

PET/CT: Molekulare Diagnostik und Theragnostik für die Radionuklidtherapie

PET/CT: Molecular Imaging and Theranostics for Radionuclide Therapy



Autoren

Thorsten Derlin, Frank M. Bengel

Institut

Klinik für Nuklearmedizin, Zentrum Radiologie,
Medizinische Hochschule Hannover

Bibliografie

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0042-117979>

Pneumologie 2017; 71: 48–62

© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York

ISSN 0934-8387

VNR 2760512017152370989

Die kombinierte Positronenemissions- und Computertomografie (PET/CT) ist unverzichtbarer Bestandteil vieler diagnostischer Algorithmen in der Pneumologie geworden. Mit ihr können exakte anatomische und molekulare Informationen erfasst werden, sodass Erkrankungen umfassend charakterisiert werden können. Mit ^{18}F -Fluorodeoxyglukose (FDG) steht ein universell einsetzbarer Radiotracer zur Darstellung maligner und entzündlicher Prozesse zur Verfügung.

LERNZIELE

In diesem Beitrag gewinnt der Leser einen Überblick über Grundlagen der PET/CT, über Voraussetzungen der klinischen Durchführung und über etablierte und innovative klinische Anwendungen. Er soll dadurch in die Lage versetzt werden, die Methode zielgerichtet im diagnostischen Algorithmus einzusetzen, die Betreuung der behandelten Patienten zu gewährleisten und darüber hinaus neue innovative Entwicklungen kennenlernen.

Einleitung

Die Positronenemissionstomografie/Computertomografie (PET/CT) ist ein bildgebendes Hybridverfahren, das die simultane Erfassung von molekularen, in der Regel funktionellen, und anatomischen Informationen erlaubt. Die entstehenden Schnittbilder vereinen damit sowohl anatomische als auch funktionelle Informationen (multimodale Bildgebung). Seit Einführung der ersten kommerziellen kombinierten PET/CT-Hybridgeräte im Jahr 2001 ist dieses Verfahren insbesondere im Bereich der Pneumoonkologie zu einem unverzichtbaren Bestandteil der diagnostischen Algorithmen geworden.

Dabei stellt die PET ein nuklearmedizinisches bildgebendes Verfahren dar, bei dem die Anreicherung und Metabolisierung radioaktiv markierter Moleküle im menschlichen Körper visualisiert werden kann (Molecular Imaging), z. B. zur Darstellung des Zellstoffwechsels oder von Oberflächenrezeptoren. Hierbei steht insbesondere im Bereich der Forschung eine Vielzahl an möglichen Radiotraceren zur Verfügung, wobei in der klinischen Routine das Glukoseanalogon ^{18}F -Fluorodeoxyglukose (FDG) am verbreitetsten eingesetzt wird [1].

Die radioaktive Markierung von Radiotraceren für die PET erfolgt grundsätzlich mit Positronenstrahlern. Das Positron ist das Antiteilchen des Elektrons, von dem es sich im Vorzeichen der elektrischen Ladung und des magnetischen Moments unterscheidet. Beim Zusammentreffen von Positron und Elektron im Gewebe kommt es zu einer Paarvernichtung (Annihilation), wobei die Teilchen in zwei Vernichtungsquanten von je 511 keV zerstrahlen. Dabei handelt es sich um zwei γ -Quanten, die in einem Winkel von 180° zueinander ausgesandt werden. Diese beiden γ -Quanten werden im Positronenemissionstomografen detektiert und bilden letztlich die Grundlage des PET-Bildes.

Die Tracerakkumulation kann hierbei semiquantitativ in einem Zielvolumen mittels des sog. Standardized Uptake Value (SUV) gemessen werden, sodass sowohl

quantifizierende Verlaufsuntersuchungen als auch interindividuelle Vergleiche möglich werden [1]. Hierbei existieren unterschiedliche Ansätze zur Berechnung des SUV (z. B. Normalisierung auf das Körpergewicht, auf die fettfreie Körpermasse, Berücksichtigung des Blutglukosespiegels etc.).

Bei Kenntnis der arteriellen Eingangsfunktion kann in der PET auch vollständig quantitativ in SI-Einheiten gemessen werden (z. B. in g/cm^3). Eine akkurate SUV-Messung stellt hierbei hohe Anforderungen an Kalibrierung und fortlaufende Qualitätskontrolle. Sie kann durch eine Vielzahl technischer (z. B. Rekonstruktionsparameter) und biologischer Faktoren (z. B. Body Mass Index, Blutglukosespiegel, Zeit zwischen Tracerinjektion und Bildakquisition) beeinflusst werden [2].

Merke

Eine semiquantitative Auswertung der Traceranreicherung erfolgt mittels des Standardized Uptake Value (SUV).

Die γ -Quanten unterliegen auf dem Weg durch das Gewebe einer Schwächung, welche durch eine Schwächungskorrektur für eine optimale Bildqualität ausgeglichen werden muss. Die akquirierten CT-Daten dienen hierbei zur Schwächungskorrektur des PET-Datensatzes. Diese ist sowohl zur Rekonstruktion der Bildaten für die letztliche Befundung als auch für eine exakte Quantifizierung der Tracerakkumulation notwendig [1,2].

Nicht schwächungskorrigierte PET-Daten werden üblicherweise nur zur Interpretation in diagnostischen Sonderfällen herangezogen, wie bei der Beurteilung von metallischen Implantaten, welche zu Rekonstruktionsartefakten in der PET führen können. Atemgetriggerte PET-Aufnahmen verbessern die Darstellung pulmonaler Rundherde. Zudem können bei den aktuellen PET/CT-Scannern problemlos Computertomografien in diagnostischer Qualität, ggf. nach intravenöser Kontrastmittelapplikation, durchgeführt werden, bis hin zu getriggerten Herzaufnahmen.

Wegen der Möglichkeit einer Verschlechterung der Nierenfunktion sowie der Gefahr einer jodinduzierten Hyperthyreose sollten vor der Applikation von jodhaltigem Kontrastmittel ein aktueller Kreatininwert sowie ein TSH-Wert vorliegen.

Grundsätzlich sind an aktuellen PET/CT-Geräten alle Fragestellungen zu beantworten, die sonst auch an alleinigen CT-Scannern adressiert werden können. Eine Durchführung aller notwendigen Untersuchungen an einem Termin (one-stop-shop-imaging) vereinfacht den Untersuchungsaufwand für den Patienten und erlaubt eine konklusive Beurteilung aller notwendigen

bildgebenden Informationen (z. B. ^{18}F -FDG PET/CT und Kontrastmittelgestütztes CT Thorax/Abdomen zum Staging).

Merke

Zur Gabe von intravenösem jodhaltigen Kontrastmittel sollten ein aktueller Kreatinin- und TSH-Wert vorliegen.

Hinsichtlich der durch eine ^{18}F -FDG PET verursachten Strahlenexposition ist bei einem derzeit gültigen diagnostischen Referenzwert von 350 MBq bei einem Standardpatienten mit ca. 7 mSv zu rechnen [1]. An modernen hochsensitiven PET/CT-Geräten der neuesten Generation lassen sich PET-Untersuchungen regelhaft mit deutlich niedrigeren Dosen (z. B. 200 MBq) realisieren. Die Strahlenexposition durch die CT variiert deutlich mit dem angeforderten Untersuchungsbereich (z. B. Ganzkörper) und dem CT-Protokoll (z. B. mehrphasiges Oberbauch-CT) und kann typischerweise für ein Low-Dose-CT des Ganzkörpers bei 3 mSv liegen, wohingegen bei mehrphasigen CT-Untersuchungen Bereiche bis 20 mSv durchaus erreicht werden. Die Strahlenexposition der PET/CT wird daher heutzutage wesentlich durch den CT-Anteil bestimmt.

Bildgebung des Glukosestoffwechsels mit ^{18}F -FDG

Die meisten Tumorentitäten weisen zur Sicherstellung ihres Energiebedarfs (Generierung von Adenosin-5'-triphosphat, ATP) eine gesteigerte aerobe Glykolyserate auf, in deren Verlauf Glukose zu Laktat abgebaut wird. Diese charakteristische Eigenschaft von Tumorzellen wurde erstmals in den 20er-Jahren des vorigen Jahrhunderts von Otto Warburg beschrieben [3].

Wenngleich die im normalen Gewebe dominierende mitochondriale oxidative Phosphorylierung von Glukose deutlich effizienter ist, bevorzugen viele Tumorzellen auch bei ausreichendem Sauerstoffangebot die aerobe Glykolyse, möglicherweise, um über glykolytische Zwischenprodukte eher anabole Reaktionen und die Generierung von Biomasse zu unterstützen als eine effiziente ATP-Synthese zu gewährleisten. Glukose wird hierbei vor allem über den insulinunabhängigen Glukosetransporter Typ 1 (GLUT1) aufgenommen, der bei vielen Tumorzellen überexprimiert wird und dessen Dichte die FDG-Anreicherung beeinflusst [4].

^{18}F -FDG wird in der Zelle zunächst wie Glukose durch die Hexokinase phosphoryliert, jedoch dann nicht in signifikantem Umfang weiter metabolisiert, sodass es zu einer zunehmenden Anreicherung des ^{18}F -FDG in stoffwechselaktivem Gewebe kommt. Allerdings ist ein hoher Glukosestoffwechsel nicht tumorspezifisch.

Insbesondere Granulozyten und aktivierte Makrophagen, aber auch andere Immunzellen, weisen ebenfalls einen hohen Glukosemetabolismus auf, weshalb ^{18}F -FDG auch zur Darstellung entzündlicher Prozesse genutzt werden kann. Hieraus erklären sich falsch positive Befunde in der onkologischen ^{18}F -FDG PET/CT bei infektiösen oder inflammatorischen Erkrankungen wie Tuberkulose, Sarkoidose, Histoplasmose oder auch in Rheumaknoten [5].

Falsch negative Befunde werden bei Tumoren mit niedriger ^{18}F -FDG-Aufnahme beobachtet. Diese betrifft im Bereich der Thoraxbildgebung vor allem Adenokarzinome mit lepidischem Wachstumsmuster, muzinöse Adenokarzinome oder hochdifferenzierte neuroendokrine Tumore [5]. Ferner kann ein hoher physiologischer Glukosestoffwechsel im zu untersuchenden Organ (vor allem zerebral/zerebellär) die Detektion insbesondere kleinerer Metastasen erschweren, diese sind – wenn überhaupt – teils nur an der Minderung des Glukosestoffwechsels in der umgebenden Ödemzone indirekt zu erkennen. Daher bleibt die kraniale MRT auch weiterhin die bevorzugte Methode zum Ausschluss einer zerebralen Metastasierung [1].

Vorbereitung des Patienten auf eine ^{18}F -FDG PET/CT

Für die Vorbereitung des Patienten auf eine ^{18}F -FDG PET/CT sind mehrere Faktoren zu beachten. Patienten müssen mindestens vier Stunden vor Injektion des Radiopharmakons streng nüchtern bleiben, lediglich das Trinken von Wasser ist erlaubt [1]. In der Praxis bedeutet dies, dass die meisten Patienten bei Untersuchung am nächsten Morgen ab Mitternacht nüchtern bleiben, dies gilt natürlich auch für eine parenterale Ernährung oder glukosebasierte Infusionen.

Merke

Eine Nüchternperiode von mindestens vier Stunden vor Injektion des Radiopharmakons ist einzuhalten.

Vor der Untersuchung sollte eine ausreichende Hydratation zur Stimulation der Tracerausscheidung und Minimierung von Ausscheidungsartefakten sichergestellt sein (z. B. ein Liter Wasser in den zwei Stunden vor der PET/CT; kein Kaffee oder Tee). ^{18}F -FDG ist auch bei fortgeschrittener Niereninsuffizienz nicht nephrotoxisch. Zur Vermeidung einer erhöhten intramuskulären Traceraufnahme sollten die Patienten in den Stunden vor der PET/CT anstrengende körperliche Tätigkeiten vermeiden (z. B. Radfahren).

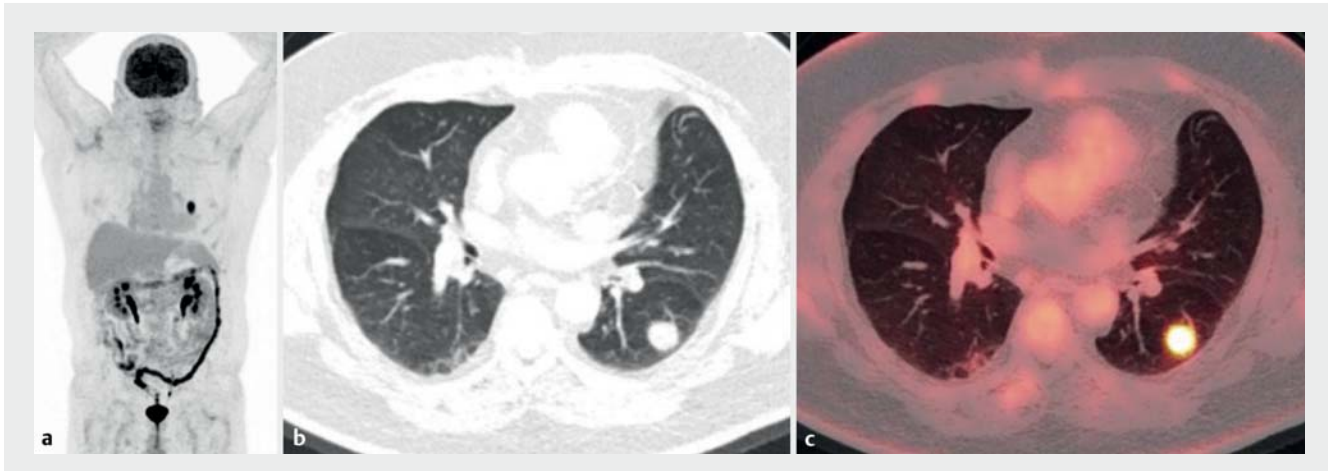
Eine klinische PET/CT sollte bei einem Blutzuckerspiegel von $>200\text{ mg/dl}$ nicht mehr durchgeführt werden, da aufgrund der hohen endogenen Glukoseverfügbar-

keit eine eingeschränkte Sensitivität resultiert [1]. Daher ist insbesondere eine adäquate Vorbereitung von Patienten mit Diabetes mellitus wichtig. Die Vorbereitung dieser Patienten kann komplex sein und sollte in enger Abstimmung mit dem die PET durchführenden Nuklearmediziner geschehen, um eine Untersuchung in Normoglykämie zu gewährleisten. Patienten mit mittels oraler Medikation kontrolliertem Diabetes mellitus Typ 2 halten sich an die oben beschriebene Vorbereitung und nehmen ihre orale Medikation wie gewohnt ein. Die PET erfolgt vorzugsweise am späten Vormittag. Bei Diabetes mellitus Typ 1 oder insulinabhängigem Diabetes mellitus Typ 2 bevorzugen die Autoren die Einnahme eines Frühstücks um spätestens 7 Uhr mit Nüchternperiode bis zur PET (bis auf die Hydratation mit Wasser), die PET erfolgt dann 4–5 Stunden später. Kurzwirksames Insulin darf je nach verwendetem Präparat ab 4–6 Stunden vor der PET nicht mehr gegeben werden. Langwirksame Insuline sollten am Tag der Untersuchung nicht vor der PET/CT gegeben werden [1].

Stellenwert der ^{18}F -FDG PET/CT beim solitären pulmonalen Rundherd

Ein solitärer pulmonaler Rundherd ist eine rundliche oder ovale Verdichtung von $\leq 3\text{ cm}$ Diameter, umgeben von pulmonalem Parenchym und ohne begleitende Lymphadenopathie, Minderbelüftung oder pneumonische Infiltrate [6]. Die meisten Läsionen entsprechen hierbei Granulomen, Bronchialkarzinomen oder Hamartomen [7,8]. Die Diagnostik solitärer pulmonaler Rundherde muss akkurat und effektiv sein, um potenziell maligne Befunde sicher zu identifizieren und einer Resektion zuzuführen, wohingegen weitere invasive Maßnahmen bei benignen Befunden reduziert werden sollen.

Daten an 53454 Patienten aus dem National Lung Screening Trial zeigen, dass bei Screeninguntersuchungen in Risikopopulationen auffällige Befunde in der CT (nichtkalzifizierter Nodulus $>4\text{ mm}$ oder z. B. Lymphadenopathie) in 24,2% der Patienten erhoben werden, im konventionellen Röntgen immerhin noch in 6,9%, was die Häufigkeit und klinische Relevanz des Problems verdeutlicht [9]. Hierbei ist das Risiko für Malignität eindeutig von der Größe des Nodulus abhängig [10]. Bei einem malignomverdächtigen, isolierten Lungenrundherd $>8\text{–}10\text{ mm}$ Durchmesser soll daher in der Regel eine chirurgische Abklärung durchgeführt werden. In der Praxis wird in aller Regel vor Resektion bereits zur Therapieplanung eine ^{18}F -FDG PET/CT zum Staging durchgeführt.



► **Abb. 1** ^{18}F -FDG-PET/CT (Darstellung des Glukosestoffwechsels) bei nichtkleinzelligem Bronchialkarzinom bei einem 65-jährigen Patienten. **a** Maximum-Intensitäts-Projektion des PET. **b** Axiales CT. **c** Axiales fusioniertes PET/CT mit Darstellung einer stoffwechselaktiven Raumforderung. Kein Nachweis einer lokoregionären oder distanten Metastasierung.

Die ^{18}F -FDG PET/CT (► **Abb. 1**) ist ein hochempfindliches Verfahren zur Detektion von Malignität und zeigte in einer aktuellen Metaanalyse zur Beurteilung des isolierten pulmonalen Rundherds eine gepoolte Sensitivität von 0,95 (95 % KI: 0,93 – 0,98) bei einer gepoolten Spezifität von 0,82 (95 % KI: 0,77 – 0,88) [11].

Gemäß der aktuellen interdisziplinären S3-Leitlinie soll bei einem malignomverdächtigen, isolierten Lungenrundherd von >8–10 mm eine ^{18}F -FDG PET/CT bei Patienten mit erhöhtem Operationsrisiko durchgeführt werden, wenn eine Diagnosestellung mittels einer invasiven Diagnostik nicht möglich ist (Empfehlungsgrad A) [12].

Bei einem isolierten Lungenrundherd <8–10 mm Durchmesser sollen radiologische Verlaufskontrollen durchgeführt werden (Empfehlungsgrad A), und zwar mittels diagnostischem CT oder Low-Dose-CT nach 3, 6, 12 und 24 Monaten (Empfehlungsgrad B) [12].

Im NELSON Trial an 7155 Patienten war die Wahrscheinlichkeit für einen malignen Lungentumor über den Studienzeitraum bei einem maximalen transversalen Durchmesser <5 mm nicht signifikant höher als bei Patienten ohne Nodulus (0,4 % [95 % KI 0,2 – 0,7] vs. 0,4 % [95 % KI 0,3 – 0,6], $p = 1,00$) [13].

Merke

Isolierte Lungenrundherde finden sich beim CT-Screening in Risikopopulationen bei >20 % der Patienten.

Die Rate falsch negativer oder falsch positiver Befunde in der PET beträgt beim isolierten Lungenrundherd jeweils ca. 8–10 % [11, 14]:

Falsch negative Befunde ergeben sich neben den zuvor erwähnten, nicht Glukose-aviden Histologien insbesondere bei kleinen Noduli wegen der Unterschätzung der ^{18}F -FDG-Anreicherung aufgrund des Partialvolumeneffekts (Unterschätzung der Radioaktivitätskonzentration in einer Läsion, wenn das Volumen dieser Läsion kleiner als das Doppelte der Auflösung des Messsystems ist) und der Atembewegung [15]. Daher sollten Noduli <8 mm nicht regelhaft in der PET/CT evaluiert werden.

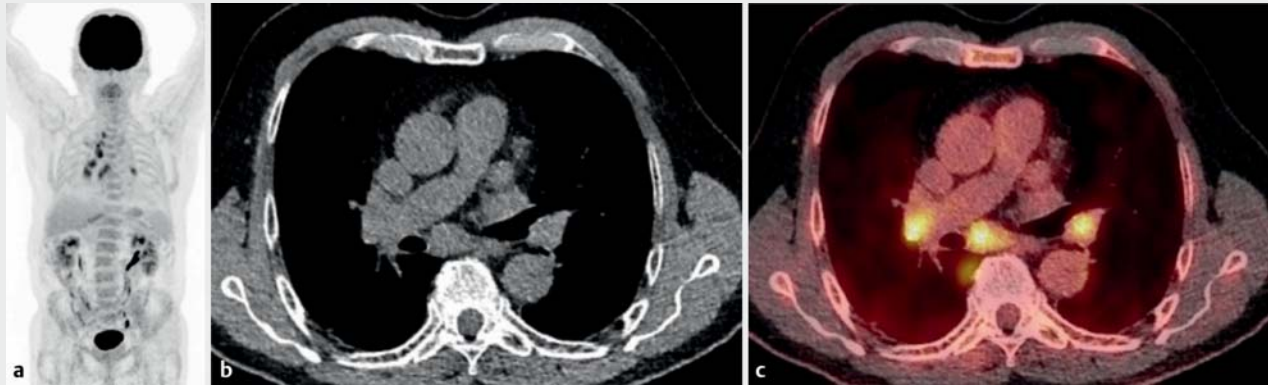
Falsch positive Befunde (► **Tab. 1**) ergeben sich vor allem aufgrund infektiöser Erkrankungen; bei Herkunft des Patienten aus Gebieten mit endemischen Infektionskrankheiten ist die Spezifität der PET/CT daher eingeschränkt [16].

Merke

Falsch positive Befunde in der PET werden beim isolierten Lungenrundherd in ca. 8–10 % der Fälle beobachtet und sind überwiegend entzündlich bedingt.

► **Tab. 1** Isolierter Lungenrundherd: Ursachen falsch positiver Befunde in der ^{18}F -FDG-PET/CT (Auswahl) [5, 16].

Ätiologie	Beispiele
bakteriell	Pneumonie, Abszess, Nokardiose
mykobakteriell	Tuberkulose, atypische Mykobakteriose
mykotisch	Aspergillose, Blastomykose, Kryptokokkose, Histoplasmose, Kokzidioidomykose
granulomatös	Sarkoidose, Morbus Wegener, Rheumaknoten
andere	kryptogene organisierende Pneumonie (COP), Anthrakose



► **Abb. 2** ^{18}F -FDG-PET/CT (Darstellung des Glukosestoffwechsels) bei nichtkleinzelligem Bronchialkarzinom bei einem 77-jährigen Patienten. **a** Maximum-Intensitäts-Projektion des PET. **b** Axiales CT. **c** Axiales fusioniertes PET/CT mit Darstellung einer ausgedehnten mediastinalen Metastasierung.

Stellenwert der ^{18}F -FDG PET/CT beim nichtkleinzelligen Bronchialkarzinom

Der wesentliche Beitrag der ^{18}F -FDG PET/CT beim nichtkleinzelligen Bronchialkarzinom besteht im mediastinalen Staging und in der Detektion einer Fernmetastasierung.

Lymphknoten (N-Status)

Der mediastinale Lymphknotenstatus soll vor der Behandlung des Primärtumors evaluiert werden. Im klinischen Stadium IA mit kurativer Behandlungsindikation kann, im Stadium IB–IIIB soll die ^{18}F -FDG-PET/CT für das mediastinale und extrathorakale Staging eingesetzt werden [12]. Die ^{18}F -FDG-PET/CT stellt dabei das derzeit sensitivste und spezifischste bildgebende mediastinale Staging-Verfahren dar (► **Abb. 2**).

So zeigte die PET/CT in mehreren Metaanalysen eine gepoolte Sensitivität von 0,77–0,85 bei einer gepoolten Spezifität von 0,90–0,92 [17–19]. Dies liegt signifikant über der gepoolten Sensitivität (0,59–0,61) und Spezifität (0,78–0,79) der CT [18, 19]. Hierbei ist insbesondere der hohe negative prädiktive Wert der Kombination von PET und CT von 0,98 hervorzuheben [20].

In der Konsequenz kann bei einer negativen PET/CT auf eine definitive Evaluation des Lymphknotenstatus vor der kurativ intendierten Therapie verzichtet werden. Allerdings sollten bei diskrepantem Befund computertomografisch vergrößerte Lymphknoten auch bei unauffälligem Glukosestoffwechsel in der PET weiter evaluiert werden, da die Wahrscheinlichkeit einer N2-Situation in dieser Konstellation bei bis zu 21% liegen kann [21].

Merke

Die Kombination aus unauffälliger PET und fehlender Lymphknotenvergrößerung in der CT schließt eine mediastinale Metastasierung nahezu aus.

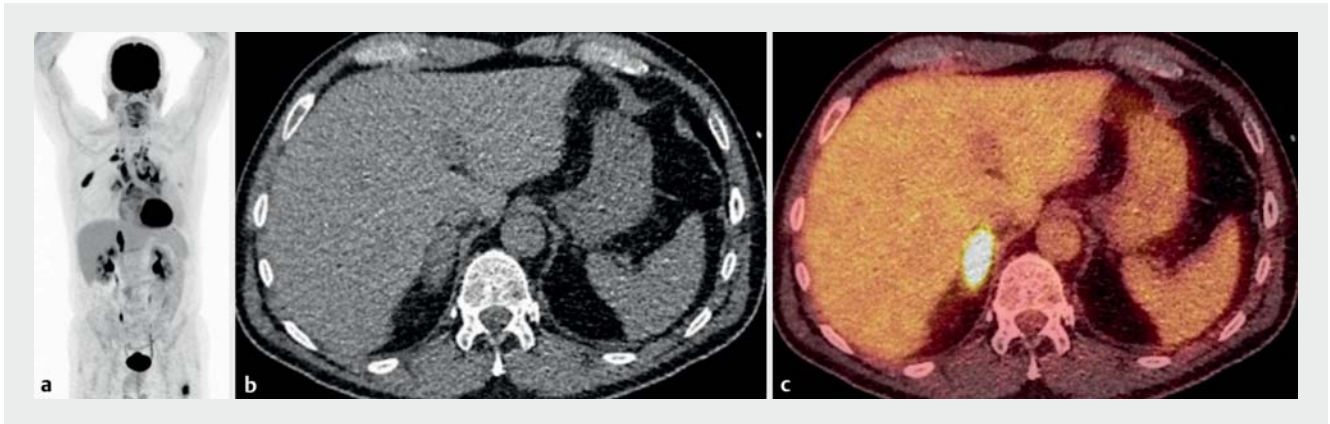
Fernmetastasierung (M-Staging)

Zur Detektion extrathorakaler Metastasen soll im klinischen Stadium IB–IIIB und bei kurativer Behandlungsintention eine Untersuchung auf extrathorakale Metastasen mittels cMRT und ^{18}F -FDG-PET/CT erfolgen (Empfehlungsgrad A) [12]. Dabei soll ein Patient nur im Falle der pathologischen Bestätigung der Metastasierung oder im Ausnahmefall einer eindeutigen klinischen oder radiologischen Evidenz der Metastasierung von einer potenziell kurativen Behandlung ausgeschlossen werden (Empfehlungsgrad A) [12].

Die ^{18}F -FDG PET/CT zeigt eine sehr hohe Sensitivität in der Detektion einer distanten Metastasierung. So werden mit ihrer Hilfe selbst bei mittels kontrastmittelgestützter Thorax-/Abdomen-CT bereits untersuchten Patienten noch in 19% der Fälle bisher unbekannte Fernmetastasen diagnostiziert [22]. Die Detektionsrate insbesondere ossärer und adrener Metastasen (► **Abb. 3**) ist mit 0,98–1,0 außerordentlich hoch [23, 24].

Wenn die PET – wie in der S3-Leitlinie gefordert – als Ganzkörperuntersuchung durchgeführt wird, kann auf eine ergänzende Skelettszintigrafie zum ossären Staging grundsätzlich verzichtet werden, da letztere aufgrund der geringen Detektionsrate osteolytischer Metastasen ohnehin nur eine Sensitivität von 61% aufweist [24].

Die hohe Sensitivität und Spezifität der PET/CT führt zu einem Stadienshift in bis zu 61% der Patienten [25], wobei ungefähr zwei Drittel von ihnen ein Upstaging



► **Abb. 3** ^{18}F -FDG-PET/CT (Darstellung des Glukosestoffwechsels) bei nichtkleinzelligem Bronchialkarzinom bei einem 55-jährigen Patienten. **a** Maximum-Intensitäts-Projektion des PET. **b** Axiales CT. **c** Axiales fusioniertes PET/CT mit Darstellung einer ausgedehnten, auch adrenalen Metastasierung.

erfahren. Hiervon wird eine relevanter Patientenanteil korrekt einem nicht mehr kurativ behandelbaren Stadium zugeordnet. So kam es in einer Studie neben einem Stadienshift innerhalb der Stadien I–III zu einem Upstaging in Stadium IV in 19% der Fälle [22]. In der niederländischen PLUS-Studie konnte gezeigt werden, dass sich durch den Einsatz der PET/CT eine letztlich frustrane Operation bei 20% der Patienten vermeiden ließ [26]. In einer anderen Studie konnte die Anzahl der frustranen Thorakotomien (Rezidiv, Fernmetastasierung oder Exitus innerhalb von zwölf Monaten nach OP), von 52% auf 35% verringert werden, wenn präoperativ eine PET/CT eingesetzt wurde [27].

Da es sich bei der PET/CT um eine Ganzkörperdiagnostik handelt, wurden in den letzten Jahren neue Parameter zur Prognosestratifizierung und zum Therapie-monitoring evaluiert, welche die Ganzkörper-tumorlast abbilden. Mit dem metabolisch aktiven Tumolvolumen (metabolic tumour volume, MTV) im Ganzkörper und der totalen intraläsionalen Glykolyse (total lesion glycolysis, TLG) stehen zwei neue summarische Parameter hierfür zur Verfügung, die in allen Tumorstadien signifikant mit dem Patientenoutcome assoziiert sind [28] und eine konklusive Verlaufsbeurteilung aller Tumor-manifestationen in einem repräsentativen Parameter erlauben. Mittels PET/CT lassen sich also distante Metastasen mit teils deutlich höherer Sensitivität als mit anderen bildgebenden Verfahren detektieren. Dies ist insbesondere auch relevant zum Ausschluss weiterer Metastasen bei singulärer distanter Metastasierung und kurativ intendiertem multimodalem Therapiekonzept.

Bestrahlungsplanung

Mit der Möglichkeit der Koregistrierung von PET/CT und Bestrahlungsplanungs-CT findet die ^{18}F -FDG-PET/CT immer weiteren Einzugs in die Therapieplanung.

Gegenüber der alleinigen CT kommt es hierbei zu einer Änderung der geplanten Bestrahlungsfelder in ca. 50% der Fälle [29]. Zum einen werden bislang nicht detektierte Lymphknotenmetastasen durch die PET ins Bestrahlungsvolumen inkludiert, zum anderen kann der Primarius anhand des Glukosestoffwechsels von poststenotischen Atelektasen differenziert werden (► **Abb. 4**).

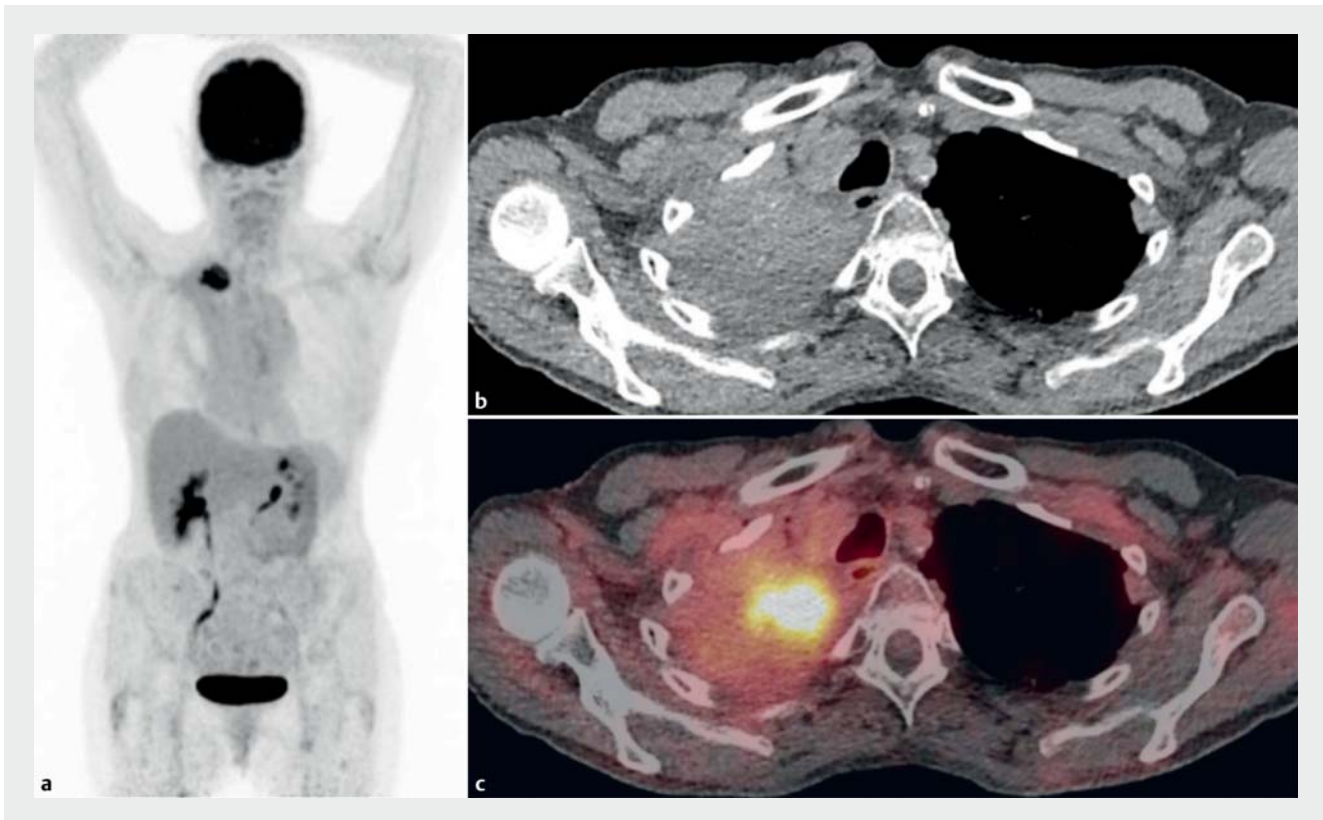
Die Frage, mit welcher Methodik sich hierbei das Zielvolumen am besten definieren lässt (z. B. visuelle Analyse, SUV_{max} Schwellenwert, SUV_{max} Isokontur), ist weiterhin Gegenstand der Forschung [30]. Ebenso bietet sich die Möglichkeit der Dosiseskala-tion im anhand der PET besser definierten Zielvolumen bei gleichzeitiger Schonung des umgebenden gesunden Gewebes.

Dabei sollten insbesondere Patienten vor geplanter kurativ-intendierter Strahlentherapie einer ^{18}F -FDG-PET/CT zugeführt werden. Die hohe Rate mittels PET/CT detektierter unerwarteter Fernmetastasen im aufgrund der CT angenommenen Stadium III von bis zu 24% erfordert eine Modifizierung des Therapiekonzepts und würde anderenfalls – wie zu erwarten – mit einer Progression der Metastasierung assoziiert sein [22].

Merke
Anhand der ^{18}F -FDG-Aufnahme lassen sich Tumor und umgebendes atelektatisches Lungengewebe differenzieren.

^{18}F -FDG-PET/CT und Sarkoidose

Der unspezifische Anreicherungsmechanismus des Radiotracers ^{18}F -FDG mit Aufnahme auch in inflammato-rischen Zellen wie aktivierten Makrophagen, Neutrophilen und Lymphozyten kann zur Bildgebung entzünd-



► **Abb. 4** ^{18}F -FDG-PET/CT (Darstellung des Glukosestoffwechsels) bei nichtkleinzelligem Bronchialkarzinom bei einer 73-jährigen Patientin. **a** Maximum-Intensitäts-Projektion des PET. **b** Axiales CT. **c** Axiales fusioniertes PET/CT mit Darstellung eines Rezidivs mit begleitender Oberlappenatektase.

licher Erkrankungen genutzt werden [5]. Am Beispiel der Sarkoidose kann dies gezeigt werden.

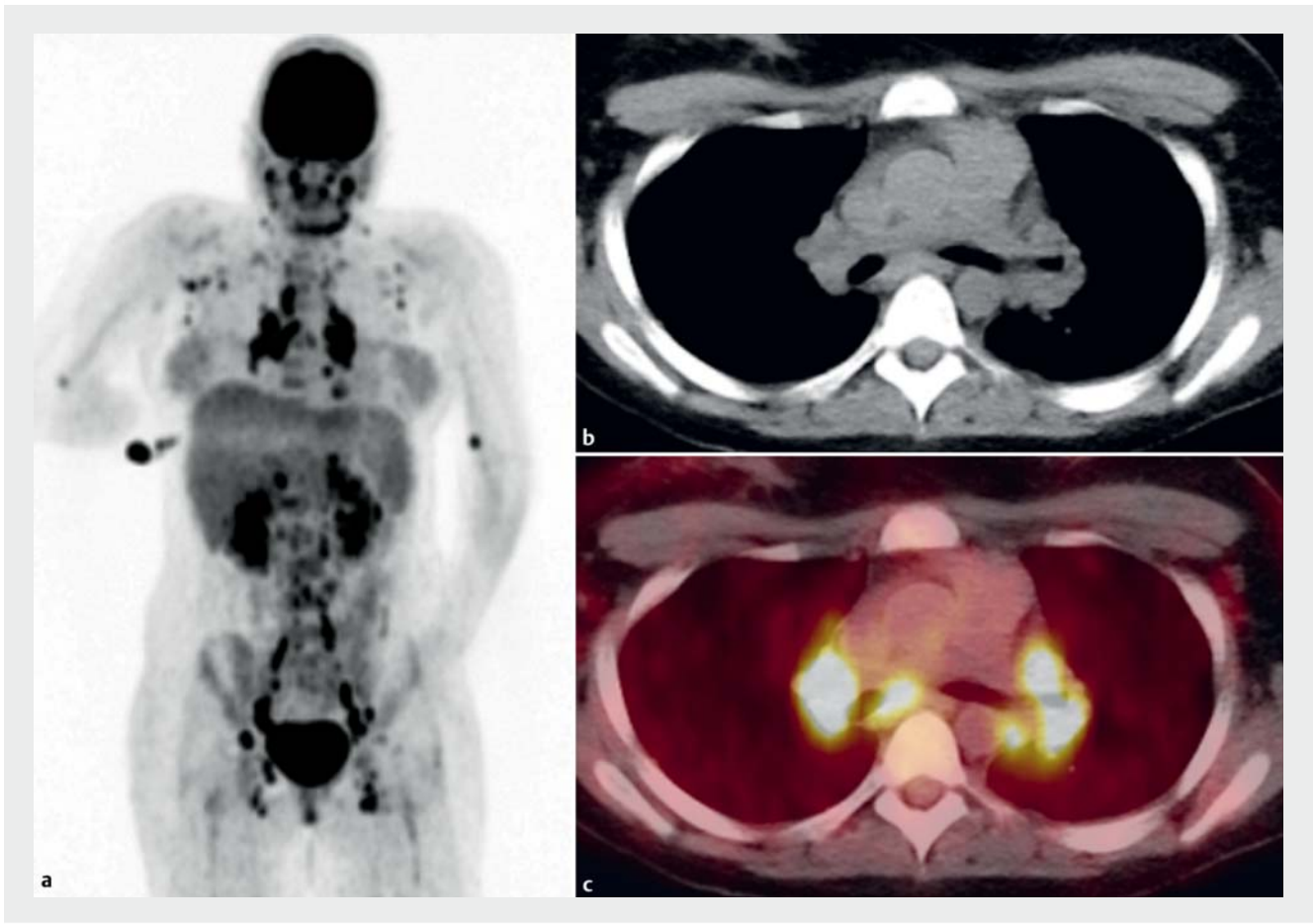
Die ^{18}F -FDG PET/CT besitzt aufgrund des hohen Glukosestoffwechsels in granulomatösen Entzündungen eine äußerst hohe Sensitivität zur Detektion entzündlicher Herde und kann zu einer vollständigen Kartografierung des Sarkoidosebefalls (► **Abb. 5**) eingesetzt werden [31]. Diese erscheint insbesondere hilfreich bei atypischen, komplexen oder multisystemischen Krankheitsverläufen.

Für thorakale oder sinunasale Manifestationen beträgt die Sensitivität im Vergleich zur bioptischen Sicherung nahezu 100%, die Sensitivität für einen oft kleinherdigen Hautbefall ist geringer [31]. Hierbei ist die ^{18}F -FDG-PET insbesondere auch hilfreich bei Patienten, bei denen das ACE keinen brauchbaren Parameter zur Beurteilung darstellt (z. B. ACE-negative Patienten) [32]. Die ^{18}F -FDG-PET kann eingesetzt werden, um eine Verschlechterung der Lungenfunktion nach zwölf Monaten vorherzusagen bzw. den zu erwartenden Effekt einer Behandlung [33, 34].

Der kardiale Sarkoidosebefall lässt sich ebenfalls unter Verwendung spezieller Untersuchungsprotokolle mit Suppression des physiologischen kardialen Glukosemetabolismus erfassen. Kardiale FDG-positive Sarkoidoseherde sind signifikant mit dem Auftreten von anhaltenden ventrikulären Tachykardien und einer erhöhten Mortalität assoziiert [35]. Die PET kann auch zum Therapiemonitoring unter immunsuppressiver Therapie eingesetzt werden. Eine Rückbildung der kardialen Inflammation in der PET ist signifikant mit einer Verbesserung der linksventrikulären systolischen Funktion assoziiert [36].

Bei kardialer Sarkoidose mit Überleitungsstörungen kann die FDG-PET häufiger kausale Entzündungsfoki detektieren als die kardiale MRT (8% der Patienten nur in der MRT positiv, 33% nur in der FDG-PET). Insbesondere bei Sarkoidosepatienten mit neu aufgetretenem AV-Block kann eine FDG-PET einen kardialen Befall darstellen, auch bei negativem MRT [37].

Studien, welche die diagnostische Genauigkeit der MRT und der PET/CT vergleichen, sind bei der kardialen Sarkoidose nur limitiert verfügbar. Die PET könnte eine höhere Sensitivität als die MRT besitzen, bei allerdings geringerer Spezifität [38]. Zumindest bei Patienten



► **Abb. 5** ^{18}F -FDG-PET/CT (Darstellung des Glukosestoffwechsels) bei Sarkoidose bei einer 21-jährigen Patientin. **a** Maximum-Intensitäts-Projektion des PET. **b** Axiales CT. **c** Axiales fusioniertes PET/CT mit Darstellung einer ausgeprägten, bilhär betonten stoffwechselaktiven Lymphadenopathie.

mit negativem MRT und fortbestehendem Verdacht auf eine kardiale Sarkoidose sollte eine FDG-PET durchgeführt werden, ebenso bei Patienten, bei denen eine MRT kontraindiziert ist.

Merke

Mittels ^{18}F -FDG-PET/CT kann man einen kardialen Befall bei Sarkoidose detektieren, das Ausmaß der Inflammation bestimmen und prognostische Informationen ableiten.

Neue theragnostische Radiopharmaka in der PET/CT

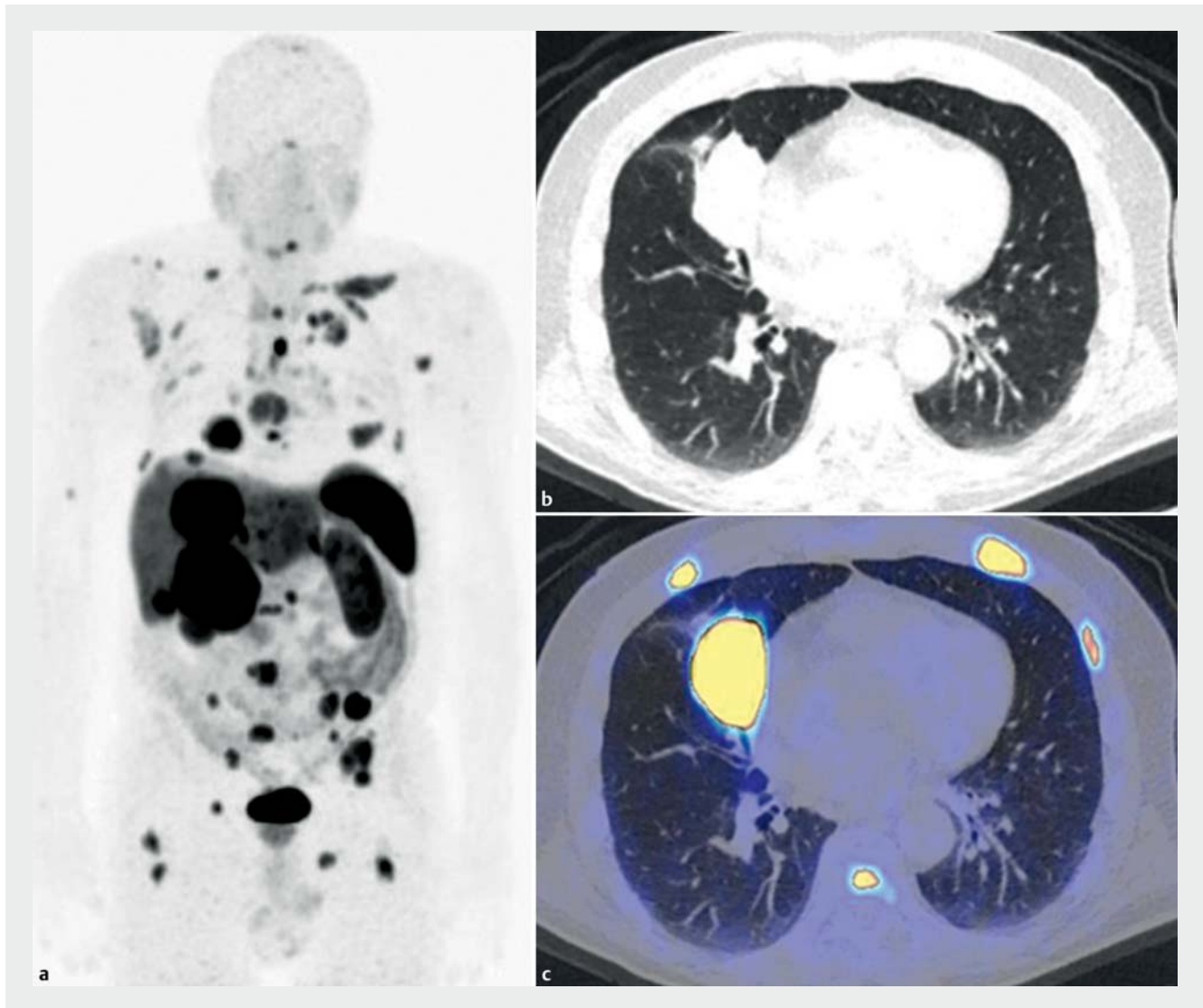
Neben ^{18}F -FDG stehen auch in der klinischen Routine inzwischen verbreitet eine Reihe weiterer Radiopharmaka zur nichtinvasiven Charakterisierung bezüglich weiterer molekularer Targets zur Verfügung. Insbesondere mittels ^{68}Ga markierte Peptidtracer haben in den letzten Jahren eine zunehmende Verbreitung gefunden. Diese Radiopharmaka (► **Tab. 2**) sind überwiegend theragnostisch, d.h. sie können sowohl mit

einem diagnostischen Radionuklid wie ^{68}Ga als auch mit einem für therapeutische Zwecke einsetzbaren Radionuklid wie dem aufgrund seiner physikalischen Halbwertszeit und der günstigen Gewebereichweite häufig verwendeten β -Strahler ^{177}Lu markiert.

► **Tab. 2** Auswahl theragnostischer Radiopharmaka in der PET/CT.

Molekulares Target	Diagnostisches Radiopharmakon	Therapeutisches Radiopharmakon
Somatostatinrezeptor (Subtyp 2 und 5)	^{68}Ga -DOTA-TATE	^{177}Lu -DOTA-TATE, ^{90}Y -DOTA-TATE
PSMA	^{68}Ga -PSMA I&T	^{177}Lu -PSMA I&T
CXCR4	^{68}Ga -Pentixafor	^{177}Lu -Pentixather
GRPr	^{68}Ga -RM2	^{177}Lu -RM2

PSMA: Prostataspezifisches Membranantigen; CXCR4: CXC-Motiv-Chemokinrezeptor 4; GRPr: Gastrin-releasing peptide receptor; Ga: Gallium; Lu: Lutetium; Y: Yttrium; DOTA-TATE: DOTA-(Tyr3)-octreotate; I&T: Imaging & Therapy; RM2: DOTA-4-amino-1-carboxymethylpiperidine-d-Phe-Gln-Trp-Ala-Val-Gly-His-Sta-Leu-NH₂



► **Abb. 6** ^{68}Ga -DOTA-TATE-PET/CT (Darstellung der Somatostatinrezeptorexpression) bei neuroendokrinen Tumor bei einem 63-jährigen Patienten. **a** Maximum-Intensitäts-Projektion des PET. **b** Axiales CT. **c** Axiales fusioniertes PET/CT mit Darstellung einer disseminierten, auch pulmonalen Metastasierung.

kiert werden. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit einer nichtinvasiven bildgebenden Expressionsanalyse molekularer Targets im Rahmen einer Ganzkörperdiagnostik, gefolgt von einer zielgerichteten Radiopeptidtherapie, bei der lediglich die das Target exprimierenden Metastasen therapiert werden, bei gleichzeitiger Schonung der übrigen Organe.

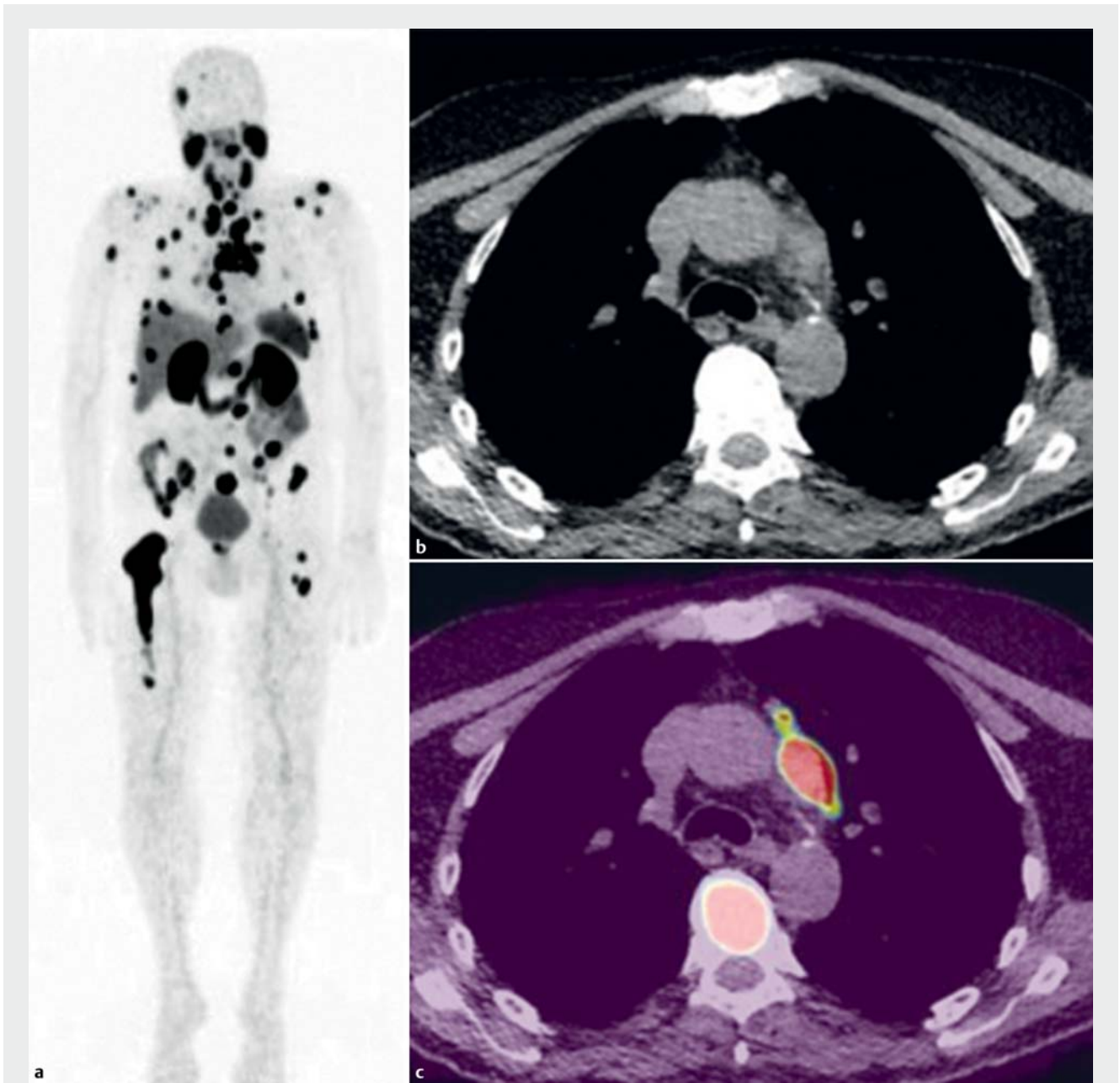
Merke

Theragnostische Radiopharmaka können sowohl mit diagnostischen Radionukliden als auch mit therapeutischen Radionukliden markiert werden.

Gerade bei neuroendokrinen Tumoren hat sich die Somatostatin-Rezeptor-Diagnostik (► **Abb. 6**) bewährt und dient sowohl dem Staging als auch der Evaluation einer ausreichenden Rezeptorexpression für eine pep-

tidvermittelte Rezeptortherapie [39]. Gallium-markierte Somatostatinanaloga zeigen hierbei eine höhere Sensitivität für bronchopulmonale Karzinoide als ^{18}F -FDG [40], insbesondere bei typischen Karzinoiden [39]. Hierbei sollte der PET/CT mit Gallium-markierten Somatostatinanaloga gegenüber der älteren ^{111}In ium-Octreotid Szintigrafie wegen der deutlich geringeren Strahlenexposition, der höheren Auflösung und der höheren Sensitivität der Vorzug gegeben werden.

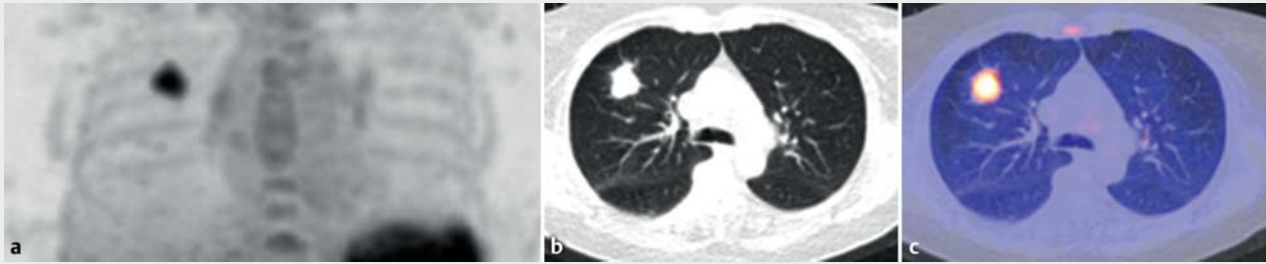
Als weitere theragnostische Radiopharmaka stehen Liganden des prostataspezifischen Membranantigens (PSMA) zur Verfügung (► **Abb. 7**). PSMA wird vor allem im Endothel neu gebildeter Gefäße bei einer Vielzahl von Tumoren exprimiert und kann sowohl diagnostisch als auch therapeutisch adressiert werden [41]. PSMA-Liganden stehen inzwischen in Deutschland in der klini-



► **Abb. 7** ^{68}Ga -PSMA-Liganden-PET/CT (Darstellung der PSMA-Expression) bei Adenokarzinom der Prostata bei einem 71-jährigen Patienten. **a** Maximum-Intensitäts-Projektion des PET. **b** Axiales CT. **c** Axiales fusioniertes PET/CT mit Darstellung einer disseminierten, auch mediastinalen Metastasierung.

schen Routine zur Verfügung und werden vor allem beim kastrationsresistenten metastasierten Prostatakarzinom eingesetzt. Hierbei stellen sie eine systemische Behandlungsoption bei therapierefraktärem metastasierten Prostatakarzinom dar.

Der CXC-Motiv-Chemokinrezeptor 4 (CXCR4) stellt ebenfalls ein interessantes theragnostisches Target dar (► **Abb. 8**), das derzeit bei einer Reihe von Tumor-entitäten, wie dem kleinzelligen Bronchialkarzinom, evaluiert wird [42].



► **Abb. 8** ^{68}Ga -Pentixafor-PET/CT (Darstellung der CXCR4-Expression) bei nichtkleinzelligem Bronchialkarzinom bei einer 63-jährigen Patientin. **a** Maximum-Intensitäts-Projektion des PET des Thorax. **b** Axiales CT. **c** Axiales fusioniertes PET/CT mit Darstellung einer hoch CXCR4-exprimierenden Raumforderung. Kein Nachweis einer lokoregionären Metastasierung.

KERNAUSSAGEN

Die kombinierte PET/CT ist seit ihrer Einführung zu einem unverzichtbaren Bestandteil vieler diagnostischer Algorithmen in der Pneumologie geworden. Mit ihr können sowohl exakte anatomische als auch molekulare Informationen erfasst werden, sodass Erkrankungen umfassend charakterisiert werden können.

Mit dem Glukoseanalogon ^{18}F -FDG steht ein universell einsetzbarer Radiotracer zur Darstellung maligner und entzündlicher Prozesse zur Verfügung.

Bei malignen thorakalen Tumoren stellt die ^{18}F -FDG PET/CT inzwischen den bildgebenden Referenzstandard zum nichtinvasiven Staging dar.

Bei entzündlichen Erkrankungen erfolgt ein zunehmender Einsatz der PET/CT zur sensitiven Erfassung aller entzündlichen Veränderungen.

Aktuell erfolgt ein zunehmend breiter Einsatz neuer theragnostischer Radiopharmaka, welche die nichtinvasive Analyse der Expression therapeutischer Targets über die bloße Darstellung des Glukosestoffwechsels hinaus erlauben und eine nachfolgende zielgerichtete Radionuklidtherapie ermöglichen.

Zukünftige Radiopharmakaentwicklungen müssen darauf gerichtet sein, auch bei den soliden thorakalen Tumoren neue Behandlungsoptionen zu eröffnen.

Literatur

- [1] Boellaard R, Delgado-Bolton R, Oyen WJ et al. FDG PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour imaging: version 2.0. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2015; 42: 328–354
- [2] Boellaard R. Standards for PET image acquisition and quantitative data analysis. *J Nucl Med* 2009; 50: 11–20
- [3] Warburg O, Posener K, Negelein E. Über den Stoffwechsel der Tumoren. *Biochem Z* 1924; 152: 319–344
- [4] de Geus-Oei LF, van Krieken JH, Aliredjo RP et al. Biological correlates of FDG uptake in non-small cell lung cancer. *Lung Cancer* 2007; 55: 79–87
- [5] Bunyaviroch T, Coleman RE. PET evaluation of lung cancer. *J Nucl Med* 2006; 47: 451–469
- [6] Midthun DE, Swensen SJ, Jett JR. Approach to the solitary pulmonary nodule. *Mayo Clin Proc* 1993; 68: 378–385
- [7] Winer-Muram H. The solitary pulmonary nodule. *Radiology* 2006; 239: 34–49
- [8] Murthy SC, Rice TW. The solitary pulmonary nodule: a primer on differential diagnosis. *Semin Thorac Cardiovasc Surg* 2002; 14: 239–249
- [9] National Lung Screening Trial Research Team, Aberle DR, Adams AM et al. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening. *Engl J Med* 2011; 365: 395–409
- [10] McWilliams A, Tammemagi MC, Mayo JR et al. Probability of cancer in pulmonary nodules detected on first screening CT. *N Engl J Med* 2013; 369: 910–919
- [11] Cronin P, Dwamena BA, Kelly AM et al. Solitary pulmonary nodules: meta-analytic comparison of cross-sectional imaging modalities for diagnosis of malignancy. *Radiology* 2008; 246: 772–782
- [12] Goeckenjan G, Sitter H, Thomas M et al. [Prevention, diagnosis, therapy, and follow-up of lung cancer. Interdisciplinary guideline of the German Respiratory Society and the German Cancer Society – abridged version]. *Pneumologie* 2011; 65: e51–e75
- [13] Horeweg N, van Rosmalen J, Heuvelmans MA et al. Lung cancer probability in patients with CT-detected pulmonary nodules: a prespecified analysis of data from the NELSON trial of low-dose CT screening. *Lancet Oncol* 2014; 15: 1332–1341

- [14] Gould MK, Maclean CC, Kuschner WG et al. Accuracy of positron emission tomography for diagnosis of pulmonary nodules and mass lesions: a meta-analysis. *JAMA* 2001; 285: 914–924
- [15] Apostolova I, Wiemker R, Paulus T et al. Combined correction of recovery effect and motion blur for SUV quantification of solitary pulmonary nodules in FDG PET/CT. *Eur Radiol* 2010; 20: 1868–1877
- [16] Deppen SA, Blume JD, Kensinger CD et al. Accuracy of FDG-PET to diagnose lung cancer in areas with infectious lung disease: a meta-analysis. *JAMA* 2014; 312: 1227–1236
- [17] Schmidt-Hansen M, Baldwin DR, Hasler E et al. PET-CT for assessing mediastinal lymph node involvement in patients with suspected resectable non-small cell lung cancer. *Cochrane Database Syst Rev* 2014; 11: CD009519
- [18] Gould MK, Kuschner WG, Rydzak CE et al. Test performance of positron emission tomography and computed tomography for mediastinal staging in patients with non-small-cell lung cancer: a meta-analysis. *Ann Intern Med* 2003; 139: 879–892
- [19] Birim O, Kappetein AP, Stijnen T et al. Meta-analysis of positron emission tomographic and computed tomographic imaging in detecting mediastinal lymph node metastases in nonsmall cell lung cancer. *Ann Thorac Surg* 2005; 79: 375–382
- [20] Pozo-Rodríguez F, Martín de Nicolás JL, Sánchez-Nistal MA et al. Accuracy of helical computed tomography and [18F] fluorodeoxyglucose positron emission tomography for identifying lymph node mediastinal metastases in potentially resectable non-small-cell lung cancer. *J Clin Oncol* 2005; 23: 8348–8356
- [21] de Langen AJ, Raijmakers P, Riphagen I et al. The size of mediastinal lymph nodes and its relation with metastatic involvement: a meta-analysis. *Eur J Cardiothorac Surg* 2006; 29: 26–29
- [22] MacManus MP, Hicks RJ, Matthews JP et al. High rate of detection of unsuspected distant metastases by pet in apparent stage III non-small-cell lung cancer: implications for radical radiation therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2001; 50: 287–293
- [23] Erasmus JJ, Patz EF Jr, McAdams HP et al. Evaluation of adrenal masses in patients with bronchogenic carcinoma using 18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography. *AJR* 1997; 168: 1357–1360
- [24] Bury T, Barreto A, Daenen F et al. Fluorine-18 deoxyglucose positron emission tomography for the detection of bone metastases in patients with non-small cell lung cancer. *Eur J Nucl Med* 1998; 25: 1244–1247
- [25] Pieterman RM, van Putten JW, Meuzelaar JJ et al. Preoperative staging of non-small-cell lung cancer with positron-emission tomography. *N Engl J Med* 2000; 343: 254–261
- [26] van Tinteren H, Hoekstra OS, Smit EF et al. Effectiveness of positron emission tomography in preoperative assessment of patients with suspected non-small cell lung cancer: The PLUS multicentre randomized trial. *Lancet* 2002; 359: 1388–1393
- [27] Fischer B, Lassen U, Mortensen J et al. Preoperative staging of lung cancer with combined PET-CT. *N Engl J Med* 2009; 361: 32–39
- [28] Im HJ, Pak K, Cheon GJ et al. Prognostic value of volumetric parameters of (18)F-FDG PET in non-small-cell lung cancer: a meta-analysis. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2015; 42: 241–251
- [29] Bradley J, Thorstad WL, Mutic S et al. Impact of FDG-PET on radiation therapy volume delineation in non-small-cell lung cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2004; 59: 78–86
- [30] Nestle U, Kremp S, Schaefer-Schuler A et al. Comparison of different methods for delineation of 18F-FDG PET-positive tissue for target volume definition in radiotherapy of patients with non-small cell lung cancer. *J Nucl Med* 2005; 46: 1342–1348
- [31] Braun JJ, Kessler R, Constantinesco A et al. 18F-FDG PET/CT in sarcoidosis management: review and report of 20 cases. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2008; 35: 1537–1543
- [32] Sobic-Saranovic D, Grozdic I, Videnovic-Ivanov J et al. The utility of 18F-FDG PET/CT for diagnosis and adjustment of therapy in patients with active chronic sarcoidosis. *J Nucl Med* 2012; 53: 1543–1549
- [33] Keijsers RG, Verzijlbergen EJ, van den Bosch JM et al. 18F-FDG PET as a predictor of pulmonary function in sarcoidosis. *Sarcoidosis Vasc Diffuse Lung Dis* 2011; 28: 123–129
- [34] Valeyre D, Prasse A, Nunes H et al. Sarcoidosis. *Lancet* 2014; 383: 1155–1167
- [35] Blankstein R, Osborne M, Naya M et al. Cardiac positron emission tomography enhances prognostic assessments of patients with suspected cardiac sarcoidosis. *J Am Coll Cardiol* 2014; 63: 329–336
- [36] Osborne MT, Hulten EA, Singh A et al. Reduction in 18F-fluorodeoxyglucose uptake on serial cardiac positron emission tomography is associated with improved left ventricular ejection fraction in patients with cardiac sarcoidosis. *J Nucl Cardiol* 2014; 21: 166–174
- [37] Ohira H, Birnie DH, Pena E et al. Comparison of (18)F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography (FDG PET) and cardiac magnetic resonance (CMR) in corticosteroid-naive patients with conduction system disease due to cardiac sarcoidosis. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2016; 43: 259–269
- [38] Ohira H, Tsujino I, Ishimaru S et al. Myocardial imaging with 18F-fluoro-2-deoxyglucose positron emission tomography and magnetic resonance imaging in sarcoidosis. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2008; 35: 933–941
- [39] Lococo F, Perotti G, Cardillo G et al. Multicenter comparison of 18F-FDG and 68Ga-DOTA-peptide PET/CT for pulmonary carcinoid. *Clin Nucl Med* 2015; 40: e183–189
- [40] Venkataraman B, Karunanithi S, Kumar A et al. Role of 68Ga-DOTATOC PET/CT in initial evaluation of patients with suspected bronchopulmonary carcinoid. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2014; 41: 856–864
- [41] Baum RP, Kulkarni HR, Schuchardt C et al. 177Lu-Labeled Prostate-Specific Membrane Antigen Radioligand Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer: Safety and Efficacy. *J Nucl Med* 2016; 57: 1006–1013
- [42] Lapa C, Lückerath K, Rudelius M et al. [68Ga]Pentixafor-PET/CT for imaging of chemokine receptor 4 expression in small cell lung cancer – initial experience. *Oncotarget* 2016; 7: 9288–9295

Vorstellung der Autoren



PD Dr. med. Thorsten Derlin

PD Dr. med. Thorsten Derlin, Leitender Oberarzt an der Klinik für Nuklearmedizin der Medizinischen Hochschule Hannover (seit 7/2014). 2008–2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin und an der Klinik und Poliklinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf. 2013 Anerkennung zum Facharzt für Nuklearmedizin. 2014 Habilitation für das Fachgebiet Nuklearmedizin.



Prof. Dr. med. Frank M. Bengel

Prof. Dr. med. Frank M. Bengel, Direktor der Klinik für Nuklearmedizin, Medizinische Hochschule Hannover (seit 1/2011). Nuklearmedizinische Klinik der TU München: Facharztausbildung (1995–2000); Oberarzt (2000–2005); Habilitation (2002). Johns Hopkins University, Baltimore, MD, USA: Associate Professor of Radiology and Medicine (2005–2010); Director of Cardiovascular Nuclear Medicine (2005–2010); Adjunct Associate Professor of Radiology (seit 2011).

Interessenkonflikt

Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Korrespondenzadresse

PD Dr. med. Thorsten Derlin
Klinik für Nuklearmedizin
Zentrum Radiologie
Medizinische Hochschule Hannover
Carl-Neuberg-Str. 1
30625 Hannover
E-Mail: Derlin.Thorsten@mh-hannover.de

CME-Fragen bei CME.thieme.de

Viel Erfolg bei Ihrer CME-Teilnahme unter <http://cme.thieme.de>

Bitte informieren Sie sich über die genaue Gültigkeitsdauer unter <http://cme.thieme.de/hilfe>

Sollten Sie Fragen zur Online-Teilnahme haben, unter <http://cme.thieme.de/hilfe> finden Sie eine ausführliche Anleitung.

VNR 2760512017152370989

Frage 1

Wie groß ist die Energie der in der PET detektierten γ -Quanten?

- A 80–90 keV
- B 141 keV
- C 364 keV
- D 511 keV
- E 737 keV

Frage 2

Was ist der bevorzugte Stoffwechselweg maligner Tumorzellen (bekannt als Warburg-Effekt)?

- A mitochondriale oxidative Phosphorylierung von Glukose
- B aerobe Glykolyse trotz ausreichendem Sauerstoffangebot
- C oxidative Decarboxylierung von α -Ketoglutarat
- D anaerobe Glykolyse
- E Konjugation von Acetyl-CoA und Malonyl-CoA

Frage 3

Bei welchem Anteil von Patienten wurden im National Lung Screening Trial [9] auffällige Befunde in der CT (nichtkalzifizierter Nodulus >4 mm oder z. B. Lymphadenopathie) erhoben?

- A 24,2% der Patienten
- B 17,3% der Patienten
- C 5,4% der Patienten
- D 44,3% der Patienten
- E 3,6% der Patienten

Frage 4

Mit welcher Rate an falsch positiven Befunden muss in der ^{18}F -FDG-PET/CT bei der Diagnostik isolierter Lungenrundherde gerechnet werden?

- A <2%
- B ca. 2–4%
- C ca. 8–10%
- D ca. 12–14%
- E ca. 16–18%

Frage 5

Mittels welches Verfahrens sollte beim nichtkleinzelligen Bronchialkarzinom entsprechend der S3-Leitlinie der Ausschluss einer zerebralen Metastasierung bevorzugt erfolgen?

- A native CT des Neurokraniums
- B ^{18}F -FDG PET/CT des Gehirns
- C kontrastmittelgestützte CT des Neurokraniums
- D transkraniale kontrastmittelgestützte Sonografie
- E zerebrale MRT

Frage 6

Bei einem 65-jährigen Patienten mit Erstdiagnose eines peripheren, 1,9 cm messenden nichtkleinzelligen Bronchialkarzinoms zeigt sich in der ^{18}F -FDG-PET/CT neben dem Primarius eine singuläre suspekte Anreicherung in einer Osteolyse im rechten Os ilium. Welche Maßnahme ist als nächster Schritt angezeigt?

- A ergänzende Skelettszintigrafie
- B bildgebende Verlaufskontrolle
- C ergänzende MRT
- D histologische Sicherung
- E palliative Chemotherapie

Frage 7

Wie hoch ist die Rate falsch negativer Befunde beim mediastinalen Staging des nichtkleinzelligen Bronchialkarzinoms bei CT-grafisch unauffälligen Lymphknoten und fehlender ^{18}F -FDG Anreicherung in der PET/CT?

- A 5–10%
- B <2%
- C 10–20%
- D 20–30%
- E >98%

CME-Fragen bei CME.thieme.de

Fortsetzung ...

Frage 8

In der aktuellen interdisziplinären S3-Leitlinie wird welche Vorgehensweise nicht empfohlen?

- A Durchführung einer ^{18}F -FDG-PET/CT im Stadium IB – IIIB für das mediastinale Staging
- B Durchführung einer ^{18}F -FDG-PET/CT bei einem malignomverdächtigen, isolierten Lungenrundherd von $>8 - 10$ mm bei Patienten mit erhöhtem Operationsrisiko, wenn eine Diagnosestellung mittels einer invasiven Diagnostik nicht möglich ist
- C Durchführung einer ^{18}F -FDG-PET/CT im Stadium IB – IIIB für das extrathorakale Staging
- D Durchführung einer cMRT zur Detektion zerebraler Metastasen bei kurativer Behandlungsintention im klinischen Stadium IB – IIIB
- E Durchführung einer Skelettszintigrafie und ^{18}F -FDG-PET/CT im Stadium IB – IIIB für das ossäre Staging

Frage 9

Zu welchem Zweck kann die ^{18}F -FDG PET/CT bei Sarkoidose nicht eingesetzt werden?

- A zur sensitiven Erfassung des Sarkoidosebefalls im Ganzkörper
- B zur Prädiktion der Verschlechterung der Lungenfunktion nach 12 Monaten bzw. des zu erwartenden Effekts einer Behandlung
- C zur sensitiven Erfassung einer kardialen Beteiligung
- D zum Therapiemonitoring bei Patienten, die weder eine erhöhte Konzentration des ACE noch des sIL-2 R aufweisen
- E zur zielgerichteten Radionuklidtherapie von Sarkoidoseherden

Frage 10

Welches Radionuklid wird aufgrund seiner physikalischen Halbwertszeit und der günstigen Gewebereichweite als β -Strahler für die Therapie mit theragnostischen Radiopharmaka bevorzugt verwendet?

- A ^{18}F Fluorid
- B ^{123}I od
- C ^{111}In dium
- D $^{99\text{m}}\text{Tc}$ hnetium
- E ^{177}Lu tetium