinkunft, dass eine Therapieform oder eine diagnostische Maßnahme nicht effektiv, nicht möglich oder nicht heilsam und im Einzelfall schädlich ist.

Evidenzgrade:

- A: Evidenz aus mehreren randomisierten Studien
- B: Evidenz aus einer randomisierten Studie oder mehreren nichtrandomisierten Studien
- C: Evidenz auf Grund von Expertenausschüssen, basierend auf Studien und klinischen Erfahrungen

3.2.1 Indikationen bei der KHK-Diagnostik symptomatischer Patienten

Abklärung eines Ischämie-Äquivalents (keine akute Symptomatik)

Niedrige Vortestwahrscheinlichkeit (< 10 %)		Klasse IIb
EKG nicht beurteilbar	G(7)	Evidenzgrad* B
oder Patient ergometrisch nicht belastbar		
Mittlere Vortestwahrscheinlichkeit (10 bis 90 %)		Klasse I/IIb
EKG beurteilbar und Patient ergometrisch belastbar	G(7)	Evidenzgrad B
Mittlere Vortestwahrscheinlichkeit (10 bis 90 %)		Klasse I/IIa
EKG nicht beurteilbar oder Patient ergometrisch nicht belastbar	G(9)	Evidenzgrad B
Hohe Vortestwahrscheinlichkeit (> 90 %)		Klasse IIa/IIb
unabhängig ob EKG beurteilbar oder Patient belastbar	G(8)	Evidenzgrad B

Akuter Thoraxschmerz mit Verdacht auf akutes Koronarsyndrom (ACS)

Troponin negativ bis minimal erhöht	G	Klasse I/IIa/III
EKG beurteilbar, keine Ischämiezeichen	(7-8)	Evidenzgrad B/C

Rest-only-Aufnahme bei akutem Thoraxschmerz mit Verdacht auf akutes Koronarsyndrom (ACS)

Persistierender oder erneut aufgetretener Thoraxschmerz	G(7)	Klasse I/IIa/III
EKG beurteilbar, keine Ischämiezeichen		Evidenzgrad B/C

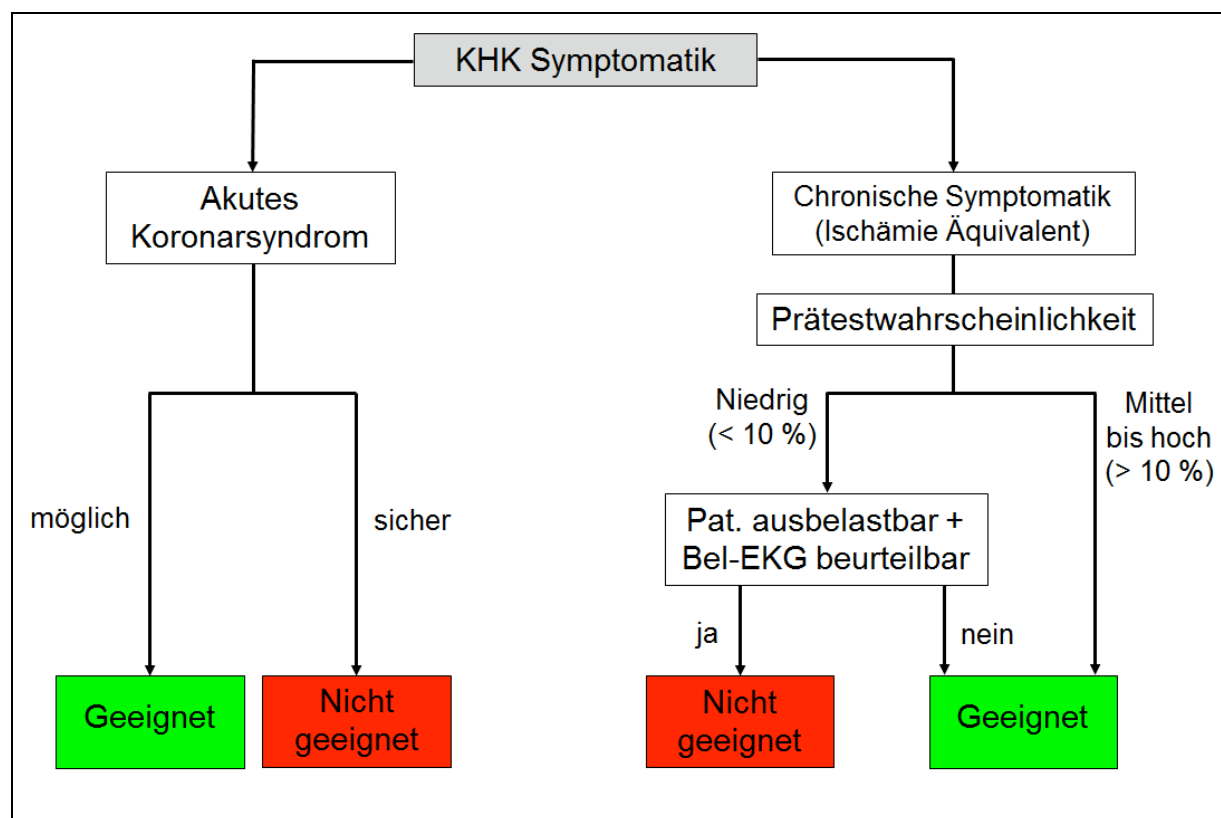


Abb.2: Entscheidungspfad für den Einsatz der Myokard-Perfusions-SPECT bei symptomatischen Patienten

3.2.2 Indikationen bei der KHK-Diagnostik und Risikobeurteilung asymptomatischer Patienten

Asymptomatischer Patient

Mittleres kardiales Risiko (10 bis 20 %/10 Jahre) EKG nicht beurteilbar	B(5)	Klasse IIa Evidenzgrad B
Hohes kardiales Risiko(> 20 %/10 Jahre)	G(7)	Klasse IIa/III Evidenzgrad B/C

Neu aufgetretenes Vorhofflimmern

Teil der Diagnosefindung bei unklarer Ätiologie	B(6)	-
---	------	---

Erstmals oder erneut aufgetretene Herzinsuffizienz mit systolischer Dysfunktion

Bisher keine Koronarangiographie, Kontraindikationen für eine Koronarangiographie	G(8)	Klasse IIa/IIb Evidenzgrad B/C
---	------	-----------------------------------

Ventrikuläre Tachykardie

Niedriges kardiales Risiko (< 10 %/10 Jahre)	G(7)	Klasse I Evidenzgrad B
Mittleres oder hohes kardiales Risiko(>10 %/10 Jahre)	G(8)	Klasse I Evidenzgrad B

Synkope

Mittleres oder hohes kardiales Risiko (> 10 %/10 Jahre)	G(7)	-
---	------	---

Erhöhtes Troponin

Troponinerhöhung ohne Hinweis auf ein akutes Koronarsyndrom	G(7)	Klasse III Evidenzgrad C
---	------	-----------------------------

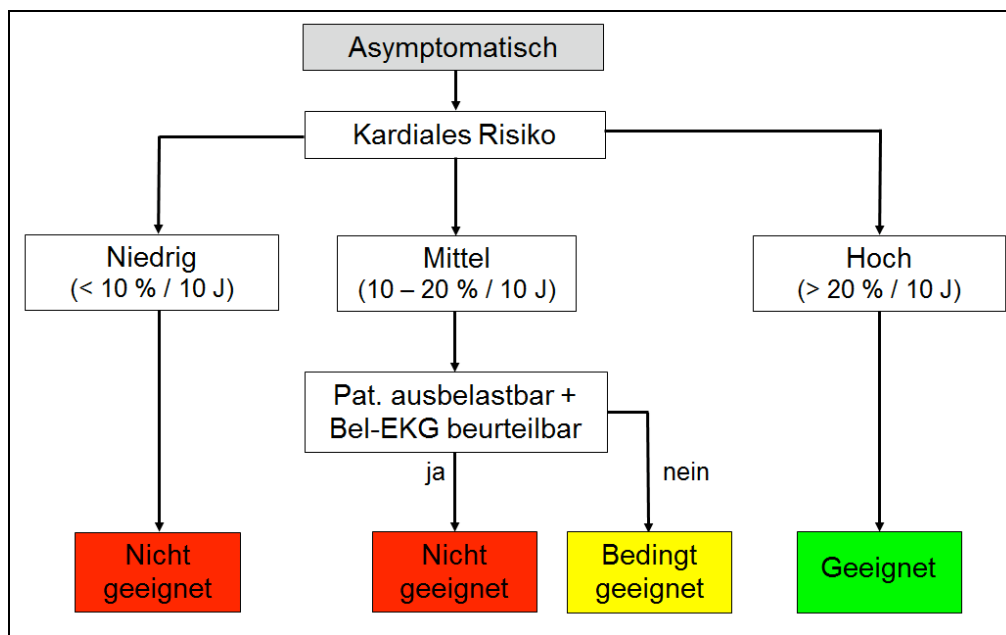


Abb. 3: Entscheidungspfad für den Einsatz der Myokard-Perfusions-SPECT bei asymptomatischen Patienten

3.2.3 Indikationen zur Risikobeurteilung bei Vordiagnostik (soweit nicht anders vermerkt stabile Symptomatik oder asymptomatisch)

Vorbefund: normale bildgebende Belastungsuntersuchung

Mittleres oder hohes kardiales Risiko(> 10 %/10 Jahre)	B(6)	Klasse IIb
Letzte bildgebende Diagnostik mit Belastungstest ≥ 2 J		Evidenzgrad B/C

Vorbefund: Pathologische Koronarangiographie oder pathologische Belastungsstudie, keine Revaskularisation

Letzte bildgebende Diagnostik mit Belastungstest ≥ 2 J	B(5)	Klasse I/IIb
		Evidenzgrad B/C

Belastungsuntersuchung nicht aussagekräftig

Grenzwertiges oder nicht eindeutiges Ergebnis der Belastungsuntersuchung, aber Verdacht auf Progress der KHK	G(8)	Klasse I
		Evidenzgrad B

Neu aufgetretene Symptomatik oder Verschlechterung der Symptomatik

Pathologische Angiographie oder vorbefundlich pathologische Belastungsuntersuchung	G(9)	Klasse I
		Evidenzgrad B/C
Normale Angiographie oder vorbefundlich normale Belastungsuntersuchung	B(6)	Klasse I
		Evidenzgrad B/C

Vordiagnostik: Koronarangiographie

Abklärung der funktionellen Relevanz einer Koronarstenose	G(9)	Klasse I
		Evidenzgrad B

Vordiagnostik: Kalzium-Scoring; Patient asymptomatisch

Geringes bis mittleres kardiales Risiko (<20 %/10 Jahre) Agatson-Score 100 bis 400	B(5)	-
Hohes kardiales Risiko (> 20 %/10 Jahre) Agatson-Score 100 bis 400	G(7)	-
Agatson-Score > 400	G(7)	Klasse IIb Evidenzgrad B/C

Vordiagnostik: Ergometrie

Mittlerer Duke-Treadmill-Score* (entspricht einer mäßig pathologischen Ergometrie)	G(7)	Klasse I Evidenzgrad B
Hoher Duke-Treadmill-Score* (entspricht einer hoch pathologischen Ergometrie)	G(8)	-

Duke Treadmill Score*Berechnung:**

Belastungszeit (min) mit einem Bruce-Protokoll - (5 x ST-Segment-Abweichung in mm) - (4 x Angina-Index)

Bruce-Protokoll: Laufbandergometer, Steigerung der Belastung 3-minütlich

Angina-Index: 0 – keine, 1 – nicht-belastungslimitierend, 2 – belastungslimitierend

Ergebnis:

Niedrigrisiko-Score: ≥ 5 , Intermediärrisiko-Score: -10 bis 4, Hochrisiko-Score: < -10

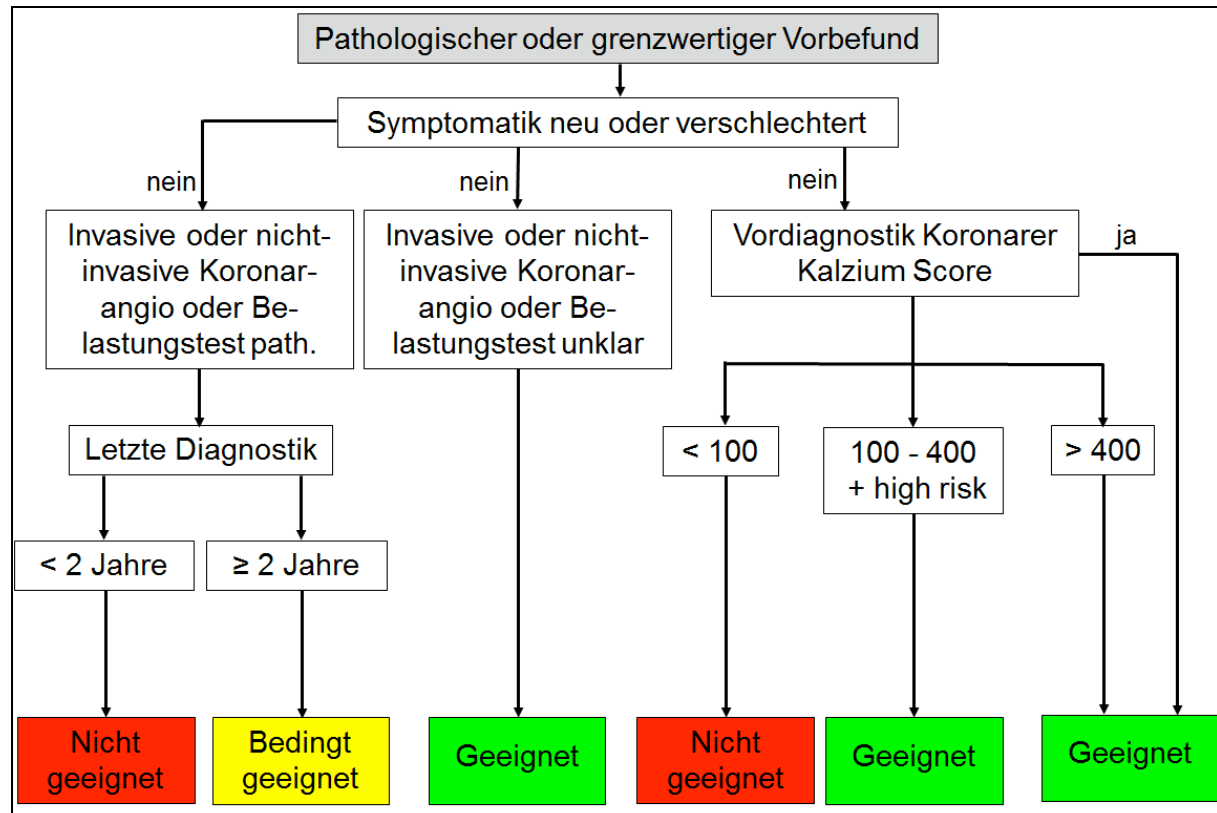


Abb. 4: Entscheidungspfad für den Einsatz der Myokard-Perfusions-SPECT bei pathologischem oder grenzwertigem Vorbefund

3.2.4 Indikationen vor nicht-kardialer OP (keine schwere kardiale Begleiterkrankung¹)

Operation mit mittlerem kardialen Risiko²

Vorliegen mindestens eines perioperativen Risikofaktors ³ schlechte oder nicht bekannte ergometrische Belastbarkeit ⁴	G(7)	Klasse IIa/IIb Evidenzgrad B
--	------	---------------------------------

Gefäßchirurgischer Eingriff

Vorliegen mindestens eines perioperativen Risikofaktors ³ schlechte oder nicht bekannte ergometrische Belastbarkeit ⁴	G(8)	Klasse IIb/III Evidenzgrad B
--	------	---------------------------------

* Erläuterungen und Definitionen siehe Anhang.

Im Vergleich mit der europäischen Leitlinie gibt es geringe Abweichungen. Die europäische Leitlinie sieht eine Belastungs-Untersuchung vor einer Hoch-Risiko-OP bei Patienten mit ≥ 3 Risikofaktoren als Klasse I Indikation (Evidenzgrad C) und bei < 3 Risikofaktoren als Klasse II Indikation (Evidenzgrad B) (68).

¹Schwere kardiale Erkrankung:

Instabiles Koronarsyndrom (instabile oder schwere Angina pectoris, vor kurzem (1 bis 4 Wochen) Myokardinfarkt), dekompensierte Herzinsuffizienz, signifikante Arrhythmien, schwerer Herzklappenfehler.

²Operationen mit mittlerem kardialen Risiko (1 bis 5 %):

Arteria carotis Endarteriektomie, Eingriffe im Halsbereich, thorakale und abdominelle Eingriffe, orthopädische Operationen, Prostata-Operationen (21).

³Perioperative Risikofaktoren (23):

- ischämische Herzerkrankung
- bekannter Herzinfarkt
- kompensierte Herzinsuffizienz
- zerebrovaskuläre Erkrankung
- insulinpflichtiger Diabetes mellitus
- Niereninsuffizienz (Kreatinin > 2.0 mg/dl)

⁴Schlechte ergometrische Belastbarkeit:

Definition: < 4 METs (1 MET = $3,5$ ml O₂ Aufnahme/(kg x min)). Dementsprechend ergometrische Leistung < 50 W bei Patienten bis 70 kg, < 75 W bei Patienten 75 bis 100 kg (88).

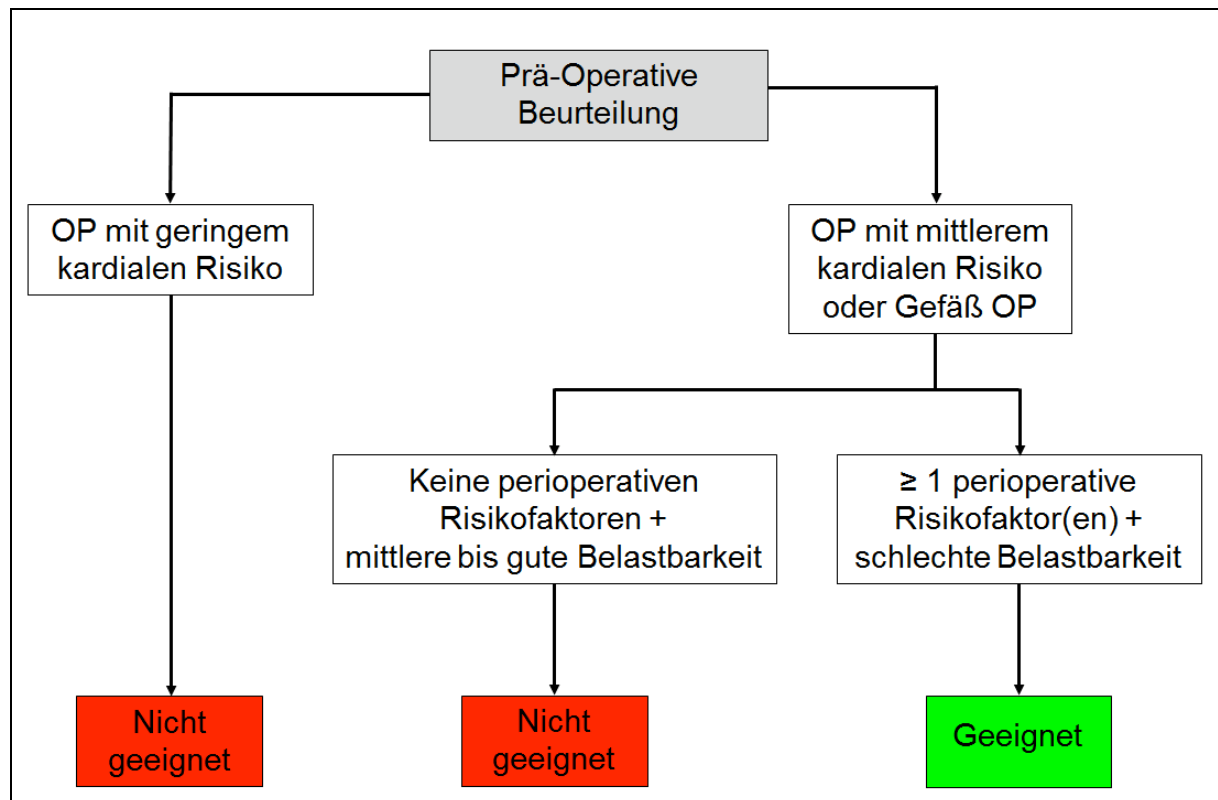


Abb. 5: Entscheidungspfad für den Einsatz der Myokard-Perfusions-SPECT in der präoperativen Diagnostik

3.2.5 Indikationen nach akutem Koronarsyndrom (Ischämienachweis und Risikobeurteilung)

STEMI in den letzten 3 Monaten

Häodynamisch stabil, keine erneut aufgetretenen
Thoraxschmerzen, keine Zeichen einer Herzinsuffizienz
keine Koronarangiographie

G(8)

Klasse I
Evidenzgrad B

Instabile Angina pectoris/NSTEMI in den letzten 3 Monaten

Häodynamisch stabil, keine erneut aufgetretenen
Thoraxschmerzen, keine Zeichen einer Herzinsuffizienz
keine vorherige Koronarangiographie

G(9)

Klasse I
Evidenzgrad B/C

3.2.6 Indikationen zur Risikobeurteilung nach Revaskularisation (PTCA oder Bypass)

Symptomatischer Patient

Abklärung von Beschwerden (Ischämie-Äquivalent)	G(8)	Klasse I Evidenzgrad B/C
---	------	-----------------------------

Asymptomatischer Patient

Inkomplette Revaskularisation weitere Revaskularisation möglich?	G(7)	Klasse I Evidenzgrad B
Bypass < 5 Jahre	B(5)	Klasse I/IIa Evidenzgrad B
Bypass ≥ 5 Jahre	G(7)	Klasse I/IIa Evidenzgrad B
PTCA ≥ 2 Jahre	B(6)	Klasse I/IIa Evidenzgrad B

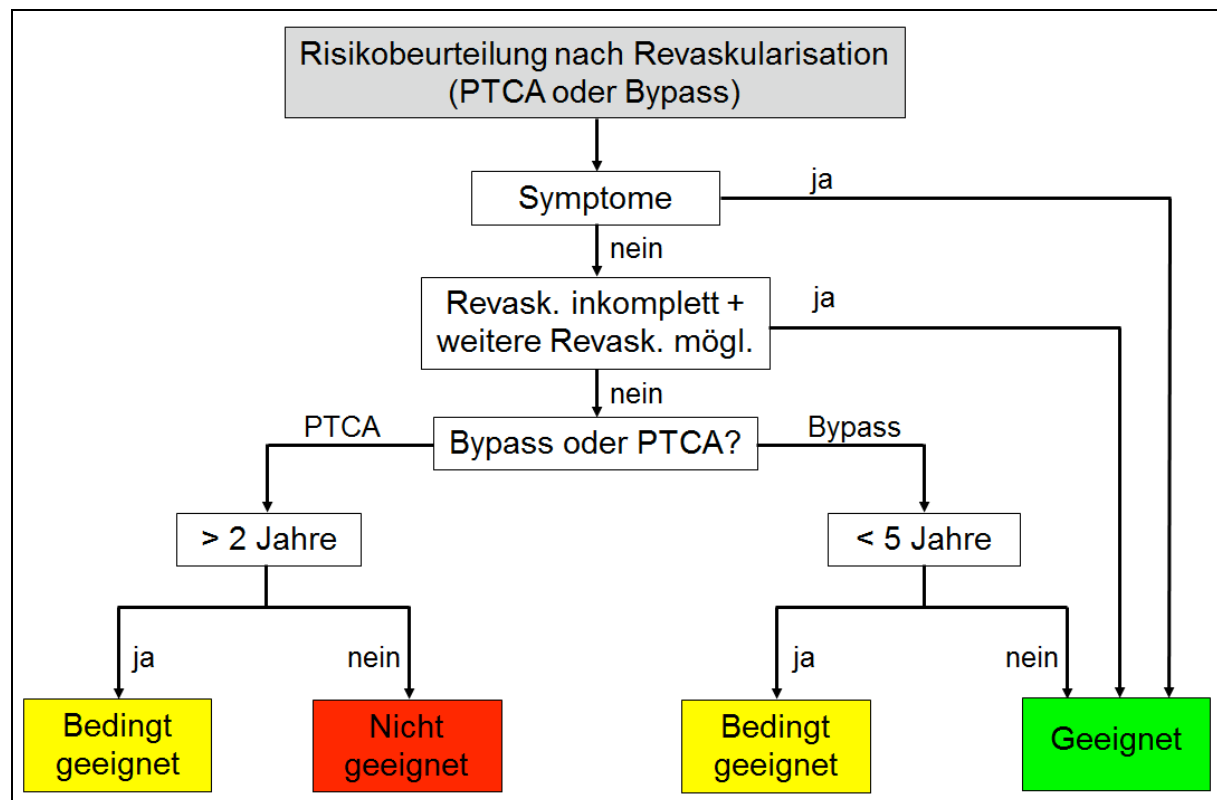


Abb. 6: Entscheidungspfad für den Einsatz der Myokard-Perfusions-SPECT nach Revaskularisation

3.2.7 Indikation zur Vitalitätsdiagnostik

Schwere linksventrikuläre Dysfunktion Patient für Revaskularisation geeignet?	G(9)	Klasse I/IIa Evidenzgrad B
--	------	-------------------------------

4. Untersuchungsmethode, Vorgehensweise, Verfahren

4.1 Vorbereitung

4.1.1 Aufklärung und Patienteninformation

Die Patienten sollten vor der Untersuchung oder bereits bei der Anmeldung ein Informationsblatt oder eine Informationsbroschüre über den Untersuchungsablauf erhalten. Für die ergometrische Belastung ist auf geeignete Kleidung und Schuhwerk hinzuweisen. Am Tag der Untersuchung empfiehlt sich eine mündliche Information. Folgende Punkte sollten berücksichtigt werden:

- Zweck der Untersuchung
- Kurze Erklärung der Methodik
- Kurze Ablaufbeschreibung mit
 - Erläuterung des Belastungsverfahrens (bei medikamentösen Belastungen Dauer, Symptomatik, Nebenwirkungen)
 - Liegedauer unter der Kamera
 - Hinweis: Bewegungen unter der Kamera vermeiden
 - Gesamtdauer der Untersuchung
 - Information zur Strahlenexposition

Nach § 80 Abs. 2 Satz 2 der StrlSchV sind Patienten über frühere medizinische Anwendungen radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlung, die für die vorgesehene Anwendung von Bedeutung sind, zu befragen. Grundsätzlich gilt, dass nuklearmedizinische Untersuchungen bei Schwangeren nur bei dringlicher Indikation durchgeführt werden dürfen (81).

Nach § 85 StrlSchV ist das Ergebnis der Befragung aufzuzeichnen und 10 Jahre lang aufzubewahren (81).

Eine schriftliche Einverständniserklärung ist für normale diagnostische Bildgebungsverfahren in der klinischen Routine nicht erforderlich, wird für eventuelle Beweis Zwecke aber dringend empfohlen.

4.1.2 Patientenvorbereitung

Das Ziel der Patientenvorbereitung ist, eine bestmögliche Aufnahme des Radiopharmakons im Myokard und eine nur minimale Anreicherung im umliegenden Gewebe (überwiegend Gastrointestinaltrakt) zu erreichen. Folgende vorbereitende Maßnahmen sind geeignet (90):

Die Belastungsuntersuchung sollte nach mindestens 4-stündiger Nahrungskarenz erfolgen. Bei Diabetikern ist ein leichtes Frühstück möglich. Nach der Injektion sollten die Patienten etwas Fetthaltiges essen (z. B. Käse- oder Wurstbrot/-brötchen), reichlich trinken (keine kohlen säurehaltigen Getränke) und sich bewegen (herumgehen) (39). Die Vorbereitungen für die Ruheuntersuchung erfolgen entsprechend. Bei Ein-Tages-Protokollen (zuerst Belastungs-, dann Ruheuntersuchung) entfällt für die Ruheuntersuchung die Nahrungskarenz.

Im Fall einer medikamentösen Belastung mit einem Vasodilatator dürfen mindestens 12 h vor der Belastungsuntersuchung keine koffeinhaltigen Speisen oder Getränke eingenommen werden (dazu gehören Kaffee, Espresso, Cappuccino, Cola, Cola light, schwarzer Tee, grüner Tee, Teemischungen, Speisen mit Schokolade, ...) (10, 78). Koffeinhaltige Medikamente, z. B. Schmerzmittel wie Aspirin® forte oder Grippemedikamente wie Grippostad® (enthält 25 mg Koffein pro Kapsel) und theophyllinhaltige Medikamente müssen

für mindestens 24 h pausiert werden (79). Dipyridamolhaltige Medikamente (z. B. Aggrenox®) sollten ebenfalls mindestens 24 h abgesetzt werden.

4.2 Durchführung der Untersuchung

4.2.1 Vorbereitende Maßnahmen

Informationen zur kardiovaskulären Krankengeschichte und zu vorhergehenden diagnostischen und interventionellen Maßnahmen sollten vor der Untersuchung vorliegen. Der untersuchende Arzt muss sich vor der Belastung ein Bild vom kardiovaskulären Status des Patienten machen. Hierzu gehören: Anamnese mit vorangegangenen diagnostischen und therapeutischen Maßnahmen, Symptome, Risikofaktoren und Medikation. Bei Einnahme von Beta-Blockern, Nitraten und Kalzium-Antagonisten ist der Zeitpunkt der letzten Medikation zu erfragen.

Nach § 80 und § 82 der StrlSchV ist die rechtfertigende Indikation zur Untersuchung von einem Arzt mit der erforderlichen Fachkunde im Strahlenschutz zu stellen, auch bei Anforderung durch einen überweisenden Arzt (81). Eine rechtfertigende Indikation ist gegeben, wenn der gesundheitliche Nutzen der Untersuchung das Strahlenrisiko überwiegt.

Strahlungsabsorbierende Gegenstände im Thoraxbereich sollten vor der Aufnahme entfernt werden. Implantate (Silikon, Metall, u. a.) müssen als mögliche Ursache für Schwächungsartefakte berücksichtigt werden.

4.2.2 Belastungsverfahren

Um Koronarstenosen zu detektieren, ist die Myokardperfusion maximal zu steigern. Die Durchblutungssteigerung kann ergometrisch oder medikamentös erfolgen. Jede Belastung sollte mit regelmäßiger Überwachung von Puls, Blutdruck und unter 12-Kanal-EKG-Kontrolle erfolgen. Ein Arzt mit der erforderlichen Kenntnis und Erfahrung in Notfallsituationen muss während der Belastung zugegen sein. Ebenso muss das Notfallinstrumentarium mit Defibrillator und Medikamenten vor Ort einsatzbereit zur Verfügung stehen. Die Häufigkeiten schwerer Nebenwirkungen unterscheiden sich für die verschiedenen Belastungsmodalitäten nicht grundsätzlich. Sie sind selten, so dass sowohl die ergometrische als auch die medikamentöse Belastung sicher und zuverlässig sind.

Ist auf Grund von Begleiterkrankungen, Trainingsmangel oder mangelnder Compliance eine ergometrische Belastung bzw. Ausbelastung nicht möglich, kann die myokardiale Perfusionssteigerung auch pharmakologisch erreicht werden. Abb. 7 zeigt den Entscheidungspfad zur Auswahl des geeigneten Belastungsverfahrens.

Ergometrische und pharmakologische Belastungen können in vergleichbarer Genauigkeit Perfusionsstörungen nachweisen (Metaanalyse über 24 Studien mit 14.918 Patienten) (63).

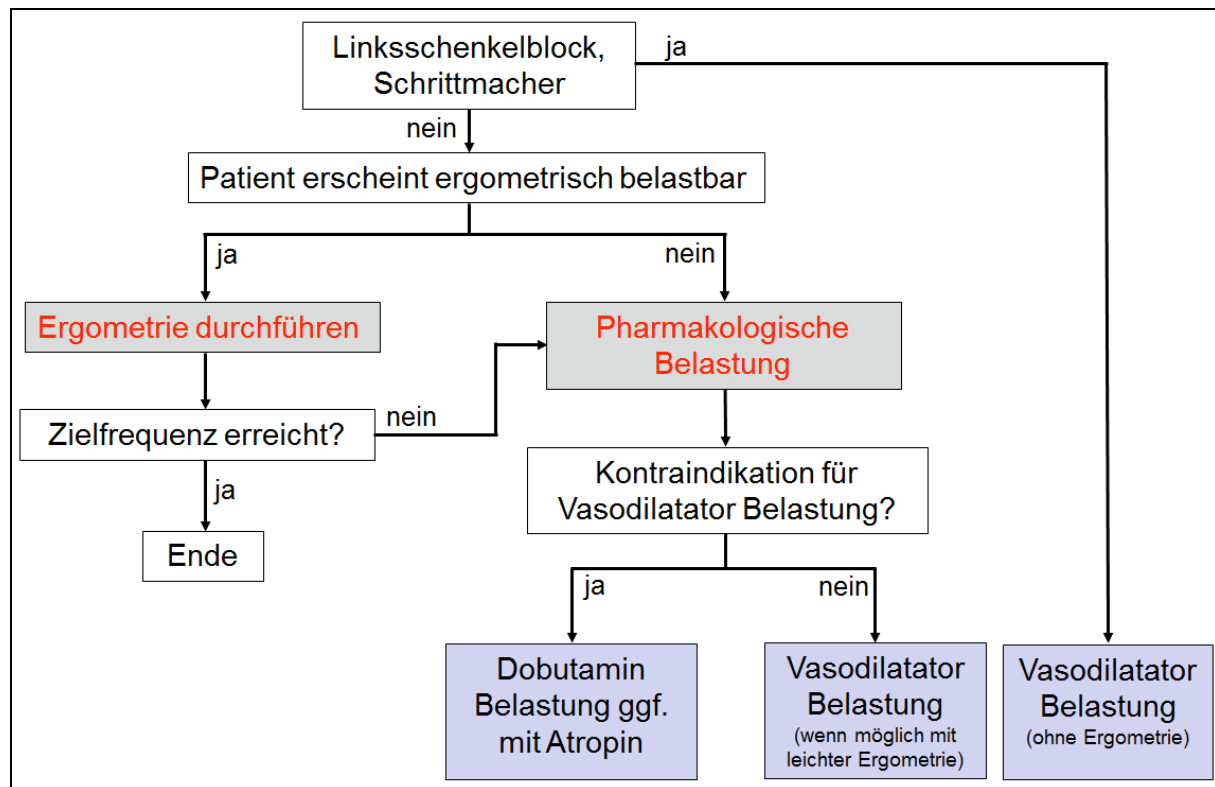


Abb. 7: Entscheidungspfad zur Auswahl des geeigneten Belastungsverfahrens für die Myokard-Perfusions-Szintigraphie

4.2.2.1 Ergometrie

Bei der Ergometrie wird der Sauerstoffverbrauch des Myokards erhöht und regulatorisch die Perfusion gesteigert. Die Ergometrie erfolgt als Stufentest beginnend bei 25 bis 50 W und ein- bis zweiminütlicher Steigerung um 25 bis 50 W. Sofern die Belastung nicht symptomlimitiert abgebrochen wird, sollte eine submaximale Ausbelastung mit einer Herzfrequenz von $0,85 \times (220 - \text{Alter})$ erzielt werden. Wird dieser Schwellenwert nicht erreicht, vermindert sich die Sensitivität der Myokard-Perfusions-Szintigraphie deutlich (49). Orientierend kann das Rate-Pressure-Produkt (Systolischer Blutdruck $\times$ Herzfrequenz) als Gütekriterium einer Belastung in folgender Kategorisierung herangezogen werden: 20.000 bis 25.000 genügend, 25.000 bis 30.000 gut, > 30.000 mm Hg/min sehr gut.

Die Injektion des Radiopharmakons erfolgt auf der höchsten Belastungsstufe, die danach für 1 bis 2 min aufrechterhalten wird. So wird das Radiopharmakon auch nach mehreren Kreislauflagen noch im Zustand der gesteigerten Perfusion von den Myokardzellen aufgenommen. Die absoluten und relativen Kontraindikationen für eine Ergometrie sind in Tabelle 4 aufgelistet, die Abbruchkriterien in Tabelle 5.

Patienten mit permanentem oder belastungsinduziertem Linksschenkelblock oder mit ventrikulärer Schrittmacherstimulation sollten wegen der höheren Rate falsch positiver Befunde bei einer ergometrischen Belastung oder einer Dobutamin-Belastung rein pharmakologisch mit einem Vasodilatator (ohne zusätzliche Ergometrie) belastet werden (8, 65, 89). Bei einem Rechtsschenkelblock kann eine Ergometrie durchgeführt werden. Hier liegt keine Störung im Kontraktionsablauf vor, die die Perfusion beeinflusst.

Sofern adäquat realisierbar, ist einer Ergometrie gegenüber einer medikamentösen Belastung der Vorzug zu geben. Eine ergometrische Belastung liefert gleichzeitig Auskunft über die kardiopulmonale und physische Leistungsfähigkeit, die Kreislaufreaktion, Arrhythmien und die Symptomatik des Patienten (12).

Antianginöse Medikamente können eine belastungsinduzierte Ischämie kaschieren. So senken Beta-Blocker und Kalzium-Antagonisten den Sauerstoffverbrauch und beeinflussen damit auch die Perfusion bzw. die Perfusionssteigerung unter Belastung. Ferner hemmen Beta-Blocker den Anstieg von Puls und Blutdruck unter Belastung und somit eine adäquate ergometrische Belastung. Nitrate, Beta-Blocker und Kalzium-Antagonisten sollten vor einer Myokard-Perfusions-Szintigraphie ausreichend lange abgesetzt werden, speziell wenn es um die Erstdiagnostik der KHK geht. Die Karenzzeit sollte mindestens 24 h betragen. Bei Beta-Blockern mit langer Halbwertszeit (z. B. Nebivolol HWZ 10 bis 30 h, Bisoprolol HWZ 6 bis 10 h) sollte bis 48 h pausiert werden. Als Orientierung gilt eine Karenz von 3 bis 5 Halbwertszeiten. Sublinguales Nitroglycerin kann bis 2 h vor der Belastung eingenommen werden. Wenn die Effektivität einer antianginösen Therapie mit der Myokard-Perfusions-Szintigraphie dokumentiert werden soll, ist es sinnvoll, die Untersuchung unter laufender Medikation durchzuführen.

Weitere Details zur Ergometrie sind den Leitlinien zur Ergometrie der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung zu entnehmen (88).

Absolute Kontraindikationen

- Akutes Koronarsyndrom (abhängig vom klinischen Risiko kann bei stabilen Patienten 24 bis 72 Stunden nach dem Ereignis eine Ergometrie erfolgen) (4)
- Instabile Angina pectoris
- Herzrhythmusstörungen mit Symptomatik und/oder eingeschränkter Hämodynamik
- Symptomatische schwere Aortenstenose
- Dekompensierte Herzinsuffizienz
- Akute Lungenembolie
- Akute Myokarditis
- Akute Perikarditis
- Akute Aortendissektion

Relative Kontraindikationen

- Hauptstammstenose
- Klappenerkrankungen mäßigen Schweregrades
- Bekannte Elektrolytstörungen
- Arterielle Hypertonie (RR > 200 mm Hg syst, > 110 mm Hg diast)
- Tachyarrhythmie oder Bradyarrhythmie
- Hypertrophe Kardiomyopathie und andere Formen der Ausflussbahnostruktion
- Höhergradige AV-Blockierungen
- Physische und/oder psychische Beeinträchtigungen
- Linksschenkelblock
- Ventrikulärer Schrittmacherrhythmus

Tabelle 4: Kontraindikationen für eine Ergometrie oder einen Dobutamin-Stress-Test

Absolute Abbruchkriterien

- ST-Strecken-Senkung > 3 mm
- ST-Strecken-Hebung > 1 mm
- Blutdruckabfall bei der Ergometrie > 10 mm Hg (Vergleich zum Ausgangs-Blutdruck) mit Zeichen einer myokardialen Ischämie (Angina pectoris, ST-Senkung)
- Mäßige bis schwere Angina pectoris-Symptomatik
- Schwere Dyspnoe
- Klinische Zeichen einer Minderperfusion (Zyanose)
- Anhaltende ventrikuläre Tachykardie (Dauer > 30 Sekunden)
- Erschöpfung des Patienten
- Technische Probleme (defekte EKG-Registrierung, Monitor-Ausfall)

Relative Abbruchkriterien

- Hypertensive Fehlregulation (RR syst 230 bis 260 mm Hg, RR diast > 115 mm Hg)
- Blutdruckabfall > 10 mm Hg (Vergleich zum Ausgangs-Blutdruck) ohne Zeichen einer myokardialen Ischämie (keine Angina pectoris, keine ST-Senkung)
- Polymorphe Extrasystolie, Paare (2 konsekutive VES), Salven (> 3 konsekutive VES)
- Supraventrikuläre Tachykardien
- Bradyarrhythmien
- Auftreten von Leitungsstörungen (höhergradiger AV-Block, Schenkelblock)
- Verstärkte Angina pectoris-Symptomatik

Tabelle 5: Abbruchkriterien von Belastungs-Untersuchungen

(Abkürzungen: EKG – Elektrokardiogramm, VES – ventrikuläre Extrasystolen)

4.2.2.2 Pharmakologische Belastungsverfahren**4.2.2.2.1 Vasodilatoren****4.2.2.2.1.1 Adenosin**

Pharmakologische Belastungen werden überwiegend mit Adenosin durchgeführt (58). Adenosin bewirkt über A_{2a}-Rezeptoren eine Vasodilatation im Koronarsystem und dadurch eine Perfusionssteigerung. Diese Perfusionssteigerung erfolgt nur in nicht-stenotierten Gefäßabschnitten. Poststenotische Gefäßabschnitte weisen autoregulatorisch vermittelt bereits eine maximale Weitstellung der Widerstandsgefäße auf, um den Druckabfall über der Stenose zu kompensieren. Hier können Vasodilatoren keine weitere Perfusionssteigerung hervorrufen. Im Myokard-Perfusions-Szintigramm findet sich entsprechend in poststenotischen Versorgungsgebieten eine geringere Aufnahme des Radiopharmakons als in normal perfundierten Myokardsegmenten.

Adenosin bewirkt infolge der Vasodilatation einen reflektorischen Anstieg der Herzfrequenz um etwa 10 % und einen geringen Blutdruckabfall. Es ist daher nicht kreislaufbelastend. Der myokardiale Sauerstoffverbrauch wird nur minimal gesteigert. Im Gegensatz zur Ergometrie oder zu einer Dobutaminbelastung werden nur im seltenen Fall eines koronaren Steals Ischämien provoziert.

Adenosin hat mit einer Plasmahalbwertszeit von < 2 s eine kurze Wirkdauer und ist daher gut steuerbar. Symptome und Nebenwirkungen einer Adenosin-Infusion sind nach 1 bis 2 min nahezu komplett reversibel. Deutlich länger anhaltende Beschwerden können auf einen Vasospasmus oder ein akutes Koronarsyndrom hinweisen.

Die medikamentöse Belastung mit Adenosin kann über einen i.v.-Zugang mit einem 3-Wege-Hahn erfolgen, über den während der Infusion das Radiopharmakon ohne Unterbrechung der Adenosin-Zufuhr appliziert wird. Das Radiopharmakon sollte langsam appliziert werden,

da ansonsten das venöse Adenosindepot als Bolus vorgeschoben wird und Nebenwirkungen wie passagere AV-Blockierungen und andere Bradykardien auftreten können.

Adenosin wird mit 140 µg/kg/min über 6 min infundiert. Bewährt hat sich eine Verdünnung mit NaCl auf 40 ml. Die Infusionsrate beträgt dann 400 ml/h. Kürzere Adenosin-Protokolle mit Infusionszeiten von 4 min und Injektion des Radiopharmakons nach 2 min sind möglich. Die American Society of Nuclear Cardiology (ASNC) empfiehlt das 6-Minuten-Protokoll, akzeptiert aber auf Grund der Datenlage auch ein 4-Minuten-Protokoll (9).

Eine Adenosin-Belastung lässt sich gut mit einer Ergometrie auf einem niedrigen Belastungsniveau (20 bis 60 W) kombinieren. Der Vorteil dieser Kombination liegt in seltener und abgemildert auftretenden Nebenwirkungen und einer günstigeren Bildgebung infolge einer geringeren gastrointestinalen Anreicherung des Radiopharmakons (40, 66).

Adenosin steigert die Myokardperfusion maximal auf 3 bis 4 ml/min/mg. Die Perfusionssteigerung ist höher als bei der Ergometrie (55). Allerdings weisen die SPECT Radiopharmaka ein Uptake-Plateau bei Perfusionswerten > 2 bis 2,5 ml/min/g auf. Deshalb bestehen trotz der höheren Perfusionssteigerung durch Adenosin keine grundsätzlichen Unterschiede im Aufnahmeverhalten und in der Genauigkeit zwischen einer ergometrischen und einer pharmakologischen Belastung (55). PET Perfusionsradiopharmaka haben in dieser Hinsicht deutlich günstigere Eigenschaften und erlauben durch die absolute Quantifizierbarkeit auch Differenzierungen in Hochflusssituationen. Das ist vor allem bei der Diagnostik von Frühstadien der KHK von Bedeutung.

Ob Beta-Blocker vor einer Adenosin-Belastung pausiert werden müssen, ist derzeit nicht abschließend geklärt. Es liegen sowohl Studien vor, die eine geringere diagnostische Genauigkeit der Myokard-Perfusions-Szintigraphie unter Beta-Blocker-Einnahme aufzeigen, als auch Studien, die keinen Einfluss des Beta-Blockers bei einer Vasodilatator-Belastung belegen (71, 95).

Die Kontraindikationen und Nebenwirkungen eines Vasodilatator-Stress-Tests sind in den Tabellen 6 und 7 aufgelistet.

Absolute Kontraindikationen

- Akutes Koronarsyndrom (abhängig vom klinischen Risiko kann bei stabilen Patienten 24 bis 72 Stunden nach dem Ereignis ein Vasodilatator-Stress-Test erfolgen) (4)
- mittel- und höhergradige Ventilationsstörung
- gesichertes Asthma bronchiale
- theophyllinpflichtige COPD
- AV-Block zweiten oder dritten Grades (kein implantierter Schrittmacher)
- Sick-Sinus-Syndrom (kein implantierter Schrittmacher)
- Hypotension (RR syst < 90 mm Hg)

Relative Kontraindikationen

- Bradykardie < 40/min
- leichte Formen einer COPD (vor Durchführung des Stress-Tests Gabe eines inhalativen beta-Mimetikums) (25)
- rezente zerebrale Ischämie oder rezenter Infarkt

Tabelle 6: Kontraindikationen für einen Vasodilatator-Stress-Test

Symptom	Dipyridamol (n = 3911) [%]	Adenosin (n = 9256) [%]	Dobutamin (n = 1012) [%]
Leichte Nebenwirkungen			
Thorakaler Druck/Schmerz	20	35	31
Dyspnoe	3	35	12
Flush	3	37	10
Kopfschmerz	12	14	14
Palpitationen	3	-	10
Übelkeit	6	15	8
Hypotension	5	2	-
AV-Block	-	8	-
Arrhythmien	-	3	5
Extrasystolen	5	-	14
ST-Senkungen	8	6	-
Bronchospasmus	0,15	0,1	0
Nebenwirkungen überhaupt	47	82	85
Schwere Nebenwirkungen			
Tod	0,05	0	0
Myokardinfarkt	0,02	0,01	0

Tabelle 7: Symptome bei pharmakologischen Belastungen (13, 16, 70)

4.2.2.2.1.2 Dipyridamol

Dipyridamol war bis vor einigen Jahren für die Diagnostik bei der Myokard-Perfusions-Szintigraphie zugelassen. Inzwischen ist es in Deutschland nicht mehr im Handel und besitzt keine Zulassung nach dem deutschen Arzneimittelgesetz bei der Myokard-Perfusions-Szintigraphie.

Dipyridamol verlängert die Wirkungsdauer von Adenosin am Rezeptor, indem es den Abbau von Adenosin hemmt. Die Infusion erfolgt mit 140 µg/kg/min über 4 min. Das Radiopharmakon wird 3 min nach Infusionsende injiziert.

Dipyridamol hat eine längere Plasmahalbwertszeit (40 min) als Adenosin und ist daher schlechter steuerbar. Nebenwirkungen sind ähnlich wie bei Adenosin, treten seltener auf, halten aber länger an (15 bis 25 min) (82). Um Symptome und Nebenwirkungen zu antagonisieren, sollte Theophyllin zur i.v. Gabe bereitstehen (13, 70).

Der Einsatz von Dipyridamol ist in Deutschland nur noch nach sorgfältiger Nutzen-Risiko-Abwägung im Rahmen der ärztlichen Therapiefreiheit möglich. Dazu muss Dipyridamol aus einem Staat importiert werden, in dem es rechtmäßig in den Verkehr gebracht werden darf. Für diesen Fall gelten § 73 Abs. 3 AMG (Arzneimittelgesetz) und § 18 ApoBetrO (Apothekenbetriebsordnung). Ein Import ist nach dem Arzneimittelgesetz zulässig, wenn in Deutschland keine medizinisch gleichwertigen Arzneimittel verfügbar sind (29, 93).

Die gesetzliche Haftung des pharmazeutischen Unternehmers für Arzneimittelschäden entfällt bei Import-Arzneimitteln. Im Falle eines Arzneimittelschadens besteht für den Patienten ein eingeschränkter Schutz, da nur die Haftpflichtversicherung des Arztes oder Apothekers und das Produkthaftungsgesetz zum Tragen kommen. Der Patient ist vom Arzt darüber aufzuklären, dass ein Import-Arzneimittel eingesetzt wird und dies mit einer veränderten (verschlechterten) Haftungssituation einhergeht. Dies sollte schriftlich festgehalten werden.

4.2.2.2.1.3 Regadenoson

Regadenoson ist ein selektiver A_{2a}-Antagonist und als Rapiscan® in der EU zugelassen. Das Medikament ist seit September 2011 in Deutschland in Handel. Da Regadenoson nur an Adenosin-A_{2a}-Rezeptoren wirkt, ist die Nebenwirkungsrate geringer als bei Adenosin (48). Bei Patienten mit Asthma bronchiale und bei COPD Patienten scheint sich Regadenoson als sicher zu erweisen (85).

Die Substanz wird gewichtsunabhängig als Einzelinjektion (5 ml, 0,4 mg Regadenoson) über 10 s injiziert. Hiernach werden 5 ml NaCl injiziert und nach 10 bis 20 s das Radiopharmakon. Regadenoson lässt sich wie Adenosin mit einer Ergometrie auf einem niedrigen Belastungsniveau (20 bis 60 W) kombinieren (54, 86).

4.2.2.2.2 Katecholamine (Dobutamin)

Ein Stress-Test mit Dobutamin wird bei ergometrisch nicht belastbaren oder nicht ausbelastbaren Patienten mit Kontraindikationen für Vasodilatoren durchgeführt. Als Sympathomimetikum steigert Dobutamin Herzfrequenz, Blutdruck und Kontraktilität, hierüber den myokardialen Sauerstoffverbrauch und reflektorisch die Perfusion. Bei Koronarstenosen werden Ischämien provoziert.

Die Belastung erfolgt in 3-minütigen Intervallen, beginnend mit einer Infusionsrate von 5 µg/kg/min und Steigerung auf 10, 20, 30 und 40 µg/kg/min. Eine Zielfrequenz von 0,85 x (220 - Alter) ist anzustreben. Wird diese auf der höchsten Stufe nicht erreicht, kann zusätzlich Atropin verabreicht werden (4 x 0,25 mg bis max. 1 mg i.v.) (62). Die Zielfrequenz wird dann bei über 90 % der Patienten erreicht (22). Die Dobutaminwirkung (Plasmahalbwertszeit 120 s) wird mit einem Beta-Blocker antagonisiert. Die Abbruchkriterien und Kontraindikationen entsprechen denen der Ergometrie (Tabelle 4 und 5).

4.3 Vorsichtsmaßnahmen

Siehe Leitlinie „Nuklearmedizinische Bildgebung“, Absatz II C (AWMF-Leitlinien-Register 031/030).

4.4 Radiopharmaka

Für die Myokard-Perfusions-Szintigraphie stehen derzeit mit Tc-99m-Sestamibi, Tc-99m-Tetrofosmin und Tl-201 drei kommerziell erhältliche Radiopharmaka zur Verfügung. In Deutschland werden inzwischen über 85 % der Myokard-Perfusions-Szintigraphien mit Tc-99m Radiopharmaka durchgeführt (58). Es gibt zwischen den Radiopharmaka keine grundsätzlichen Unterschiede in der Genauigkeit, eine > 50%ige Koronarstenose nachzuweisen (30, 51).

Tl-201 und Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka akkumulieren abhängig vom Funktionszustand der Kardiomyozyten zellulär. Daher sind diese Substanzen auch zur Vitalitätsdiagnostik einsetzbar (s. 2.1.7). Hierfür existieren geeignete Untersuchungsprotokolle (z. B. Applikation nach Nitroglycerin-Gabe und unter optimaler antianginöser Therapie, Tl-201 Reinjektion) (51).

4.4.1 Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka (Sestamibi und Tetrofosmin)

Tc-99m ist ein Generatorprodukt mit einer Halbwertszeit von 6 h und einer Photonenenergie von 140 keV. Diese strahlenphysikalischen Eigenschaften erlauben die Verwendung höherer Aktivitätsmengen als bei Tl-201, so dass die Bildstatistik besser als bei Tl-201 ist. Tc-99m-Sestamibi und Tc-99m-Tetrofosmin weisen eine geringere Extraktion als Tl-201 auf. Nach

der Aufnahme aus dem Blut werden beide Substanzen an den Mitochondrien gebunden und nur zu einem minimalen Anteil ausgewaschen. Im Gegensatz zu Tl-201 muss daher die Aufnahme nicht unmittelbar nach der Injektion erfolgen. Auf Grund einer höheren hepatischen und gastrointestinalen Anreicherung können Artefakte durch Überlagerung und einstrahlende Aktivität entstehen.

Wegen der günstigeren Zählstatistik und der höheren räumlichen Auflösung sind die Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka bei der EKG-getriggerten Akquisition (gated SPECT) dem Tl-201 überlegen.

4.4.2 Thallium-201

Tl-201 ist ein Zyklotronprodukt mit einer Halbwertszeit von 73 h. 90 % der Photonen werden mit einer Energie zwischen 68 bis 80 keV emittiert, 10 % mit 167 keV. Tl-201 verhält sich im Körper wie Kalium und wird nach der Injektion rasch und bis zu einem Blutfluss von 3 ml/min/mg nahezu linear zur Perfusion von der Myokardzelle über die Na-K-ATPase aufgenommen. Auf Grund des entstandenen Konzentrationsgefälles zwischen Zelle und Blut wird Tl-201 anschließend aus der Zelle ausgewaschen (Washout). Da minderperfundierte Myokardareale weniger Tl-201 aufnehmen als normalperfundierte, sind Konzentrationsgradient und Washout entsprechend geringer. Das führt innerhalb eines Zeitraums von 3 bis 4 h zu einem Angleich der Tl-201 Nettokonzentrationen (Redistribution) zwischen minder- und normalperfundiertem Myokard.

Die Strahlenexposition bei Tl-201 ist bei einer Standarddosis von 74 MBq deutlich höher als bei den kurzlebigeren Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka (Tabelle 8). Aus diesem Grund ist die Anwendung von Tl-201 für die Myokard-SPECT (Belastung/Redistribution) nur noch mit Einschränkung zu empfehlen.

4.4.3 Strahlenexposition

Das Bundesamt für Strahlenschutz hat auf der Grundlage des § 81 Abs. 2 Satz 3 StrlSchV diagnostische Referenzwerte (DRW) für die Myokard-Perfusions-Szintigraphie veröffentlicht, die bei der Untersuchung zugrunde zu legen sind. Eine Überschreitung der DRW ist schriftlich zu begründen. Im Gegensatz zur Röntgendiagnostik sind die DRW in der nuklearmedizinischen Diagnostik keine oberen Richtwerte, sondern "Optimalwerte". Sie geben die für eine gute Bildqualität notwendige Aktivität an und sollen bei Standardverfahren und Standardpatienten (70 ± 3 kg) appliziert werden. Die DRW gelten nicht für einzelne individuelle Untersuchungen. Hintergrund ist, dass die Dosis einer Untersuchung bzw. die applizierte Aktivität nicht nur von der technischen Durchführung der Untersuchung abhängt, sondern von vielen weiteren Faktoren (z. B. Körpermaße und Gewicht). Wenn daher bei einer Untersuchung die individuelle Patientendosis höher liegt als der DRW, ist das erklärbar und erfordert keine weiteren Konsequenzen. Entscheidend ist, dass die Mittelwerte der Patientendosen bzw. der applizierten Aktivität die DRW nicht überschreiten (11, 15).

Die Daten zur Dosimetrie sind in Tabelle 8 für die gebräuchlichen Radiopharmaka und Protokolle dargestellt. Bei Kindern – die extrem selten myokardszintigraphisch untersucht werden – ist die zu applizierende Aktivität nach dem Körpergewicht zu dosieren. Die Bruchteile der zu verabreichenden Erwachsenen-Aktivität sind vom Bundesamt für Strahlenschutz in Tabelle 6 der Referenz aufgelistet (11).

Empfehlungen zur Anpassung der Dosis bei adipösen Patienten liegen derzeit nicht vor. Es gibt verschiedene Vorgehensweisen, die Dosis abhängig vom Körpergewicht bei Patienten > 70 kg anzupassen. Meist wird eine lineare Anpassung gewählt (46, 64, 84). Bei Patienten > 70 kg haben sich für die erste Injektion bei Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka 4 MBq/kg Körpergewicht als routinetauglich erwiesen und 10 MBq/kg Körpergewicht für die zweite Injektion beim Ein-Tages-Protokoll.

Radiopharmakon und Protokoll	Applizierte Aktivität [MBq] nach Dosisrichtwerten	Kritisches Organ [mGy/MBq]	Effektive Dosis [mSv/MBq]	Effektive Dosis für Patient 70 kg [mSv]
Tl-201	75	Ovar 0,73 Testes 0,45	0,22	16,5
Tc-99m-Sestamibi				
Nur Belastung	250 - 600	Gallenblase 0,033	0,008	2,0 - 4,8
Zwei-Tages-Protokoll	Gesamtdosis 500* - 1200 (250 - 600 Bel. und 250 - 600 Ruhe)	Gallenblase Belastung 0,033 Ruhe 0,039	Belastung 0,008 Ruhe 0,009	4,3 - 10,2
Ein-Tages-Protokoll (erst Belastung, dann Ruhe)	1000 (250 Bel. 750 Ruhe)	Gallenblase Belastung 0,033 Ruhe 0,039	Belastung 0,008 Ruhe 0,009	8,8
Tc-99m-Tetrofosmin				
Nur Belastung	250 - 600	Gallenblase 0,027	0,007	1,8 - 4,2
Zwei-Tages-Protokoll	500* - 1200 (250 - 600 Bel. 250 - 600 Ruhe)	Gallenblase Belastung 0,027 Ruhe 0,036	Belastung 0,007 Ruhe 0,009	4,0 - 9,6
Ein-Tages-Protokoll (erst Belastung, dann Ruhe)	1000 (250 Bel. 750 Ruhe)	Gallenblase Belastung 0,027 Ruhe 0,036	Belastung 0,007 Ruhe 0,009	8,5

Hybridprotokoll	75 MBq TI-201 Ruhe 400** MBq Sestamibi Bel.	Ovar 0,73 Testes 0,45	s. o. Ruhe 0,22 Belastung: 0,008	19,7
	75 MBq TI-201 Ruhe 400** MBq Tetrofosmin Bel.	Ovar 0,73 Testes 0,45	Ruhe 0,22 Belastung: 0,007	19,3

*Der DRW beträgt für das Zweitagesprotokoll 600 MBq pro Injektion, Gesamtdosis 1200 MBq. Da je nach Ausstattung und Detektorqualität mit Mehrkopfkameras mit 250 MBq pro Injektion beim Zweitagesprotokoll eine gute Bildqualität erreichbar ist, kann sich die Gesamtdosis auch auf nur 500 MBq belaufen.

**Mittlerer Wert

Tabelle 8: Dosimetrie bei der Myokard-Perfusions-Szintigraphie (47)

4.5 Datenakquisition

Aus Gründen der einfacheren Lesart wird in den folgenden Absätzen die ergometrisch oder pharmakologisch provozierte reversible Perfusionsstörung als Ischämie bezeichnet.

4.5.1 Protokolle für Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka

Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka bleiben nach Aufnahme nahezu vollständig in der Myokardzelle fixiert, d. h. der Perfusionszustand zum Zeitpunkt der Injektion wird „eingefroren“. Zum Nachweis einer Ischämie sind zwei Injektionen notwendig, unter Belastung und in Ruhe. Die Aufnahmen werden – im Unterschied zu Tl-201 – nach einem längeren Zeitintervall (45 bis 60 min p. i.) angefertigt, um den Einfluss störender Aktivität aus dem Gastrointestinaltrakt gering zu halten. Diese findet sich besonders bei Belastungen mit Vasodilatoren und der damit einhergehenden Durchblutungssteigerung im Magen-Darm-Trakt.

Neuere Studien zeigen, dass die Akquisition der Szintigramme insbesondere bei ergometrischer Belastung bereits nach 10 bis 15 min gestartet werden kann (31).

Die Abfolge von Belastungs- und Ruheuntersuchung kann mit Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka unterschiedlich gehandhabt werden. Zum einen können die Untersuchungen an zwei Tagen (Zwei-Tages-Protokoll) oder an einem Tag (Ein-Tages-Protokoll) durchgeführt werden. Beim Ein-Tages-Protokoll muss eine höhere Gesamtmenge des Radiopharmakons verwendet werden, da die Aktivitätsmenge der ersten Untersuchung „überspritzt“ wird, um deren Beitrag an der Zählrate bei der zweiten Aufnahme gering zu halten. Hierzu wird üblicherweise die dreifache Menge der ersten Aktivität injiziert. Das ist bei Zwei-Tages-Protokollen nicht erforderlich.

Die Strahlenexposition ist bei Ein-Tages-Protokollen höher als bei Zwei-Tages-Protokollen. Dafür liegt das Ergebnis schneller vor. Der Patient muss den Weg in die Abteilung nur einmal antreten. Die Abfolge „erst Belastungsuntersuchung, dann Ruheuntersuchung“ hat den Vorteil, dass bei einem unauffälligen Resultat in der Belastungs-Szintigraphie die Untersuchung beendet werden kann. Dieses Vorgehen bietet sich besonders für die Vorfelddiagnostik an. Ist eine Ruheuntersuchung notwendig, nimmt der Patient nach der Belastungsuntersuchung seine Medikamente ein, so dass für die Ruheuntersuchung, ggf. durch vorherige sublinguale Nitratgabe, eine optimale Perfusionssituation geschaffen wird (60, 87). Bei der Abfolge „zuerst Ruhe-, dann Belastungsuntersuchung“ stört die Medikation die Genauigkeit der Belastungsuntersuchung. Letztere kann dann frühestens einen Tag später durchgeführt werden. Bei Patienten mit unbekanntem Koronarbefund und kardialer Vorgeschichte kann es angebracht sein, zunächst einen Überblick über die Ruheperfusion bzw. die Vitalität des Myokards zu gewinnen, um die Belastungsuntersuchung adäquat planen zu können. In allen anderen Situationen sollte mit der Belastungsuntersuchung begonnen und bei einem normalen Ergebnis (Perfusion, LVEF, Volumina, Wandbewegung normal) auf die Ruheuntersuchung verzichtet werden.

4.5.2 Protokolle für Tl-201

Das Thallium-Protokoll besteht aus einer Frühaufnahme, welche wenige Minuten nach der Belastung beginnt, und einer Spät- oder Redistributionsaufnahme, die 3 bis 4 h nach der Injektion erstellt wird. Bei einer Ischämie zeigt sich ein Defekt in der Frühaufnahme und in der Spätaufnahme eine Redistribution in den betroffenen Segmenten. Besteht ein zu langer Zeitraum zwischen Injektion und Frühaufnahme, kann auf Grund der bereits einsetzenden Umverteilungsvorgänge (frühe Redistribution) die Ausdehnung und Ausprägung einer Ischämie abgeschwächt werden.

Bei Myokardnarben stellt sich in der Spätaufnahme keine Redistribution ein. Im Fall hochgradiger Stenosen und prolongierter Ischämien kann die Redistributionsphase deutlich länger als 3 bis 4 h dauern. Dann sind späte Redistributionsaufnahmen bis 24 h p.i. sinnvoll. Nach der 3- bis 4-h-Redistributionsaufnahme kann eine Ruheinjektion erfolgen, um den TI-201 Pool aufzufüllen und so die Bildqualität der 24-h-Redistributionsaufnahmen zu verbessern. Diese Protokolle kommen zur Anwendung, wenn das Ausmaß des vitalen Myokards bestimmt werden soll. Für die Vitalitätsdiagnostik wird TI-201 in Ruhe injiziert.

4.5.3 Hybridprotokolle

Hybridprotokolle werden mit TI-201 und Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka durchgeführt. Im Normalfall wird mit der TI-201 Ruheuntersuchung begonnen. Nach der Aufnahme folgt die Belastungsuntersuchung mit dem Tc-99m-Perfusions-Radiopharmakon. Wegen der niedrigeren Photonenenergie von TI-201 stört die Ruheaufnahme die spätere Perfusionsaufnahme nicht. Vorteil dieses Protokolls ist die optimale Ausnutzung der unterschiedlichen Eigenschaften der verwendeten Radiopharmaka. Von Nachteil ist die hohe Strahlenexposition (Tabelle 8). Aus diesem Grund sind Hybridprotokolle nur mit Einschränkung zu empfehlen. Sie werden nur sehr selten durchgeführt (57).

4.5.4 Kameraakquisition

4.5.4.1 Qualitätskontrolle von Gammakameras und Hybridgeräten

Die Qualitätsprüfung erfolgt nach der „Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin“ und der DIN-Norm (DIN 6855-2). Die relevanten gesetzlichen Bestimmungen zur Durchführung der Konstanzprüfung finden sich in der „Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin“ in Verbindung mit der einschlägigen DIN-Norm (DIN 6855-2) für die planare Gammakamera und für SPECT-Systeme. Detaillierte Angaben sind der Leitlinie „Nuklearmedizinische Bildgebung“ (AWMF-Leitlinien-Register 031/030) zu entnehmen.

Hybridgeräte (SPECT-CT und PET-CT) werden nach den geltenden Normen der Einzelkomponenten überprüft. Zusätzlich ist eine Überprüfung der Schnittstellenparameter (Überlagerungsgenauigkeit bei der Co-Registrierung und Skalierung der Absorptionskoeffizienten) erforderlich. Derzeit liegen keine Normen oder Empfehlungen zur Durchführung von Abnahme- und Konstanzprüfungen der Schnittstelle vor. Es sind die Herstellerangaben zu beachten.

4.5.4.2 Patientenlagerung

Die Aufnahmen unter der Gamma-Kamera erfolgen überwiegend in Rückenlage. Um Bewegungen während der Aufnahme zu vermeiden, sollten die Patienten so bequem wie möglich gelagert werden. Zur Entlastung der Wirbelsäule ist eine Knieunterlage hilfreich. Alternativ können Aufnahmen auch in Bauchlage erfolgen. Die Abschwächung der Strahlung im Hinterwandbereich fällt in dieser Position geringer aus als in Rückenlage, allerdings können häufiger Absorptionsartefakte im Septum (meist durch die linke Mamma bei Frauen) auftreten. Es gibt keine Studien, die einer Lageposition den Vorzug geben. Wichtig ist, dass Ruhe- und Belastungsaufnahme identisch (Lage, Protokoll, Kameratyp) aufgenommen werden (45).

4.5.4.3 Kameraorbit

Bei Einkopf- oder Doppelkopfkameras erfolgt die Aufnahme von RAO 45° bis LPO 45°. Bei Doppelkopfkameras sollten die Köpfe in 90°-Position zueinander stehen (L-Form). Bei 3-Kopf-Systemen wird eine 360°-Akquisition durchgeführt. 180°-Aufnahmen zeigen einen höheren Kontrast als 360°-Aufnahmen, da bei letzteren durch die dorsalen Projektionen ein höherer Rauschanteil generiert wird. Das ist besonders bei den niedrigen Photonenenergien des

TI-201 der Fall. Es bestehen keine signifikanten Unterschiede in der Genauigkeit der Myokard-Perfusions-SPECT zwischen einem 180°- und einem 360°-Orbit (24, 38, 45).

4.5.4.4 Zirkuläre und nicht-zirkuläre Orbits

Einige Kamerasysteme können die Körperkontur des Patienten nachführen und so Aufnahmen entlang eines nicht-zirkulären Orbits akquirieren. Die räumliche Auflösung ist auf Grund der geringeren Distanz zum Objekt besser (38, 45).

4.5.4.5 Pixel-Größe und Matrix

Die Pixel-Größe sollte etwa 6 mm bei einer 64 x 64er Matrix betragen. Diese Werte liefern sowohl für TI-201 als auch für Tc-99m-Aufnahmen eine ausreichende räumliche Auflösung. Ein Zoom kann verwendet werden, sollte aber nicht zwischen Belastung und Ruheuntersuchung verändert werden oder von Patient zu Patient variieren (38, 45).

4.5.4.6 EKG-Triggerung (gated SPECT)

Alle Aufnahmen sollten EKG-getriggert, als gated SPECT mit 8 Frames (alternativ 12 oder 16 Frames) pro Herzzyklus erfolgen. Sofern akquisitionsseitig umsetzbar, empfiehlt es sich, ein $\pm 10\%$ -Toleranzfenster zu verwenden und außerhalb dieses Bereichs liegende Herzschläge nicht zu verwerfen, sondern separat abzuspeichern. Für die Auswertung der getriggerten Akquisition werden die Daten aus dem $\pm 10\%$ -Toleranzfenster herangezogen. Für die Perfusionsbilder werden alle registrierten Herzschläge verwandt und rekonstruiert. Moderne Aufnahmesysteme haben diese Akquisitionsstrategie bereits implementiert. Andernfalls ist das Aufnahmezeitfenster größer zu wählen (mindestens $\pm 20\%$), um zu gewährleisten, dass alle registrierten Herzschläge gespeichert werden und insbesondere für die Auswertung der Perfusionsstudie in jeder Kamerakopfstellung eine ausreichende Zählratenstatistik gegeben ist. Abb. 8 zeigt schematisch die Aufnahmestrategien und die Auswertungen für gated SPECT.

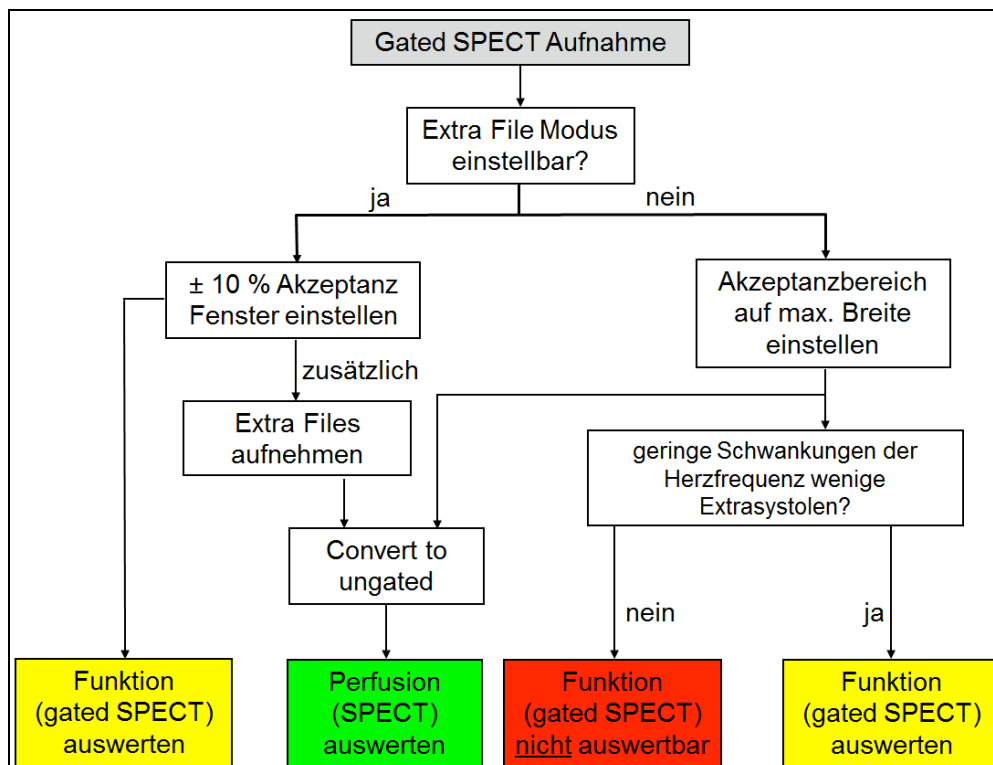


Abb. 8: Akquisition und Auswertung bei der gated SPECT

Bei absoluter Arrhythmie und mehr als 20 % supra- oder ventrikulären Extrasystolen ist die Funktionsauswertung mit der gated SPECT nur eingeschränkt aussagekräftig (26, 38, 45).

4.5.4.7 Step-and-Shoot- vs. Continuous-Mode

Die Aufnahmen erfolgen überwiegend als Step-and-Shoot. Alternativ kann mit einem geringen Zeitgewinn die Akquisition im Continuous-Mode durchgeführt werden. Bei letzterem ist die Ausbeute etwas höher, die Auflösung etwas schlechter. Die Unterschiede zwischen beiden Aufnahmestrategien sind minimal (45).

4.5.4.8 Anzahl der Projektionen

Für TI-201 sind 32 Projektionen über 180° ausreichend, 64 Projektionen können ebenfalls erstellt werden. Für Tc-99m werden 32 bis 64 Projektionen bei 180° Akquisition oder 64 bis 128 Projektionen bei 360° Akquisition empfohlen (38, 45).

4.5.4.9 Aufnahmezeit pro Projektion, Dauer der Aufnahme

Die Aufnahmezeit pro Projektion ist ein Kompromiss zwischen Zählstatistik, der Gesamtdauer der Aufnahme, der Patientencompliance und den Zeitressourcen der Abteilung. Die Akquisitionsdauer sollte 20 bis 30 min nicht überschreiten. Damit liegt die Dauer pro Projektion zwischen 20 bis 30 s. Sofern eine Schwächungskorrektur mit Transmissionsquellen erfolgt, verlängert sich die Aufnahmezeit um 5 bis 10 min (38, 45). Bei der CT-Schwächungskorrektur ist sie deutlich kürzer.

4.6 Datenauswertung

4.6.1 Begutachtung der planaren Projektionsdaten

Vor der Rekonstruktion sollten die Rohdaten (planare Projektionen) überprüft werden. Folgende Punkte sind zu berücksichtigen:

- Technische Qualität der Aufnahmen: niedrige Countrate z. B. durch paravasale Injektion oder Kameraproblem, Ausfall von Projektionen z. B. durch Abfall einer EKG-Elektrode bei der gated SPECT.
- Befand sich das Herz während der gesamten Aufnahme im field-of-view? Wenn nicht, bei Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka oder bei TI-201-Redistributionsaufnahmen Akquisition wiederholen.
- Patientenbewegung während der Aufnahme? Wenn ja, sollte - sofern implementiert - eine Bewegungskorrektur der Daten erfolgen, alternativ eine Wiederholung der Aufnahmen. Bei vertikalen Bewegungen ist eine softwaregestützte Bewegungskorrektur oft erfolgreich, bei horizontalen oder kombinierten Bewegungen meist eine Wiederholung der Aufnahmen zielführend.
- Kommt das Myokard in einigen Projektionen (z. B. anterior bis seitlich) mit geringerer Aktivität zur Darstellung? Hinweis auf Absorption.
- Zeigen sich schwächende Objekte (z. B. Implantate), die Artefakte hervorrufen können?
- Zeigt sich eine hohe Lungenaktivität, ein dilatierter Ventrikel? Hinweise auf eine Herzinsuffizienz.
- Zeigen sich parakardiale Anreicherungen? Radiopharmaka werden auch von Tumoren, Metastasen, versprengten Nebenschilddrüsenadenomen und Thymomen aufgenommen.

- Finden sich intensive parakardiale Aktivitätsanreicherungen (z. B. durch Aktivität im Gastrointestinaltrakt)? Hierdurch können insbesondere bei der gefilterten Rückprojektion Rekonstruktionsartefakte (meist in der Hinterwand) hervorgerufen werden.

4.6.2 Rekonstruktion: Gefilterte Rückprojektion und iterative Rekonstruktion

Für die Datenrekonstruktion stehen zwei Verfahren (gefilterte Rückprojektion und iterative Rekonstruktion) zur Verfügung. Die gefilterte Rückprojektion ist ein schnelles Verfahren, berücksichtigt aber grundlegende Prozesse der Photonenemission (Schwächung, Streustrahlung) nicht. Die Daten müssen vor oder nach der Rekonstruktion gefiltert werden (Hanning- oder Butterworth-Filter kombiniert mit einem Rampenfilter). Die Filterung verringert den Rauschanteil im Bild durch Elimination hoher Frequenzanteile, jedoch auf Kosten der räumlichen Auflösung. Daher stellt eine Filterung immer eine Kompromisslösung dar. Für die geeignete Filtereinstellung sind die Angaben des Kameraherstellers zu beachten. Kontrastverstärkende Filter (Wiener oder Metz) sollten nicht verwendet werden. Ebenso sollten Filtereinstellungen aus Gründen der intra- und interindividuellen Vergleichbarkeit nicht verändert werden (59).

Der gated SPECT-Datensatz, der für die Funktionsanalyse verwendet wird, kann wegen der geringeren Zählrate pro Frame verglichen mit der ungetriggerten Perfusionsstudie etwas weicher gefiltert werden (Beispiel bei Verwendung eines Butterworth-Filters (Order 5.0): ungetriggelter Datensatz (Perfusionsstudie): cutoff 0,25 bis 0,3 cycles/pixel; getriggelter Datensatz 0,2 cycles/pixel) (27, 45).

Iterative Rekonstruktionsverfahren (OSEM: ordered-subset expectation maximization; MLEM: maximum likelihood expectation maximization) werden auf Grund der inzwischen hohen Rechnerkapazität immer häufiger eingesetzt. Die Verfahren erlauben bei der Rekonstruktion die Streustrahlung, die Absorption durch das Gewebe und die Kollimatoreigenschaften zu berücksichtigen. Sie kommen bevorzugt bei Systemen zur Anwendung, die mit einer Schwächungskorrektur arbeiten. Auch bei schlechter Zählstatistik liefern sie gute Ergebnisse (38, 45).

4.6.3 Reorientierung

Die Rekonstruktionsverfahren liefern transversale Schnittbilder, die entlang der Herzachse reanguliert und ausgerichtet werden. Es werden Kurzachsenschnitte (von apikal nach basal), horizontale Längsachsenschnitte (von kranial nach kaudal oder umgekehrt) und vertikale Längsachsenschnitte (von septal nach lateral) erzeugt.

4.6.4 Gated SPECT

4.6.4.1 Qualitätskontrolle

Die Software ist z. T. mit Kontrolldarstellungen ausgestattet, die die Häufigkeitsverteilung der registrierten und für die gated SPECT akzeptierten Herzschläge liefert. An Hand des Herzschlag-Histogramms (Beat-Histogramm) kann erkannt werden, wie viele Herzzyklen pro Kamerakopfposition registriert wurden und ob größere Abweichungen während der Akquisition vorlagen. Der Verlauf der Volumenkurve erlaubt gleichfalls Rückschlüsse auf die Qualität der gated SPECT.

Die Wandkonturfundung sollte genau geprüft werden. Bei größeren Infarkten oder einstrahlender Aktivität aus dem Gastrointestinaltrakt kann diese fehlerhaft sein. Auf Grund des begrenzten Auflösungsvermögens der Kamera wird bei kleinen Herzen das Ventrikelkavum in der Endsystole nicht mehr komplett aufgelöst, so dass ein zu kleines endsystolisches Volumen ermittelt wird. Dies führt nahezu unabhängig vom enddiastolischen Volumen zu einer Überschätzung der LVEF.

4.6.4.2 Auswertung

Für gated SPECT stehen zertifizierte Auswerteprogramme zur Verfügung, die meist auf Basis der rekonstruierten Kurzachsenschnitte arbeiten. Sie liefern neben Funktionsparametern und ventrikulären Volumina auch Informationen zur regionalen Wandbewegung und Wanddickenzunahme. Die Wandbewegung kann an Hand der Schnittbilder oder in 3-D-Ansichten mit auswählbaren endsystolischen und epikardialen Hilfskonturen im Cine-Mode betrachtet werden.

Alle verfügbaren Auswerteprogramme weisen über das gesamte LVEF-Spektrum eine hohe Übereinstimmung der ermittelten gated SPECT-Funktionsparameter im Vergleich zum Referenzstandard (meist MRT) auf. Allerdings bestehen zwischen den Programmen signifikante Unterschiede bei der Bestimmung von LVEF, EDV und ESV.

Neben den Funktionsparametern und den ventrikulären Volumina sind mit der gated SPECT die regionale Wandbewegung und die Wanddickenzunahme beurteilbar. An Hand der Schnittbilder oder in 3-D-Ansichten mit wählbaren enddiastolischen und epikardialen Hilfskonturen können Wandbewegung und Wanddickenzunahme im Cine-Mode aus unterschiedlichen Blickrichtungen (Empfehlung Ansicht von septal, Ansicht von anterior) beurteilt werden.

4.6.5 Schwächungskorrektur

4.6.5.1 Qualitätskontrolle

Transmissionsbilder sollten bei jeder Patientenstudie auf Truncation-Artefakte (helle Ringe in der Körperperipherie), Crosstalk (verminderte Intensität im Bereich von Herz und Leber), geringe Zählraten (vermehrte Unschärfe und Rauschen in den Bildern) und exakte Koregistrierung geprüft werden. Für die Befundung sollten die schwächungskorrigierten und nicht-schwächungskorrigierten Tomogramme herangezogen werden.

4.6.5.2 Artefakte

Die folgenden Artefaktquellen sind bei einer gemessenen Schwächungskorrektur (CT oder Transmissionsquellen) zu berücksichtigen (32, 44):

- Wird das zu untersuchende Objekt in der Transmissionsmessung nicht vollständig erfasst, entstehen Artefakte in den Transmissionsaufnahmen und in den damit korrigierten Emissionsbildern (Truncation-Artefakte).
- Transmissions- und Emissionsaufnahmen müssen exakt koregistriert sein. Ein Versatz zwischen der Emissions- und der Transmissionsmatrix von mehr als einem Pixel führt zu Bildartefakten.
- Je nach Energie der Transmissions- oder Emissionsstrahlung kommt es zu einem Einfluss auf die Transmissions- bzw. Emissionsaufnahmen (Crosstalk).
- Streustrahlung aus benachbarten Organen (Leber und Intestinum) kann regional eine Überkorrektur, insbesondere im Hinterwandbereich bewirken.
- Bei niedrigen Zählraten in den Transmissionsaufnahmen können Artefakte in den rekonstruierten Schichten entstehen, die sich auf die Emissionsbilder übertragen.

4.7 Befundung und Dokumentation

4.7.1 Tomographische Darstellung

Die Befundung erfolgt an Hand aller 3 Schnittebenen (Kurzachse, horizontale und vertikale Längsachse). Belastungs- und Ruheaufnahmen sollten korrespondierend, am besten untereinander angeordnet werden. Zu bevorzugen ist ein Format, auf dem alle 3 Bildebenen dargestellt sind. Für die Bilddarstellung sollte eine kontinuierliche Farbskala verwendet und auf der Schnittbilddarstellung dokumentiert werden. Diskontinuierliche Farbskalen sind nicht geeignet.

4.7.2 Polartomogramme

Ein Polartomogramm ist die Projektion des gesamten linksventrikulären Myokards auf eine Kreisfläche. Polartomogramme ergänzen die schnittbildbasierte Darstellung und zeigen anschaulich Ausdehnung und Ausprägung von Perfusionsstörungen bzw. Vernarbungen. Die Ventrikelgröße bleibt unberücksichtigt, da die Projektion auf eine Kreisfläche von fester Größe erfolgt. Artefakte (z. B. durch einstrahlende Aktivität oder Absorptionen) lassen sich auf Polartomogrammen nicht erkennen.

Durch Subtraktion des Stress-Polartomogramms vom Rest-Polartomogramm wird ein Differenz-Polartomogramm errechnet, das die reversiblen (ischämischen) Perfusionsstörungen in Ausdehnung, Ausprägung und Lokalisation zeigt. Hierzu müssen die Ausgangs-Polartomogramme identisch orientiert sein.

4.7.3 Befundung der Belastungs- und Ruheaufnahmen

Die Beschreibung eines Perfusionsdefektes sollte Lokalisation, Ausdehnung und Ausprägung beinhalten. Für die Lokalisation bietet sich das 17- oder 20-Segment-Modell an. Als einheitliche Basis und Nomenklatur – auch zu anderen bildgebenden Modalitäten – empfiehlt sich das 17-Segment-Modell (14, 67). Zur Graduierung von Perfusionsstörungen siehe Tabelle 9.

Score	Perfusion			Funktion	
	Beschreibung	Aufnahme in % vom Maximum	Standardabweichungen v. Normalkollektiv	Wandbewegung	Wanddickenzunahme
0	Normal	≥ 70	< 1,5	normal	normal
1	Gering vermindert	50 - 69	1,51 - 2,1	geringe Hypokinesie	gering vermindert
2	Mäßig vermindert	30 - 49	2,11 - 4,0	mäßige Hypokinesie	mäßig vermindert
3	Deutlich vermindert	10 - 29	4,1 - 7	schwere Hypokinesie	deutlich vermindert
4	Fehlend	< 10	> 7	Akinesie	Keine
5				Dyskinesie	

Tabelle 9: Graduierung der Ausprägung von Perfusionsstörungen, der Wandbewegung und der Wanddickenzunahme (91, 96)

4.7.4 Quantitative Bewertung der Perfusion

Zur quantitativen Perfusionsanalyse wird das Polartomogramm in 17 oder 20 Segmente unterteilt. Die Aktivitätsbelegung in jedem Segment wird semiquantitativ an Hand eines 5er Scores (0 – normal, 1 – grenzwertig, 2 – gering, 3 – mäßig, 4 – deutlich vermindert) kategorisiert. Die Klassifikation erfolgt automatisch durch den Vergleich mit einem gesunden Normalkollektiv und/oder visuell. Die Normkollektive müssen geschlechts-, kamera- und Radiopharmakon-spezifisch erstellt werden und mindestens 20 bis 30 Datensätze beinhalten.

Die softwareseitig gelieferten Normkollektive (z. B. aus den USA) sind nicht ohne Weiteres auf deutsche Verhältnisse übertragbar (53). Daher empfiehlt es sich, eigene Normkollektive zu erstellen. Für die Aufnahme in ein Normkollektiv sollte idealerweise die KHK-Vortestwahrscheinlichkeit < 3 % sein. Diese Vorbedingung kann allein seitens der rechtfertigenden Indikation nicht eingehalten werden. Inzwischen wurden die Kriterien für Patienten, die in eine Normaldatenbank aufgenommen werden können, überarbeitet. Sie sind in Tabelle 10 ausgeführt. Voraussetzung ist, dass ein normaler Befund ohne Artefakte vorliegt (94).

Einschlusskriterien

- Alter 25 bis 65 Jahre
- asymptomatisch
- keine bekannte Herzerkrankung
- keine systemische Erkrankung

Ausschlusskriterien

- bekannte KHK
- Angina pectoris-Symptomatik
- Diabetes mellitus
- Hypertonus
- Dyslipoproteinämie
- Einnahme kardialer Medikamente
- Herzinsuffizienz
- Adipositas (BMI > 30 kg/m²)
- obstruktive Ventilationsstörung
- signifikante atriale oder ventrikuläre Arrhythmien
- pathologisches Belastungs-EKG
- belastungsabhängiger Hypertonus
- bedeutsame Schwächungsartefakte
- schlechte Qualität der SPECT-Aufnahme

Tabelle 10: Ein- und Ausschlusskriterien für eine Normaldatenbank (94)

Beim 17-Segment-Modell liegt das Resultat der quantitativen Perfusionsbewertung zwischen 0 und (theoretisch) 68, beim 20-Segment-Modell zwischen 0 und (theoretisch) 80. Eine Umrechnung der Scores vom 20- auf das 17-Segment-Modell ist für klinische Zwecke möglich (7). Alternativ können die Scores auch prozentual angegeben werden. Prozentwerte erlauben eine leichtere Vergleichbarkeit.

Der Score der Belastungs-Perfusions-Studie wird als Summed Stress Score (SSS) und der Ruhe-Perfusions-Studie als Summed Rest Score (SRS) bezeichnet. Der SRS ist ein Maß für Infarzierungen (und von hibernierendem Myokard), wohingegen der SSS sowohl das Ausmaß reversibler (ischämischer) als auch irreversibler (auf Infarkten beruhender) Perfusionsstörungen widerspiegelt. Die Zuordnung des SSS zu Risikoklassen zeigt die Tabelle 11. Der Summed Difference Score (SDS) ist die Differenz aus SSS und SRS und das Maß der reversiblen (ischämischen) Perfusionsstörungen. Ein SDS < 3 % ist noch normal, ein SDS > 9 % entspricht einer deutlichen Ischämie (75).

Ein besonderer Stellenwert kommt dem SDS bei der Entscheidung zwischen medikamentöser oder interventioneller Therapie zu (s. 2.1.5). Bei einem SDS < 10 bis 12 % liegt die kardiale Mortalität mit einer medikamentösen Therapie unter der einer Intervention, bei einem höheren SDS kehrt sich diese Relation um (35). Entsprechend der Empfehlung der NVL Chronische KHK, dass vor einer Revaskularisation ein Ischämienachweis erfolgen sollte, ergibt sich hiermit eine effektive Einsatzmöglichkeit der Myokard-Perfusions-SPECT in Zusammenschau mit der klinischen Symptomatik.

Die quantitative Auswertung sollte als Additivum in die Befundung eingebunden werden. Sie liefert ergänzend zur Beschreibung der Perfusion standardisierte Werte, an Hand derer Risikoklassifizierungen und therapeutische Entscheidungshilfen begründet werden können (34, 35). Darüber hinaus eignet sich die Quantifizierung bei Verlaufsbeurteilungen.

SSS (20-Segment-Modell)	SSS (%)	Status	Kardiales Risiko und jährliche kardiale Mortalitätsrate
< 4	< 5	normal	niedrig, < 1 %
4 - 8	5 - 10	gering pathologisch	mittel, 1 - 3 %
9 - 13	11 - 16	mäßig pathologisch	
> 13	> 16	hoch pathologisch	hoch, > 3 %

Tabelle 11: Risikobeurteilung anhand des Summed Stress Scores (34)

4.7.5 Nebenefunde

4.7.5.1 Transitorische ischämische Dilatation

Eine transitorische ischämische Dilatation (TID) liegt vor, wenn das linksventrikuläre Cavum in den Post-Stressaufnahmen größer als in den Ruheaufnahmen ist. Der Parameter deutet auf eine belastungsinduzierte ventrikuläre Dysfunktion bei Herzinsuffizienz und/oder ausgeprägten Ischämien hin, häufig im Rahmen einer Mehrgefäßerkrankung. Bei subendokardialen Ischämien kann der TID ebenfalls erhöht sein. Der TID-Index wird von vielen Auswerteprogrammen automatisch generiert. Bei Aufnahmen mit Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka oder TI-201 ist ein TID-Index > 1,12 pathologisch, bei Hybridprotokollen ein Wert > 1,22 (61).

4.7.5.2 Lungen-Herz-Quotient

Bei TI-201-Aufnahmen weist ein Lungen-Herz-Quotient > 0,5 auf eine Herzinsuffizienz (ausgedehnte Ischämie, Klappenfehler, Kardiomyopathie) hin. Für Tc-99m-Perfusions-Radiopharmaka ist der pathologische Bereich nicht so klar wie für TI-201 definiert. Der Normwert liegt bei < 0,3. Erhöhte Werte gehen wie bei TI-201 mit einer schlechteren Prognose einher (56).

4.7.6 Gated SPECT: LVEF und Volumina

Die linksventrikuläre Ejektionsfraktion ist ein zentraler und prognostisch wegweisender Parameter der gated SPECT-Auswertung. Er sollte im Befund aufgeführt werden. Die ermittelte LVEF bei der Myokard-Perfusions-SPECT hängt von mehreren Faktoren wie der Zahl der aufgezeichneten Frames (8 oder 16 Frames), dem Geschlecht und dem Auswerteprogramm ab. Bei einer Akquisition mit 16 Frames wird die Volumenkurve genauer als mit 8 Frames abgetastet. Die LVEF liegt daher etwa 5 % höher als beim 8-Frame-Gating (27).

Allgemein ist ein Wert > 50 % als normal und < 40 % als eindeutig pathologisch zu bewerten. Zwischen 40 bis 50 % liegt eine Grauzone. Orientierende Normwerte für die LVEF und die linksventrikulären Volumina, mit QGS™ ermittelt, sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Geschlecht	LVEF (%)	EDV (ml)	ESV (ml)	EDVi (ml/m ²)	ESVi (ml/m ²)
w (n=597)	51	102	46	60	27
m (n=824)	43	149	75	75	39

Tabelle 12: Normgrenzen für LVEF, EDV, ESV, EDVi, ESVi (76)

Die Grenzwerte entsprechen für die LVEF dem MW – 2 x SD, für die Volumina dem MW + 2 x SD. Die Werte wurden mit dem Auswerteprogramm QGS™ ermittelt (28).

Tabelle 12: Normgrenzen für LVEF, EDV, ESV, EDVi, ESVi (75)

Für die Wandbewegung und die Wanddickenzunahme existiert ein semiquantitatives Beurteilungssystem, das sich allerdings noch nicht durchgesetzt hat (Tabelle 9).

4.7.7 Befundbericht

Der Befundbericht ist für den Zu- oder Überwieser das zentrale Ergebnis der Untersuchung. Er sollte sich an folgenden Positionen orientieren (19, 43):

- **Klinische Angaben und Anamnese**
 - Symptomatik: Angina pectoris, Ischämie-Äquivalent (klinische Symptomatik, die auf eine stenosierende KHK hinweisen kann), Dyspnoe, zeitliche Entwicklung
 - Kardiales Risikoprofil: Dyslipoproteinämie, arterieller Hypertonus, Adipositas, Nikotinkonsum, Familienanamnese
 - Kardiale Anamnese: Infarkte, Interventionen (PTCA, Stent), Bypass-OP (mit Gefäßstatus), Herzklappenerkrankungen, -OP, Kardiomyopathie, Schrittmacher, implantierte Defibrillatoren
 - Ergebnisse von Voruntersuchungen: Koronarangiographien, Myokardszintigraphien, (Stress-)Echokardiographien, MRT, CT, Labor
 - Aktuelle kardiale Medikation mit letzter Einnahme
- **(Rechtfertigende) Indikation und Fragestellung**
 - Sollte sich aus der Anamnese ergeben und die Untersuchung begründen, klare Formulierung, Indikationen siehe Kapitel 3 der Leitlinie
- **Durchführung der Belastung**
 - Belastungsart (ergometrisch, pharmakologisch) und Protokoll (Dauer der Belastung, maximale Belastungsstufe, Injektionszeitpunkt, bei pharmakologischer Belastung Angabe der Dosierung)
 - Klinische Symptomatik unter Belastung (Angina pectoris, Dyspnoe, Abbruchkriterium, Sonstiges)
 - Kreislaufreaktion (Verlauf von Herzfrequenz und Blutdruck)

- EKG-Veränderungen (ST-Strecken) mit Angaben der Ableitungen, Rhythmusstörungen
- **Aufnahmeprotokoll**
 - Verwendete Radiopharmaka, injizierte Dosis (siehe Dosisrichtwerte), Wartezeit bis zum Aufnahmezeitpunkt, Ein- oder Zwei-Tages-Protokoll bei Tc-99m-Radiopharmaka
 - Gabe von sublingualem Nitrat vor der Ruheinjektion
 - Einsatz einer Schwächungskorrektur
 - Einsatz von gated SPECT
- **Befundbeschreibung**
 - Qualität der Studie (Bewegung, einstrahlende Aktivität, technische Defekte)
 - Erwähnung, wenn die Befundung mit schwächungskorrigierten Aufnahmen erfolgte
 - Beschreibung von Aktivitätsdefekten hinsichtlich Ausdehnung (klein, mittel, ausgedehnt), Ausprägung (gering, mäßig, deutlich) und Reversibilität (vollständig reversibel, teilweise reversibel, fixierter Defekt), Lokalisation und Nomenklatur an Hand des 17- oder 20-Segment-Modells hilfreich
 - Semiquantitative Auswertung mit Scores
 - Zeichen der Herzinsuffizienz (TID, Lungenaktivität, rechtsventrikuläre Darstellung)
 - Bei gated SPECT:
 - bei kleinen Ventrikeln mit hoher EF kann die Formulierung „EF > 60 %“ verwandt werden
 - Ruhe-LVEF und Post-Stress-LVEF mit Zeitangabe, wie viele Minuten nach der Belastung die Aufnahme erfolgte
 - bei Dilatation des Ventrikels EDV (und ESV) angeben
 - regionale Wandbewegung und Wanddickenzunahme, insbesondere wenn sie zum Nachweis von Schwächungsartefakten herangezogen werden
- **Beurteilung**
 - Beschreibung einer Ischämie (bei ergometrischer Belastung) oder einer Einschränkung der Perfusionsreserve (bei Vasodilatator-Belastung) hinsichtlich Ausdehnung und Ausprägung (gering – moderat – schwer)
 - ggf. Zuordnung zu Gefäßterritorien und zum Gefäßstatus, wenn dieser vorliegt
 - Beschreibung einer Vernarbung (Ausdehnung, Ausprägung transmural – disseminiert)
 - ggf. Zuordnung zu Gefäßterritorien und zum Gefäßstatus, wenn dieser vorliegt
 - LVEF normal, geringgradig, mittelgradig, hochgradig eingeschränkt, Differenz zwischen Ruhe und Post-Stress-LVEF erwähnen wenn > 5 %
 - Wandbewegungsstörung nach Belastung im Bereich der Ischämiezone und verbesserte Wandbewegung bei der Ruheaufnahme als Hinweis auf ein ischämiegetriggertes Stunning
 - Wenn möglich, eindeutige und klare Aussage formulieren

- Wenn Befund pathologisch, diesen zu vorliegenden Ergebnissen (Koronarstatus), Symptomatik, Belastungsverlauf in Bezug setzen
- Unsichere Formulierungen sollten vermieden werden (< 10 % der Fälle)
- Klare Antwort auf die klinische Fragestellung geben und individuellen Kontext berücksichtigen
- Prognose- und Risikoinformation durch die Myokard-Perfusions-SPECT berücksichtigen (z. B. Normalbefund bedeutet geringes kardiales Risiko)
- Wenn eine Entscheidung zwischen konservativer Therapie oder Revaskularisation im Raum steht, kann das Ausmaß der Ischämie als Entscheidungshilfe dienen (bei SDS < 10 bis 12 % bevorzugt konservative Therapie)

4.8 Qualitätssicherung und Fehlerquellen

Als häufige Fehlerquellen kommen in Betracht:

- Paravasale Injektion
- Nicht ausreichende Belastung
- Patientenbewegung während der Aufnahme
- Fehlerhaftes oder gestörtes Triggersignal
- Fehler in der Rekonstruktion und Bildverarbeitung
- Schwächungsartefakte
- Bei Schwächungskorrekturen Misalignement von Transmission und Emission
- Parakardiale Aktivitätsanreicherungen
- Ungeeignete Normkollektive bei den Perfusionsscores

Zur Behebung und Vermeidung dieser Fehlerquellen sei auf die Positionen 4.6.1, 4.6.4.1 und 4.6.5.1 verwiesen.

5 Literaturverzeichnis

1. Acampa W, Cuocolo A, Petretta M, et al. Tetrofosmin imaging in the detection of myocardial viability in patients with previous myocardial infarction: comparison with sestamibi and TI-201 scintigraphy. *J Nucl Cardiol* 2002;9:33-40.
2. Adamu U, Knollmann D, Almutairi B, et al. Stress/rest myocardial perfusion scintigraphy in patients without significant coronary artery disease. *J Nucl Cardiol* 2010;17:8-12.
3. Allman KC, Shaw LJ, Hachamovitch R, Udelson JE. Myocardial viability testing and impact of revascularization on prognosis in patients with coronary artery disease and left ventricular dysfunction: a meta-analysis. *J Am Coll Cardiol* 2002;39:1151-1158.
4. Anderson JL, Adams CD, Antman EM, et al. ACC/AHA 2007 guidelines for the management of patients with unstable angina/non ST-elevation myocardial infarction: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines. *Circulation* 2007;116:e148-304.
5. Bateman TM, Heller GV, Johnson LL, et al. Does attenuation correction add value to non-attenuation corrected ECG-gated technetium-99m-sestamibi SPECT? *Journal of Nuclear Cardiology* 2003;10:S91.
6. Bax JJ, Wijns W, Cornel JH, et al. Accuracy of currently available techniques for prediction of functional recovery after revascularization in patients with left ventricular dysfunction due to chronic coronary artery disease: comparison of pooled data. *J Am Coll Cardiol* 1997;30:1451-1460.
7. Berman DS, Abidov A, Kang X, et al. Prognostic validation of a 17-segment score derived from a 20-segment score for myocardial perfusion SPECT interpretation. *J Nucl Cardiol* 2004;11:414-423.
8. Biagini E, Shaw LJ, Poldermans D, et al. Accuracy of non-invasive techniques for diagnosis of coronary artery disease and prediction of cardiac events in patients with left bundle branch block: a meta-analysis. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2006;33:1442-1451.
9. Bokhari S, Ficaro EP, McCallister BD, Jr. Adenosine stress protocols for myocardial perfusion imaging. *J Nucl Cardiol* 2007;14:415-416.
10. Bottcher M, Czernin J, Sun KT, Phelps ME, Schelbert HR. Effect of caffeine on myocardial blood flow at rest and during pharmacological vasodilation. *J Nucl Med* 1995;36:2016-2021.
11. Bundesamt für Strahlenschutz. Bekanntmachung der diagnostischen Referenzwerte für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen. 2003.
www.bfs.de/de/ion/medizin/referenzwerte01.pdf
12. Bundesärztekammer, Arbeitsgemeinschaft der wissenschaftlichen medizinischen Fachgesellschaften, Kassenärztliche Bundesvereinigung. Nationale Versorgungsleitlinie Chronische KHK, Version 1.10 (Langfassung). Dezember 2010.
www.versorgungsleitlinien.de/themen/khk/pdf/nvl_khk_lang.pdf (letzter Zugriff 23.05.2011)
13. Cerqueira MD, Verani MS, Schwaiger M, Heo J, Iskandrian AS. Safety profile of adenosine stress perfusion imaging: results from the Adenoscan Multicenter Trial Registry. *J Am Coll Cardiol* 1994;23:384-389.
14. Cerqueira MD, Weissman NJ, Dilsizian V, et al. Standardized myocardial segmentation and nomenclature for tomographic imaging of the heart. A statement for healthcare professionals from the Cardiac Imaging Committee of the Council on Clinical Cardiology of the American Heart Association. *Int J Cardiovasc Imaging* 2002;18:539-542.

15. Commission, European. Radiation Protection 10. Guidance on diagnostic reference levels (DRLs) for medical exposures, Luxembourg; Office for Official Publications of the European Communities. 1999.
ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/109_en.pdf (letzter Zugriff 23.05.2011).
16. Dakik HA, Vempathy H, Verani MS. Tolerance, hemodynamic changes, and safety of dobutamine stress perfusion imaging. *J Nucl Cardiol* 1996;3:410-414.
17. del Val Gomez M, Gallardo FG, San Martin MA, Garcia A, Terol I. Ischaemic related transitory left ventricular dysfunction in 201Tl gated SPECT. *Nucl Med Commun* 2005;26:601-605.
18. DePuey EG, Rozanski A. Using gated technetium-99m-sestamibi SPECT to characterize fixed myocardial defects as infarct or artifact. *J Nucl Med* 1995;36:952-955.
19. Douglas PS, Hendel RC, Cummings JE, et al. ACCF/ACR/AHA/ASE/ASNC/HRS/NASCI/RSNA/SAIP/SCAI/SCCT/SCMR 2008 Health Policy Statement on Structured Reporting in Cardiovascular Imaging. *Circulation* 2009;119:187-200.
20. Druz RS, Akinboboye OA, Grimson R, Nichols KJ, Reichek N. Postischemic stunning after adenosine vasodilator stress. *J Nucl Cardiol* 2004;11:534-541.
21. Eagle KA, Berger PB, Calkins H, et al. ACC/AHA guideline update for perioperative cardiovascular evaluation for noncardiac surgery. *Circulation* 2002;105:1257-1267.
22. Elhendy A, Valkema R, van Domburg RT, et al. Safety of dobutamine-atropine stress myocardial perfusion scintigraphy. *J Nucl Med* 1998;39:1662-1666.
23. Fleisher LA, Beckman JA, Brown KA, et al. ACC/AHA 2007 guidelines on perioperative cardiovascular evaluation and care for noncardiac surgery. *J Am Coll Cardiol* 2007;50:e159-241.
24. Freeman MR, Konstantinou C, Barr A, Greyson ND. Clinical comparison of 180-degree and 360-degree data collection of technetium 99m sestamibi SPECT for detection of coronary artery disease. *J Nucl Cardiol* 1998;5:14-18.
25. Fricke E, Esdorn E, Kammeier A, et al. Respiratory resistance of patients during cardiac stress testing with adenosine: is dyspnea a sign of bronchospasm? *J Nucl Cardiol* 2008;15:94-99.
26. Germano G, Berman D. Acquisition and Processing for Gated Perfusion SPECT: Technical Aspects. In: Germano G, Berman D, eds. *Clinical Gated Cardiac SPECT*. Armonk, New York: Futura Publishing Company, Inc.; 1999:93-113.
27. Germano G, Berman DS. Quantitative Gated Perfusion SPECT. In: Germano G, Berman DS, eds. *Clinical Gated Cardiac SPECT*. Armonk, New York: Futura Publishing Company, Inc.; 1999:115-146.
28. Germano G, Kiat H, Kavanagh PB, et al. Automatic quantification of ejection fraction from gated myocardial perfusion SPECT. *J Nucl Med* 1995;36:2138-2147.
29. Gesetz. über den Verkehr mit Arzneimitteln (Arzneimittelgesetz - AMG). Arzneimittelgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 12. Dezember 2005 (BGBl. I S. 3394), das zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. September 2009 (BGBl. I S. 3172) geändert worden ist.
30. Gibbons RJ, Balady GJ, Bricker JT, et al. ACC/AHA 2002 guideline update for exercise testing: summary article. A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (Committee to Update the 1997 Exercise Testing Guidelines). *J Am Coll Cardiol* 2002;40:1531-1540.

31. Giorgetti A, Rossi M, Stanislao M, et al. Feasibility and diagnostic accuracy of a gated SPECT early-imaging protocol: a multicenter study of the Myoview Imaging Optimization Group. *J Nucl Med* 2007;48:1670-1675.
32. Gregoriou GK, Tsui BM, Gullberg GT. Effect of truncated projections on defect detection in attenuation-compensated fanbeam cardiac SPECT. *J Nucl Med* 1998;39:166-175.
33. Hachamovitch R, Berman DS. The use of nuclear cardiology in clinical decision making. *Semin Nucl Med* 2005;35:62-72.
34. Hachamovitch R, Berman DS, Shaw LJ, et al. Incremental prognostic value of myocardial perfusion single photon emission computed tomography for the prediction of cardiac death: differential stratification for risk of cardiac death and myocardial infarction. *Circulation* 1998;97:535-543.
35. Hachamovitch R, Hayes SW, Friedman JD, Cohen I, Berman DS. Comparison of the short-term survival benefit associated with revascularization compared with medical therapy in patients with no prior coronary artery disease undergoing stress myocardial perfusion single photon emission computed tomography. *Circulation* 2003;107:2900-2907.
36. Hachamovitch R, Rozanski A, Hayes SW, et al. Predicting therapeutic benefit from myocardial revascularization procedures: are measurements of both resting left ventricular ejection fraction and stress-induced myocardial ischemia necessary? *J Nucl Cardiol* 2006;13:768-778.
37. Hage FG, Venkataraman R, Aljaroudi W, et al. The impact of viability assessment using myocardial perfusion imaging on patient management and outcome. *J Nucl Cardiol* 2010;17:378-389.
38. Hansen CL, Goldstein RA, Berman DS, et al. Myocardial perfusion and function single photon emission computed tomography. *J Nucl Cardiol* 2006;13:e97-120.
39. Hara M, Monzen H, Futai R, et al. Reduction of intracardiac intestinal activity by a small amount of soda water in technetium-99m tetrofosmin myocardial perfusion scintigraphy with adenosine stress. *J Nucl Cardiol* 2008;15:241-245.
40. Hashimoto A, Palmar EL, Scott JA, et al. Complications of exercise and pharmacologic stress tests: differences in younger and elderly patients. *J Nucl Cardiol* 1999;6:612-619.
41. Hashimoto J, Kubo A, Iwasaki R, et al. Gated single-photon emission tomography imaging protocol to evaluate myocardial stunning after exercise. *Eur J Nucl Med* 1999;26:1541-1546.
42. Hendel RC, Berman DS, Di Carli MF, et al. ACCF/ASNC/ACR/AHA/ASE/SCCT/SCMR/SNM 2009 appropriate use criteria for cardiac radionuclide imaging. *Circulation* 2009;119:e561-587.
43. Hendel RC, Budoff MJ, Cardella JF, et al. ACC/AHA/ACR/ASE/ASNC/HRS/NASCI/RSNA/SAIP/SCAI/ SCCT/SCMR/SIR 2008 Key Data Elements and Definitions for Cardiac Imaging: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Data Standards. *Circulation* 2009;119:154-186.
44. Hendel RC, Corbett JR, Cullom SJ, et al. The value and practice of attenuation correction for myocardial perfusion SPECT imaging: a joint position statement from the American Society of Nuclear Cardiology and the Society of Nuclear Medicine. *J Nucl Cardiol* 2002;9:135-143.
45. Hesse B, Tagil K, Cuocolo A, et al. EANM/ESC procedural guidelines for myocardial perfusion imaging in nuclear cardiology. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2005;32:855-897.
46. Holly TA, Abbott BG, Al-Mallah M, et al. Single photon-emission computed tomography. *J Nucl Cardiol*;17:941-973.

47. ICRP. Publication 80. Radiological protection in biomedical research: Annals of the ICRP Vol 28/3, Pergamon Press; 1998.
48. Iskandrian AE, Bateman TM, Belardinelli L, et al. Adenosine versus regadenoson comparative evaluation in myocardial perfusion imaging: results of the ADVANCE phase 3 multicenter international trial. *J Nucl Cardiol* 2007;14:645-658.
49. Iskandrian AS, Heo J, Kong B, Lyons E. Effect of exercise level on the ability of thallium-201 tomographic imaging in detecting coronary artery disease: analysis of 461 patients. *J Am Coll Cardiol* 1989;14:1477-1486.
50. Johnson LL, Verdesca SA, Aude WY, et al. Postischemic stunning can affect left ventricular ejection fraction and regional wall motion on post-stress gated sestamibi tomograms. *J Am Coll Cardiol* 1997;30:1641-1648.
51. Klocke FJ, Baird MG, Lorell BH, et al. ACC/AHA/ASNC guidelines for the clinical use of cardiac radionuclide imaging - executive summary: A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines. *Circulation* 2003;108:1404-1418.
52. Knapp WH. Guidelines for myocardial perfusion scintigraphy. *Nuklearmedizin* 1999;38:226-229.
53. Knollmann D, Knebel I, Koch KC, et al. Comparison of SSS and SRS calculated from normal databases provided by QPS and 4D-MSPECT manufacturers and from identical institutional normals. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2008;35:311-318.
54. Leaker BR, O'Connor B, Hansel TT, et al. Safety of regadenoson, an adenosine A_{2A} receptor agonist for myocardial perfusion imaging, in mild asthma and moderate asthma patients: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *J Nucl Cardiol* 2008;15:329-336.
55. Leppo JA. Comparison of pharmacologic stress agents. *J Nucl Cardiol* 1996;3:S22-26.
56. Leslie WD, Tully SA, Yogendran MS, et al. Prognostic value of lung sestamibi uptake in myocardial perfusion imaging of patients with known or suspected coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol* 2005;45:1676-1682.
57. Lindner O, Burchert W, Bengel FM, et al. Myocardial perfusion scintigraphy in Germany. Results of the 2005 query and current status. *Nuklearmedizin* 2007;46:49-55.
58. Lindner O, Burchert W, Bengel FM, et al. Myocardial perfusion scintigraphy 2008 in Germany - results of the fourth query. *Nuklearmedizin* 2010;49:65-72.
59. Luig H. Filterwahl bei der Myokardtomographie mit einer rotierenden Gammakamera (Myokard-SPECT). *Nuklearmedizin* 1992;31:263.
60. Maurea S, Cuocolo A, Soricelli A, et al. Enhanced detection of viable myocardium by technetium-99m-MIBI imaging after nitrate administration in chronic coronary artery disease. *J Nucl Med* 1995;36:1945-1952.
61. McLaughlin MG, Danias PG. Transient ischemic dilation: a powerful diagnostic and prognostic finding of stress myocardial perfusion imaging. *J Nucl Cardiol* 2002;9:663-667.
62. McNeill AJ, Fioretti PM, el-Said SM, et al. Enhanced sensitivity for detection of coronary artery disease by addition of atropine to dobutamine stress echocardiography. *Am J Cardiol* 1992;70:41-46.
63. Navare SM, Mather JF, Shaw LJ, Fowler MS, Heller GV. Comparison of risk stratification with pharmacologic and exercise stress myocardial perfusion imaging: a meta-analysis. *J Nucl Cardiol* 2004;11:551-561.

64. Notghi A, Williams N, Smith N, Goyle S, Harding LK. Relationship between myocardial counts and patient weight: adjusting the injected activity in myocardial perfusion scans. *Nucl Med Commun* 2003;24:55-59.
65. O'Keefe JH, Jr., Bateman TM, Barnhart CS. Adenosine thallium-201 is superior to exercise thallium-201 for detecting coronary artery disease in patients with left bundle branch block. *J Am Coll Cardiol* 1993;21:1332-1338.
66. Pennell DJ, Mavrogeni SI, Forbat SM, Karwatowski SP, Underwood SR. Adenosine combined with dynamic exercise for myocardial perfusion imaging. *J Am Coll Cardiol* 1995;25:1300-1309.
67. Pereztol-Valdes O, Candell-Riera J, Santana-Boado C, et al. Correspondence between left ventricular 17 myocardial segments and coronary arteries. *Eur Heart J* 2005;26:2637-2643.
68. Poldermans D, Bax JJ, Boersma E, et al. Guidelines for pre-operative cardiac risk assessment and perioperative cardiac management in non-cardiac surgery. *Eur Heart J* 2009;30:2769-2812.
69. Preuss R, Weise R, Lindner O, et al. Optimisation of protocol for low dose CT-derived attenuation correction in myocardial perfusion SPECT imaging. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2008;35:1133-1141.
70. Ranhosky A, Kempthorne-Rawson J. The safety of intravenous dipyridamole thallium myocardial perfusion imaging. Intravenous Dipyridamole Thallium Imaging Study Group. *Circulation* 1990;81:1205-1209.
71. Reyes E, Stirrup J, Roughton M, et al. Attenuation of adenosine-induced myocardial perfusion heterogeneity by atenolol and other cardioselective beta-adrenoceptor blockers: a crossover myocardial perfusion imaging study. *J Nucl Med* 2010;51:1036-1043.
72. Schäfers M, Bengel F, Büll U, et al. Positionspapier Nuklearkardiologie. *Kardiologie* 2009;3:283-289.
73. Seifert H, Chapot C, Schaefer A, Donsch P, Kirsch CM. Radiation exposure of the patient caused by transmission measurement for myocardial perfusion SPECT. *Nuklearmedizin* 1999;38:186-188.
74. Sharir T, Bacher-Stier C, Dhar S, et al. Identification of severe and extensive coronary artery disease by postexercise regional wall motion abnormalities in Tc-99m sestamibi gated single-photon emission computed tomography. *Am J Cardiol* 2000;86:1171-1175.
75. Sharir T, Germano G, Kang X, et al. Prediction of myocardial infarction versus cardiac death by gated myocardial perfusion SPECT: risk stratification by the amount of stress-induced ischemia and the poststress ejection fraction. *J Nucl Med* 2001;42:831-837.
76. Sharir T, Kang X, Germano G, et al. Prognostic value of poststress left ventricular volume and ejection fraction by gated myocardial perfusion SPECT in women and men: gender-related differences in normal limits and outcomes. *J Nucl Cardiol* 2006;13:495-506.
77. Shaw LJ, Iskandrian AE. Prognostic value of gated myocardial perfusion SPECT. *J Nucl Cardiol* 2004;11:171-185.
78. Smits P, Corstens FH, Aengevaeren WR, Wackers FJ, Thien T. False-negative dipyridamole-thallium-201 myocardial imaging after caffeine infusion. *J Nucl Med* 1991;32:1538-1541.
79. Smits P, Lenders JW, Thien T. Caffeine and theophylline attenuate adenosine-induced vasodilation in humans. *Clin Pharmacol Ther* 1990;48:410-418.

80. Stowers SA, Umfrid R. Supine-prone SPECT myocardial perfusion imaging: the poor man's attenuation compensation. *J Nucl Cardiol* 2003;10:338.
81. Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). 15. Auflage 2009. Carl Heymanns Verlag.
82. Taillefer R, Amyot R, Turpin S, et al. Comparison between dipyridamole and adenosine as pharmacologic coronary vasodilators in detection of coronary artery disease with thallium 201 imaging. *J Nucl Cardiol* 1996;3:204-211.
83. Taillefer R, DePuey EG, Udelson JE, et al. Comparative diagnostic accuracy of TI-201 and Tc-99m sestamibi SPECT imaging (perfusion and ECG-gated SPECT) in detecting coronary artery disease in women. *J Am Coll Cardiol* 1997;29:69-77.
84. Taylor JC, Froberg SA, Hillel PG, Harris AM, Tindale WB. Correlation of left ventricular count rate with patient weight in Tc-99m myocardial perfusion imaging. *Nucl Med Commun*.
85. Thomas GS, Tammelin BR, Schiffman GL, et al. Safety of regadenoson, a selective adenosine A_{2A} agonist, in patients with chronic obstructive pulmonary disease: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial (RegCOPD trial). *J Nucl Cardiol* 2008;15:319-328.
86. Thomas GS, Thompson RC, Miyamoto MI, et al. The RegEx trial: a randomized, double-blind, placebo- and active-controlled pilot study combining regadenoson, a selective A(2A) adenosine agonist, with low-level exercise, in patients undergoing myocardial perfusion imaging. *J Nucl Cardiol* 2009;16:63-72.
87. Thorley PJ, Bloomer TN, Sheard KL, Sivananthan UM. The use of GTN to improve the detection of ischaemic myocardium using 99Tcm-tetrofosmin. *Nucl Med Commun* 1996;17:669-674.
88. Trappe HJ, Lollgen H. Guidelines for ergometry. German Society of Cardiology - Heart and Cardiovascular Research. *Z Kardiol* 2000;89:821-831.
89. Vaduganathan P, He ZX, Raghavan C, Mahmarian JJ, Verani MS. Detection of left anterior descending coronary artery stenosis in patients with left bundle branch block: exercise, adenosine or dobutamine imaging? *J Am Coll Cardiol* 1996;28:543-550.
90. van Dongen AJ, van Rijk PP. Minimizing liver, bowel, and gastric activity in myocardial perfusion SPECT. *J Nucl Med* 2000;41:1315-1317.
91. Van Train KF, Areeda J, Garcia EV, et al. Quantitative same-day rest-stress technetium-99m-sestamibi SPECT: definition and validation of stress normal limits and criteria for abnormality. *J Nucl Med* 1993;34:1494-1502.
92. Verna E, Ceriani L, Giovanella L, Binaghi G, Garancini S. "False-positive" myocardial perfusion scintigraphy findings in patients with angiographically normal coronary arteries: insights from intravascular sonography studies. *J Nucl Med* 2000;41:1935-1940.
93. Verordnung. über den Betrieb von Apotheken (Apothekenbetriebsordnung - ApBetrO). neugefasst durch B. v. 26.09.1995 BGBl. I S. 1195; zuletzt geändert durch Artikel 2 V. v. 02.12.2008 BGBl. I S. 2338; Geltung ab 01.07.1987.
94. Wackers FJ. Quantification of SPECT myocardial perfusion images. In: Iskandrian AI, Garcia EV, eds. *Nuclear Cardiac Imaging*. New York: Oxford University Press; 2008:102-116.
95. Yoon AJ, Melduni RM, Duncan SA, Ostfeld RJ, Travin MI. The effect of beta-blockers on the diagnostic accuracy of vasodilator pharmacologic SPECT myocardial perfusion imaging. *J Nucl Cardiol* 2009;16:358-367.
96. Zoghbi GJ, Iskandrian AE. Exercise myocardial perfusion imaging. In: Iskandrian AI, Garcia EV, eds. *Nuclear Cardiac Imaging*. New York: Oxford University Press; 2008:267-292.

Addendum

vom 11. Dezember 2012 zur

DGN-Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie)

Myokard-Perfusions-Szintigraphie

Stand: 4/2012 – AWMF-Registernummer: 031-006

Autor

O. Lindner
Institut für Radiologie, Nuklearmedizin und Molekulare Bildgebung,
Herz- und Diabeteszentrum NRW, Bad Oeynhausen

Herausgeber/Korrespondenzadresse

Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin
Nikolaistraße 29
37073 Göttingen

Tel.: +49 (0)551 48857-401

Fax: +49 (0)551 48857-401

E-Mail: office@nuklearmedizin.de

Gültigkeit der Leitlinie, auf die sich dieses Addendum bezieht

4/2016 (einschließlich)

Nach der Publikation der DGN-Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie) Myokard-Perfusions-Szintigraphie hat es mit Bekanntmachung vom 25. September 2012 und Veröffentlichung im Bundesanzeiger am 19. Oktober 2012 eine Aktualisierung der diagnostischen Referenzwerte (DRW) für nuklearmedizinische Untersuchungen durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) gegeben. Die aktualisierten Werte ersetzen die bisher gültigen. Unter anderem wurden auch die DRW für die Myokard-Perfusions-Szintigraphie angepasst und ein Höchstwert eingeführt (Tabelle 1).

Tabelle 1:

Diagnostische Referenzwerte für die Myokard-Perfusions-Szintigraphie

Radiopharmakon		Bisherige DRW (MBq)	Aktualisierte DRW (MBq)	Höchstwert (MBq)
Tc-99m-Sestamibi	Eintagesprotokoll	1000	1000 ¹	1100 ¹
Tc-99m-Tetrofosmin	Zweitagesprotokoll	600	400 ²	500 ²
Tl-201		75	75	90

¹für beide Applikationen zusammen; ²pro Applikation

Das BfS führt zu den DRW aus: DRW in der nuklearmedizinischen Diagnostik sind keine oberen Richtwerte sondern „Optimalwerte“. Sie geben die für eine gute Bildqualität notwendige Aktivität bei der Verwendung üblicher Bildgebungssysteme an und sollen bei Standardverfahren und -patienten appliziert werden. Nichtsdestotrotz können und sollen sie unterschritten werden, wenn die erreichte Bildqualität für die diagnostische Bewertung hinreichend gut ist (1).

Der neu eingeführte Höchstwert ist wie folgt definiert: Der Höchstwert ersetzt das zur Handhabung der diagnostischen Referenzwerte in der Nuklearmedizin angegebene Toleranzintervall, bei dessen mehrmaliger Überschreitung ohne plausible Begründung weitergehende Maßnahmen durch die zuständige ärztliche Stelle erforderlich sind (1).

DRW und Höchstwerte gelten für „Standardpatienten“. Deshalb sollen diese Werte im Mittel über mindestens zehn unselektierte Patienten eingehalten werden. Eine Überschreitung der DRW bei einzelnen Patienten muss begründet werden (1).

Der Terminus „Standardpatient“ wurde in der aktuellen Bekanntmachung des BfS nicht näher erläutert. Verwiesen sei auf die Bekanntmachung des BfS aus dem Jahr 2003 und die Leitlinie der Europäischen Kommission für DRW. Standardpatienten werden dort als Patienten mit einem Gewicht von 70 ± 3 kg definiert (2, 3). Diese Standardwerte reflektieren die tägliche Standardpatientensituation in Klinik und Praxis jedoch nicht.

Literatur

1. Bundesamt für Strahlenschutz. Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für nuklearmedizinische Untersuchungen vom 25. September 2012. Veröffentlicht am Freitag, 19. Oktober 2012 BAnz AT 19.10.2012 B5. http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/A24_DRW.pdf (letzter Zugriff 11.12.2012).
2. Bundesamt für Strahlenschutz. Bekanntmachung der diagnostischen Referenzwerte für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen. BAnz Nr. 143 vom 05.08.2003, S. 17503.
3. Commission, European. Radiation Protection 10. Guidance on diagnostic reference levels (DRLs) for medical exposures, Luxembourg; Office for Official Publications of the European Communities. 1999. http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/109_en.pdf (letzter Zugriff 11.12.2012).