

## DGN-Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie) Durchführung von Hirnperfusions-SPECT- Untersuchungen mit <sup>99m</sup>Tc-markierten Radiopharmaka

Stand: 9/2025 – AWMF-Registernummer: 031-016

### Autoren

R. Buchert<sup>1\*</sup>, P. T. Meyer<sup>2\*</sup>, N. L. Albert<sup>3</sup>, H. Barthel<sup>4,5</sup>, H. Boecker<sup>6</sup>, C. Bouter<sup>7</sup>, M. Brendel<sup>8,9,10</sup>, J. Brumberg<sup>2</sup>, H. H. Coenen<sup>11</sup>, A. Drzezga<sup>12,13,14</sup>, G. Gründer<sup>15</sup>, F. Grünwald<sup>16</sup>, S. Hesse<sup>5</sup>, T. Kuwert<sup>17</sup>, C. la Fougère<sup>18</sup>, C. Lange<sup>19</sup>, P. Lohmann<sup>20,21</sup>, C. Menzel<sup>22</sup>, I. Miederer<sup>23</sup>, B. Neumaier<sup>11,24</sup>, A. Rominger<sup>25</sup>, C. N. Schmitz<sup>15</sup>, M. Schreckenberger<sup>23</sup>, I. Yakushev<sup>26</sup>, W. T. Kranert<sup>22</sup>, für die Arbeitsgruppe Neuronuklearmedizin der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V.

\*Diese Autoren haben gleichermaßen als Erstautoren beigetragen

<sup>1</sup>Klinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie und Nuklearmedizin Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, <sup>2</sup>Klinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Freiburg, Fakultät für Medizin, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, <sup>3</sup>Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Klinikum der LMU München, <sup>4</sup>Klinik für Nuklearmedizin, Städtisches Klinikum Dessau, <sup>5</sup>Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universität Leipzig, <sup>6</sup>Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, <sup>7</sup>Klinik für Nuklearmedizin, Universitätsmedizin Göttingen, <sup>8</sup>Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Klinikum der LMU München, <sup>9</sup>Munich Cluster of Systems Neurology (SyNergy), <sup>10</sup>Deutsches Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen (DZNE) München, <sup>11</sup>Institut für Neurowissenschaften und Medizin, Abteilung Nuklearchemie (INM-5), Forschungszentrum Jülich, <sup>12</sup>Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Uniklinik Köln, <sup>13</sup>Deutsches Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen (DZNE), Bonn-Köln, <sup>14</sup>Institut für Neurowissenschaften und Medizin, Molekulare Organisation des Gehirns (INM-2), Forschungszentrum Jülich, <sup>15</sup>Abteilung für Molekulares Neuroimaging, Zentralinstitut für Seelische Gesundheit, Medizinische Fakultät Mannheim, Universität Heidelberg, <sup>16</sup>Johann Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt, <sup>17</sup>Nuklearmedizinische Klinik, Universitätsklinikum Erlangen, <sup>18</sup>Nuklearmedizin und Klinische Molekulare Bildgebung, Universitätsklinikum Tübingen, <sup>19</sup>Klinik für Nuklearmedizin, Charité – Universitätsmedizin Berlin, corporate member of Freie Universität Berlin and Humboldt-Universität zu Berlin, <sup>20</sup>Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen <sup>21</sup>Institut für Neurowissenschaften und Medizin, Abteilung Physik und Medizinische Bildgebung (INM-4), Forschungszentrum Jülich, <sup>22</sup>Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin, Schwerpunkt Nuklearmedizin, Universitätsmedizin Frankfurt, Johann Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt, <sup>23</sup>Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, <sup>24</sup>Institut für Radiochemie und Experimentelle Bildgebung, Uniklinik Köln, <sup>25</sup>Universitätsklinik für Nuklearmedizin, Inselspital, Bern, Schweiz, <sup>26</sup>Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, TUM Klinikum Rechts der Isar

### Federführender Autor

W. Tilman Kranert

### Herausgeber

Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V.

### Weitere Beteiligte

Deutsche Gesellschaft für Neurologie e.V.

Deutsche Gesellschaft für Psychiatrie und Psychotherapie, Psychosomatik und Nervenheilkunde e.V.

### GESCHÄFTSTELLE

Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V.  
Nikolaistraße 29  
37073 Göttingen

### KONTAKT

+49 (0) 551 / 48857-401  
@ office@nuklearmedizin.de

### VEREINSREGISTER

Vereinsregisternummer: 3705  
Vereinsregister Hannover

## 1. Geltungsbereich und Zweck

### 1.1 Was gibt es Neues?

Die vorliegende 4. Fassung der S1-Handlungsempfehlung zur Durchführung von Single-photon Emission Computer Tomography (SPECT)-Untersuchungen der Hirnperfusion mit  $^{99m}\text{Tc}$ -markierten Radiopharmaka der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V. (DGN) ist eine Aktualisierung und Erweiterung der 3. Fassung aus 09/2019 [1] (AWMF-Registriernummer 031-016). Die Aktualisierung berücksichtigt neben der wissenschaftlichen Literatur seit 2019 die S3-Leitlinie „Demenzen“ in der Fassung 5.2 vom 17.07.2025 [2] (AWMF-Registriernummer 038-013), die S2k-Leitlinie "Erster epileptischer Anfall und Epilepsien im Erwachsenenalter" in der Fassung 6.0 vom 01.09.2023 [3] (AWMF-Registriernummer 030-041) sowie die "Richtlinie ... zur Feststellung des Todes und die Verfahrensregeln zur Feststellung des endgültigen, nicht behebbaren Ausfalls der Gesamtfunktion des Großhirns, des Kleinhirns und des Hirnstamms ..." in der Fassung vom 08.07.2022 [4]. Darüber hinaus wurden die Empfehlungen der European Association of Nuclear Medicine zum appropriate use von PET und SPECT bei Patienten mit Epilepsie aus 02/2024 berücksichtigt [5], das Einheitliche Bewertungssystem der Ärztlichen Stellen nach §128 StrlSchV in der Fassung vom 22.10.2023 [6], ICRP Publication 128 zur Strahlenexposition durch Radiopharmaka [7] sowie neue Entwicklungen in der SPECT-Technik.

Anteilig beruht die vorliegende S1-Handlungsempfehlung auf der „Procedure guideline for brain perfusion SPECT using  $^{99m}\text{Tc}$  radiopharmaceuticals 3.0“ der Society of Nuclear Medicine (SNM) [8] und der „EANM procedure guideline for brain perfusion SPECT using  $^{99m}\text{Tc}$ -labelled radiopharmaceuticals, version 2“ der European Association of Nuclear Medicine (EANM) [9].

### 1.2 Zweck

Diese Handlungsempfehlung soll bei der Planung, Durchführung, Qualitätskontrolle, Beurteilung und Erstellung des Befundbriefs zur Perfusions-SPECT des Gehirns mit  $^{99m}\text{Tc}$ -markierten Radiopharmaka, [ $^{99m}\text{Tc}$ ]Tc-HMPAO und [ $^{99m}\text{Tc}$ ]Tc-ECD, unterstützen. Sofern eine Empfehlung gleichermaßen für beide vorgenannten Radiopharmaka gilt, wird im Folgenden der Einfachheit halber der Begriff cerebral blood flow (CBF)-SPECT verwendet.

Die Handlungsempfehlung stellt den Konsens der Arbeitsgemeinschaft Neuronuklearmedizin der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin dar und wurde in einem informellen Verfahren erarbeitet.

### 1.3 An wen wendet sich die Leitlinie?

Die Leitlinie wendet sich an alle Ärzte und physikalisch-technisches Personal (MTR, Physiker) in der Nuklearmedizin.

---

<sup>1</sup> PubMed-Suche am 24.05.2025 mit ("Tomography, Emission-Computed, Single-Photon"[MeSH] OR "SPECT" OR "Single Photon Emission Computed Tomography") AND ("Cerebral Blood Flow"[MeSH] OR "brain perfusion" OR "CBF"). Treffer im Zeitintervall 01.01.2019 - 24.05.2025: n = 321.

## 1.4 Gliederung

Die Abschnitte 1 bis 8 beziehen sich auf die CBF-SPECT unabhängig von der Indikation. Abschnitt 9 geht auf Besonderheiten bei speziellen Indikationen ein („Perfusionsreserve“, „iktale Untersuchung“, „Hirntod“).

## 1.5 Sonstige Hinweise

Für eine bessere Lesbarkeit wurde auf die Verwendung spezieller geschlechtsneutraler Formulierungen im Text verzichtet. Alle Formulierungen und Empfehlungen dieser Leitlinie gelten ohne Unterschiede für alle Geschlechter.

## 2. Einleitung

Die CBF-SPECT ist eine seit den 1970er Jahren etablierte Methode zur nicht-invasiven, üblicherweise semi-quantitativen Bestimmung der regionalen zerebralen Perfusion (im Englischen typischerweise als cerebral blood flow, CBF, bezeichnet) [10-12]. Sie erlaubt die Detektion und Differenzierung von Erkrankungen mit primären (z.B. zerebrovaskuläre Erkrankungen) oder sekundären (z.B. Degeneration, Epilepsie) CBF-Veränderungen. Durch die Entwicklung und zunehmende Verfügbarkeit alternativer Untersuchungsverfahren (z.B. CT, MRT, PET) hat die CBF-SPECT zwar insgesamt an Bedeutung verloren, ist aber für ausgewählte Anwendungen noch von hoher klinischer Relevanz (siehe Indikationen). Die [15O]Wasser-PET gilt im Allgemeinen als Goldstandard für die CBF-Messung [13].

## 3. Indikationen/Kontraindikationen

### 3.1 Indikationen

- Prächirurgische Lateralisierung und Lokalisation der Anfallsursprungszone bei Patienten mit Epilepsie und Unsicherheit hinsichtlich Lateralisierung und/oder Lokalisation der Anfallsursprungszone nach Basisdiagnostik einschließlich zerebraler MRT sowie iktaler und interiktaler EEG [5, 14, 15]. Die S2k-Leitlinie "Erster epileptischer Anfall und Epilepsien im Erwachsenenalter" in der Fassung vom 01.09.2023 (AWMF-Registriernummer 030-041) empfiehlt („kann erwogen werden“) die iktale SPECT vor allem bei Patienten mit pharmakoresistenter Epilepsie, die keine MRT-Läsion oder diskordante Befunde von MRT und EEG aufweisen [3].
- Feststellung eines irreversiblen Hirnfunktionsausfalls als unterstützende Maßnahme bei der Feststellung des Todes [4, 16, 17].
- Diagnose und Bewertung zerebrovaskulärer Erkrankungen (v.a. stenosierende Gefäßprozesse unklarer hämodynamischer Relevanz, z.B. bei Moyamoya-Krankheit), insbesondere durch Bestimmung der zerebrovaskulären Perfusionsreserve, sofern [15O]Wasser-PET nicht verfügbar ist [18-20].
- Ätiologische Zuordnung klinisch unklarer kognitiver Einschränkungen, insbesondere in der Differentialdiagnostik von Demenzen [21-23]. Die aktuelle Fassung 5.2 der S3-Leitlinie „Demenzen“ vom 17.07.2025 empfiehlt die CBF-SPECT für diese Fragestellung nur noch „bei fehlender Verfügbarkeit einer [18F]FDG-PET als Alternative einzusetzen und automatisierte Analyseverfahren zusätzlich anzuwenden“ [2]. Head-to-head Vergleiche an denselben Patienten zeigen eine deutliche Überlegenheit der [18F]FDG-PET für den Nachweis [24] und die Differenzierung neurodegenerativer Demenz-Erkrankungen [25]. Dazu trägt nicht nur die bessere technische Bildqualität der PET gegenüber der SPECT bei, sondern auch bessere pharmakokinetische Eigenschaften von [18F]FDG gegenüber [99mTc]Tc-HMPAO und [99mTc]Tc-ECD zur Detektion neuronaler Dysfunktion/Degeneration.

- In der Literatur finden sich Hinweise für einen möglichen Nutzen der CBF-SPECT bei anderen Indikationen (z.B. (sub)akuter Schlaganfall [26], Schädel-Hirn-Trauma [27], Enzephalitiden [28], Früh- und Differentialdiagnostik neurodegenerativer Parkinson-Syndrome [19, 29, 30], Therapiekontrolle nach Revaskularisierung [31] oder antidementiver Therapie [32, 33]), doch spielen diese in der klinischen Praxis kaum eine Rolle, weil besser geeignete diagnostische Verfahren zur Verfügung stehen.

### **3.2 Strenge Kontraindikationen**

- Fehlende Einwilligung (bei nicht einwilligungsfähigen Patienten siehe [34])
- Allergie gegen das Radiopharmakon oder dessen Bestandteile

### **3.3 Relative Kontraindikationen**

- Schwangerschaft (gesichert oder vermutet)
- Stillzeit: Bei Durchführung der Untersuchung ist das Stillen bis mindestens 12 Stunden nach der Untersuchung zu unterbrechen und die abgepumpte Muttermilch zu verwerfen.
- Alter < 18 Jahre
- Nierenfunktionsstörung (erhöhte Strahlenexposition)

Relative Kontraindikation müssen bei Prüfung des Vorliegens einer rechtfertigenden Indikation berücksichtigt werden.

## **4. <sup>99m</sup>Tc-markierte Radiopharmaka**

- Hexamethylpropylenaminnoxim ([<sup>99m</sup>Tc]Tc-HMPAO)
- Ethylcystein-Dimer ([<sup>99m</sup>Tc]Tc-ECD)

### **4.1 Aufbewahrung, Präparation, Qualitätskontrolle, Haltbarkeit nach Präparation und mögliche Nebenwirkungen**

- Zu Aufbewahrung, Präparation, Qualitätskontrolle, Haltbarkeit nach Präparation und möglichen Nebenwirkungen sind die zugehörigen Fachinformationen in der jeweils gültigen Fassung zu beachten.

### **4.2 Pharmakokinetik**

- [<sup>99m</sup>Tc]Tc-HMPAO [35]: Bei normaler zerebraler Perfusion werden bei einer Kapillarpassage im Gehirn etwa 80% der [<sup>99m</sup>Tc]Tc-HMPAO Moleküle mittels passiver Diffusion aus dem arteriellen Blut ins Gehirngewebe extrahiert. Dort werden sie pH-anhängig in Sekundärkomplexe und polare Folgeprodukte verwandelt, die lokal im Gehirn fixiert werden (trapping). Die maximale Radioaktivitätskonzentration im Gehirn wird nach Bolusinjektion innerhalb der ersten Minute erreicht und entspricht 3,5-7% der injizierten Radioaktivitätsmenge. Innerhalb der ersten 2 Minuten nach Bolusinjektion sinkt die Radioaktivitätskonzentration im Gehirn um bis zu 15% vom Maximum (washout). Danach bleibt die zerfallskorrigierte Radioaktivitätskonzentration im Gehirn über 24 Stunden nahezu konstant. Eine Stunde nach Injektion finden sich noch mehr als 10% der injizierten Radioaktivitätsmenge im Blut.
- [<sup>99m</sup>Tc]Tc-ECD [36]: Bei normaler zerebraler Perfusion werden bei einer Kapillarpassage im Gehirn 60-70% der [<sup>99m</sup>Tc]Tc-ECD Moleküle mittels passiver Diffusion aus dem arteriellen Blut ins Gehirngewebe extrahiert. Die maximale

Radioaktivitätskonzentration im Gehirn wird nach Bolusinjektion innerhalb der ersten Minute erreicht und entspricht 4,9-6,5% der injizierten Radioaktivitätsmenge. Durch enzymatische Entesterung entstehen polare Metabolite, die lokal im Gehirn fixiert werden. Während der ersten 4 Stunden nach Injektion sinkt die Radioaktivitätskonzentration im Gehirn um bis zu 25% vom Maximum (6% pro Stunde). Eine Stunde nach Injektion findet sich weniger als 5% der injizierten Radioaktivitätsmenge im Blut.

### **4.3 Dosierung bei Erwachsenen**

- [99mTc]Tc-HMPAO und [99mTc]Tc-ECD: bei einem Körpergewicht von 70 kg intravenöse Injektion von 555-1110 MBq, typische Aktivitätsdosis: 740 MBq.
- Unter besonderen Umständen (z.B. iktale SPECT) kann eine niedrigere Aktivitätsmenge eingesetzt werden, wenn eine für die Fragestellung hinreichende statistische Bildqualität erwartet werden kann.
- [99mTc]Tc-ECD: Falls notwendig, kann eine Aktivität bis 1700 MBq injiziert werden, sofern sichergestellt werden kann, dass der Patient danach am Untersuchungstag mindestens alle 2 Stunden die Blase entleert [36].
- Zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Leitlinie (05/2025) hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) keine diagnostischen Referenzwerte für die CBF-SPECT festgelegt. Falls das BfS künftig diagnostische Referenzwerte festlegt, sind diese anzuwenden.

### **4.4 Strahlenexposition bei Erwachsenen nach ICRP 128**

- Effektive Dosis
  - [99mTc]Tc-HMPAO: 0,0093 mSv/MBq, bei Gabe von 740 MBq: 6,9 mSv.
  - [99mTc]Tc-ECD: 0,0077 mSv/MBq, bei Gabe von 740 MBq: 5,7 mSv.
- Organdosen für [99mTc]Tc-HMPAO und [99mTc]Tc-ECD bei Erwachsenen finden sich in ICRP Publikation 128 [7].

### **4.5 Dosierung bei Kindern**

- Nach aktuellen Fachinformationen wird die Anwendung von [99mTc]Tc-HMPAO [35] oder [99mTc]Tc-ECD [36] bei Kindern wegen unzureichender Datenlage nicht empfohlen. Dies muss bei Prüfung des Vorliegens einer rechtfertigenden Indikation für die Untersuchung von Kindern berücksichtigt werden.
- Falls bei einem Kind eine rechtfertigende Indikation für die CBF-SPECT vorliegt, sollte die Berechnung der Aktivitätsdosis nach EANM Dosage Card (<https://eanm.org/publications/useful-resources/dosage-card/>) oder mittels EANM Dosage Calculator ([https:// eanm.org/app-calc/](https://eanm.org/app-calc/)) in der gültigen Fassung erfolgen. Falls das BfS künftig diagnostische Referenzwerte für die CBF-SPECT festlegt, sind diese anzuwenden, mit Bestimmung des körperlengewichtsabhängigen Bruchteils der Erwachsenenendosis gemäß BfS Bekanntmachung.

### **4.6 Strahlenexposition bei Kindern nach ICRP 128**

- Effektive Dosis (abhängig vom Alter)
  - [99mTc]Tc-HMPAO: 15 Jahre 0,011 mSv/MBq, 10 Jahre 0,017 mSv/MBq, 5 Jahre 0,027 mSv/MBq, 1 Jahr 0,049 mSv/MBq, Neugeborene 0,12 mSv/MBq.

- [99mTc]Tc-ECD: 15 Jahre 0,0099 mSv/MBq, 10 Jahre 0,015 mSv/MBq, 5 Jahre 0,022 mSv/MBq, 1 Jahr 0,040 mSv/MBq.
- Organdosen für [99mTc]Tc-HMPAO und [99mTc]Tc-ECD bei Kindern finden sich in ICRP Publikation 128 [7].

#### **4.7 Uptakedauer**

- Der Start der SPECT-Akquisition sollte für beide Tracer im Zeitintervall 30-90 Minuten nach intravenöser Injektion erfolgen [5]. Es wird empfohlen, dass jede Einrichtung einen festen Zeitpunkt im genannten Zeitintervall festlegt, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit aller CBF-SPECT Untersuchungen in der Einrichtung zu erreichen.
- In Ausnahmefällen kann die Akquisition bereits 2 Minuten oder auch erst bis zu 5 Stunden nach Ende der intravenösen Gabe des Radiopharmakons beginnen. Bei spätem Start der Akquisition ist die Reduktion der Zählrate durch radioaktiven Zerfall bei der Wahl der Akquisitionsdauer zu berücksichtigen.

## **5. Durchführung**

### **5.1 Vor der Untersuchung**

- Eine Nüchternphase vor der Untersuchung ist nicht erforderlich.
- Medikamente müssen in der Regel für die Untersuchung nicht abgesetzt werden.
- Patienten sollten auf Drogen und Genussmittel mit CBF-Einfluss (koffeinhaltige Getränke, Alkohol, Nikotin) am Untersuchungstag vor der Untersuchung verzichten. Falls dies nicht erfolgt ist, kann die Untersuchung in der Regel dennoch durchgeführt werden. Hierdurch möglicherweise bedingte CBF-Änderungen sind bei der Beurteilung der Untersuchung zu berücksichtigen.
- Folgende Unterlagen sollte der Patient zur Untersuchung mitbringen
  - aktueller Medikationsplan.
  - Bilder struktureller (CT, MRT) und funktioneller (SPECT, PET) Voruntersuchungen des Gehirns, vorzugsweise Befundbriefe plus Bilddaten (DICOM-CD oder QR-Code für Online-Zugriff auf Bilder).
  - Ergebnisse neuropsychologischer Testung (z.B. MMSE, MoCA, Uhrentest, CERAD), sofern dem Patienten bereits vorliegend (Einholung beim Zuweiser ist nicht erforderlich).
  - Falls nicht alle der genannten Unterlagen vorliegen, kann die Untersuchung in der Regel dennoch erfolgen. Abhängig vom Befund der Untersuchung können für die Beurteilung erforderliche Unterlagen nachträglich eingeholt werden.

### **5.2 Vor Tracer-Injektion**

- Der Patient soll vor Beginn der Untersuchung viel trinken, um eine ausreichende Diurese sicherzustellen.
- Aufklärung über die Untersuchung mit hinreichend ausführlicher Erläuterung des Untersuchungsablaufs, sodass von 10 Minuten vor bis 5 Minuten nach intravenöser Injektion des Radiopharmakons möglichst keine Interaktion mit dem Patienten erforderlich ist.

- Bei der Aufklärung soll darauf hingewiesen werden, dass der Kopf während der SPECT- und ggf. CT-Akquisition (dann auch dazwischen) nicht bewegt werden sollte („sonst wird das Bild verwackelt“).
- Im Falle von Klaustrophobie kann eine Sedierung angeboten werden (s. Abschnitt 5.4). Auch eine „Besichtigung“ der Kamera mit „Probeliegen“ kann Compliance-Problemen bei der Akquisition vorbeugen.
- Nach Einwilligung Anlage eines venösen Zugangs.
- Von mindestens 10 Minuten vor bis mindestens 5 Minuten nach intravenöser Injektion des Radiopharmakons sollte der Patient in einer reizarmen Umgebung (kein Lärm, gedimmtes Licht) in komfortabler Sitz- oder Liegeposition ruhen. Während der (mindestens) 15-minütigen Ruhephase sollte der Patient nicht lesen, sprechen, Mobiltelefon nutzen, laufen oder sonstige körperlichen Tätigkeiten ausüben.
- Jede Einrichtung sollte einen eigenen stets einzuhaltenden Standard festlegen, ob Patienten während der 15-minütigen Ruhephase die Augen geöffnet oder geschlossen halten sollen.

### **5.3 Tracer-Injektion**

- Die intravenöse Gabe des Radiopharmakons erfolgt als Bolus-Injektion.
- Bei intravenöser Gabe des Radiopharmakons (inkl. Spülen) erfolgt möglichst wenig Interaktion mit dem Patienten (wie zuvor bei der ausführlichen Aufklärung mit dem Patienten besprochen).
- Nach intravenöser Gabe des Radiopharmakons ruht der Patient noch mindestens 5 Minuten.

### **5.4 Vorbereitung für die SPECT-Akquisition**

- Falls eine Sedierung für die SPECT-Akquisition erforderlich ist, sollte diese frühestens 5 Minuten nach intravenöser Gabe des Radiopharmakons erfolgen (cave: separate Aufklärung in Hinsicht auf Fahrtüchtigkeit etc.).
- Unmittelbar vor der SPECT-Akquisition sollte der Patient die Blase entleeren.
- Alle Gegenstände am Kopf sollen abgelegt werden (z.B. Brille, Ohringe, Haarspangen, Hörgeräte, etc.).
- Der Patient soll so bequem wie möglich auf der Patientenliege der SPECT-Kamera gelagert werden (z.B. Knierolle, Decke, Armablage).
- Vor dem Start der Untersuchung soll der Patient erneut daran erinnert werden, den Kopf während der Untersuchung nicht zu bewegen.
- Der Kopf des Patienten soll so bequem wie möglich im Kopfhalter der SPECT-Kamera gelagert werden. Eine achsengerechte oder anatomische Ausrichtung des Kopfes wird nicht empfohlen (erfolgt bei Postprocessing). Der Kopf kann leicht fixiert werden (Klettband, Mullbinde), als „Erinnerungshilfe“, den Kopf während der Akquisition nicht zu bewegen. Eine vollständige Fixierung wird nicht empfohlen.

### **5.5 Während der SPECT-Akquisition**

- Es sollte eine permanente Überwachung erfolgen.

### **5.6 Nach der SPECT-Aufnahme**

- Zur Reduzierung der Strahlenexposition soll der Patient nach der Akquisition am Untersuchungstag ausreichend trinken und häufig die Blase entleeren (z.B. alle 2 Stunden).

## **6. Akquisition, Rekonstruktion & Auswertung**

- In der lokalen standard operating procedure (SOP) zur CBF-SPECT sollen alle relevanten Akquisitions-, Rekonstruktions- und Auswerte-Methoden und -Parameter hinreichend detailliert festgelegt sein. Von den festgelegten Methoden und Parametern sollte nur in begründeten Fällen abgewichen werden, um bestmögliche Vergleichbarkeit zwischen Patienten und bei Verlaufsuntersuchungen zu gewährleisten. Abweichungen sollen in der Akte dokumentiert und begründet werden.
- Das Einheitliche Bewertungssystem der Ärztlichen Stellen nach §128 StrlSchV in der Fassung vom 22.10.2023 [6] macht keine speziellen Vorgaben für die CBF-SPECT. Sollten bei Aktualisierung des Einheitlichen Bewertungssystems spezielle Vorgaben gemacht werden, sollten diese berücksichtigt werden.

### **6.1 Kamera & Kollimatoren**

- Einkopfkameras sollen nicht verwendet werden.
- 3D CZT-Systeme [37-39], dedizierte Hirn-SPECT Systeme [40-42] oder konventionelle Mehrkopfkameras mit speziellen Hirn-SPECT Kollimatoren [43, 44] bieten in der Regel einen besseren Kompromiss zwischen Zählrate und räumlicher Auflösung als Mehrkopfkameras mit Parallelloch-Kollimatoren.
- Für Mehrkopfkameras wird der Einsatz von low-energy-high-resolution (LEHR) Kollimatoren empfohlen, sofern keine dedizierten Kollimatoren für die Hirn-SPECT zur Verfügung stehen, die einen besseren Kompromiss zwischen Zählrate und räumlicher Auflösung bieten, z.B. fanbeam Kollimatoren [45], multifokale Kollimatoren [46] oder multiple-pinhole Kollimatoren [44, 47, 48]. Low-energy-ultra-high-resolution (LEUHR) Kollimatoren können ebenfalls eingesetzt werden, insbesondere wenn für die Beantwortung der Fragestellung eine besonders hohe räumliche Auflösung notwendig erscheint. Der Einsatz von low-energy-all-purpose (LEAP) Kollimatoren wird nicht empfohlen.
- Bei der SPECT-Akquisition rotieren die Detektorköpfe in der Regel auf einer Kreisbahn (circular orbit) mit konstantem Rotationsradius. Mit Parallelloch-Kollimatoren sollte dabei der kleinste Rotationsradius gewählt werden, mit dem die Untersuchung sicher durchgeführt werden kann, häufig  $\leq 13$  cm, fast immer  $\leq 15$  cm. In begründeten Ausnahmefällen kann die Untersuchung mit einem Rotationsradius bis 20 cm durchgeführt werden. In diesen Fällen dann vorrangig visuelle Beurteilung, da semiquantitative und/oder statistische Auswertungen durch den Auflösungsverlust eingeschränkt werden. (cave: es gibt verschiedene Konventionen zur Messung des Rotationsradius: vom Rotationszentrum zur Oberfläche des Detektorkristalls oder zur Oberfläche des Kollimators. Der Unterschied ist abhängig von Kollimatortyp und -modell. Bei LEHR-Kollimatoren beträgt der Unterschied typisch 2,5 cm, bei LEUHR-Kollimatoren typisch 3,5 cm).
- Bei anderen Kollimatoren (fanbeam, multi-focal, multiple-pinhole) soll der vom Hersteller vorgegebene Rotationsradius verwendet werden. Falls dies bei einem Patienten nicht möglich ist, sollte der Einsatz eines Parallelloch-Kollimators erwogen werden.

- Durch automatische Konturfindung, die den Abstand der Detektoren vom Kopf des Patienten separat für jeden Projektionswinkel minimiert, kann die Bildqualität verbessert werden [49].
- Beim Einsatz von Parallelloch-Kollimatoren soll auf eine möglichst vollständige Abbildung des Cerebellums geachtet werden. Beim Einsatz von fanbeam Kollimatoren ist auf eine vollständige Positionierung des Gehirns im Gesichtsfeld bei jedem Winkelschritt zu achten („Anschnitt des Frontallappens“ in seitlichen Projektionen vermeiden). Beim Einsatz von *multiple-pinhole* Kollimatoren sollen Startposition und Tischvorschub (bei helikaler Akquisition) so gewählt werden, dass das gesamte Gehirn erfasst wird („Anschnitt des Parietallappens“ vermeiden).
- Die Kantenlänge der Pixel der Projektionsbilder sollte bei etwa 1/3 der erwarteten Auflösung (full-width-at-half-maximum) im rekonstruierten Bild liegen (max. 4 mm). In der Regel ist eine Matrixgröße von mindestens 128x128 erforderlich. Bei SPECT-Kameras mit großflächigen Detektoren ist ein geeigneter acquisition zoom (hardware zoom) zu wählen.
- Beim Einsatz von Parallelloch- oder fanbeam Kollimatoren werden in der Regel Projektionen in Winkelschritten von etwa 3 Grad (typisch 120 oder 128 Projektionen) aus allen Richtungen (360 Grad) akquiriert, gleichverteilt auf die vorhandenen Kameraköpfe. Bei anderen Kollimatoren (z.B. multiple-pinhole) können weniger Projektionen ausreichend sein.
- Die Akquisitionsdauer soll so gewählt werden, dass eine ausreichende statistische Bildqualität sichergestellt ist. Beim Einsatz von Parallelloch- oder fanbeam Kollimatoren ist das in der Regel bei Detektion von 5 Millionen (oder mehr) Zerfällen der Fall. Beim Einsatz von multiple-pinhole Kollimatoren oder spezieller Techniken zur Reduktion statistischen Rauschens kann die Detektion einer kleineren Zahl von Zerfällen ausreichend sein.
- Kontinuierliche Datenakquisition ermöglicht eine Verkürzung der (Brutto-) Akquisitionsdauer im Vergleich zur step-and-shoot Technik.
- Die statische Akquisition kann in Teilaufnahmen durchgeführt werden, z.B. 3 x 10 Minuten statt 1 x 30 Minuten, um Bewegung während der Akquisition detektieren und ggf. korrigieren zu können. Bei Kameras mit list mode Option kann diese verwendet werden, um nachträglich die Rekonstruktion auf ein Zeitintervall ohne relevante Bewegung einzuschränken.
- Für die Qualitätskontrolle von SPECT-Systemen wird auf Vorgaben der Kamera-Hersteller, das Bewertungssystem der Ärztlichen Stellen sowie entsprechende (DIN-) Normen, Richt- und Leitlinien verwiesen.

## **6.2 Bildrekonstruktion**

- Vor der Bildrekonstruktion sollen die Rohdaten (Projektionen oder Sinogramme) auf Artefakte und relevante Bewegungen während der Akquisition geprüft werden. Zur Prüfung auf relevante Bewegungen kann eine cine mode Darstellung der Projektionen verwendet werden (insbesondere für Kopfbewegungen in axialer Richtung). Bei relevanter Kopfbewegung sollten Bilder mit und ohne Bewegungskorrektur rekonstruiert und verglichen werden. Eine regelhafte Bewegungskorrektur bei allen Untersuchungen wird nicht empfohlen.
- In der Regel sind iterative Rekonstruktionsverfahren (z.B. ordered-subset-expectation-maximization, OSEM) der gefilterten Rückprojektion vorzuziehen.
- Bei der gefilterten Rückprojektion sollen low-pass Filter mit geeigneten Werten für cutoff Frequenz und ggf. weitere Filterparameter (z.B. Ordnung) verwendet werden (cave:

unterschiedliche Konventionen, z.B. cutoff Frequenz in cycles/cm, cycles/pixel oder Nyquistfrequenz).

- Bei iterativer Rekonstruktion soll Konvergenz im gesamten Gesichtsfeld sichergestellt werden, um Artefakte zu vermeiden (besonders kritisch, wenn die Systemsensitivität im Gesichtsfeld erheblich variiert, z.B. bei multiple-pinhole Kollimatoren). Dazu kann eine besonders hohe Zahl von Iterationen sinnvoll sein (ggf. in Kombination mit postfiltering). Zur Optimierung der Rekonstruktionsparameter kann die Messung eines hinreichend großen Phantoms (mindestens Kopfgröße) eingesetzt werden.
- Zur Reduktion statistischen Rauschens kann die 3-dimensionale Filterung des rekonstruierten Bilds mit einem 3-dimensionalen isotropen Gauß-Filter eingesetzt werden (postfiltering). Prefiltering der Projektionsdaten und 2-dimensionales postfiltering werden nicht empfohlen.
- Das Gesichtsfeld der Rekonstruktion sollte den gesamten Kopf (einschließlich Kopfhaut) mit hinreichendem Sicherheitsabstand (z.B. 1 cm) umfassen. Einschränkungen des Gesichtsfelds sollen bei Bedarf im Rahmen von postprocessing und/oder Auswertung erfolgen.
- Masken zum Ausschluss „extrazerebraler counts“ sollen nicht verwendet werden.
- Für die Bildrekonstruktion sollten kubische Voxel ohne Lücken (gaps) verwendet werden, um Auflösungsverluste bei räumlichen Transformationen im Rahmen von postprocessing und/oder Auswertung zu vermeiden.
- Die Kantenlänge der kubischen Voxel im rekonstruierten Bild sollte bei etwa 1/3 der erwarteten Auflösung im rekonstruierten Bild liegen (max. 4 mm).

### 6.3 Korrekturen

- Absorptionskorrektur (Schwächungskorrektur)
  - Korrektur für Absorption von Photonen im Schädel wird empfohlen [50].
  - CT-basierte und rechnerische Verfahren sind hierfür gleichwertig [51].
  - Bei CT-basierter Korrektur ist ein auxiliäres CT ausreichend. Falls keine aktuelle strukturelle Bildgebung (CT, MRT) des Patienten verfügbar ist, kann ein diagnostisches CT des Schädels sinnvoll sein und dann auch für die CT-basierte Schwächungskorrektur verwendet werden.
  - Bei CT-basierter Schwächungskorrektur soll Bewegung zwischen CT und SPECT vermieden und ggf. korrigiert werden.
  - Für rechnerische Verfahren muss die äußere Kontur des Kopfes (nicht des Gehirns!) einschließlich Kopfhaut mit hinreichender Genauigkeit definiert werden. Hierfür wird der Einsatz (halb-)automatischer Methoden empfohlen. Für die manuelle Delineation sind hinreichendes Training und regelmäßige Kontrolle erforderlich.
  - Bei rechnerischen Verfahren kann die Berücksichtigung des Kopfhalters die Genauigkeit der Schwächungskorrektur verbessern, insbesondere kann ein artifizieller anterior-zu-posterior Gradient vermieden werden [52].
- Streukorrektur: Korrektur für gestreute Photonen kann zu einem besseren Signal-zu-Untergrund-Verhältnis führen und damit den Nachweis regionaler Perfusionsänderungen verbessern [8, 9, 50].
- Auflösungsverbesserung: Der Einsatz von Verfahren zur Auflösungsverbesserung (z.B. mittels point-spread-function modeling) wird nicht empfohlen. Beim Einsatz von Verfahren zur Auflösungsverbesserung sollten zum Vergleich auch Bilder ohne Auflösungsverbesserung rekonstruiert werden.

## 6.4 Postprocessing

- Eine starre (rigid-body) Transformation der SPECT-Aufnahme in eine festgelegte Standard-Orientierung soll erfolgen, bspw. um Fehlinterpretation scheinbarer Links-Rechts-Asymmetrien infolge Inklination zu vermeiden. Die Transformation kann manuell erfolgen. Eine automatische Ausrichtung ist in der Regel zu bevorzugen.
- Bei Epilepsie-Patienten, insbesondere bei Verdacht auf temporalen Anfallsursprung, ist zusätzlich eine Orientierung der Schichtebenen entlang des Planum temporale zu empfehlen.

## 6.5 Semiquantitative und statistische Auswertung

- Bei der CBF-SPECT erfolgt in der Regel keine absolute CBF-Quantifizierung (in ml Blut / 100 g Gewebe / min), sodass diffuse CBF-Veränderungen (ganzes Gehirn gleichermaßen betroffen) nicht detektiert werden können [53]. Stattdessen erfolgt eine Skalierung der Voxel-Intensitäten auf eine nicht (oder nur wenig) betroffene Referenzregion, die den Nachweis relativer regionaler CBF-Änderungen erlaubt. Als Referenzregion wird häufig das Cerebellum verwendet (cave: „an- oder abgeschnittenes Cerebellum“). Die Wahl der Referenzregion kann von der Fragestellung abhängen [54].
- Der Einsatz semi-quantitativer und statistischer Auswertungen auf volume-of-interest VOI- und/oder Voxelbasis wird empfohlen. Diese können die visuelle Beurteilung unterstützen, aber nicht ersetzen [55].
- Die Ergebnisse semi-quantitativer und statistischer Auswertungen müssen visuell anhand der SPECT-Bilder auf Plausibilität geprüft werden.
- Die Ergebnisse von semi-quantitativen und statistischen Auswertungen können durch strukturelle/vaskuläre Läsionen sowie durch Bewegungen „verfälscht“ werden.
- Die Ergebnisse von semi-quantitativen und statistischen Auswertungen hängen in der Regel von Akquisition, Rekonstruktion und postprocessing ab. Es muss daher sichergestellt werden, dass Schwellenwerte, Normbereiche, Normkollektive etc. für die auszuwertende SPECT-Untersuchung geeignet sind.
- In der Regel sind Schwellenwerte, Normbereiche, Normkollektive für  $[99mTc]Tc$ -HMPAO und  $[99mTc]Tc$ -ECD unterschiedlich und daher nicht austauschbar.

## 7. Beurteilung

### 7.1 $[99mTc]Tc$ -HMPAO versus $[99mTc]Tc$ -ECD

- Die Radioaktivitätsverteilung bei Normalbefunden unterscheidet sich zwischen  $[99mTc]Tc$ -HMPAO und  $[99mTc]Tc$ -ECD.  $[99mTc]Tc$ -ECD zeigt in der Regel eine deutlich geringere extrazerebrale Hintergrundaktivität, einen höheren Kontrast zwischen grauer und weißer Hirnsubstanz und, bei Patienten mit zerebrovaskulären oder neurodegenerativen Erkrankungen, einen höheren Kontrast zwischen hypoperfundierten Arealen und gesundem Gewebe [56-59].
- Darüber hinaus zeigt  $[99mTc]Tc$ -ECD im Vergleich zu  $[99mTc]Tc$ -HMPAO eine relativ höhere Aufnahme im Neokortex sowie in der Kleinhirnrinde, und eine relative geringere Aufnahme mesiotemporal und subkortikal [60, 61].
- Der Einfluss der Uptake-Dauer auf die Aktivitätskonzentration (und möglicherweise die Aktivitätsverteilung) ist bei  $[99mTc]Tc$ -ECD stärker als bei  $[99mTc]Tc$ -HMPAO.

- Luxusperfusion / postischämische Hyperperfusion, d.h. regionaler zerebraler Blutfluss über den lokalen Stoffwechselbedarf hinaus, führt zu einer erhöhten regionalen Konzentration von  $[^{99m}\text{Tc}]\text{Tc-HMPAO}$  aber nicht von  $[^{99m}\text{Tc}]\text{Tc-ECD}$  [62].

## 7.2 Radiopharmakon-unabhängige Aspekte

- Zusätzlich zur normalen Aktivitätsverteilung (bei gesunden Personen) soll die normale Variabilität berücksichtigt werden (supplementary figure 1 in [63]). Substantielle Variabilität besteht nicht nur interindividuell sondern auch intraindividuell (short-term test-retest variability) [64].
- Die normale Aktivitätsverteilung ist abhängig von Alter, Geschlecht [65] und möglicherweise Händigkeit [66]. Während Effekte von Geschlecht und Händigkeit bei Auswertung und Beurteilung von CBF-SPECT Untersuchungen in der Regel nicht in Betracht gezogen werden müssen, sollten Alterseffekte berücksichtigt werden. Eine relative Reduktion der Aktivitätskonzentration im fortgeschrittenen Alter zeigt sich vor allem in folgenden Hirnregionen: Frontallappen (vor allem mesial), Nucleus caudatus, perisylvisch (insulär und superior temporal) [64], wahrscheinlich überwiegend durch alters-assoziierte Partialvolumeneffekte infolge Atrophie [64].
- Für die visuelle Beurteilung der SPECT-Bilder sollte jede Einrichtung einen eigenen Standard festlegen. Viele Einrichtungen bevorzugen dabei die visuelle Beurteilung am Computer-Monitor. So sind zusätzlich zum festgelegten Standard auch andere Einstellungen von Farbtafel und deren Aussteuerung möglich [67].
- Bei nicht-kontinuierlichen Farbtafeln können die resultierenden abrupten Farbsprünge im Bild die Beurteilung erschweren.
- Bei der Beurteilung der SPECT-Untersuchung sind zu berücksichtigen
  - Vigilanz des Patienten (z.B. Sedierung).
  - Vaskuläre/strukturelle Läsionen und Atrophie. Dazu soll die SPECT-Untersuchung in Zusammenschau mit hinreichend aktueller struktureller Bildgebung (CT/MRT) beurteilt werden. Eine Koregistrierung ist hierfür in der Regel nicht erforderlich. Falls eine Koregistrierung erfolgt, sollte die Zusammenschau beider Modalitäten side-by-side erfolgen (z.B. korrespondierendes Fadenkreuz), eine Fusionsdarstellung kann zusätzlich verwendet werden.
  - Bewegung während der Akquisition.
  - Diaschisis, insbesondere gekreuzte cerebelläre Diaschisis bei kortikalen Pathologien und ipsilaterale kortikale Diaschisis bei Läsionen in Thalamus und Capsula interna.

## 8. Befundbrief

- Der strukturierte Befundbrief sollte aus folgenden Abschnitten bestehen: (rechtfertigende) Indikation, Klinische Angaben, Methodik, Befund, Beurteilung.
- Im Methodik-Teil sollten der verwendete Tracer und die injizierte Radioaktivitätsdosis genannt sein.
- Bei eingeschränkter Beurteilbarkeit der Untersuchung soll der Grund hierfür im Befund-Teil genannt und dies bei der Beurteilung berücksichtigt werden.

## 9. Besonderheiten bei speziellen Indikationen

### 9.1 Überprüfung der Perfusionsreserve mit Azetazolamid

- Azetazolamid (Diamox®)
  - Azetazolamid ist für diese Anwendung nicht zugelassen (off-labe use).
  - Kontraindikationen gemäß Fachinformation müssen beachtet werden (siehe auch [18, 68]).
  - Zu Nebenwirkungen ist die zugehörige Fachinformation zu beachten.
  - Langsame intravenöse Gabe, typischerweise als Kurzinfusion über 5-10 Minuten. Typische Dosis bei Erwachsenen: 1000 mg Azetazolamid; typische Dosis bei Kindern: 14 mg/kg Körpergewicht.
  - Ab Start der Azetazolamid-Infusion sollte insbesondere auf einen möglichen Blutdruckabfall geachtet werden (cave: orthostatische Hypotension, z.B. beim Aufstehen von der Patientenliege).
  - Die Gabe des Radiopharmakons erfolgt typischerweise 5-15 Minuten nach Ende der 5-10-minütigen Azetazolamid-Infusion, da die maximale CBF Steigerung bei intravenöser Bolusgabe nach 10-15 Minuten eintritt [69, 70]. Bei gesunden Personen führt die Azetazolamid-Infusion zu einer 30-60%-igen CBF-Steigerung [69].
  
- Die CBF-SPECT unter Azetazolamid bietet eine geringere Sensitivität zum Nachweis einer eingeschränkten Perfusionsreserve als die [15O]Wasser PET [71] und sollte daher nur eingesetzt werden, wenn die [15O]Wasser PET nicht verfügbar ist.
- Im Gegensatz zur [15O]Wasser PET erlaubt die CBF-SPECT unter Azetazolamid nur eine Bestimmung der relativen CBF-Änderung (relativ zu anderen Hirnregionen) und keine absolute Bestimmung der CBF-Änderung, sodass z.B. symmetrische CBF-Änderungen unbemerkt bleiben und steal Phänomene, d.h. absolute Minderung der regionalen Perfusion unter Azetazolamid, nicht von eingeschränkter Perfusionsreserve (ohne steal) unterschieden werden können.
- Basis- und Belastungsuntersuchungen (ohne/mit Azetazolamid) sollen unter identischen Rahmenbedingungen akquiriert werden (insbesondere das Radiopharmakon und die technischen Parameter betreffend).
- Die Untersuchung kann mit einem 1-Tagesprotokoll oder einem 2-Tagesprotokoll durchgeführt werden. In Kürze:
  - Beim 1-Tagesprotokoll wird zuerst die Basisuntersuchung durchgeführt. Die Radioaktivitätsdosis (in Summe typischerweise  $2 \times 740 \text{ MBq} = 1480 \text{ MBq}$ ) wird in der Regel ungleich auf beide Untersuchungen verteilt, um einen guten Kompromiss zwischen statistischer Bildqualität der Basisuntersuchung (möglichst hohe Aktivität für Basisuntersuchung) und Restaktivität der Basis- in der Belastungsuntersuchung (möglichst niedrige Aktivität für Basisuntersuchung) zu erreichen. Typische Verhältnisse sind 1:3 und 1:4 zu Ungunsten der Basisuntersuchung. Dies führt häufig zum Unterschreiten der Minimalaktivitätsdosis von 555 MBq gemäß Fachinformation, was unter diesen speziellen Umständen aber in der Regel akzeptabel ist.
  - Beim 2-Tagesprotokoll wird typischerweise zunächst die Belastungsuntersuchung durchgeführt, da unter Umständen auf die Basisuntersuchung verzichtet werden kann, falls die Belastungsuntersuchung einen Normalbefund zeigt. Beim 2-

Tagesprotokoll sollten Belastungs- und Basisuntersuchung mit etwa der gleichen Radioaktivitätsdosis durchgeführt werden.

- Semiquantitative (Subtraktions-)Verfahren zur Bestimmung der relativen Perfusionsreserve können die visuelle Beurteilung unterstützen, aber nicht ersetzen [71].
- Bei beidseitigen Stenosen ist die Sensitivität von Seitenvergleichen eingeschränkt.
- Es gibt Hinweise darauf, dass die pharmakologische Vasodilatation mit Azetazolamid (unphysiological stressor) die physiologische Situation bei hämodynamischem Versagen nicht immer vollständig realistisch widerspiegelt [72].

## **9.2 Iktale und interiktale Untersuchung zur Lateralisierung und Lokalisation der Anfallsursprungszone bei Patienten mit Epilepsie**

- Für die Lokalisation der Anfallsursprungszone mittels iktaler SPECT sind [99mTc]Tc-HMPAO und [99mTc]Tc-ECD weitgehend gleichwertig [73]. Da die zu applizierende Aktivität über längere Zeit (bis 4 h) bereitgestellt werden muss, kommen für iktale Untersuchungen nur „stabilisierte“ Radiopharmaka in Betracht, die bei Beginn des Anfalls unmittelbar (ohne weitere Präparation) injiziert werden können.
- Interiktale Hypoperfusion in einer Läsion (z.B. Hippocampussklerose) kann durch die Läsion per se verursacht sein und ist daher nicht zwingend ein Hinweis auf epileptische Aktivität. Ebenso kann iktale Hyperperfusion in einer Läsion (z.B. Tumor) durch die Läsion per se verursacht sein und ist daher nicht zwingend ein Hinweis auf epileptische Aktivität. In beiden Fällen kann die Untersuchung vor allem indirekt, durch Ausschluss anderer Kandidaten für die Anfallsursprungszone, zur Bestätigung der Läsion als Anfallsursprungszone beitragen.
- Die beste Genauigkeit (Sensitivität und Spezifität) für Lateralisierung und Lokalisation der Anfallsursprungszone liefert die Kombination von iktaler und interiktaler SPECT mit semiquantitativer / statistischer Auswertung (Subtraktionsanalyse) in Zusammenschau mit der zerebralen MRT [74]. Dies gilt ganz besonders bei voroperierten Patienten mit Verdacht auf Anfallsursprungszone im Randbereich des OP-Defekts [75].
- Iktale und interiktale Untersuchung sollen unter identischen Rahmenbedingungen akquiriert werden (insbesondere das Radiopharmakon und die technischen Parameter betreffend).
- Wenn iktale SPECT und interiktale [18F]FDG-PET vorliegen, kann auf eine interiktale SPECT oft verzichtet werden [76].
- Es ist nicht sinnvoll, in der präoperativen Epilepsiediagnostik mit einer interiktalen Untersuchung zu beginnen, um auf die iktale Untersuchung bei einem eindeutigen Befund in der interiktalen SPECT zu verzichten, da (i) eindeutige Kandidaten für die Anfallsursprungszone in der interiktalen SPECT selten sind ( $\leq 5\%$  der Fälle) und (ii) diese mit einem nicht zu vernachlässigenden Risiko (um 10%) falsch lateralisiert werden [77].
- Dagegen ist es sinnvoll, mit einer iktalen Untersuchung zu beginnen, um auf die interiktale Untersuchung bei einem eindeutigen Befund in der iktalen SPECT zu verzichten, da (i) die iktale SPECT in etwa einem Drittel aller Fälle einen eindeutigen Kandidaten für die Anfallsursprungszone liefert und (ii) in diesen Fällen die Kombination mit einer interiktalen SPECT nur sehr selten zu einer Änderung der Lateralisierung führt [77].
- Zwischen interiktaler und iktaler SPECT sollten mindestens 24 Stunden liegen.
- Wenn ausschließlich eine interiktale Untersuchung geplant ist, sollte der [18F]FDG-PET der Vorzug gegenüber der CBF-SPECT gegeben werden.

- Bei der interiktalen SPECT sollte der Patient von mindestens 2 Stunden vor bis mindestens 5 Minuten nach der Injektion des Radiopharmakons anfallsfrei sein. Am besten kann dies durch EEG-Überwachung sichergestellt werden [78].
- Für iktale Untersuchungen soll die Injektion des Radiopharmakons so schnell wie möglich nach Anfallsbeginn erfolgen, um Sekundäreffekte (Anfallsausbreitung, postictal switch, *surround inhibition*), die die Identifikation der Anfallsurspungszone erschweren können, zu reduzieren.
- „Postiktale“ Untersuchungen mit verlängerter Latenzzeit ( $\geq 2$  Minuten) zwischen Anfallsbeginn und Injektion des Radiopharmakons sollen vermieden werden [79-81].
- Durch Einsatz eines semi-automatischen Injektors (mit manuellem Start) kann die Latenzzeit zwischen Anfallsbeginn und Injektion des Radiopharmakons verkürzt werden [82]. Eine vollautomatische EEG-gesteuerte Injektion wird nicht empfohlen (erhöhtes Risiko von Fehlinjektion ohne Vorliegen eines Anfalls).
- Die Injektion des Radiopharmakons für die iktale Untersuchung sollte unter Video-EEG-Überwachung erfolgen, sodass der Zeitpunkt des Anfallsbeginns, die Latenzzeit zwischen Anfallsbeginn und Injektion sowie die Dauer des Anfalls genau bestimmt werden können.
- Bei sehr kurzer ( $\leq 15$ s) Dauer des Anfalls nach Injektion des Radiopharmakons erreicht das Radiopharmakon das Gehirn erst nach Anfallsende. Falls die Untersuchung dann eine normale Perfusion zeigt, kann eine Wiederholung der iktalen SPECT sinnvoll sein [83].
- Weitere Empfehlungen zur Beurteilung der CBF-SPECT bei dieser Fragestellung finden sich im Supplement zu [77]. Darüber hinaus sei auf die Durchführungsempfehlungen der Europäischen Gesellschaft für Nuklearmedizin zu PET und SPECT bei Patienten mit Epilepsie verwiesen [5].

### **9.3 Frage nach irreversiblen Funktionsausfall („Hirntoddiagnostik“)**

- Bei Frage nach irreversiblen Funktionsausfall soll nach den Vorgaben der "Richtlinie ... zur Feststellung des Todes und die Verfahrensregeln zur Feststellung des endgültigen, nicht behebbaren Ausfalls der Gesamtfunktion des Großhirns, des Kleinhirns und des Hirnstamms ..." [4] in der aktuell gültigen Fassung verfahren werden.
- Bei einem großen Anteil der Patienten mit Verdacht auf irreversiblen Funktionsausfall und unklarem Befund in der Doppler-/Duplexsonographie führt die CBF-SPECT zum Nachweis eines irreversiblen Funktionsausfalls [84].

## **10. Offene Punkte**

- Zum Einsatz deep learning-basierter Methoden in der CBF-SPECT liegen derzeit noch keine ausreichenden Erfahrungen vor. Rauschunterdrückung (denoising, image enhancement), Schwächungskorrektur [85, 86], automatische Beurteilung der SPECT-Bilder [87-89] und Transformation unstrukturierter Freitext-Befundbriefe in strukturierte Befundbriefe [89] stellen besonders vielsprechende Anwendungen dar.

## **11. Danksagung**

Die Autoren danken den ehemaligen Autoren P. Bartenstein (Ludwig-Maximilians Universität Klinikum, München), P. Brust (Universität Leipzig), B. J. Krause (Universitätsklinikum, Rostock), K.-J. Langen (Forschungszentrum Jülich), K. Tatsch (Städtisches Klinikum Karlsruhe) und O. Sabri (Universität Leipzig) für die Mitarbeit bei früheren Versionen dieser Handlungsempfehlung.

## 12. Vorbehaltserklärung

Die Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin gibt Leitlinien heraus, um die Anwendung von Untersuchungsverfahren und Behandlungsmethoden in der Nuklearmedizin zu fördern. Diese Art von Empfehlungen gilt nicht für alle Gegebenheiten in der Praxis. Die Leitlinien sollen nicht den Anspruch erheben, dass sie alle in Frage kommenden Verfahren enthielten oder dass sie Methoden, die zum gleichen Ergebnis führen, ausschließen würden. Ob ein Untersuchungsverfahren angemessen ist, hängt zum Teil von der Prävalenz der Erkrankung in der Patientenpopulation ab. Außerdem können sich die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten in verschiedenen medizinischen Einrichtungen unterscheiden. Aus diesen Gründen dürfen Leitlinien nicht starr angewendet werden.

Fortschritte in der Medizin vollziehen sich schnell. Deshalb muss bei der Anwendung einer Leitlinie auf ihr Entstehungsdatum geachtet werden.

## 13. Literatur

1. Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V. (Hrsg.). Autoren: Kranert T, Bartenstein P, Barthel H et al.. DGN-Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie): Hirnperfusions-SPECT mit Tc-99m-Radiopharmaka. Version 3, 09/2019. AWMF-Registernummer 031-016
2. Deutsche Gesellschaft für Neurologie e.V. & Deutsche Gesellschaft für Psychiatrie und Psychotherapie, Psychosomatik und Nervenheilkunde e.V. (Hrsg.). S3-Leitlinie Demenzen. Version 5.2, 17 Jul 2025. AWMF-Registernummer 038-013. DOI: <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/038-013>
3. Deutsche Gesellschaft für Neurologie e.V. (Hrsg.). Autoren: Holtkamp M, May TW, Berkenfeld R et al.. Erster epileptischer Anfall und Epilepsien im Erwachsenenalter, S2k-Leitlinie. Version 6.0, 01 Sep 2023. AWMF-Registernummer 030-041. DOI: <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/030-041>
4. Bundesministerium für Gesundheit. Richtlinie gemäß § 16 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 TPG für die Regeln zur Feststellung des Todes nach § 3 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 TPG und die Verfahrensregeln zur Feststellung des endgültigen, nicht behebbaren Ausfalls der Gesamtfunktion des Großhirns, des Kleinhirns und des Hirnstamms nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 TPG. In: Fünfte Fortschreibung Bekanntmachung 08072022
5. Traub-Weidinger T, Arbizu J, Barthel H et al. EANM practice guidelines for an appropriate use of PET and SPECT for patients with epilepsy. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2024; 51: 1891-1908. DOI: 10.1007/s00259-024-06656-3
6. Zentraler Erfahrungsaustausch der Ärztlichen Stellen nach §128 StrlSchV (Hrsg.). Einheitliches Bewertungssystem der Ärztlichen Stellen nach § 128 StrlSchV Nuklearmedizin, Version 10.00, 2023. [https://www.aekno.de/fileadmin/user\\_upload/aekno/downloads/2024/einheitliches-bewertungssystem-version10-2023-10.pdf](https://www.aekno.de/fileadmin/user_upload/aekno/downloads/2024/einheitliches-bewertungssystem-version10-2023-10.pdf)
7. ICRP (Hrsg.). Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128, 2015, Ann ICRP 44(2S)
8. Juni JE, Waxman AD, Devous MD et al. Procedure Guideline for Brain Perfusion SPECT Using 99mTc Radiopharmaceuticals 3.0. *Journal of Nuclear Medicine Technology* 2009; 37: 191-195. DOI: 10.2967/jnmt.109.067850

9. Kapucu ÖL, Nobili F, Varrone A et al. EANM procedure guideline for brain perfusion SPECT using Tc-labelled radiopharmaceuticals, version 2. *Eur J Nucl Med Mol I* 2009; 36: 2093-2102. DOI: 10.1007/s00259-009-1266-y
10. Pavel DG, Henderson TA, DeBruin S. The Legacy of the TTASAAN Report- Premature Conclusions and Forgotten Promises: A Review of Policy and Practice Part I. *Front Neurol* 2021; 12: 749579. DOI: 10.3389/fneur.2021.749579
11. Pavel DG, Henderson TA, DeBruin S et al. The Legacy of the TTASAAN Report - Premature Conclusions and Forgotten Promises About SPECT Neuroimaging: A Review of Policy and Practice Part II. *Front Neurol* 2022; 13: 851609. DOI: 10.3389/fneur.2022.851609
12. Herzog H. Basic ideas and principles for quantifying regional blood flow with nuclear medical techniques. *Nuklearmed-Nucl Med* 1996; 35: 181-185.
13. Wintermark M, Sesay M, Barbier E et al. Comparative overview of brain perfusion imaging techniques. *Stroke* 2005; 36: E83-E99. DOI: 10.1161/01.STR.0000177884.72657.8b
14. Ponisio MR, Zempel JM, Day BK et al. The Role of SPECT and PET in Epilepsy. *AJR Am J Roentgenol* 2021; 216: 759-768. DOI: 10.2214/AJR.20.23336
15. von Oertzen TJ. PET and ictal SPECT can be helpful for localizing epileptic foci. *Curr Opin Neurol* 2018; 31: 184-191. DOI: 10.1097/Wco.0000000000000527
16. Günther A, Werner A, Fritzenwanger M et al. Determination of brain death using Tc-HMPAO scintigraphy and transcranial duplex sonography in a patient on veno-arterial ECMO. *Neurol Res Pract* 2024; 6. DOI: ARTN 610.1186/s42466-023-00298-w
17. Zuckier LS, Brendel M, Cecchin D et al. The SNMMI/EANM Practice Guideline for Radionuclide Brain Perfusion Scintigraphy in Suspected Death by Neurologic Criteria (Brain Death) 3.0 Updated from 2012. In: Society of Nuclear Medicine & Molecular Imaging; DOI: <https://snmmi.org/Web/Clinical-Practice/Procedure-Standards/Standards/Brain-Death-Scintigraphy-3-0>
18. Wong TH, Shagera QA, Ryoo HG et al. Basal and Acetazolamide Brain Perfusion SPECT in Internal Carotid Artery Stenosis. *Nucl Med Mol Imaging* 2020; 54: 9-27. DOI: 10.1007/s13139-019-00633-7
19. Bartenstein P, Grünwald F, Kuwert T et al. Clinical applications of single photon emission tomography in neuromedicine Part 1:: Neuro-oncology, epilepsy, movement disorders, cerebrovascular disease. *Nuklearmed-Nucl Med* 2000; 39: 180-195.
20. Pavics L, Grünwald F, Reichmann K et al. Regional cerebral blood flow single-photon emission tomography with 99mTc-HMPAO and the acetazolamide test in the evaluation of vascular and Alzheimer's dementia. *Eur J Nucl Med* 1999; 26: 239-245. DOI: 10.1007/s002590050383
21. Athanasio BS, Oliveira ACS, Pedrosa AL et al. The role of brain perfusion SPECT in the diagnosis of frontotemporal dementia: A systematic review. *J Neuroimaging* 2024; 34: 308-319. DOI: 10.1111/jon.13189
22. Imokawa T, Yokoyama K, Takahashi K et al. Brain perfusion SPECT in dementia: what radiologists should know. *Jpn J Radiol* 2024; 42: 1215-1230. DOI: 10.1007/s11604-024-01612-5
23. Döbert N, Pantel J, Frölich L et al. Diagnostic value of FDG-PET and HMPAO-SPET in patients with mild dementia and mild cognitive impairment: metabolic index and perfusion index. *Dement Geriatr Cogn Disord* 2005; 20: 63-70. DOI: 10.1159/000085857
24. Nadebaum DP, Krishnadas N, Poon AMT et al. Head-to-head comparison of cerebral blood flow single-photon emission computed tomography and (18) F-fluoro-2-

- deoxyglucose positron emission tomography in the diagnosis of Alzheimer disease. *Intern Med J* 2021; 51: 1243-1250. DOI: 10.1111/imj.14890
25. O'Brien JT, Firbank MJ, Davison C et al. 18F-FDG PET and perfusion SPECT in the diagnosis of Alzheimer and Lewy body dementias. *J Nucl Med* 2014; 55: 1959-1965. DOI: 10.2967/jnumed.114.143347
  26. Kong E, Park D, Chang MC. Prediction of motor outcome based on brain perfusion single photon emission computed tomography in corona radiata infarct. *Int J Neurosci* 2024; 134: 1470-1476. DOI: 10.1080/00207454.2023.2269476
  27. Koziarz A, Koziarz F, Shen R et al. Diagnostic Accuracy of SPECT for Mild Traumatic Brain Injury: A Systematic Review and Meta-analysis. *Clin Nucl Med* 2024; 49: 938-947. DOI: 10.1097/rlu.0000000000005328
  28. Šiško Markoš I, Blažeković I, Peitl V et al. Psychiatric Illness or Immune Dysfunction-Brain Perfusion Imaging Providing the Answer in a Case of Anti-NMDAR Encephalitis. *Diagnostics (Basel)* 2022; 12. DOI: 10.3390/diagnostics12102377
  29. Numahata K, Miyamoto T, Akaiwa Y et al. Brain Perfusion Single-Photon Emission Computed Tomography Using an Easy Z-Score Imaging System Predicts Progression to Neurodegenerative Dementia in Rapid Eye Movement Sleep Behavior Disorder. *Dement Geriatr Cogn Disord* 2021; 50: 577-584. DOI: 10.1159/000521645
  30. Rahayel S, Postuma R, Baril AA et al. (99m)Tc-HMPAO SPECT Perfusion Signatures Associated With Clinical Progression in Patients With Isolated REM Sleep Behavior Disorder. *Neurology* 2024; 102: e208015. DOI: 10.1212/wnl.0000000000208015
  31. Onodera K, Ooigawa H, Tabata S et al. Effect of revascularization surgery on cerebral hemodynamics in adult moyamoya disease. *Clin Neurol Neurosurg* 2024; 239: 108180. DOI: 10.1016/j.clineuro.2024.108180
  32. Weijs RWJ, Shkredova DA, Brekelmans ACM et al. Longitudinal changes in cerebral blood flow and their relation with cognitive decline in patients with dementia: Current knowledge and future directions. *Alzheimers Dement* 2023; 19: 532-548. DOI: 10.1002/alz.12666
  33. Tepmongkol S, Hemrungron S, Dupont P et al. Early prediction of donepezil cognitive response in Alzheimer's disease by brain perfusion single photon emission tomography. *Brain Imaging Behav* 2019; 13: 1665-1673. DOI: 10.1007/s11682-019-00182-9
  34. Deutsche Gesellschaft für Gerontologie und Geriatrie e.V., Deutsche Gesellschaft für Psychiatrie und Psychotherapie, Psychosomatik und Nervenheilkunde e.V., Deutsche Gesellschaft für Neurologie e.V. (Hrsg.). S2k-Leitlinie Einwilligung von Menschen mit Demenz in medizinische Maßnahmen. Version 1, 31 Oct 2019. AWMF-Registernummer 108-001. DOI: <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/108-001>
  35. GE Healthcare (Hrsg.). Fachinformation Stabilised Ceretec™. 09/2008;
  36. Lantheus MI UK Limited (Hrsg.). Fachinformation Neurolite 99mTechnetiumbiscisat-Injektion - Kit für ein radioaktives Arzneimittel. 20.07.2012
  37. Bordonne M, Chawki MB, Marie PY et al. High-quality brain perfusion SPECT images may be achieved with a high-speed recording using 360° CZT camera. *EJNMMI Phys* 2020; 7: 65. DOI: 10.1186/s40658-020-00334-7
  38. Bordonne M, Marie PY, Imbert L et al. Brain perfusion SPECT acquired using a dedicated brain configuration on a 360° whole-body CZT-camera. *J Neuroradiol* 2020; 47: 180-181. DOI: 10.1016/j.neurad.2019.11.002

39. Verger A, Cecchin D, Guedj E et al. EANM perspectives for CZT SPECT in brain applications. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2024; 51: 3680-3684. DOI: 10.1007/s00259-024-06788-6
40. Adriaanse SM, de Wit TC, Stam M et al. Clinical evaluation of [(123)I]FP-CIT SPECT scans on the novel brain-dedicated InSPira HD SPECT system: a head-to-head comparison. *EJNMMI Res* 2018; 8: 85. DOI: 10.1186/s13550-018-0436-y
41. Varrone A, Pagani M, Salvatore E et al. Identification by [99mTc]ECD SPECT of anterior cingulate hypoperfusion in progressive supranuclear palsy, in comparison with Parkinson's disease. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2007; 34: 1071-1081. DOI: 10.1007/s00259-006-0344-7
42. El Fakhri G, Ouyang J, Zimmerman RE et al. Performance of a novel collimator for high-sensitivity brain SPECT. *Med Phys* 2006; 33: 209-215. DOI: 10.1118/1.2143140
43. Kalluri KS, Zeraatkar N, Auer B et al. Examination of aperture layout designs for an adaptive-stationary multi-pinhole brain-dedicated SPECT system. *Med Phys* 2025. DOI: 10.1002/mp.17866
44. Képes Z, Kukuts K, Oszlászki A et al. Initial clinical experience with dedicated multi-pinhole (MPH) collimator for (99m)Tc-HMPAO brain perfusion SPECT. *Hell J Nucl Med* 2022; 25: 143-147. DOI: 10.1967/s002449912474
45. Pareto D, Pavia J, Falcon C et al. Characterisation of fan-beam collimators. *Eur J Nucl Med* 2001; 28: 144-149. DOI: 10.1007/s002590000436
46. Shibutani T, Onoguchi M, Nishiyama T et al. Image characteristics of brain perfusion SPECT/CT using a new multi-focal collimator: Comparison with conventional SPECT with LEHR collimator. *Journal of Nuclear Medicine* 2022; 63.
47. Ozsahin I, Chen L, Konik A et al. The clinical utilities of multi-pinhole single photon emission computed tomography. *Quant Imaging Med Surg* 2020; 10: 2006-2029. DOI: 10.21037/qims-19-1036
48. Van Audenhaege K, Van Holen R, Vandenberghe S et al. Review of SPECT collimator selection, optimization, and fabrication for clinical and preclinical imaging. *Med Phys* 2015; 42: 4796-4813. DOI: 10.1118/1.4927061
49. Gottschalk SC, Salem D, Lim CB et al. Spect Resolution and Uniformity Improvements by Non-Circular Orbit. *Journal of Nuclear Medicine* 1983; 24: 822-828.
50. Bai J, Hashimoto J, Ogawa K et al. Effect of scatter and attenuation correction in ROI analysis of brain perfusion scintigraphy - Phantom experiment and clinical study in patients with unilateral cerebrovascular disease. *Nuklearmed-Nucl Med* 2007; 46: 101-106. DOI: 10.1160/nukmed-0018
51. Gillen R, Firbank MJ, Lloyd J et al. CT-based attenuation and scatter correction compared with uniform attenuation correction in brain perfusion SPECT imaging for dementia. *Physics in Medicine and Biology* 2015; 60: 6775-6787. DOI: 10.1088/0031-9155/60/17/6775
52. Nakashima M, Yamazaki Y. Evaluation of attenuation correction method for head holder in brain perfusion single-photon emission computed tomography. *Radiol Phys Technol* 2024; 17: 322-328. DOI: 10.1007/s12194-024-00778-x
53. Matsuda H. Quantification in Brain SPECT: Noninvasive Cerebral Blood Flow Measurements Using 99mTc-Labeled Tracers. In: Dierckx RAJO, Otte A, de Vries EFJ et al., Hrsg. *PET and SPECT in Neurology*. Springer; 2021: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53168-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53168-3_3)
54. BouSSION N, RYVLIN P, ISNARD J et al. Towards an optimal reference region in single-photon emission tomography difference images in epilepsy. *Eur J Nucl Med* 2000; 27: 155-160. DOI: 10.1007/s002590050021

55. Van Laere KJ, Warwick J, Versijpt J et al. Analysis of clinical brain SPECT data based on anatomic standardization and reference to normal data: an ROC-based comparison of visual, semiquantitative, and voxel-based methods. *J Nucl Med* 2002; 43: 458-469.
56. Leveille J, Demonceau G, Walovitch RC. Intrasubject Comparison between Technetium-99m-Ecd and Technetium-99m-Hmpao in Healthy-Human Subjects. *Journal of Nuclear Medicine* 1992; 33: 480-484.
57. Matsuda H, Li YM, Higashi S et al. Comparative SPECT study of stroke using Tc-99m ECD, I-123 IMP, and Tc-99m HMPAO. *Clin Nucl Med* 1993; 18: 754-758. DOI: 10.1097/00003072-199309000-00005
58. Tsuchida T, Nishizawa S, Yonekura Y et al. SPECT images of technetium-99m-ethyl cysteinat dimer in cerebrovascular diseases: comparison with other cerebral perfusion tracers and PET. *J Nucl Med* 1994; 35: 27-31.
59. van Dyck CH, Lin CH, Smith EO et al. Comparison of technetium-99m-HMPAO and technetium-99m-ECD cerebral SPECT images in Alzheimer's disease. *J Nucl Med* 1996; 37: 1749-1755.
60. Inoue K, Nakagawa M, Goto R et al. Regional differences between 99mTc-ECD and 99mTc-HMPAO SPET in perfusion changes with age and gender in healthy adults. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2003; 30: 1489-1497. DOI: 10.1007/s00259-003-1234-x
61. Asenbaum S, Brucke T, Pirker W et al. Imaging of cerebral blood flow with technetium-99m-HMPAO and technetium-99m-ECD: a comparison. *J Nucl Med* 1998; 39: 613-618.
62. Miyazawa N, Koizumi K, Mitsuka S et al. Discrepancies in brain perfusion SPECT findings between Tc-99m HMPAO and Tc-99m ECD: evaluation using dynamic SPECT in patients with hyperemia. *Clin Nucl Med* 1998; 23: 686-690. DOI: 10.1097/00003072-199810000-00008
63. Taherpour J, Jaber M, Voges B et al. Predicting the Outcome of Epilepsy Surgery by Covariance Pattern Analysis of Ictal Perfusion SPECT. *J Nucl Med* 2022; 63: 925-930. DOI: 10.2967/jnumed.121.262702
64. Van Laere K, Versijpt J, Audenaert K et al. 99mTc-ECD brain perfusion SPET: variability, asymmetry and effects of age and gender in healthy adults. *Eur J Nucl Med* 2001; 28: 873-887. DOI: 10.1007/s002590100549
65. Shin S, Kim K, Nam HY et al. Sex difference in cerebral blood flow and cerebral glucose metabolism: an activation-likelihood estimation meta-analysis. *Nucl Med Commun* 2021; 42: 410-415. DOI: 10.1097/mnm.0000000000001343
66. Gur RC, Gur RE, Obrist WD et al. Sex and handedness differences in cerebral blood flow during rest and cognitive activity. *Science* 1982; 217: 659-661. DOI: 10.1126/science.7089587
67. Shibutani T, Onoguchi M, Yoneyama H et al. Impact of calibration methods for color medical displays on interpreting brain SPECT images. *Med Phys* 2019; 46: 2580-2588. DOI: 10.1002/mp.13532
68. Mugikura S, Fujimura M, Takahashi S. Implications of Off-Label Use of Acetazolamide in the Management of Moyamoya Disease in Japan. *Radiology* 2016; 279: 652-653. DOI: 10.1148/radiol.2016152305
69. Vagal AS, Leach JL, Fernandez-Ulloa M et al. The acetazolamide challenge: techniques and applications in the evaluation of chronic cerebral ischemia. *AJNR Am J Neuroradiol* 2009; 30: 876-884. DOI: 10.3174/ajnr.A1538

70. Weber B, Westera G, Treyer V et al. Constant-infusion H(2)15O PET and acetazolamide challenge in the assessment of cerebral perfusion status. *J Nucl Med* 2004; 45: 1344-1350.
71. Acker G, Lange C, Schatka I et al. Brain Perfusion Imaging Under Acetazolamide Challenge for Detection of Impaired Cerebrovascular Reserve Capacity: Positive Findings with (15)O-Water PET in Patients with Negative (99m)Tc-HMPAO SPECT Findings. *J Nucl Med* 2018; 59: 294-298. DOI: 10.2967/jnumed.117.195818
72. Henriksen AC, Thomsen GK, Knudsen GM et al. Physiological provocation compared to acetazolamide in the assessment of cerebral hemodynamics: a case report. *EJNMMI Res* 2024; 14: 89. DOI: 10.1186/s13550-024-01154-x
73. Jaber M, Taherpour J, Voges B et al. No Evidence to Favor 99mTc-HMPAO or 99mTc-ECD for Ictal Brain Perfusion SPECT for Identification of the Seizure Onset Zone. *Clin Nucl Med* 2021; 46: 890-895. DOI: 10.1097/rlu.0000000000003791
74. Oliveira Young C, Etchbehre E, Souza EM et al. Clinical Usefulness of SISCOM-SPM Compared to Visual Analysis to Locate the Epileptogenic Zone. *Front Neurol* 2020; 11: 467. DOI: 10.3389/fneur.2020.00467
75. Apostolova I, Lindenau M, Fiehler J et al. Detection of a possible epilepsy focus in a preoperated patient by perfusion SPECT and computer-aided subtraction analysis. *Nuklearmedizin* 2008; 47: N65-68.
76. Perissinotti A, Ninerola-Baizan A, Rubi S et al. PISCOM: a new procedure for epilepsy combining ictal SPECT and interictal PET. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2018; 45: 2358-2367. DOI: 10.1007/s00259-018-4080-6
77. Baradaran-Salimi K, Karimzadeh A, Voges B et al. Brain perfusion SPECT in the presurgical evaluation of epilepsy: is additional ictal SPECT required in case of high-confidence lateralization of the seizure onset zone by interictal SPECT and vice versa? *EJNMMI Res* 2024; 14: 83. DOI: 10.1186/s13550-024-01149-8
78. Rogeau A, Lilburn DML, Kaplar Z et al. Identifying and troubleshooting the pitfalls of ictal/interictal brain perfusion SPECT studies. *Nucl Med Commun* 2023; 44: 1053-1058. DOI: 10.1097/mnm.0000000000001755
79. Newton MR, Berkovic SF, Austin MC et al. Postictal switch in blood flow distribution and temporal lobe seizures. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1992; 55: 891-894. DOI: 10.1136/jnnp.55.10.891
80. Newton MR, Berkovic SF, Austin MC et al. Ictal postictal and interictal single-photon emission tomography in the lateralization of temporal lobe epilepsy. *Eur J Nucl Med* 1994; 21: 1067-1071. DOI: 10.1007/BF00181061
81. Rowe CC, Berkovic SF, Sia ST et al. Localization of epileptic foci with postictal single photon emission computed tomography. *Ann Neurol* 1989; 26: 660-668. DOI: 10.1002/ana.410260512
82. Setoain X, Campos F, Donaire A et al. How to inject ictal SPECT? From manual to automated injection. *Epilepsy Res* 2021; 175. DOI: ARTN 10669110.1016/j.epilepsyres.2021.106691
83. Karimzadeh A, Baradaran-Salimi K, Voges B et al. Short post-injection seizure duration is associated with reduced power of ictal brain perfusion SPECT to lateralize the seizure onset zone. *EJNMMI Res* 2024; 14: 40. DOI: 10.1186/s13550-024-01095-5
84. Gutgold A, Shorbaji N, Epstein D et al. The role of single positron emission computed tomography imaging in the diagnosis of brain death whenever Trans-cranial Doppler fails to support it: A retrospective cohort study. *Clin Transplant* 2023; 37: e15003. DOI: 10.1111/ctr.15003

85. Chen Y, Goorden MC, Beekman FJ. Automatic attenuation map estimation from SPECT data only for brain perfusion scans using convolutional neural networks. *Phys Med Biol* 2021; 66: 065006. DOI: 10.1088/1361-6560/abe557
86. Murata T, Yokota H, Yamato R et al. Development of attenuation correction methods using deep learning in brain-perfusion single-photon emission computed tomography. *Med Phys* 2021; 48: 4177-4190. DOI: 10.1002/mp.15016
87. Ni YC, Tseng FP, Pai MC et al. The Feasibility of Differentiating Lewy Body Dementia and Alzheimer's Disease by Deep Learning Using ECD SPECT Images. *Diagnostics (Basel)* 2021; 11. DOI: 10.3390/diagnostics11112091
88. Ni YC, Tseng FP, Pai MC et al. Detection of Alzheimer's disease using ECD SPECT images by transfer learning from FDG PET. *Ann Nucl Med* 2021; 35: 889-899. DOI: 10.1007/s12149-021-01626-3
89. Ryoo HG, Choi H, Lee DS. Deep learning-based interpretation of basal/acetazolamide brain perfusion SPECT leveraging unstructured reading reports. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2020; 47: 2186-2196. DOI: 10.1007/s00259-019-04670-4

Versionsnummer:	5.0
Erstveröffentlichung:	12/1999
Letzte inhaltliche Überarbeitung:	09/2025
Nächste Überprüfung geplant:	09/2030

Die AWMF erfasst und publiziert die Leitlinien der Fachgesellschaften mit größtmöglicher Sorgfalt - dennoch kann die AWMF für die Richtigkeit des Inhalts keine Verantwortung übernehmen. **Insbesondere bei Dosierungsangaben sind stets die Angaben der Hersteller zu beachten!**

Autorisiert für elektronische Publikation: AWMF online