

Empfehlungen zur Durchführung der Ganzkörper-¹⁸F-FDG-PET und -PET/CT bei Kindern mit onkologischen Erkrankungen

Anpassung der EANM-Guideline* an aktuelle Gegebenheiten in Deutschland

C. Franzius^{1,2}; J. Stauss³; T. Pfluger⁴; K. U. Juergens^{1,5}; R. Kluge⁶; H. Amthauer⁷; H. Juergens⁸; G. Henze⁹; B. Stoeber¹⁰; K. Hahn⁴

¹MR-, Nuklearmedizin- und PET/CT-Zentrum Bremen-Mitte, Deutschland; ²Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Münster, Deutschland; ³Department of Radiology, Brigham and Women's Hospital, Boston, MA, USA; ⁴Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland; ⁵Institut für Klinische Radiologie, Universitätsklinikum Münster, Deutschland; ⁶Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Leipzig, Deutschland; ⁷Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Magdeburg, Deutschland; ⁸Klinik und Poliklinik für Kinderheilkunde – Pädiatrische Hämatologie und Onkologie, Universitätsklinikum Münster, Deutschland; ⁹Klinik für Pädiatrie – Onkologie und Hämatologie, Charité der Humboldt-Universität Berlin, Campus Virchow-Klinikum, Berlin, Deutschland; ¹⁰Klinik für Strahlenheilkunde, Abt. Pädiatrische Radiologie, Universitätsklinikum Charité der Humboldt-Universität Berlin, Campus Virchow-Klinikum, Berlin, Deutschland

Keywords

FDG, PET, PET/CT, children, paediatrics

Summary

The purpose of these guidelines is to offer the nuclear medicine and the appropriate interdisciplinary team a framework for performing and reporting positron emission tomography (PET) and the combination with computed tomography (PET/CT) in children with malignant diseases mainly using the radiopharmaceutical ¹⁸F-fluorodeoxy-glucose (FDG). These guidelines are based on the recent guidelines of the Paediatric Committee of the European Association of Nuclear Medicine (EANM) (57) and have been translated and adapted to the current conditions in Germany. The adaptation of CT-parameters using PET/CT in children is covered in a more detailed way than in the EANM guideline taking into account that in Germany already a good portion of PET examinations is performed using an integrated PET/CT-scanner. Furthermore, a CT-scan without adaption of the CT acquisition parameters would result in a not tolerably high

radiation exposition of the child. There are excellent guidelines for FDG PET and PET/CT in oncology published by the German Society of Nuclear Medicine (Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin, DGN) (42) and EANM (4). These guidelines aim at providing additional information on issues particularly relevant to PET and PET/CT imaging in children. These guidelines should be taken in the context of local and national current standards of quality and rules.

Schlüsselwörter

FDG, PET, PET/CT, Kinder, Pädiatrie

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Leitlinie ist es, dem nuklearmedizinischen und ggf. interdisziplinären Team Hilfestellungen für die Indikationsstellung, Durchführung, Interpretation und Dokumentation der Positronenemissionstomographie (PET) und der Kombination mit der Computertomographie (PET/CT) bei Kindern mit malignen Erkrankungen zu geben. Im Wesentlichen wird auf die Anwen-

dung von ¹⁸F-Fluorodesoxyglucose eingegangen. Diesen Empfehlungen liegt die aktuelle Leitlinie des Paediatric Committee der EANM zugrunde (57), die ins Deutsche übertragen und an die aktuellen Gegebenheiten in Deutschland angepasst wurde. Das Thema Anpassung der CT-Parameter bei der PET/CT im Kindesalter wird ausführlicher behandelt als in der EANM-Leitlinie. Dies berücksichtigt, dass in Deutschland ein Großteil der PET-Untersuchungen an PET/CT-Geräten durchgeführt wird, und ein unkritisches Übernehmen der Erwachsenenprotokolle für die CT-Komponente zu einer nicht zu tolerierenden Strahlenexposition der Kinder führt. Diese Empfehlungen verstehen sich als Ergänzung der Leitlinien für die FDG-PET und PET/CT in der Onkologie, wie sie von der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin (DGN) (42) und der European Association of Nuclear Medicine (EANM) (4) publiziert wurden. Die Ergänzungen betreffen ausschließlich die speziellen Anforderungen bei der Untersuchung von Kindern. Diese Empfehlungen müssen immer im Zusammenhang mit lokalen und aktuellen nationalen Qualitätsstandards und Vorschriften gesehen werden.

Correspondence to:

Prof. Dr. med. Christiane Franzius
MR-, Nuklearmedizin- und PET/CT-Zentrum Bremen
Mitte, St. Jürgen Straße 1, 28177 Bremen, Germany
Tel. 04 21/497 35 55, Fax 04 21/497 33 30
E-mail: christiane.franzius@t-online.de

Procedure guidelines for whole-body ¹⁸F-FDG PET and PET/CT in children with malignant diseases

Nuklearmedizin 2010; 49: 225–233
doi: 10.3413/nukmed-0322
received: May 4, 2010
accepted: May 4, 2010
prepublished online: July 9, 2010

* Stauss J, Franzius C, Pfluger T, Juergens KU, Biassoni L, Begent J, Kluge R, Amthauer H, Voelker T, Højgaard L, Barrington S, Hain S, Lynch T, Hahn K. Guideline for F-18-FDG PET and PET-CT imaging in paediatric oncology. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2008; 35: 1581–1588.

Die Positronenemissionstomographie mit ¹⁸F-Fluorodesoxyglukose (FDG-PET) ist inzwischen ein etabliertes bildgebendes Verfahren für Erwachsene mit onkologischen Erkrankungen. Die FDG-PET wird bei verschiedenen Tumorentitäten eingesetzt für

- die Primärtumorsuche,
- das Staging,
- die Evaluation des Therapieansprechens und
- die Rezidivdiagnostik.

In den letzten Jahren gibt es vermehrt Publikationen, die zeigen, dass Lymphome und verschiedene solide Tumoren bei Kindern vermehrt FDG anreichern, und damit diese Tumoren einer Diagnostik mit der FDG-PET zugänglich sind. Die PET hat vermutlich das Potential, Therapieentscheidungen in der pädiatrischen Onkologie signifikant zu beeinflussen (39, 60).

Derzeit befinden wir uns in einer Übergangsphase von der singulären PET-Diagnostik zur integrierten PET/CT-Diagnostik (41), wobei die PET/CT wie bei Erwachsenen höchstwahrscheinlich der international akzeptierte Standard in der PET-Bildgebung pädiatrischer Tumoren werden wird. Dennoch werden viele sog. stand-alone PET-Scanner in den nächsten Jahren kontinuierlich weiter genutzt werden. Diese Leitlinie möchte in dieser Übergangsphase sowohl Empfehlungen für PET-Scanner als auch spezielle Empfehlungen für die PET/CT geben.

Kinder unterscheiden sich von Erwachsenen in ihrer Psychologie, Physiologie und Pathophysiologie.

Darüber hinaus werden unterschiedliche Tumorentitäten oder Tumorsubtypen mit anderem biologischen Verhalten gesehen; dieses muss berücksichtigt werden, wenn die PET bzw. PET/CT bei pädiatrischen Fragestellungen durchgeführt wird.

Indikationen

Die häufigsten Indikationen für die PET bzw. PET/CT in der pädiatrischen Onkologie sind:

- maligne Lymphome (Morbus Hodgkin und Non-Hodgkin-Lymphome): Sta-

ging, Therapiekontrolle, Re-Staging, Vitalität residualer Raumforderung nach Therapie, Bestrahlungsplanung,

- Sarkome (Osteosarkome, Ewing-Sarkome, Weichteilsarkome, insbesondere Rhabdomyosarkome): Staging, Therapiekontrolle, Re-Staging/Rezidivdiagnostik,
- Neuroblastome (in MIBG-negativen Fällen oder PET mit spezifischen Tracern für Tumoren des sympathischen Nervensystems),
- ZNS Tumoren: Grading, Prognosestratifikation, Therapiekontrolle, Rezidivdiagnostik, Therapieplanung, insbesondere Bestrahlungsplanung. Neben FDG sind für diese Fragestellungen andere PET-Tracer (z. B. Aminosäuren) verfügbar. Es wird auf die publizierte EANM-Leitlinie für die PET des Gehirns verwiesen (3).
- Seltener Indikationen für die PET in der pädiatrischen Onkologie sind z. B. Keimzelltumore, Hepatoblastome, maligne Tumoren mit unklarer Primärtumor-Lokalisation (CUP), Langerhans-Zell-Histiozytose, Schilddrüsenkarzinome mit der Frage nach entdifferenzierten Anteilen und die Neurofibromatose Typ I mit der Frage nach einer malignen Transformation der Neurofibrome.

Kontraindikationen

Die Möglichkeit einer Schwangerschaft ist bei weiblichen Jugendlichen auszuschließen. Bei einer Jugendlichen, die schwanger ist oder sein könnte, muss wie bei jeder anderen diagnostischen Prozedur in einer klinischen Entscheidung der potenzielle Nutzen gegenüber einer potenziellen Schädigung abgewogen werden, und die Indikation sehr streng gestellt werden.

Vorbereitung

Patientenvorbereitung

Der Ablauf einer PET- bzw. PET/CT-Untersuchung ist dem Patienten und den Eltern bzw. Sorgeberechtigten ausführlich zu erklären. Während des Aufklärungsgesprä-

ches sind die Ruhezeit, Dauer der Aufnahme und Details der Untersuchung anzusprechen. Diese Informationen sollten sowohl mündlich als auch in schriftlicher Form gegeben werden, um die Compliance sicher zu stellen, und dem Kind und den Eltern die Angst vor der Untersuchung zu nehmen. Idealerweise erhalten die Eltern oder Sorgeberechtigten die schriftliche Information bei der Terminvergabe und werden zusätzlich im Vorfeld telefonisch kontaktiert, um ihre Fragen und mögliche Besonderheiten zu klären, wie z. B. die Notwendigkeit einer Sedierung oder Narkose oder das Vorliegen eines Diabetes mellitus. Im Falle einer geplanten diagnostischen CT mit Gabe eines iodhaltigen Kontrastmittels muss auch über potenzielle Komplikationen der Kontrastmittelgabe informiert und Kontraindikationen ausgeschlossen werden (z. B. allergische Reaktionen nach vorangegangenen Kontrastmittelgaben, Einschränkung der Nierenfunktion, Hyperthyreose). Der aktuelle Serum-Kreatininspiegel sollte vorliegen und möglichst auch der TSH-Wert. Bei Kindern kommt allerdings eine TSH-Suppression extrem selten vor, und es kann – falls es anamnestisch keinen Hinweis auf eine Schilddrüsenerkrankung gibt – auf die Dokumentation des Wertes verzichtet werden. Die Patienten sollten vor der Untersuchung starke körperliche Belastung meiden, damit es nicht zu einer hohen FDG-Aufnahme in die Skelettmuskulatur kommt. Das Kind sollte für mindestens 4 bis 6 Stunden vor der Untersuchung nüchtern bleiben, um einen niedrigen Blutzucker- und niedrigen Insulinspiegel zum Untersuchungszeitpunkt zu gewährleisten. Reines Wasser darf jedoch für eine gute Hydratation getrunken werden. Das Verbot von Süßgetränken, Süßigkeiten und Kaugummi während der Vorbereitungsphase muss explizit genannt werden. Eine parenterale Ernährung oder glukosehaltige Infusionslösungen müssen ebenfalls in dieser Nüchternphase pausiert werden, dies betrifft insbesondere die Infusionslösungen Pädiafusin® (PÄD I, PÄD II). Bei Säuglingen sollte der Zeitpunkt der Tracerinjektion möglichst nahe an der folgenden Brust- bzw. Milchmahlzeit liegen. Die Milch kann dann ca. 30 Minuten nach der Tracerinjektion gegeben werden.

Information vor Tracerinjektion

Vor der Untersuchung sollten alle verfügbaren Informationen eingeholt und dokumentiert werden (durch Arzt oder MTRA), um eine optimale Interpretation der PET-Studien zu ermöglichen:

- relevante Vorgeschichte, insbesondere Ort und Typ des fraglichen oder bekannten Primärtumors,
- aktuelle klinische Symptome,
- Ergebnisse der vorausgegangenen Bildgebung,
- vorausgegangene Therapien mit exakten Daten (Operationen, Chemotherapien, Strahlentherapien),
- vorausgegangene Infektionen/Entzündungen,
- Veränderungen des Urogenitaltraktes und Einschränkung der Nierenfunktion,
- Patientenmedikation (zum Ausschluss möglicher Interaktionen),
- zentrale Venenkatheter, Hickman-Katheter, Port-a-Cath-Systeme, Drainagen und ähnliches.

Idealerweise sollte der intravenöse Zugang bereits vor dem Eintreffen des kleinen Patienten in der Nuklearmedizinischen Abteilung gelegt worden sein, um Stress des Kindes direkt vor der Tracerinjektion zu vermeiden, und so ein Maximum an Kooperation während der Untersuchung zu erreichen. Eine vor der Anlage des intravenösen Zugangs lokal aufgetragene Anästhesie-Creme kann die Unannehmlichkeiten für das Kind reduzieren. Der Nüchternblutzuckerspiegel sollte vor der Tracer-Injektion bestimmt werden:

■ Optimal ist ein Blutzuckerwert < 120 mg/dl.

Wenn der Blutzuckerspiegel über 120 mg/dl beträgt, sollte der zuweisende Arzt darüber informiert werden, dass die Untersuchung möglicherweise eine verringerte Sensitivität hat. Es sollte dann die Möglichkeit angeboten werden, die Untersuchung zu verschieben. Der Befund sollte die diagnostische Unsicherheit, die durch einen erhöhten Blutzuckerspiegel entsteht, berücksichtigen.

In 15–20% der FDG-PET(/CT)-Untersuchungen bei Kindern und Jugendlichen

kommt es zu einer Aufnahme von FDG im braunen Fettgewebe, was die Aussagekraft der Studie bezüglich des Nachweises oder Ausschlusses einer pathologischen Aufnahme in diesen Regionen beeinträchtigen kann. Es wurde beobachtet, dass die Aufnahme ins braune Fettgewebe weniger häufig vorkommt, wenn der Raum, in dem das Kind sich während der Aufnahmephase aufhält, warm ist. Eine warme Decke oder heißer ungesüßter Tee kann ebenso dazu beitragen, die Traceraufnahme ins braune Fettgewebe zu reduzieren. Von verschiedenen Gruppen werden unterschiedliche Maßnahmen der medikamentösen Vorbereitung empfohlen, um die FDG-Aufnahme ins braune Fettgewebe zu reduzieren. Über die Gabe eines Medikaments und dessen potentielle Nebenwirkungen müssen die Eltern/Sorgeberechtigten vorher aufgeklärt werden, insbesondere darüber, dass es sich hierbei nicht um eine zugelassene Indikation handelt (off-label-use).

- Oral appliziertes Diazepam in mittlerer Dosierung kann die FDG-Aufnahme in braunes Fettgewebe teilweise oder komplett blocken (0,1 mg/kg Körpergewicht, max. 7,5 mg) (22).
- Die Gabe von Propranolol wird für diesen Zweck empfohlen (52, 55). In der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin des Universitätsklinikums Leipzig und inzwischen auch in anderen Einrichtungen wird z. B. nach schriftlichem Einverständnis Propranolol mit 1 mg/kg Körpergewicht, max. 40 mg, 60 Minuten vor der FDG-Gabe allen Patienten zwischen 15 und 30 Jahren verabreicht, bei denen keine Kontraindikationen für Propranolol vorliegen. Propranolol wird zusätzlich bei allen Kindern ab dem Alter von 10 Jahren mit Lymphomen gegeben. Die wichtigsten **Kontraindikationen**: manifeste Herzinsuffizienz, AV-Block II°, Sick-Sinus-Syndrom, Bradykardie, Hypotonie, hyperreagibles Bronchialsystem, Asthma bronchiale.
- Die Häufigkeit der FDG-Aufnahme in braunes Fettgewebe kann auch durch eine Prämedikation mit intravenösen Fentanyl verringert werden (0,75–1,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Körpergewicht, max. 50 μg) (22).

Furosemid kann vor oder nach der FDG-Injektion gegeben werden (0,5–1,0 mg/kg

Körpergewicht, max. 20 mg), um die Diurese anzuregen und so die FDG-Aktivität im harnableitenden System zu reduzieren, da diese bei der Interpretation der Aufnahmen Schwierigkeiten bereiten kann. Blasenkatheter werden im Allgemeinen nicht empfohlen, da die Katheterisierung das Risiko einer Infektion erhöht und einen zusätzlichen Stress für das Kind bedeutet. In einzelnen Fällen mag die Katheterisierung gerechtfertigt sein, wenn eine Akkumulation des Tracers im harnableitenden System mit hoher Wahrscheinlichkeit die Evaluation einer bekannten Läsion in der Nähe beeinträchtigen wird. Die Gabe von Benzodiazepinen und Furosemid ist bei Verwendung eines singulären PET-Scanners besonders nützlich. Viele Zentren mit einem PET/CT-Scanner verzichten auf diese Prämedikation, da die zusätzliche anatomische Information durch die CT-Komponente meist ausreicht, um Areale mit erhöhtem Traceruptake exakt zu lokalisieren.

Injektion des Radiopharmazeutikums, zu applizierende Aktivität

Die Injektion des Radiopharmakons in einen zentralen Venenkatheter sollte generell vermieden werden, da die Retention des Tracers im Katheter oder an der Spitze des Katheters FDG-avidem Gewebe nachahmen kann, und daher zu einem falsch positiven Befund führen kann. Wenn ein alleiniger PET-Scanner benutzt wird, ist dies besonders bei Patienten mit einem möglichen oder gesicherten Befall des Mediastinums wichtig. Falls ein zentraler Venenkatheter benutzt werden muss, sollte der Katheter anschließend mit 0,9%iger NaCl-Lösung gespült werden (mindestens 20 ml; **cave**: pädiatrische Infusionslösungen können Glukose enthalten, diese nicht verwenden).

Die Höhe der Aktivität, die verabreicht werden muss, um eine ausreichend gute Bildqualität zu erhalten, hängt sowohl von dem Detektorkristall der PET-Kamera als auch von den Akquisitionsparametern (insbesondere 2D- oder 3D-Modus) ab. Falls verfügbar, sollte die Akquisition im 3D-Modus (Akquisition ohne Septen) mit höherer Sensitivität im Vergleich zum



Tab. 1 Empfohlene Aktivität basierend auf der revidierten EANM-Dosiskarte für 2D- und 3D-Ganzkörper- ^{18}F -FDG-PET (46): Diese Empfehlungen ersetzen nicht nationale oder internationale Vorgaben, stehen aber in Einklang mit den derzeitigen nuklearmedizinischen Referenzwerten in Deutschland (6): Für kalkulierte Aktivitäten unter 70 MBq in sehr jungen oder leichten Patienten sollte die niedrigste mögliche Aktivität unter Berücksichtigung des Stands der Akquisitionstechnik und der Art des verfügbaren PET-Scanners sorgfältig überdacht werden, so dass es nicht zur Einschränkung des diagnostischen Wertes der Untersuchung kommt.

Körpergewicht [kg]	Aktivität [MBq]	
	2D-Modus	3D-Modus
3	26	14
4	30	16
6	44	24
8	55	30
10	70	38
12	81	44
14	92	50
16	104	56
18	115	62
20	126	68
22	137	74
24	148	80
26	159	86
28	167	90
30	178	96
32	189	102
34	200	108
36	207	112
38	218	118
40	229	124
42	237	128
44	248	134
46	259	140
48	267	144
50	277	150
52–54	292	158
56–58	311	168
60–62	329	178
64–66	348	188
68	363	196

2D-Modus verwendet werden. Eine Ausnahme sind übergewichtige Patienten ($\text{BMI} > 34 \text{ kg/m}^2$), bei denen die Fraktion der gestreuten Ereignisse in der 3D-Akquisition so hoch sein kann, dass die Bildqualität leidet. Bei diesen Patienten ist insbesondere in Scannern mit BGO-Detektoren die Verwendung des 2D-Modus vorzuziehen (8).

Die Aktivität sollte an das Gewicht der jungen Patienten und an den gewählten Akquisitionsmodus (2D oder 3D) angepasst werden. Das Dosimetry Committee und das Paediatric Committee der EANM haben sich kürzlich dazu entschlossen, die Werte der minimalen Aktivität für ^{18}F und ^{18}F -FDG von ursprünglich 70 MBq (45) zu reduzieren, nachdem von zwei Gruppen gezeigt wurde, dass klinisch gute Ergebnisse mit geringen FDG-Aktivitäten bei sehr jungen Kindern und solchen mit geringem Körpergewicht erzielt werden (30, 59). In der neuesten Version der pädiatrischen Dosiskarte der EANM und in deren korrespondierendem Anhang wird aus diesem Grund eine minimale Aktivität für ^{18}F und ^{18}F -FDG von 26 MBq für den 2D-Modus und von 14 MBq für den 3D-Modus empfohlen (►Tab. 1) (46). Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass auch andere Wege der Kalkulation der Aktivität von FDG bei Kindern möglich sind, z. B. 6 MBq/kg Körpergewicht FDG bei der 2D- und 3 MBq/kg Körpergewicht bei der 3D-Akquisition (30). Auch bei dieser Kalkulation wird empfohlen, die genannten minimalen Aktivitäten nicht zu unterschreiten.

Grundsätzlich sollte unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Akquisitionstechnik und der Sensitivität des verfügbaren PET-Scanners sorgfältig überlegt werden, welche minimale Aktivität verwendet werden kann, ohne die diagnostisch relevante Information zu beeinträchtigen. Die maximale Aktivität wird durch nationale Regulationen vorgegeben: In Deutschland sind die diagnostischen Referenzwerte für den 2D-Modus 370 MBq und für den 3D-Modus 200 MBq (6). In der Leitlinie der DGN für PET/CT in der Onkologie werden 370 MBq als empfohlene Aktivität für die PET/CT bei normgewichtigen Erwachsenen angegeben (42). Selbstverständlich muss bei entsprechender Begründung die Aktivität erhöht werden, z. B.

bei einem Körpergewicht von deutlich über 70 kg.

Nach der Injektion

Der Patient sollte bis zum Start der Akquisition ruhig liegen. Üblicherweise wird die Akquisition eine Stunde nach Injektion begonnen. Manche Zentren bevorzugen es, wegen des höheren relativen Traceruptakes innerhalb eines Tumors bis zu zwei Stunden nach Applikation zu warten. Unabhängig von dem verwendeten Zeitintervall ist wichtig, dass das gleiche Zeitintervall zwischen Tracerinjektion und Beginn der Akquisition bei Folgeuntersuchungen verwendet wird. Säuglinge, die nicht sediert oder narkotisiert sind, können ab 30 Minuten nach Tracerinjektion gefüttert werden. Vor dem Start der Akquisition sollte das Kind angehalten werden, die Blase zu entleeren. Eine Windel sollte bei Säuglingen vor der Aufnahme gewechselt werden.

Strahlenexposition

In ►Tabelle 2 wird die geschätzte absorbierte Strahlendosis in verschiedenen Organen bei gesunden Probanden nach Applikation von FDG gemäß der ICRP-Publikation 80 angegeben (32).

Vergleich singulärer PET-Scanner und kombinierter PET/CT-Scanner

Es ist zu beachten, dass in ►Tabelle 2 nur die Strahlenexposition durch die Applikation des Radiopharmakons für die Emissionsaufnahme angegeben ist. Eine zusätzliche Strahlenexposition wird durch die Transmissionsaufnahme, die für die Schwächungskorrektur notwendig ist, hervorgerufen. In singulären PET-Scannern wird die Schwächungskorrektur traditionell durch Transmissionsdaten von rotierenden externen positronen-emittierenden Stabquellen hervorgerufen. In kombinierten PET/CT-Scannern werden die Schwächungsdaten von der CT-Komponente durch eine Transformation zu Werten ge-

wonnen, die adäquat für die 511 keV-Photonen sind. Mit steigender Zahl von PET/CT-Systemen gewinnt die zusätzliche Strahlenexposition von Kindern durch die CT-Komponente zunehmend an Bedeutung. Grundsätzlich geht eine verbesserte CT-Bildqualität mit einer Erhöhung der Strahlenexposition einher. Daher hängt die zusätzliche Strahlenexposition der CT-Komponente primär von der gewünschten Qualität und damit den gewählten Untersuchungsparametern der CT-Aufnahmen ab. Es muss individuell für jeden Patienten entschieden werden, ob das CT lediglich zur Schwächungskorrektur und anatomischen Orientierung verwendet werden soll (sogenanntes Niedrigdosis-CT), oder ob ein CT mit diagnostischer Qualität, ein sogenanntes diagnostisches CT notwendig ist (Nomenklatur nicht standardisiert, auch Normaldosis-CT genannt). Der diagnostische Wert einer Niedrigdosis-CT als Teil einer PET/CT-Untersuchung wird derzeit wissenschaftlich evaluiert (44). Eine diagnostische CT sollte nicht als Standarduntersuchung durchgeführt werden, sondern nur dann, wenn diese zusätzlich klinisch indiziert ist: für Kinder mit Sarkomen kann es nützlich sein, eine Ganzkörper-CT in Niedrigdosis-Technik zur Schwächungskorrektur und anatomischen Orientierung mit einer diagnostischen Thorax-CT (in tiefer Inspiration!) in einer Untersuchung zu akquirieren, um eine höhere Sensitivität für die Erkennung pulmonaler Metastasen zu erreichen. Bei Kindern und Jugendlichen mit (Hodgkin-)Lymphom ist es nötig, die PET/CT für Hals, Abdomen und Becken sowie für den Thorax in tiefer Inspiration mit i.v.-Applikation von Kontrastmittel durchzuführen, sofern keine zusätzliche MRT oder CT-Bildgebung erfolgt. Optimierte CT-Protokolle für Kinder schließen eine Adaptation der CT-Parameter an das Gewicht und an den axialen Durchmesser sowie eine altersabhängige Menge von Kontrastmitteln ein. Grundsätzlich wird eine Verringerung der Strahlenexposition durch eine Verringerung der Röhrenspannung und/oder des Röhrenstroms sowie einer Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit und/oder die Anwendung eines höheren Pitch-Faktors erreicht. Zusätzlich werden als Standard Dosismodulationssysteme verwendet, die

Tab. 2 Strahlendosis in verschiedenen Organen in Gesunden nach Applikation von ¹⁸F-FDG nach der ICRP-Publikation 80 (32)

Organ	absorbierte Dosis pro Einheit applizierter Aktivität [mGy/MBq]				
	Erwachsene	15 Jahre	10 Jahre	5 Jahre	1 Jahr
Bauchspeicheldrüse	0,012	0,016	0,025	0,040	0,076
Brustgewebe	0,0086	0,011	0,018	0,029	0,056
Dickdarm	0,013	0,017	0,027	0,040	0,074
Dünndarm	0,013	0,017	0,027	0,041	0,077
Eierstöcke	0,015	0,020	0,030	0,044	0,082
Gallenblase	0,012	0,015	0,023	0,035	0,066
Gebärmutter	0,021	0,026	0,039	0,055	0,10
Gehirn	0,028	0,028	0,030	0,034	0,048
Harnblase	0,16	0,21	0,28	0,32	0,59
Haut	0,0083	0,010	0,016	0,027	0,052
Herz	0,062	0,081	0,12	0,20	0,35
Hoden	0,012	0,016	0,026	0,038	0,073
Knochenoberfläche	0,011	0,014	0,022	0,035	0,066
Leber	0,011	0,014	0,022	0,037	0,070
Lunge	0,010	0,014	0,021	0,034	0,065
Magen	0,011	0,014	0,022	0,036	0,068
Milz	0,011	0,014	0,022	0,036	0,069
Muskulatur	0,011	0,014	0,021	0,034	0,065
Nebennieren	0,012	0,015	0,024	0,038	0,072
Nieren	0,021	0,025	0,036	0,054	0,096
rotes Knochenmark	0,011	0,014	0,022	0,032	0,061
Schilddrüse	0,010	0,013	0,021	0,035	0,068
Speiseröhre	0,011	0,015	0,022	0,035	0,068
Thymus	0,011	0,015	0,022	0,035	0,068
übrige Organe	0,011	0,014	0,022	0,034	0,063
effektive Dosis (mSv/MBq)	0,019	0,025	0,036	0,050	0,095

den Röhrenstrom online während der Datenakquisition regulieren (z. B. Care Dose 4D, Siemens), um die Strahlenexposition zu reduzieren.

Die Frage, ob eine PET/CT-Untersuchung einer Untersuchung an einem singulären PET-Scanner in Kombination mit einer separat gewonnenen anatomischen Bildgebung vorgezogen werden soll, wurde kürzlich im European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging kontrovers diskutiert: Die Publikationen geben

die verschiedenen Meinungen innerhalb des Paediatric Committee der EANM wieder (15, 16, 27). Hahn und Pfluger sind der Meinung, dass ein PET/CT-Scanner wegen der höheren Strahlenexposition der CT-Komponente nicht gegenüber einem singulären PET-Scanner bevorzugt werden sollte (27). Sie beziehen sich auf Ergebnisse von Fahey et al, die die Strahlenexposition einer Niedrigdosis-CT mit der von externen radioaktiven Quellen für die Schwächungskorrektur in pädiatrischen PET-



Untersuchungen verglichen (10). Ihrer Meinung nach kann für pädiatrische Patienten eine adäquate CT-basierte-Schwächungskorrektur mit einem Ultra-low-dose-CT erreicht werden (80 kVp, 5 mAs, Pitch 1,5:1). Die Strahlenexposition (0,30 mGy) ist schätzungsweise 100-mal geringer im Vergleich zu der einer diagnostischen CT. Allerdings ist auch diese Ultra-low-dose-basierte Schwächungskorrektur mit einer Strahlenexposition für das Kind verbunden, die etwa 10-mal höher ist als die einer auf radioaktiven Quellen basierten Schwächungskorrektur (0,035 mGy). Hahn und Pfluger argumentieren weiter, dass in den meisten Körperregionen (Hirn, Kopf und Hals, Wirbelsäule, Abdomen, Becken und Skelett) die MRT die Modalität der Wahl für morphologische Tumorbildgebung ohne Strahlenexposition im Vergleich zur CT ist. Die einzige Ausnahme sind pulmonale Läsionen, bei denen eine diagnostische CT sensitiver als eine MRT und/oder eine PET ist. Weiterhin sind verschiedene Softwarelösungen verfügbar, um eine Bildfusion oder Ko-Registrierung von getrennt akquirierten MRT- und PET-Daten durchzuführen.

Auf der anderen Seite betonen Franzius et al. die Vorteile der kombinierten PET/CT mit Niedrigdosis-CT wie die verbesserte Lokalisation von Läsionen und die mögliche höhere Sensitivität und Spezifität (15). Ihre Erfahrung beruht auf mehr als 350 pädiatrischen PET/CT-Untersuchungen. Bei diesen Vorteilen können ihrer Meinung nach die damit verbundenen Risiken der erhöhten Strahlenexposition bei jungen onkologischen Patienten in Kauf genommen werden. Allerdings fordern auch sie, dass die Strahlenexposition der Niedrigdosis-CT weiter minimiert werden muss und kritisieren, dass die herstellereigenspezifischen unteren Grenzwerte der CT-Akquisitionsparameter (mAs und KV) derzeit nicht so gering einstellbar sind wie sie für kleine Kinder zu fordern sind. Franzius et al. berichten über eine steigende Anzahl von Anforderungen für diagnostische CT-Untersuchungen als Teil einer PET/CT-Untersuchung von zuweisenden Pädiatern, wenn eine Indikation für beides vorliegt. Sie führen dies auf den Vorteil zurück, beide Modalitäten innerhalb einer Untersuchung durchzuführen. Sie betonen, dass die

Schwächungskorrektur mittels CT den Vorteil einer deutlich kürzeren Akquisitionszeit hat, und somit die Compliance der Kinder verbessert wird, und der Bedarf an Sedierung und Narkosen verringert wird.

Die Strahlenexposition für eine Ganzkörper-Niedrigdosis-CT kann in allen Altersstufen und bei allen PET/CT-Scannern unter 1,5 mSv liegen, häufig unter 1,0 mSv (9, 21). In einer Serie am Biograph 16 (Siemens) wurden im Mittel 1,1 mSv (CTDIvol) erreicht (13), wobei durch eine neuere Software-Version und Optimierung eine weitere Reduktion der Strahlenexposition möglich ist.

Besonderheiten der Durchführung und Befundung der PET/CT im Kindesalter

Wenn CT-basierte Schwächungskorrektur-Algorithmen angewandt werden, können Artefakte durch metallische Fremdkörper wie Port-Systeme auftreten, deren Problematik anfänglich überschätzt wurde. Es kann zu einer Überkorrektur der Emissionsdaten kommen, und dadurch ein fokal falsch hoher FDG-Uptake in den korrigierten Bildern auftreten. Der visuelle Vergleich mit dem nicht-schwächungskorrigierten PET-Datensatz hilft, Fehler aufgrund derartiger Metallartefakte zu vermeiden. Zahlreiche Studien belegen, dass der Gebrauch von oralem oder intravenösem Kontrastmittel in der PET/CT-Bildgebung nicht zu signifikanten Artefakten durch eine Schwächungsüberkorrektur führt, Schwächungsartefakte der PET/CT können bei unterschiedlicher Position zwischen der PET und der CT resultieren, häufig durch eine unterschiedliche Atemphase. Die CT-Untersuchung wird normalerweise in milder Expiration angefertigt, um trotz der Atemexkursionen eine bestmögliche Bildfusion auch in Diaphragmanähe zu gewährleisten. Bei Kindern unter vier Jahren kann die Kooperation bei Atemkommandos schwierig sein. Bei Kleinkindern wird daher die CT-Datenakquisition während flacher Atembewegungen bevorzugt (15, 16).

Positionierung und Sedierung

Während der PET(/CT)-Datenakquisition sollten die Kinder in einer für sie möglichst bequemen Position gelagert werden, z. B. mit Hilfe von Kissen und Klettbindern oder anderen Lagerungshilfen, um Bewegungsartefakte zu vermeiden. Für kleinere Kinder sind Kissen mit einer Füllung aus kleinen Plastikbällen, die sich an die Körperkontur anpassen, kommerziell erhältlich. Für PET/CT-Untersuchungen, die gleichzeitig der Bestrahlungsplanung dienen, sollte die Positionierung in Absprache mit den Strahlentherapeuten unter Verwendung spezieller Lagerungshilfen erfolgen. Am PET/CT-Scanner ist eine Lagerung mit den Armen über dem Kopf wünschenswert, um Bildartefakte aufgrund der neben dem Körper gelagerten Arme zu vermeiden. Wenn der Patient diese Lagerung jedoch als unangenehm empfindet und vermutlich nicht die ganze Untersuchungsdauer durchhalten kann, sollten die Arme neben dem Körper gelagert werden. Dies gilt auch für Fragestellungen, bei denen die Arme unbedingt vollständig abgebildet sein müssen (z. B. Sarkom in der oberen Extremität).

Die Notwendigkeit einer Sedierung sollte vorab individuell mit der/dem zuweisenden Kollegin/Kollegen besprochen werden. Sollte eine Sedierung erforderlich sein, sollte ein Pädiater oder eine pädiatrisch erfahrene Pflegekraft hinzugezogen werden, bei einer Narkose idealerweise ein pädiatrisch ausgebildeter Anästhesist. Eine angenehme Atmosphäre, ein kindgerechter Umgang, eine gut trainierte und kinderfreundliche MTRA und das Einbeziehen der Eltern während der Untersuchung tragen zur Kooperation des Kindes bei und helfen, die Anzahl der notwendigen Sedierungen zu reduzieren. Bei Kindern unter zwei Jahren kann eine Sedierung häufig dadurch vermieden werden, dass die Aufnahme während der normalen Schlafenszeit des Kindes durchgeführt wird.

Akquisition

Die Größe des Untersuchungsfeldes (engl. field of view) ist abhängig von der Indikation. So reicht es nur bei Patienten mit einem

Lymphom ohne Knochen- oder Knochenmarkbeteiligung aus, von der Schädelbasis bis zur Mitte des Oberschenkels zu untersuchen. Bei Patienten mit einem Neuroblastom, Sarkom oder Lymphom mit möglicher Knochen- oder Knochenmarkbeteiligung müssen die Arme und Beine vollständig mit abgebildet sein. Die Akquisitionsparameter hängen vom Detektor und Scannertyp ab und werden ausführlich in der Leitlinie für die FDG-PET bei onkologischen Patienten des Oncology Committee der EANM diskutiert (4). Im Vergleich zur Untersuchung bei Erwachsenen ist es bei Kindern noch wichtiger, die Akquisition mit hochsensitiven Scannern durchzuführen, um die injizierte Aktivität möglichst gering zu halten. Hochsensitive Scanner ermöglichen eine reduzierte Strahlenexposition und eine Reduzierung der Akquisitionszeit. Eine kürzere Akquisitionszeit geht mit einem geringeren Risiko für Bewegungsartefakte während der Akquisitionszeit einher und verringert die Notwendigkeit einer Sedierung.

Interpretation, Fehlerquellen bei der Bildanalyse

Voraussetzung ist, die physiologische FDG-Verteilung zu kennen, um Fehler bei der Bildinterpretation zu vermeiden. Ein physiologischer FDG-Uptake im Thymus kommt bei Kindern und jungen Erwachsenen vor und kann typischerweise an dem charakteristischen Erscheinungsbild eines „umgekehrten V“ erkannt werden. Zu beachten ist, dass ein kleiner Thymusanteil auch oberhalb des Aortenbogens vorliegen kann. Die Thymushyperplasie nach Chemotherapie ist häufig; es kann schwierig sein, diese von residueller bzw. rezidivierter Erkrankung im vorderen oberen Mediastinum zu unterscheiden. Die FDG-Aufnahme im lymphoiden Gewebe in der Naso-/Oropharyngeal-Region, wie im Waldayer'schen Rachenring, ist bei Kindern häufiger und deutlicher ausgeprägt als bei Erwachsenen. Erhöhte FDG-Aufnahme in der Kaumuskulatur kann bei Säuglingen sichtbar werden, wenn sie in der Ruhephase einen Schnuller bekommen oder eine Milchmahlzeit zu sich nehmen. Ein erhöhter FDG-Uptake wird oft symmetrisch in

Tab. 3

CT-Untersuchungsparameter der im Rahmen einer PET-CT-Untersuchung akquirierten nicht-kontrastierten Niedrigdosis-CT des Ganzkörpers, am Beispiel des Biograph-16®- und -6®-Systems (Siemens) erläutert (13, 15).

		Spiral-CT	
		16-Zeilen	6-Zeilen
CT-Akquisition	Gantry-Rotationszeit	420 ms	600 ms
	Detektorkonfiguration	16 x 1,5 mm	6 x 2,0 mm
	Röhrenspannung / Röhrenstrom	80–120 kVp / 13–20 mAs _{eff}	80–120 kVp / 9–20 mAs _{eff}
	Röhrenstrom-Modulationssystem	Care Dose	Care Dose 4D
	Tischvorschub pro Rotation	15–30 mm	15 mm
	Atemlage während der CT-Untersuchung	Atemmittellage (milde Expiration)	
CT-Rekonstruktion	Kontrastmittel-Applikation	keine	
	Faltungskern	B 30 (Weichteilgewebe) B 50 (Lunge) B 60 (Knochen)	

den Epiphysenfugen gesehen. Ein homogen erhöhter FDG-Uptake im blutbildenden Knochenmark wird als Zeichen der physiologischen Knochenmarkregeneration häufig bei Patienten nach Chemotherapie gesehen, kann aber auch bereits zum Zeitpunkt der Diagnose der Tumorerkrankung vorliegen und darf nicht als Knochenmarkbefall interpretiert werden. Ebenso tritt ein erhöhter FDG-Uptake in Knochenmark und Milz nach Gabe von Granulozyten-Koloniestimulierenden Faktoren (G-CSF) auf. Verschiedene Halbwertszeiten der G-CSF-Pharmazeutika müssen bei der Interpretation dieser Anreicherungsmuster berücksichtigt werden. Ein erhöhter FDG-Uptake im Knochenmark kann auch nach Behandlung mit Erythropoetin auftreten. Eine deutliche, symmetrische Traceraufnahme im Larynx wird bei kleinen Kindern häufig gesehen, wenn sie nach der Tracerinjektion geweint oder geschrien haben. Eine Traceraufnahme im braunen Fettgewebe ist bei Kindern häufig. Diese ist meistens symmetrisch und kann die zervicalen, supraklavikulären, mediastinalen, axillären, paraspinalen und pararenalen Regionen betreffen. Fusionsbilder einer kombinierten PET/CT-Akquisition oder die softwarebasierte Fusion der PET-Daten und der anatomischen Schnittbildgebung sind sehr hilfreich, um die Lokalisa-

tionen des erhöhten Uptakes tatsächlich dem braunen Fettgewebe zuzuordnen.

Für den Fall, dass die Ganzkörper-Akquisition den Kopf mit einschließt, sollte bei der Interpretation beachtet werden, dass es signifikante Unterschiede des FDG-Anreicherungsmusters im Gehirn abhängig vom Alter des Kindes gibt (7). Bei Neugeborenen wird der höchste relative Glukosemetabolismus im primären sensorischen und motorischen Cortex, im Cingulum, Thalamus, Hirnstamm, Kleinhirnwurm und Hippocampus gesehen. Im Alter von 2 bis 3 Monaten nimmt die Glukoseutilisation im parietalen, temporalen und primär visuellen Cortex, in den Basalganglien und den Kleinhirnhemisphären zu. Zwischen dem 6. und 12. Lebensmonat zeigt sich eine steigende Glukoseaufnahme im frontalen Cortex. Anfänglich zeigt sich eine Zunahme der zerebralen Glukoseutilisation von Geburt bis etwa zum vierten Lebensjahr. Zu dieser Zeit verbraucht der kindliche zerebrale Cortex etwa doppelt so viel Glukose wie der eines Erwachsenen. Vom 4. bis 10. Lebensjahr wird dieser sehr hohe Glukoseverbrauch beibehalten. Anschließend sinkt der Glukosemetabolismus und erreicht Werte eines Erwachsenen mit etwa 16 bis 18 Lebensjahren.



Da es diese potenziellen Ursachen für eine Fehlinterpretation von PET-Studien in Kindern gibt, sollten die Untersuchungen von Nuklearmedizinern (und Radiologen) befundet werden, die eine spezifische Expertise in der pädiatrischen PET(CT) haben.

Beteiligte Fachgesellschaften, Arbeitsausschüsse und Arbeitsgruppen

Diese Empfehlungen der DGN wurden von Mitgliedern der Arbeitsgemeinschaft Pädiatrie der DGN zusammengestellt. Weiterhin erfolgte eine Abstimmung des Manuskripts mit den folgenden Fachgesellschaften:

- Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie (GPOH) und
- Gesellschaft für Pädiatrische Radiologie (GPR).

Interessenkonflikt

Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur**

- Amthauer H, Furth C, Denecke T et al. FDG-PET in 10 children with non-Hodgkin's lymphoma: initial experience in staging and follow-up. *Klin Paediatr* 2005; 217: 327–333.
- Barrington S, Begent J, Lynch T et al. Guideline for the use of PET-CT in children. *Nucl Med Commun* 2008; 29: 418–424.
- Bartenstein P, Asenbaum S, Catafau A et al. European Association of Nuclear Medicine procedure guidelines for brain imaging using F-18-FDG. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2002; 29: BP43–48.
- Bombardieri E, Aktolun C, Baum R et al. FDG-PET: procedure guidelines for tumour imaging. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2003; 30: BP115–124.
- Brink I, Renhardt M, Hoerger S et al. Increased metabolic activity in the thymus gland studied with F-18-FDG PET: age dependency and frequency after chemotherapy. *J Nucl Med* 2001; 42: 591–595.
- Bundesamt für Strahlenschutz. Bekanntmachung der diagnostischen Referenzwerte für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen. *BAnz Nr. 143 vom 05.08.2003*
- Chugani H. A critical period of brain development: studies of cerebral glucose utilization with PET. *Prev Med* 1998; 27: 184–188.
- El Fakhri G, Holdsworth C, Badawi R et al. Impact of acquisition geometry and patient habitus on lesion detectability in whole body FDG-PET: a channelized hotelling observer study. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, NJ: IEEE* 2002; 3: 1402–1405.
- Fahey F. Dosimetry of pediatric PET/CT. *J Nucl Med* 2009; 50: 1483–1491.
- Fahey F, Palmer M, Strauss K et al. Dosimetry and adequacy of CT-based attenuation correction for pediatric PET: phantom study. *Radiology* 2007; 243: 96–104.
- Franzius C, Daldrup-Link HE, Sciuk J et al. FDG-PET for detection of pulmonary metastases from malignant primary bone tumors: comparison with spiral CT. *Ann Oncol* 2001; 12: 479–486.
- Franzius C, Daldrup-Link HE, Wagner-Bohn A et al. FDG PET for detection of recurrences from malignant primary bone tumors: Comparison with conventional imaging. *Ann Oncol* 2002; 13: 157–160.
- Franzius C, Hartmann L, Juergens K et al. Analyse der PET-CT-Akquisitionsprotokolle pädiatrischer Patienten: Bildqualität, Kontrastierung, Strahlenexposition. *Nuklearmedizin* 2008; 47: A79.
- Franzius C, Hermann K, Weckesser M et al. Whole-body PET/CT with C-11-meta-hydroxyephedrine in tumors of the sympathetic nervous system: feasibility study and comparison with I-123-mIBG SPECT/CT. *J Nucl Med* 2006; 47: 1635–1642.
- Franzius C, Juergens K, Schober O. Is PET/CT necessary in paediatric oncology? *For. Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2006; 33: 960–965.
- Franzius C, Juergens KU, Vormoor J. PET/CT with diagnostic CT in the evaluation of childhood sarcoma. *Am J Roentgenol* 2006; 186: 581.
- Franzius C, Jürgens K. PET/CT in paediatric oncology: indications and pitfalls. *Pediatr Radiol* 2009; 39, Suppl 3: 446–449.
- Franzius C, Schober O. Assessment of therapy response by FDG PET in Pediatric Patients. *Q J Nucl Med* 2003; 47: 41–45.
- Franzius C, Sciuk J, Brinkschmidt C et al. Evaluation of chemotherapy response in primary bone tumors with F-18-FDG-PET compared with histologically assessed tumor necrosis. *Clin Nucl Med* 2000; 25: 874–881.
- Franzius C, Sciuk J, Daldrup-Link HE et al. FDG-PET for detection of osseous metastases from malignant primary bone tumors: comparison with bone scintigraphy. *Eur J Nucl Med* 2000; 27: 1305–1311.
- Gelfand M. Dosimetry of FDG PET/CT and other molecular imaging applications in pediatric patients. *Pediatr Radiol* 2009; 39 (Suppl 1): S46–S56.
- Gelfand M, O'Hara S, Curtwright L et al. Pre-medication to block F-18-FDG uptake in brown adipose tissue of pediatric and adolescent patients. *Pediatr Radiol* 2005; 35: 984–990.
- Gerth H, Juergens K, Dirksen U et al. Significant benefit of multimodal imaging: PET/CT compared with PET alone in staging and follow-up of patients with Ewing sarcoma. *J Nucl Med* 2007; 48: 1932–1939.
- Gutzeit A, Debatin J, Antoch G. Tumor staging with PET/CT. Detection of a second tumor. *Röfo* 2004; 176: 122–124.
- Hahn K, Fischer S. Radiation dose and radiation protection from paediatric nuclear medicine procedures. *Der Nuklearmediziner* 2002; 25: 90–100.
- Hahn K, Pfluger T. Has PET become an important clinical tool in paediatric imaging. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2004; 31: 615–621.
- Hahn K, Pfluger T. Is PET/CT necessary in paediatric oncology? *Against. Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2006; 33: 966–968.
- Hawkins DS, Rajendran JG, Conrad EU et al. Evaluation of chemotherapy response in pediatric bone sarcomas by [F-18]-Fluorodeoxy-D-Glucose Positron Emission Tomography. *Cancer* 2002; 94: 3277–3284.
- Hermann S, Wormanns D, Pixberg M et al. Staging in childhood lymphoma: differences between FDG-PET and CT. *Nuklearmedizin* 2005; 44: 1–7.
- Holm S, Borgwardt L, Loft A et al. Paediatric doses – a critical appraisal of the EANM paediatric dosage card. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2007; 34: 1713–1718.
- Hudson MM, Krasin MJ, Kaste SC. PET imaging in pediatric Hodgkin's lymphoma. *Pediatr Radiol* 2004; 34: 190–198.
- ICRP. Publication 80: Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. Vol. 28, 3. Oxford: Pergamon Press, 1998.
- Jacobs F, Thierens H, Pieps A et al. Optimized tracer-dependent dosage cards to obtain weight-independent effective doses. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2005; 32: 581–588.
- Jadvar H, Connolly L, Fahey F et al. PET and PET/CT in pediatric oncology. *Semin Nucl Med* 2007; 37: 316–331.
- Jürgens K, Weckesser M, Stegger L et al. Tumor staging using whole-body high-resolution 16-channel PET-CT: Does additional low-dose chest CT in inspiration improve the detection of solitary pulmonary nodules? *Eur Radiol* 2006; 16: 1131–1137.
- Kaste S. F-18-PET-CT in extracranial paediatric oncology: when and for whom is it useful. *Pediatr Radiol* 2008; 38: S459–S466.
- Kaste S. Issues specific to implementing PET-CT for pediatric oncology: what have we learned along the way. *Pediatr Radiol* 2004; 34: 205–213.
- Kaste SC, Howard SC, McCarville EB et al. 18F-FDG-avid sites mimicking active disease in pediatric Hodgkin's. *Pediatr Radiol* 2005; 35: 141–154.
- Kobe C, Dietlein M, Mauz-Körholz C et al. FDG-PET beim Hodgkin-Lymphom. *Nuklearmedizin* 2008; 47: 225–274.
- Körholz D, Kluge R, Wickmann L et al. Importance of F-18-fluorodeoxy-D-2-glucose positron emission tomographie (FDG-PET) for staging and therapy control of Hodgkin's lymphoma in childhood and adolescence – consequences for the GPOH-HD 2003 protocol. *Onkologie* 2003; 26: 489–493.
- Kotzerke J, Oehme L, Lindner O et al. Positron emission tomography 2008, Results of the query and current status. *Nuklearmedizin* 2010; 49: 58–64.
- Krause B, Beyer T, Bockisch A et al. FDG-PET/CT in der Onkologie. *Nuklearmedizin* 2007; 46: 291–301.
- Kushner BH, Yeung HW, Larson SM et al. Extending positron emission tomography scan utility to high-risk neuroblastoma: fluorine-18-fluorodeoxyglucose positron emission tomography as sole imaging modality in follow-up of patients. *J Clin Oncol* 2001; 19: 3397–3405.
- la Fougère C, Pfluger T, Schneider V et al. Restaging von Lymphom-Patienten mit PET/CT – Vergleich von Niedrigdosis-CT (20 mAs) mit kontrastmittelverstärkter diagnostischer CT. *Nuklearmedizin* 2009; 47: 37–42.

** Weiterführende Literatur (1, 2, 5, 10–12, 14, 17–20, 23–26, 28, 29, 31, 33–38, 40, 43, 47–51, 53, 54, 56, 58).

45. Lassmann M, Biassoni L, Monieurs M et al. The new EANM dosage card. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2007; 34: 796–798.
46. Lassmann M, Biassoni L, Monsieurs M et al. The new EANM paediatric dosage card. Additional notes with respect to F-18. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2008; 35: 1748.
47. Lucas JD, O'Doherty MJ, Cronin BF et al. Prospective evaluation of soft tissue masses and sarcomas using fluorodeoxyglucose positron emission tomography. *Br J Surg* 1999; 86: 550–556.
48. Lucas JD, O'Doherty MJ, Wong JCH et al. Evaluation of fluorodeoxyglucose positron emission tomography in the management of soft-tissue sarcoma. *J Bone Joint Surg (Br)* 1998; 80-B: 441–447.
49. McCarville MB, Christie R, Daw NC et al. PET/CT in evaluation of childhood sarcomas. *Am J Roentgenol* 2005; 184: 1293–1304.
50. Montravers F, McNamara D, Landman-Parker J et al. ^{18}F -FDG in childhood lymphoma: clinical utility and impact on management. *Eur J Nucl Med* 2002; 29: 1155–1165.
51. O'Hara SA, Donnelly LF, Coleman RE. Pediatric body applications of FDG PET. *Am J Roentgen* 1999; 172: 1019–1024.
52. Parysow O, Mollerach A, Jager V et al. Low-dose oral propanolol could reduce brow adipose tissue F-18 FDG uptake in patients undergoing PET scans. *Clin Nucl Med* 2007; 32: 351–357.
53. Shulkin B. PET applications in pediatrics. *Q J Nucl Med* 1997; 41: 281–291.
54. Shulkin BL, Hutchinson RJ, Castle VP et al. Neuroblastoma: positron emission tomography with 2-[fluorine-18]-fluoro-2-deoxy-D-glucose compared with metaiodobenzylguanidine scintigraphy. *Radiology* 1996; 199: 743–750.
55. Söderlund V, Larsson S, Jacobsson H. Reduction of FDG uptake in brow adipose tissue in clinical patients by a single dose of propanolol. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2007; 34: 1018–1022.
56. Stabin M, Gelfand M. Dosimetry of pediatric nuclear medicine procedures. *Q J Nucl Med* 1998; 42: 93–112.
57. Stauss J, Franzius C, Pfluger T et al. Guideline for F-18-FDG PET and PET-CT imaging in paediatric oncology. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2008; 35: 1581–1588.
58. Voelker T, Denecke T, Steffen I et al. Positron emission tomography for staging of pediatric sarcoma patients: results of a prospective multicenter trial. *J Clin Oncol* 2007; 25: 5435–5441.
59. Warbey V, Schleyer P, Barrington S et al. The new EANM paediatric dosage card – does it conform to ALARA for PET/CT. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2007; 34: 1881–1882.
60. Wegner E, Barrington S, Kingston J et al. The impact of PET scanning on management of paediatric oncology patients. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2005; 32: 23–30.