

U. Klein¹, D. Locher¹, S. Silber²

¹Institut für Radiologie (Vorstand: Priv.-Doz. Dr. U. Klein) und

²Klinik für Herz- und Kreislauferkrankungen (Direktor: Prof. Dr. W. Rudolph), Deutsches Herzzentrum München

Röntgendiagnostische und nuklearmedizinische Untersuchungen im Deutschen Herzzentrum München

Röntgendiagnostik

Das Institut für Radiologie hat für die röntgenologische und nuklearmedizinische Diagnostik, mit Ausnahme der Herzkatheteruntersuchungen, der stationären und ambulanten Patienten aller drei Kliniken Sorge zu tragen.

In vier Räumen wurden neun Arbeitsplätze installiert, davon zwei Durchleuchtungsgeräte mit Bildverstärkerfernsehkette sowie ein Tomographietisch. Die Röntengeräte sind mit einer programmierbaren Schaltautomatik ausgerüstet, so daß die Routinearbeit erleichtert und rationalisiert wird. Ein Universaldurchleuchtungsgerät ist zusätzlich mit einer verschiebbaren Tischplatte, mit einem AOT-Blattfilmwechsler und einer 100-mm-Kamera ausgerüstet, so daß abdominale und periphere Angiographien durchgeführt werden können. Für die Betaufnahmen auf drei Intensivstationen stehen zwei (in Kürze drei) fahrbare Röntengeräte zur Verfügung.

Mit Hilfe dieser Geräte können alle röntgendiagnostischen Maßnahmen durchgeführt werden, die notwendig sind, um eine optimale Patientenversorgung im Deutschen Herzzentrum zu gewährleisten.

Neben den üblichen Thoraxaufnahmen und Durchleuchtungen in verschiedenen Ebenen ist es notwendig, Begleitkrankheiten bei Patienten, vor allem wenn sie einer Herzoperation zugeführt werden sollen, vollständig aufzuklären. Es müssen außerdem Untersuchungen durchgeführt werden, die bei atypischen Brustschmerzen die differentialdiagnostischen Überlegungen erleichtern. Das betrifft besonders gastrointestinale Erkrankungen (Magen, Darm, Galle), Lungenerkrankungen, Nierenerkrankungen und Veränderungen der Wirbelsäule.

Die ableitenden Harnwege werden routinemäßig im Anschluß an angiographische Herzuntersuchungen mit nierengängigem Kontrastmittel geröntgt, um mögliche Nierenerkrankungen aufzudecken, die bisher nicht bekannt waren. Bis jetzt konnten bereits zwei Nierenkarzinome und ein Blasenkarzinom entdeckt werden,

dazu in mehreren Fällen Schrumpfnieren und Nierenmißbildungen, die ohne diese Untersuchungen erst sehr viel später diagnostiziert worden wären.

Patienten mit einer koronaren Herzerkrankung haben häufig gleichzeitig periphere obliterierende Arterioopathien. Wir sind dazu übergegangen, bei Patienten mit klinischem Verdacht auf eine periphere Verschußkrankheit die Extremitätenangiographie durchzuführen, um Komplikationen bei extrakorporalem Kreislauf im Rahmen kardiochirurgischer Eingriffe und bei eventueller Einführung eines intraaortalen Ballons bei assistierter Zirkulation vorzubeugen.

Alle Röntgengroßbilder werden im Format 100 mm × 100 mm kopiert und in DIN-A4-Plastiktüten der Krankengeschichte beigelegt. Gegebenenfalls werden sie zusätzlich kopiert, um sie dem weiterbehandelnden Arzt zur Verfügung stellen zu können.

Koronare Herzerkrankungen

Ein großer Teil der erwachsenen Patienten in unserem Krankengut wird zum Ausschluß oder Nachweis einer koronaren Herzerkrankung in das Deutsche Herzzentrum München überwiesen. Neben der klinischen Untersuchung (Anamnese, Ruhe- und Belastungs-Ekg) bietet – als nichtinvasive Methode – der radiologische Nachweis einer Koronararterienverkalkung einen Hinweis auf das Vorliegen einer arteriosklerotischen Herzerkrankung.

Die Röntgenbildverstärker „neuerer Generation“ mit elektronenoptischer Vergrößerung haben ein außerordentlich gutes Auflösungsvermögen, so daß auch geringe Kalkeinlagerungen in den Koronararterien erkannt werden können, wenn sie eine Mindestgröße von etwa 2 mm haben. Alle Versuche, diese Kleinstverkalkungen durch Röntgenaufnahmen, einschließlich Tomographie, dokumentarisch zu sichern, sind wegen der starken Eigenbewegung der Kalkherde gescheitert.

Entscheidend für die Erkennung von Koronarkalk sind jedoch die richtigen Patientenprojektionen. Es ist erforderlich, den Patienten in der Posterior-anterior-Projektion, in der um 40 bis 50 Grad gedrehten rechts- und der um 40 bis 60 Grad gedrehten links-schrägen Position sowie in der lateralen Position bei tiefer Inspiration zu durchleuchten. Geringe Verkalkungen der rechten Koronararterie können dem Untersucher entgehen, wenn die laterale Projektion nicht benutzt wird. In der links-schrägen Projektion werden in der Regel auch kleinste Kalkstippchen im Bereich des LAD (Ramus descendens anterior) entdeckt, während sie im ersten Schrägdurchmesser meist nicht erkennbar sind.

Detaillierte Kenntnisse der Koronaranatomie erleichtern die Differenzierung des Koronarkalks gegenüber Verkalkungen der Mitralklappe, der Trikuspidalklappe und der Aortenklappe, der Klappenringe, der Aorta ascendens, des Perikards, der Ventrikulaneurysmen, der Vorhofthromben, der Lymphknoten und den intrapulmonal gelegenen indurativen Verkalkungsherden. Dennoch sind in Einzelfällen Verkalkungen im Herzschatten nicht immer eindeutig zu lokalisieren.

Die Literaturangaben über Koronarverkalkungen sind je nach Methode oder Patientengut sehr unterschiedlich. So sind die Zahlen von Pathologen über das Vorkommen von Koronarkalk relativ hoch. Sie schwanken zwischen 63% und 83%, wobei 30% bis 94% dieser Fälle gleichzeitig Gefäßveränderungen aufwiesen. Einig sind sich alle Autoren über die Tatsache, daß mit höherem Alter auch die Häufigkeit von Koronararterienverkalkung deutlich zunimmt. Andererseits betrug der Prozentsatz von Koronarverkalkungen ohne nachweisbare histologische Gefäßveränderungen bei den verschiedenen Untersuchern bis zu 72%.

Bei den radiologischen Untersuchungen (Durchleuchtung), die mit koronarangiographischen Befunden verglichen wurden, zeigten sich, bei Vorliegen von Gefäßveränderungen, zwischen 25% und 69% Koronarverkalkungen. Diese Unterschiede sind abhängig vom Alter der Patienten, teilweise auch vom Geschlecht, sicherlich aber von Risikofaktoren, wobei vor allem der arterielle Hochdruck mit diastolischen Blutdruckwerten über 100 mm Hg eine dominierende Rolle spielt. Eine Koronarverkalkung bei Kranken unter 50 Jahren, besonders bei Frauen, geht fast immer mit einer koronaren Herzerkrankung einher. Bei Patienten über 60 Jahren dagegen ist das Vorhandensein von Koronar-

kalk für die Diagnose einer koronaren Herzerkrankung nicht von entscheidender Bedeutung. Andererseits soll sich bei über 60jährigen Patienten, in etwa der Hälfte der Fälle, eine koronare Herzerkrankung finden, ohne daß Koronarkalk nachzuweisen ist.

Bei erkennbaren Verkalkungen sind am häufigsten die von der linken Koronararterie abgehenden Gefäße betroffen, die Gefäße der rechten Koronararterie in etwa 53%. Angiographisch zeigen sich in diesen Fällen Stenosen an einer Arterie nur in etwa 9%, an zwei Arterien bereits in 25% und an drei Arterien in 66%. Je mehr Gefäße Verkalkungen aufweisen, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine koronare Herzerkrankung vorliegt.

Untersuchungen verschiedener Autoren haben gezeigt, daß bei etwa einem Viertel der Patienten mit einer Koronarverkalkung Lumeneinengungen der Koronargefäße weder angiographisch noch histologisch nachgewiesen werden konnten. Bei diesen Patienten wurden auch klinisch keine Hinweise für das Vorliegen einer koronaren Herzerkrankung erhoben. Die Bedeutung dieser Befunde ist noch unklar. Durch die Kalkeinlagerung in der Gefäßintima (gelegentlich auch in der -media) kann das „starre“ Gefäß nicht mehr auf physiologische Reize mit Dilatation bzw. Konstriktion antworten, so daß es gegenüber einem Normalgefäß relativ insuffizient wird. Dadurch kann die koronare Reservekapazität eingeschränkt werden. Möglicherweise kommt der Koronarverkalkung in diesen Fällen eine prognostische Bedeutung zu.

Renale Hypertonie

Im Rahmen der Hochdruckdiagnostik wird zum Ausschluß oder Nachweis einer Nierengefäßerkrankung die abdominale, transfemorale Katheterangiographie angewandt.

In 1 bis 5% der Hypertoniekranken findet sich eine Nierenarterienstenose, die in 85% einseitig, in 15% doppelseitig vorhanden ist. In 30 bis 50% dieser Fälle sind abdominale Strömungsgeräusche hörbar. Dennoch führt eine Stenose nur in etwa 70 bis 80% der Fälle zur Entwicklung eines renovaskulären Hochdrucks.

Die häufigste Ursache einer Nierenarterienstenose ist die *Arteriosklerose* (Abbildung 1), die nicht selten doppelseitig zu beobachten ist. Da solche arteriosklerotischen

Plaques auch bei Normotonikern nachgewiesen werden, ist die Klärung eines ursächlichen Zusammenhangs zwischen Stenose und Hochdruck allerdings schwierig. So wurde bei Sektionen in 59% der Fälle mit normalem Blutdruck und in 77% der Fälle mit Hypertonie eine arteriosklerotisch bedingte Nierenarterienstenose nachgewiesen.

Die *fibromuskuläre Hyperplasie* der Nierengefäße (Abbildung 2), meist bei jüngeren Patienten vorkommend, findet sich im mittleren und distalen Abschnitt der Nierenarterie und greift gelegentlich auf die Segmentäste

über. Sie führt in den meisten Fällen zur Hypertonie. Die Ätiologie dieser Gefäßwandhyperplasie ist weitgehend unbekannt.

Neben der Arteriosklerose und der fibromuskulären Hyperplasie, die nach einer Sammelstatistik von 574 operierten Patienten mit 71,3 bzw. 22,5% als Ursache für einen renovaskulären Hochdruck zahlenmäßig an der Spitze stehen, kommen noch weitere Gefäßveränderungen dafür in Betracht: Aneurysmen in 2,7% (Abbildung 3), kongenitale Gefäßmißbildungen (Abbildungen 4 und 5) in 1,5%, Gefäßkompressionen von außen

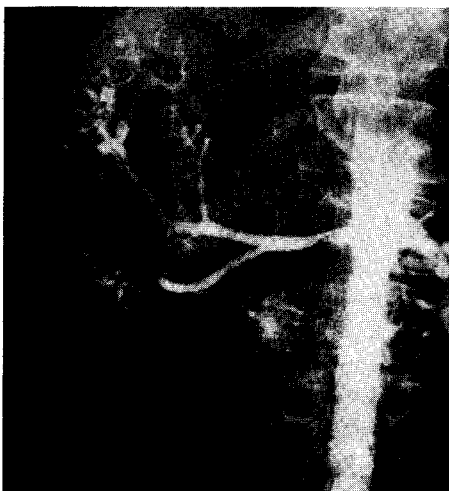


Abbildung 1

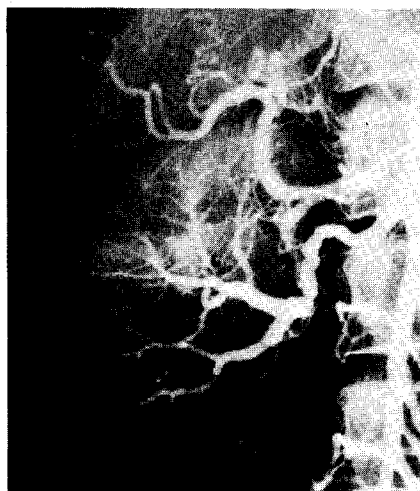


Abbildung 2



Abbildung 3

Abbildung 1. Arteriosklerotisch bedingte Nierenarterienstenose rechts bei gleichzeitigem Vorliegen eines rechtsseitigen Nierenkarzinoms. Aortensklerose.

Abbildung 2. Fibromuskuläre Hyperplasie der distalen Nierenarterie rechts mit Einbeziehung der proximalen Anteile zweier Segmentarterien.

Abbildung 3. Nierenarterienstenose links und poststenotische Aneurysmen zweier Segmentarterien.

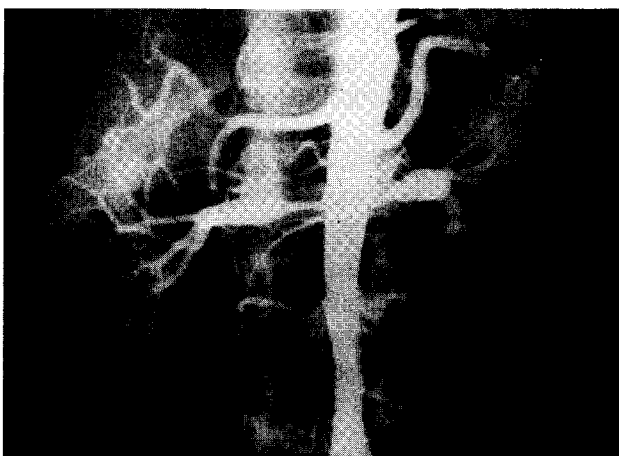


Abbildung 4. Kongenitale Nierenarterienstenosen beidseits mit poststenotischen Dilatationen bei einem vierjährigen Kind.

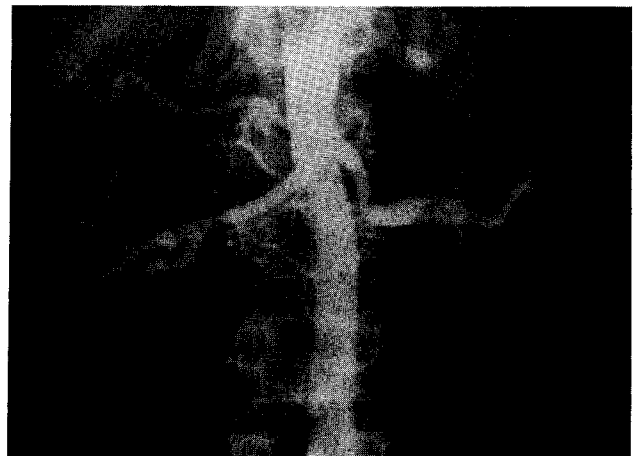


Abbildung 5. Nierenarterienanomalien beidseits mit distalen Stenosen und poststenotischen Dilatationen, vorwiegend links.

(durch Aortenaneurysma, Tumoren, große Lymphknotenpakete u. a.) in 0,5% und Embolien in 0,4% der Fälle. Gelegentlich kann sich auch nach einem Bauchtrauma eine Nierenarterienstenose mit Hochdruck entwickeln, wie wir sie in einem Fall nachweisen konnten.

Darüber hinaus können alle Parenchymerkrankungen der Niere (z.B. spezifische oder unspezifische Entzündungen, Nierenzysten, Zystennieren, Nierentumoren) Arterioarteriosklerose, arteriovenöse Fisteln (z.B. nach Nierenpunktionen), Hydronephrosen, Nephrolithiasis, Nierenmißbildungen und Obstruktion der Harnwege zum Hochdruck führen.

Zur Klärung solcher Erkrankungen wird nach einer Ausscheidungsurographie erforderlichenfalls die selektive Nierenangiographie angewandt, wobei wir dafür bevorzugt die 100-mm-Kamera benutzen. Sie hat gegenüber dem AOT-Blatfilmwechsler den Vorteil einer geringeren Strahlenbelastung für den Patienten und einer erheblich kürzeren Untersuchungsdauer, so daß die Katheterkomplikationen deutlich herabgesetzt werden.

Phäochromozytom

Als weitere Ursache für einen Hochdruck kann ein Phäochromozytom in Frage kommen, das in 0,1 bis 0,5% aller Hypertoniker vorhanden ist. Man findet es in jedem Alter, auch schon bei Säuglingen. Es ist in 90% gutartig und in 10% maligne.

Das klinische Leitsymptom ist in typischen Fällen die paroxysmale Hypertonie mit Kopfschmerzen, Schweißausbruch, Übelkeit, Herzrhythmusstörungen, Oberbauchbeschwerden, Erbrechen, Stenokardien und Gewichtsabnahme. Etwa 60% (und bis zu 88% bei Kindern) der Phäochromozytome gehen jedoch mit einer Dauerhypertonie einher. Das klinische Bild dieser Patienten bietet häufig keinen Unterschied zu Hypertonikern anderer Genese.

Die Diagnose eines Phäochromozytoms erfolgt immer laborchemisch, wenngleich darauf hingewiesen werden muß, daß etwa 3% der Hypertoniker ohne Phäochromozytom erhöhte Vanillinmandelsäureausscheidungen aufweisen.

Bei Zuständen mit erhöhtem Sympatikonotus, bei psychischen und körperlichen Belastungen, nach Einnahme von Sympatikomimetika sowie bei Vorliegen

anderer Sympatikustumoren und durch mechanische Irritation des Nebennierenmarks durch Nierenzysten, Nebennierenmarkzysten bzw. Nebennierenmarkadenomen und Pankreastumoren kann es ebenfalls zu erhöhter Katecholaminausscheidung im Urin kommen, so daß diese Faktoren bei der Frage nach einem Phäochromozytom ausgeschlossen werden müssen.

Die Aufgabe der Röntgendiagnostik besteht darin, die Lokalisation eines Phäochromozytoms zu bestimmen. Dies ist jedoch dadurch erschwert, daß 10% der vom Nebennierenmark ausgehenden Tumoren doppelseitig bzw. multiple und 10% außerhalb der Nebennieren als ektopische Paragangliome gelegen sind.

Anatomisch gesehen, liegen die Nebennieren in einer im perirenalraum abgrenzbaren Faszientasche am oberen Pol der Nieren, wobei sie ihre Lage auch dann beibehalten, wenn die Nieren nach kaudal sinken oder kaudal dystop gelegen sind.

Die Nebennieren zeigen – schon normalerweise – in Form und Größe eine erhebliche Variationsbreite, wobei das linke Organ durchschnittlich größer zur Darstellung kommt als das rechte.

Neben der „typischen“ kappenförmigen Form der Nebennieren findet man häufig finger-, halbmond- und ovalscheibenartige Organe. Die Nebennierengröße rechts schwankt zwischen 220 und 994 mm², links zwischen 273 und 1188 mm².

Die arterielle Versorgung erfolgt gewöhnlich über drei Gefäßgruppen: Die Arteriae suprarenales superiores entspringen aus der Arteria phrenica inferior, die Arteriae suprarenales mediae aus der Aorta und die Arteriae suprarenales inferiores aus der Arteria renalis. Auch hier sind die Variationsmöglichkeiten hinsichtlich Arterienzahl und Gefäßursprung außerordentlich hoch. Der größte Teil der Nebenniere wird jedoch in der Regel aus den Arteriae suprarenales inferiores versorgt.

Der venöse Abfluß der Nebennieren erfolgt beidseits über je eine Vene. Linksseitig vereinigt sie sich mit der Vena phrenica inferior und einer renalen Kapselvene zu einem Venenstamm, der in die Vena renalis mündet. Auf der rechten Seite findet sich die Einmündungsstelle der Nebennierenvene in die Kava etwa 2 bis 4 cm oberhalb der Nierenvene. In seltenen Fällen kann sie jedoch auch in eine Lebervene oder in die rechte Nierenvene münden.

In früheren Jahren wurde zur Phäochromozytomdiagnostik vor allem das Pneumoretroperitoneum angewandt. Die diagnostische Treffsicherheit lag jedoch nur bei etwa 50%.

Da das Phäochromozytom in fast allen Fällen gefäßreich ist, hat sich die Angiographie für die Diagnostik des Phäochromozytoms als besonders geeignet erwiesen. Meist zeigt bereits die abdominale Übersichtsangiographie erweiterte suprarenale Gefäße und in der spätarteriellen Phase ein feines retikuläres Gefäßnetz dünnlumiger Arterien im Nebennierenbereich. In der Parenchymphase findet sich eine Tumorkontrastierung über drei bis vier Sekunden. In Zweifelsfällen werden ein oder zwei Gefäßgruppen selektiv dargestellt, die dann ohne Überlagerung durch andere Gefäße und Organe die Diagnose sichern können.

Maligne entartete Phäochromozytome (10% der Fälle) sind charakterisiert durch größere, irregulär verlaufende Tumorgefäße, durch AV-Shunts und dadurch bedingte frühe Venendarstellungen, wobei die Größe des Tumors jedoch offenbar nicht als Kriterium für Malignität gilt. Infiltrationen in Nachbarorgane, vor allem in die Leber, kommen vor.

Kleine oder avaskuläre Tumoren können sich der arteriellen Diagnostik entziehen. In diesen Fällen wird die Nebennierenphlebographie angewandt. Sie hat gegenüber der Arteriographie den Vorteil, daß stets das gesamte Organ dargestellt wird.

Wegen der unterschiedlichen anatomischen Mündungsverhältnisse der Nebennierenvenen gelingt jedoch die Katheterisierung nicht immer. Auch bei erfahrenen Autoren ist nur in 65% (zum Teil bis 85%) der Fälle die rechte Nebennierenvene, in 95 bis 98% die linke Nierenvene zu sondieren.

Die Nebennierenphlebographie hat eine außerordentlich geringe Komplikationsrate; nur in Einzelfällen kann es durch zu große Kontrastmittelgaben zur funktionellen Ausschaltung des Organs kommen.

Die Arteriographie dagegen kann geradezu als Provokationstest gelten und löst nicht selten Hochdruckkrisen aus, die jedoch, unter Einhaltung der notwendigen Vorsichtsmaßnahmen, in der Regel therapeutisch beherrscht werden können. Dennoch sind einzelne Todesfälle beschrieben worden.

Nuklearmedizinische Untersuchungen

Die nuklearmedizinische Abteilung ist mit einer Angerkamera (Nuclear data) mit Computerauswertesystem ausgestattet, so daß alle Organ- und Funktionsszintigraphien angefertigt werden können. Gleichzeitig werden In-vitro-Untersuchungen mit radioaktiven Substanzen in unserem Isotopenlabor durchgeführt, wobei vorwiegend radioimmunologische Methoden zur Anwendung kommen. Damit ist es möglich, die im Blut physiologisch wirksamen Stoffe im Nano- bzw. Picogrammbereich quantitativ zu erfassen. Die hohe Empfindlichkeit des Radioimmunoassays (RIA) beruht auf einer Antigen-Antikörper-Reaktion, wobei geringste Veränderungen radioaktiv markierter Antigene, je nach Verwendung des Isotops, mit Hilfe eines Gamma- und Beta-Probenwechslers erfaßt werden können. Für die verschiedenen zu messenden Substanzen im Blut werden heute von der Industrie standardisierte „Kits“ geliefert, so daß auf eigene Herstellung von spezifischen Antikörpern verzichtet werden kann. Die wesentlichen Bestimmungen umfassen bei uns die Schilddrüsenhormone, den Digoxinserumspiegel sowie die Plasmapreninaktivität (PRA).

Schilddrüsenhormone

Herzrhythmusstörungen können in nicht seltenen Fällen durch Schilddrüsenerkrankungen (Hyperthyreose oder/und autonome Adenome) verursacht sein. Mit Hilfe der Radioimmunoassays ist es möglich, die relevanten Schilddrüsenhormone Thyroxin (T_4), Trijodthyronin (T_3) sowie thyroideastimulierendes Hormon (TSH) zu bestimmen. In Zusammenschau mit dem Schilddrüsen-szintigramm wird somit eine umfassende Schilddrüsen-funktionsdiagnostik bei Herzpatienten ermöglicht.

Glykosidserumspiegel

Die Erfassung des Glykosidspiegels im Serum erfolgt ebenfalls mittels radiochemischer Untersuchungen. Konzentrationen von 0,2 bis 20 µg/ml lassen sich nachweisen. Allerdings ergeben sich normalerweise Standardabweichungen bei Mehrfachbestimmung von Einzelproben bzw. in verschiedenen Untersuchungsreihen, zwischen 4 und 12%. Bei Chargenwechsel des Antikörpers kann es zu noch größeren Schwankungen der Werte kommen.

Für die Glykosidserumkonzentrationsbestimmungen gelten heute folgende Indikationen:

1. Niereninsuffizienz, Resorptionsstörungen, Hypo- und Hyperthyreosen,

2. alte Patienten,
3. Feststellung einer Vordigitalisierung,
4. Ermittlung des Sättigungszeitpunkts,
5. Kontrolle einer regelmäßigen Einnahme des verordneten Digoxins,
6. Erkennung von digitalisüberdosierungsbedingten Rhythmusstörungen, wobei jedoch Werte unter $2,3 \mu\text{g/ml}$ keine klinischen Zeichen einer Digitalisintoxikation hervorrufen,
7. Überwachung postoperativer Patienten mit einer vorübergehenden Niereninsuffizienz, bei denen Symptome der Überdosierung von Digoxin meist von anderen postoperativen Erscheinungen nicht eindeutig abgegrenzt werden können.

Medikamente (Strophantin innerhalb der ersten Stunde, Cedilanid®, Lanatosid-C, orale Gabe von Aldactone® innerhalb 24 Stunden, Hydrocortison, Cortisol, Östriol und Progesteron) sowie eine Schwangerschaft und Schilddrüsenerkrankungen können die Werte zum Teil erheblich verfälschen. So finden sich beim chronischen Cor pulmonale, bei Hypokaliämien, bei Hyperthyreosen und bei einer Gravidität höhere Glykosidwerte, wobei diese Erhöhungen zwischen $0,1$ und $0,9 \mu\text{g/ml}$ liegen. Hypothyreosen und koronare Herzerkrankungen bewirken dagegen eher einen niedrigen Serumwert.

Bei niereninsuffizienten Patienten wird die Affinität des Digoxins zu den Rezeptoren im Herzmuskel vermindert. Der Verteilungsraum für Digoxin wird daher geringer, der Serumspiegel erhöht. 80% des zugeführten Digoxins wird über die Niere ausgeschieden, nur etwa 5% über die Galle. Man kann daher durch die Bestimmung des Digoxinspiegels im Urin die Ausscheidungsfunktion der Niere für Digoxin bestimmen, wobei die Clearance für Digoxin annähernd der für Kreatinin entspricht.

Da sich etwa 80% des Digoxins in der Skelettmuskulatur, etwa 1% im Blut und etwa 5% im Myokard befinden, können die individuellen Serumwerte, je nach Körpergewicht, entsprechend dem geänderten Verteilungsraum erheblich differieren. Da Fettgewebe praktisch kein Digoxin erhält, ist dieses bei der Berechnung des Verteilungsraums zu vernachlässigen. Wenngleich die Menge des oral zugeführten Digoxins im allgemeinen der gemessenen mittleren Glykosidserumkonzentration proportional ist, zeigen sich, abgesehen vom Gewicht

des Patienten, bei gleicher Digoxingabe erhebliche individuelle Abweichungen. Diese sind vorwiegend durch die unterschiedlichen Resorptionsverhältnisse des einzelnen Kranken bedingt.

Auch die verschiedenen Digoxinderivate zeigen abweichende Serumspiegel. So liegt die Serumkonzentration am Ende der Sättigungsbehandlung von Beta-Methyldigoxin bei etwa $1,8 \mu\text{g/ml}$, von Beta-Acetyldigoxin bei etwa $1,1 \mu\text{g/ml}$ und von Digoxin bei etwa $0,8 \mu\text{g/ml}$.

Bei Kindern liegt die therapeutische Breite der Herzglykoside nahe dem Bereich der Überdosierung. Darüber hinaus sind die Resorptions- und Ausscheidungsverhältnisse für Digoxin, gerade bei volumen- und druckbelasteten kindlichen Herzfehlern, weitgehend unbekannt.

Es werden daher diesbezüglich umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um ein einheitliches Dosierungsschema zu erarbeiten. Darüber hinaus soll festgestellt werden, in welchem Maß Operationen mit oder ohne Herzlungenmaschine einen Einfluß auf den Glykosidserumspiegel bei digitalisierten Kindern haben. Da drei Tage präoperativ Digoxin abgesetzt wird, erhebt sich postoperativ die Frage, in welcher Dosierung Glycoside weitergegeben werden sollen.

Plasmareninaktivität (PRA)

Die radioimmunologische Bestimmung von Angiotensin als Ausdruck der Plasmareninaktivität wird bei verschiedenen Formen des Hochdrucks und zum Nachweis des primären und sekundären Hyperaldosteronismus angewandt. Angiotensin ist eine der stärksten blutdrucksteigernden Substanzen und gleichzeitig ein Stimulans für die Aldosteronproduktion. Stimuliert wird die Plasmareninaktivität durch Kalium- und Natriumentzug, durch Hypokaliämie und Orthostase sowie durch Gabe von Diuretika. Umgekehrt hat Hyperaldosteronismus ein Absinken der Plasmareninaktivität zur Folge. Diese Fakten beleuchten die Schwierigkeiten der Interpretation der PRA-Werte.

Als gesichert gilt heute, daß neben dem Hyperaldosteronismus mit einer erniedrigten Plasmareninaktivität drei Gruppen der essentiellen Hypertonie zu unterscheiden sind, eine solche mit normaler (47 bis 57%), mit erhöhter (16 bis 20%) und mit erniedrigter Plasmareninaktivität (20 bis 30%). Damit scheint die essentielle Hypertonie kein einheitliches Krankheitsbild darzustellen.

Hinsichtlich einer therapeutischen Beeinflussung eines solchen Hypertonus wird geprüft, inwieweit eine vasodilatatorische Therapie Einfluß auf Plasminogenaktivität und Blutdruckwerte hat.

Für die Frage nach der hämodynamischen Wirksamkeit einer Nierenarterienstenose und/oder einer einseitigen renoparenchymatösen Erkrankung gibt die Plasminogenaktivität, bestimmt in dem selektiv entnommenen Nierenvenenblut, eine Entscheidungshilfe für den Erfolg eines operativen Eingriffs. Ein stenosierender Gefäßprozeß oder eine einseitige parenchymatöse Nierenerkrankung können zu einer Steigerung der Reninsekretion der betreffenden Niere führen. Dadurch wird die Plasminogenaktivität im Nierenvenenblut gegenüber der gesunden Niere signifikant erhöht. In diesen Fällen hat ein operativer Eingriff gute Aussichten auf Erfolg hinsichtlich der Normalisierung bzw. Besserung der hohen Blutdruckwerte. Eine genaue Aussage bei 224 operierten Patienten wurde dabei in über 80% der Fälle ermittelt.

Lungenszintigraphie

Die Lungenperfusionsszintigraphie zeigt die Blutverteilung innerhalb der Lunge. Nach Injektion von ^{99m}Tc -markierten Makropartikeln wird etwa jede tausendste Lungenkapillare embolisiert. Perfusionstörungen bei malignen Tumoren, Embolien und Entzündungen können erkannt und lokalisiert werden, wobei gegenüber der Thoraxaufnahme durch das Szintigramm eine zum Teil erhebliche Mehrinformation hinsichtlich des Ausmaßes der Minderdurchblutung erreicht wird. Besonders Lungenembolien lassen sich szintigraphisch immer und

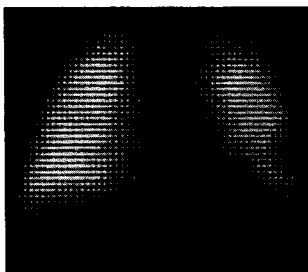


Abbildung 6a

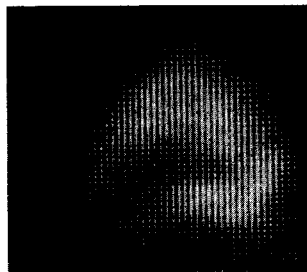


Abbildung 6b

Abbildungen 6a und 6b. Lungenperfusionsszintigramm anterior-posterior (a) und links-seitlich (b). Der Speicherdefekt links lateral-kaudal sowie die Minderperfusion im gesamten Unterfeld entspricht einem embolischen Prozeß, der auf der Thoraxstandardaufnahme nicht erkennbar war. Die Seitenaufnahme zeigt noch deutlicher das wahre Ausmaß des durch die Embolie betroffenen Lungenanteils. Der im ventralen und mittleren Anteil sichtbare Speicherdefekt ist relativ scharf begrenzt.

früher darstellen als im Röntgenbild, das häufig auch in der Verlaufskontrolle negativ bleiben kann (Abbildungen 6a und 6b).

Kinder mit Morbus Fallot zeigen in der Regel bereits im Röntgenbild eine deutliche Minderdurchblutung mit häufig unterschiedlicher Verteilung in den einzelnen Lungenabschnitten, wobei offensichtlich auch dysplastische Gefäße eine Rolle spielen. Auch bei diesen Patienten werden die Lungenperfusionsszintigraphie durchgeführt und die Befunde mit dem Röntgenbild verglichen. Es wird besonders versucht werden, Auskunft zu erhalten über den Operationserfolg einer Shuntoperation oder einer Fallot-Totalkorrektur in der Verlaufskontrolle.

Auch bei Vorliegen einer Pulmonalatresie zeigt die Lungenperfusionsszintigraphie postoperativ, ob und inwieweit beide Lungenhälften gleichermaßen durchblutet werden.

Die Lungenperfusionsszintigraphie wird weiterhin angewandt, um Blutumverteilungen von den Unter- in die Oberfelder nachzuweisen mit der Fragestellung, inwieweit eine quantitative Aussage über das Ausmaß einer Lungenstauung im Szintigramm möglich ist.

Herzsztintigraphie

Zur Diagnostik von Herzerkrankungen werden in zunehmendem Maß verschiedene nuklearmedizinische Untersuchungsmethoden angewandt. Durch Verabreichung unterschiedlicher Radiopharmaka gelingt es, einmal das Myokard, zum anderen die Herzhöhlen mit Hilfe einer Szintillationskamera darzustellen und über ein Computersystem quantitativ auszuwerten.

1. Myokardszintigraphie

Zur Darstellung ischämischer Myokardbezirke mit nichtinvasiven Methoden gibt es szintigraphisch grundsätzlich zwei Möglichkeiten.

Bei einem akuten Herzinfarkt werden Tracer intravenös appliziert, die sich in Gebieten verminderter Durchblutung besonders stark anreichern (positives Szintigramm). Dazu gehören ^{99m}Tc -Diphosphonat, ^{99m}Tc -Glucoheptonat, ^{99m}Tc -Tetracyclin und – am meisten verwandt – ^{99m}Tc -Pyrophosphat.

Tierexperimentelle Untersuchungen haben gezeigt, daß sich Pyrophosphat an Calcium bindet, das sich im akut

infarzierten Myokard in Form von Apatitkristallen abgelagert.

Das ^{99m}Tc -Pyrophosphat-Szintigramm wird besonders bei den Fällen angewandt, bei denen die Beurteilung des Ekg durch Linksschenkelblock, Schrittmacherrhythmus und einen alten Infarkt erschwert ist.

Es konnte von verschiedenen Autoren nachgewiesen werden, daß die Lokalisation und das Ausmaß der Infarkte innerhalb von 24 bis 36 Stunden bestimmt werden kann und daß es nur selten falsch negative oder falsch positive Befunde gibt.

Nach etwa zwei bis drei Wochen ist typischerweise eine Aktivitätsvermehrung im Infarktbezirk nicht mehr erkennbar und auch alte Infarkte lassen sich mit dieser Methode nicht nachweisen. Bei diesen Fällen werden Radiotracer verwandt, die sich nach intravenöser Verabreichung nur im vitalen Herzmuskel anreichern. Diese Anreicherung beruht auf der physiologisch ähnlichen Verhaltensweise von bestimmten radioaktiven Substanzen und Kalium. Das Einschleusen in die Herzmuskelzellen bedarf der vitalen Zellfunktion und ist abhängig vom Natrium-Kalium-ATPase-Transportsystem. Als geeignet haben sich Isotope des Kaliums, des Caesiums, des Rubidiums und in letzter Zeit in zunehmendem Maß $^{201}\text{Thallium}$ erwiesen.

Etwa zehn Minuten nach Injektion von etwa 2 mCi $^{201}\text{Thallium}$ wird die Szintigraphie routinemäßig in drei bis sechs Projektionen im Liegen durchgeführt. Die Aufnahmen erfolgen von ventral, im zweiten Schrägdurchmesser bei 30, 45 und 60 Grad, in linkslateraler Projek-

tion sowie im ersten Schrägdurchmesser bei 30 Grad, wobei der Patient stets in Rückenlage szintigraphiert und die Kamera um den Patienten geschwenkt wird.

Jedes Szintigramm wird über ein „Display-Oszilloskop“ von einer dreilinsigen Polaroidkamera direkt aufgenommen, mit unterschiedlicher Helligkeitsabstufung (Abbildungen 7a und 7c). Gleichzeitig wird das Szintigramm auf ein Magnetband aufgezeichnet und dort gespeichert, so daß es jederzeit über ein weiteres Oszilloskop mittels Polaroidfilm abgerufen werden kann (Abbildungen 7b und 7d).

Durch körperliche Belastung nimmt die Differenz der Durchblutung von normalem und ischämischem Myokard deutlich zu. Damit kann die Sensitivität des Szintigramms gesteigert werden, wenn das $^{201}\text{Thallium}$ bei maximaler Ergometerbelastung injiziert wird.

Im Normalfall können alle Abschnitte der Herzspitze, der linken Ventrikelvorderwand und Ventrikelhinterwand sowie des Septums dargestellt werden. Je nach Lage des Patienten erkennt man eine hufeisen- bzw. kreisförmige Aktivitätsanreicherung (Abbildung 7a bis 7d). Speicherdefekte sind Ausdruck von ischämischen Bezirken (Abbildung 8) oder zeigen postoperativ nach Ventrikulaneurysmaresektion die Narbenanteile (Abbildung 9). In der Verlaufskontrolle kann das $^{201}\text{Thallium}$ -szintigramm Auskunft über die Reversibilität kontraktionsgeschädigter Herzmuskelabschnitte geben.

Während normalerweise die rechte Ventrikelwand aufgrund der dünnen Muskelschicht im Thalliumszintigramm meist nicht zur Darstellung kommt, kann man

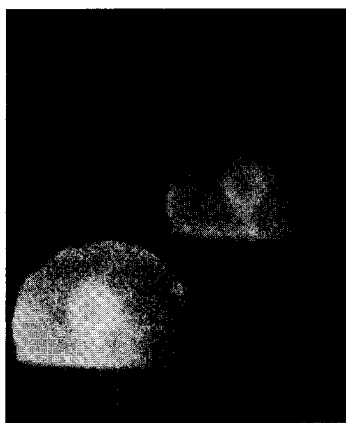


Abbildung 7a

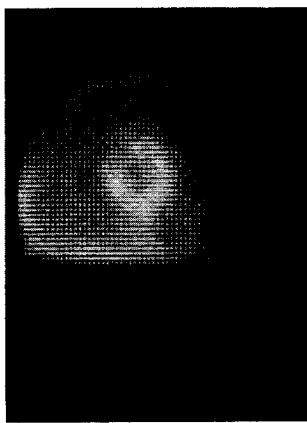


Abbildung 7b

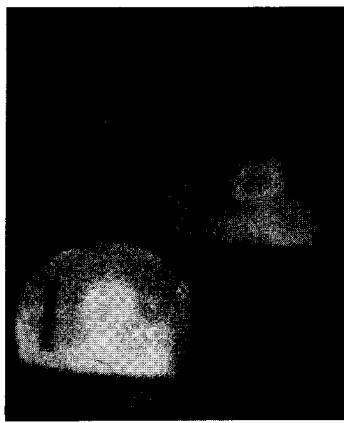


Abbildung 7c

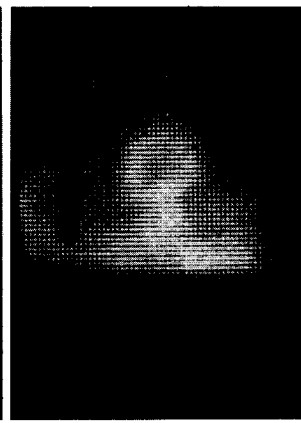


Abbildung 7d

Abbildungen 7a bis 7d. $^{201}\text{Thallium}$ szintigramm bei einer Normalperson im 30 Grad und 45 Grad links-schrägen Durchmesser (LAO). Typische hufeisen- bzw. kreisförmige homogene linksventrikuläre Myokarddarstellung.

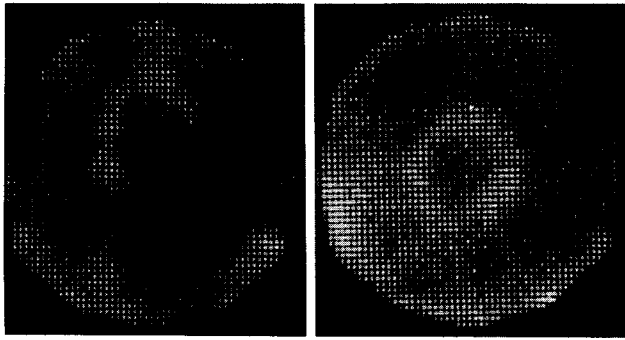


Abbildung 8

Abbildung 9

Abbildung 8. ^{201}Tl Thalliumszintigramm in 45 Grad links-schrägem Durchmesser (LAO). Deutlicher Speicherdefekt an der Ventrikelhinterwand entsprechend einem großen Hinterwandinfarkt.

Abbildung 9. ^{201}Tl Thalliumszintigramm in 30 Grad links-schrägem Durchmesser (LAO). Geringer Speicherdefekt an der Herzspitze bei Zustand nach Ventrikulaneurysmaresektion.

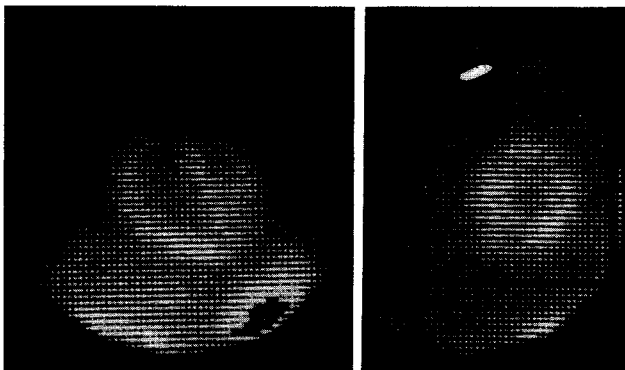


Abbildung 10

Abbildung 11

Abbildung 10. ^{201}Tl Thalliumszintigramm in 45 Grad links-schrägem Durchmesser (LAO). Neben der angedeuteten Hufeisenform des linken Ventrikels erkennt man eine deutliche Myokarddarstellung des rechten Ventrikels bei Vorliegen einer Rechtshypertrophie (Ventrikelseptumdefekt mit Eisenmenger-Reaktion).

Abbildung 11. ^{201}Tl Thalliumszintigramm eines 25jährigen Patienten mit hypertropher, obstruktiver Kardiomyopathie. Man erkennt deutlich, daß das Septum dicker ist als die linksventrikuläre freie Wand.

bei verschiedenen Krankheitszuständen (chronisches Cor pulmonale, Ventrikelseptumdefekte mit Eisenmenger-Reaktion), die mit einer Hypertrophie der rechten Ventrikelwand einhergehen, bei Szintigrammen im zweiten Schrägdurchmesser die rechte Ventrikelwand zum Teil sehr deutlich darstellen (Abbildung 10).

Bei Patienten mit einer hypertrophen Kardiomyopathie kann das Ventrikelseptum im Vergleich zur freien Ventrikelwand deutlich hypertrophiert sein und im Szintigramm verbreitert zur Darstellung kommen (Abbildung 11).

Anhand eines großen Patientenguts wird es möglich sein, eine objektivierbare Beurteilung der Aussagekraft des Thalliumszintigramms zu erhalten, wenn die Ergebnisse mit kardangiographischen Untersuchungen und mit hämodynamischen Befunden beim Myokardinfarkt und anderen Herzerkrankungen verglichen werden. Weiter wird versucht, über die bekannten Fakten hinaus neue Erkenntnisse zu sammeln. Es wird ermittelt, welche zusätzliche Information durch die Thalliumszintigraphie im Vergleich mit klinischen und Ekg-Befunden erbracht werden kann.

Neben den nichtinvasiven nuklearmedizinischen Methoden für die Herzsintigraphie ist es möglich, im Rahmen einer Koronarangiographie radioaktiv markierte Mikropartikel selektiv in die Koronararterien zu injizieren, so daß unter Verwendung zweier radioaktiver Isotopen das Versorgungsgebiet der linken und der rechten Koronararterie isoliert dargestellt werden kann. Diese Perfusionsszintigramme haben den Vorteil, daß Aktivitätsüberlagerungen durch Mediastinum und Leber verschwindend gering sind. Komplikationen dieser Methode sind bis jetzt nicht bekannt geworden.

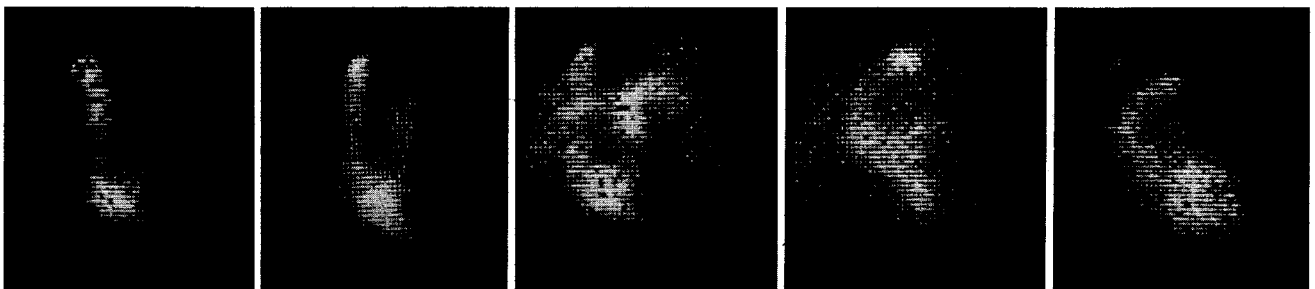


Abbildung 12a

Abbildung 12b

Abbildung 12c

Abbildung 12d

Abbildung 12e

Abbildungen 12a bis 12e. Funktionsszintigramme des Herzens nach Injektion eines Aktivitätsbolus von 15 mCi ^{99m}Tc -Pertechnetat in eine Kubitalvene, Anterior-posterior-Projektion. Darstellung der Kava und des Rechtsherzens (a), des Pulmonalstamms (b), der Pulmonalarterien (c), des linken Vorhofs sowie des linken Ventrikels (d), des linken Ventrikels und der Aorta ascendens (im zweiten Schrägdurchmesser) (e).

2. Radiokardiographie

Neben der Myokardszintigraphie ist es möglich, hämodynamische Studien am Herzen mit Hilfe von Radioisotopen durchzuführen. Es gelingt, zahlreiche Kreislaufparameter im Bereich der Lunge und des Herzens zu erhalten. Auch hier besteht der Vorteil darin, daß man das mit dem Blut durch das Herz zirkulierende radioaktive Pharmakon durch externe Messung mit einer Szintillationskamera quantitativ und qualitativ erfassen kann.

Nach rascher Injektion hoher Aktivitäten (z. B. 15 mCi ^{99m}Tc -Humanalbumin oder ^{113m}In) in eine Armvene wird der Strom des Radioindikators durch die Herzhöhlen registriert, die Aktivitätsdaten werden gespeichert und mit Hilfe eines Computers ausgewertet. Aus den gespeicherten Daten lassen sich Szintigrammbilder anfertigen (Abbildungen 12a bis 12e), welche die großen Gefäße und die Herzhöhlen darstellen. Gleichzeitig erhält man durch geeignete Auswahl von „regions of interest“ die entsprechenden Zeitaktivitätskurven. Die Aktivitätsänderung während jedes Herzschlags repräsentiert unter anderem die Pumpfunktion des Herzens.

Über ein Computerprogramm lassen sich damit das Schlagvolumen, das enddiastolische und endsystolische Füllungsvolumen, die pulmonale Zirkulationszeit sowie das pulmonale Blutvolumen berechnen.

Die „ejection fraction“ ist der sensitivste Index für eine linksventrikuläre Dysfunktion bei Patienten mit koro-

narer Herzerkrankung einschließlich Infarkten, mit Kardiomyopathien und Herzvitien. Aus der Änderung der Zeitaktivitätskurve – als Ausdruck der Volumenänderung im linken Ventrikel während jeden Herzschlags – läßt sich die Auswurfrate relativ rasch über den Computer berechnen.

Bei Überprüfung der erhaltenen Werte mit herkömmlichen Methoden, einschließlich des Herzkatheters, zeigten sich gute Übereinstimmungen, so daß diese Isotopenuntersuchungen klinisch relevant sind.

Darüber hinaus ist es möglich, durch Ekg-Triggerung die Ventrikelwandbewegungen zu erfassen, indem z. B. die enddiastolischen und endsystolischen Aktivitätsveränderungen isoliert registriert und gespeichert werden. Aus den Aktivitätsunterschieden lassen sich hypokinetische und akinetische Bezirke sowie Aneurysmen erkennen, lokalisieren und quantifizieren.

Die Herzfunktionsszintigraphie wird weiter angewandt zur Erkennung von angeborenen Herzvitien, sogenannten „blauen Babies“, und als Vorfelddiagnostik vor einer Herzkatheteruntersuchung. Es ist darüber hinaus möglich, Shuntvolumina zu berechnen, sofern sie einen Prozentsatz von etwa 10% erreichen.

Für die Verfasser: Priv.-Doz. Dr. U. Klein, Institut für Radiologie, Deutsches Herzzentrum München, Lothstraße 11, D-8000 München 2.