
Richtlinie der Kommission Irreversibler Hirnfunktionsausfall

Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Klinische Neurophysiologie und Funktionelle Bildgebung e.V. zur Diagnostik des irreversiblen Hirnfunktionsausfalls

1. Einleitung

Ein spezielles Verfahren zur Feststellung des Todes ist die Diagnostik des irreversiblen Hirnfunktionsausfalls, d.h. des endgültigen, nicht behebbaren Ausfalls der Gesamtfunktion des Großhirns, des Kleinhirns und des Hirnstamms bei intensivmedizinisch aufrecht erhaltener Beatmung und Herz-Kreislauf-Funktion.

Die Diagnose des irreversiblen Hirnfunktionsausfalls (sog. „Hirntoddiagnostik“) stützt sich auf die von der Bundesärztekammer festgelegte Richtlinie (1). Die Beachtung dieser Richtlinie ist nach § 16 Abs. 1 Ziffer 1 des Transplantationsgesetzes zwingend vorgeschrieben. Wenn die Voraussetzungen zur Hirntoddiagnostik erfüllt sind, muss der Hirnfunktionsausfall klinisch nachgewiesen werden und seine Irreversibilität dokumentiert werden.

Der Irreversibilitätsnachweis des Hirnfunktionsausfalls ist möglich durch

- eine weitere klinische Untersuchung nach einer definierten Beobachtungszeit oder
- ergänzende apparative Untersuchungen.

Bei primären infratentoriellen Hirnschädigungen und kombinierten Hirnschädigungen mit primärer Beteiligung der infratentoriellen Hirnanteile muss zwingend eine ergänzende apparative Untersuchung (Nachweis des isoelektrischen EEGs oder des zerebralen Zirkulationsstillstandes) angewendet werden. Bei reifen Neugeborenen (≥ 37 Schwangerschaftswochen postmenstruell und im Lebensalter von 0 – 28 Tagen) und bei Kindern bis zum vollendeten zweiten Lebensjahr müssen zum Nachweis der Irreversibilität des Hirnfunktionsausfalls zwei klinische Untersuchungen mit besonders vorgegebener Beobachtungszeit (mindestens 72 bzw. 24 Stunden) und zusätzlich zu jeder klinischen Untersuchung eine geeignete ergänzende apparative Untersuchung (Nachweis des isoelektrischen EEGs oder des Erlöschens bzw. des Ausfalls der intrazerebralen Komponenten der frühen akustisch evozierten Potenziale oder des zerebralen Zirkulationsstillstandes) erfolgen.

Die ergänzenden apparativen Untersuchungen werden im Rahmen der Feststellung des irreversiblen Hirnfunktionsausfalls nach der klinischen Untersuchung eingesetzt. Als ergänzende Untersuchungen kommen für den Geltungsbereich der DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR KLINISCHE NEUROPHYSIOLOGIE UND FUNKTIONELLE BILDGEBUNG (DGKN) E.V.

- elektrophysiologische (Elektroenzephalografie [EEG], frühe akustisch evozierte Potenziale [FAEP] oder somatosensorisch evozierte Potenziale [SEP]) oder
- neurovaskuläre (Dopplersonografie, Duplexsonografie)

Untersuchungen in Frage. Die hier formulierten Empfehlungen zu den ergänzenden neurophysiologischen Untersuchungen sind eine Fortschreibung der Empfehlungen der DGKN aus dem Jahr 2001 (2), zuletzt aktualisiert im Jahr 2018 (3), in Anbindung an die aktuelle fünfte Fortschreibung der Richtlinie der Bundesärztekammer (1).

Für den Einsatz ergänzender neurophysiologischer Untersuchungen gelten teilweise einschränkende Voraussetzungen, ohne deren Beachtung ein Ausfall elektrophysiologischer Potenziale vorgetäuscht werden könnte. Diese entsprechen den Einschränkungen, die gemäß Richtlinie der Bundesärztekammer schon bei der Untersuchung der klinischen Symptome des Hirnfunktionsausfalls zu beachten sind:

- primäre Unterkühlung,
- Kreislaufschock,
- metabolische oder endokrine Entgleisungen,
- Intoxikation und dämpfende Wirkung von Medikamenten.

2. Ergänzende elektrophysiologische Untersuchungen

2.1 ELEKTROENZEPHALOGRAFIE (EEG)

Die EEG-Registrierung ist eine besonders geeignete elektrophysiologische Methode zum Irreversibilitätsnachweis des Hirnfunktionsausfalls, da sie bei primären infratentoriellen, primären supratentoriellen und auch sekundären Hirnschädigungen eingesetzt werden kann und bei technisch einwandfreier Ableitung immer ein verwertbares Ergebnis liefert (4, 5). Bei primären infratentoriellen Hirnschädigungen muss das Erlöschensein der kortikalen Aktivität durch das EEG dokumentiert werden, sofern nicht alternativ der zerebrale Zirkulationsstillstand festgestellt wurde (1). Wird – bei Vorliegen der klinischen Ausfallsymptome der Hirnfunktion – während einer kontinuierlichen Ableitung des EEG über mindestens 30 Minuten eine elektrozerebrale Inaktivität (isoelektrisches EEG, Null-Linien-EEG) registriert, so kann – außer bei Neugeborenen und Kindern bis zum vollendeten zweiten Lebensjahr – der irreversible Hirnfunktionsausfall ohne weitere Beobachtungszeit festgestellt werden. Wegen der physiologischen Unreife des Gehirns muss neben der klinischen Untersuchung auch die EEG-Registrierung bei reifen Neugeborenen (≥ 37 Schwangerschaftswochen postmenstruell und im Lebensalter von 0 – 28 Tagen) nach 72 Stunden bzw. bei Kindern ab dem Lebensalter von 29 Tagen bis zum vollendeten zweiten Lebensjahr nach 24 Stunden wiederholt werden, bevor der irreversible Hirnfunktionsausfall festgestellt werden kann.

Nach hypoxischen Hirnschädigungen können in der Frühphase erhebliche Amplitudendepressionen im EEG nachweisbar sein, die nur durch exakte Beachtung der Ableitbedingungen vom Null-Linien-EEG beim irreversiblen Hirnfunktionsausfall abzugrenzen sind (6-8) (siehe Ableitetechnik). Hinsichtlich des Ausschlusses von Intoxikation und dämpfender Wirkung von Medikamenten gilt die Richtlinie der Bundesärztekammer (1). Insbesondere nach therapeutischer Hypothermie kann eine verzögerte Elimination von sedierenden Medikamenten vorliegen, so dass der Einsatz des EEG nur nach sorgfältiger Abwägung der Eliminationskinetik dieser Medikamente bzw. unter Gabe von entsprechenden Antidota erfolgen sollte (9).

Das EEG muss gemäß den Empfehlungen der DGKN (siehe Ableitetechnik) abgeleitet werden und muss von einem darin erfahrenen Arzt¹ kontrolliert und beurteilt werden (1). Der Befundbericht soll neben den üblichen Informationen (Fragestellung, Befundbeschreibung, Beurteilung) die folgenden Angaben enthalten: Ableitezeitraum (Datum, Uhrzeit von [Beginn der Ableitung] bis [Ende der Ableitung]), Namen des an der Untersuchung beteiligten Medizinischen Technologen (frühere Berufsbezeichnung: medizinisch-technischer Assistent) und des untersuchenden/befundenden Arztes, Ableitung gemäß DGKN-Empfehlungen erfolgt (ja/nein, ggf. Erläuterung), Art der festgestellten Artefakte bei den beiden gewählten Verstärkereinstellungen, Form der Archivierung des abgeleiteten EEG (Papierausdruck oder digital).

Ableitetechnik

1. Die Beurteilung muss sich auf eine mindestens 30 Minuten einwandfrei auswertbare, artefaktarme EEG-Registrierung stützen.
2. Den jeweiligen Umständen entsprechend kann mit gesinterten Ag/AgCl-Elektroden oder mit Platin- bzw. Stahlnadelelektroden abgeleitet werden. Stahlnadelelektroden zeigen bei ungünstigen Verstärkereigenschaften Polarisierungseffekte. Daher muss für die gewählte Kombination aus Verstärker und Elektrode vorher sichergestellt sein, dass eine technisch stabile EEG-Ableitung über entsprechend lange Zeiten gewährleistet ist.
3. Die Elektroden sind nach dem 10-20-System zu setzen, wobei pro Seite mindestens eine frontale (vorzugsweise Fp1 und Fp2, alternativ F3 bzw. F4 oder F7 bzw. F8), eine temporale (vorzugsweise T3 und T4, alternativ T5 bzw. T6), eine zentrale bzw. parietale (vorzugsweise C3 und C4, alternativ P3 bzw. P4) und die okzipitale (O1 und O2, bei Kopfverletzung alternativ benachbarte Lokalisation) Elektrode zu setzen und abzuleiten sind (10). Die Ableitprogramme sollen auch Abgriffe mit doppelten Elektrodenabständen beinhalten, z. B. Fp1-C3, F3-P3 usw. Als Beispiel kann folgendes Acht-Kanal-Ableiteschema verwendet werden: Fp2-C4, C4-O2, Fp1-C3, C3-O1, Fp2-T4, T4-O2, Fp1-T3, T3-O1.

Bei der heutigen digitalen EEG-Technik sind für die Auswertung Montagen zu verwenden, die obige Empfehlungen berücksichtigen. Der Bildschirm muss mindestens 8 Kanäle darstellen. Die Darstellung der Kanäle ist bei digitalen Geräten variabel, sollte aber alle die o. a. mindestens zu setzenden 8 Elektroden anzeigen.

4. Die Elektrodenübergangswiderstände sollen zwischen 1 und 10 Kiloohm liegen und untereinander möglichst gleich niedrig sein (Unterschied möglichst ≤ 5 Kiloohm²). Wegen der unterschiedlichen Ableiteigenschaften von

¹ Die in diesen Empfehlungen verwendeten Personen- und Berufsbezeichnungen beziehen sich auf alle Geschlechter.

² Diese Vorgabe ist noch nicht Bestandteil der Richtlinie der Bundesärztekammer (1).

Oberflächen- und Nadelelektroden sollten bei einer Ableitung nur gleichartige Elektroden verwendet werden.² Eine Änderung des Milieus (pH-Wert am Elektrolyt-Metall-Übergang) unter der Elektrode (z.B. durch Schweiß) führt auch zu Änderungen des Elektrodenpotenzials, was bei der Verwendung von Oberflächenelektroden zu beachten ist.² Widerstände unter 1 Kiloohm können durch Flüssigkeits- oder Elektroden-Gel-Brücken verursacht werden. Die Messungen der Übergangswiderstände sollen die Erdungselektrode(n) sowie bei referentieller Registrierung die Referenzelektrode(n) mit einschließen. Die Werte der Widerstände müssen zu Beginn und am Ende der Aufzeichnung dokumentiert werden.

5. Die Registrierung und Auswertung soll mit Standard-Filtereinstellungen erfolgen: Zeitkonstante 0,3 s (d.h. untere Grenzfrequenz 0,53 Hz); obere Grenzfrequenz 70 Hz. Zur Erfassung auch sehr langsamer Frequenzen ist das EEG über mindestens 10 Min. einwandfrei auswertbar und artefaktarm mit einer Zeitkonstante von 1 s oder länger (untere Grenzfrequenz 0,16 Hz oder darunter) zu registrieren bzw. darzustellen.

6. Die Registrierung soll mit Standard-Verstärkereinstellungen begonnen werden (5 bzw. 7 $\mu\text{V}/\text{mm}$). Die der Beurteilung zugrundeliegenden EEG-Abschnitte (= 30 min) müssen mit höherer Verstärkung, teilweise mit einer Empfindlichkeit von wenigstens 2 $\mu\text{V}/\text{mm}$ aufgezeichnet werden. Bei der digitalen EEG-Technik muss die Aufzeichnung in der Weise erfolgen, dass eine Auswertung mit einer Auflösung von 2 $\mu\text{V}/\text{mm}$ möglich ist (11). Die Kalibrierung soll mit einem Signal erfolgen, dessen Höhe der Amplitude des zu erwartenden Signals entspricht, z. B. 20 μV bei einer Empfindlichkeit von 2 $\mu\text{V}/\text{mm}$.

Kalibriersignale („Eichsignale“) müssen am Beginn, bei jeder Änderung und am Ende der Registrierung aufgezeichnet werden. Steht kein entsprechend kleines Kalibriersignal zur Verfügung, muss das Kalibriersignal mit der Standardeinstellung aufgezeichnet und jede Verstärkeränderung dokumentiert werden.

7. Der Rauschpegel des EEG-Gerätes sollte beachtet werden. Er muss so gering sein, dass eine sichere Abgrenzung von EEG-Potenzialen um 2 μV möglich ist. Das Geräterauschen sowie auch externe Einstreuungen können überprüft werden, indem man die beiden Elektroden eines dargestellten Kanals mit einer Brücke verbindet und sie überdies gegen den Masse- und bei referentieller Messung zusätzlich gegen den Referenzeingang kurzschließt.

8. Die Anzahl der EEG-Kanäle darf acht nicht unterschreiten. Unverzichtbar zur Erkennung von nicht zu beseitigenden Artefakten ist die kontinuierliche Mitregistrierung des EKGs. Andere Artefakte müssen sicher identifiziert und vom EEG abgegrenzt werden. Zur Differenzierung rascher β -Aktivität von EMG-Aktivität können kurz wirkende Muskelrelaxantien gegeben werden; dies darf jedoch nur nach der Feststellung der klinischen Kriterien zur Feststellung des irreversiblen Hirnfunktionsausfalls erfolgen.

9. Zu Beginn der Ableitung soll die Funktionstüchtigkeit der einzelnen Verstärker durch willentlich ausgelöste Artefakte überprüft werden, z. B. durch Berühren der Elektroden.

10. Während der EEG-Registrierung müssen mehrfach Schmerzreize im Gesicht gesetzt werden.

2.2 FRÜHE AKUSTISCH EVOZIERTE POTENZIALE (FAEP)

Die Ableitung der FAEP ist als Irreversibilitätsnachweis des Hirnfunktionsausfalls bei primären supratentoriellen und bei sekundären Hirnschädigungen geeignet und sie kann bei Säuglingen, Kindern und Erwachsenen gleichermaßen angewendet werden (12-15). Sie bietet sich vor allem dann an, wenn Probleme bei der Elektrodenplatzierung für das EEG durch Kopf- und Gesichtsverletzungen bestehen. Die FAEP können - unabhängig von der Körpertemperatur - auch zur Beurteilung der Bedeutung zentral dämpfender Medikamente eingesetzt werden (1). Bei primären infratentoriellen Hirnschädigungen und kombinierten Hirnschädigungen mit primärer Beteiligung der infratentoriellen Hirnanteile sind die FAEP nicht als ergänzende Untersuchung geeignet. Für die Ableitung der FAEP muss eine Schädigung des Nervus cochlearis, z. B. durch ototoxische Substanzen, ausgeschlossen werden.

Der Nachweis eines bilateralen Ausfalls aller im Hirnstamm generierten FAEP-Komponenten erlaubt den Rückschluss auf einen generellen Funktionsausfall des Hirnstammes, da die akustische Leitungsbahn hierbei parallel zu den übrigen Hirnstammstrukturen funktionslos wird (16). Damit sind folgende FAEP-Muster mit der Irreversibilität des Hirnfunktionsausfalls vereinbar:

- der progrediente, konsekutive Verlust der Wellen mit schließlich bilateralem Ausfall aller Komponenten,
- der progrediente, konsekutive Ausfall der Wellen mit Erhaltenbleiben der Wellen I oder I und II ein- und beidseitig,

- das isolierte Erhaltensein der Wellen I oder I und II.

Der primäre bilaterale Ausfall aller FAEP-Wellen schon bei der Erstuntersuchung ist nicht als Irreversibilitätsnachweis geeignet.

Die FAEP müssen gemäß den Empfehlungen der DGKN (siehe Ableitetechnik) abgeleitet werden und von einem darin erfahrenen Arzt kontrolliert und beurteilt werden (1). Der Befundbericht soll neben den üblichen Informationen (Fragestellung, Befundbeschreibung, Beurteilung) die folgenden Angaben enthalten: Ableitezeit (Datum, Uhrzeit), Namen des an der Untersuchung beteiligten Medizinischen Technologen (frühere Berufsbezeichnung: medizinisch-technischer Assistent) und des untersuchenden/befundenden Arztes, Ableitung gemäß DGKN-Empfehlungen erfolgt (ja/nein, ggf. Erläuterung), Reproduzierbarkeit der Kurven bzw. der Artefakte (gut oder mäßig oder nicht), Beschreibung der Wellen (nachweisbare und nicht nachweisbare), Form der Archivierung der abgeleiteten EP (Papierausdruck oder digital).

Ableitetechnik

Stimulation: Geschirmte Kopfhörer mit überprüfter Reizpolarität und bekanntem, vom Hersteller belegtem Frequenzgang (alternativ pneumatisch arbeitende Kopfhörer, wobei die Latenzen um die Laufzeit im Schlauch zu korrigieren sind).

- **Klickreize** 100 µs Dauer; Reizfrequenz zwischen 10 und 15 Hz; ungerade Wiederholungsrate (z. B. 11,11 Hz) wird empfohlen;
- **Sog- und Druckreize** müssen getrennt gemittelt und gespeichert werden; falls technisch nicht möglich, sollen nur Sogpulse verwendet werden.
- **Schalldruck** 95 dB HL; kontralaterales Ohr mit 30 dB unter Klick-Schalldruck verwaschen.

Analysezeit: Zur Standarduntersuchung 10 ms; 20 ms werden zur besseren Artefakt-Abgrenzung (50 Hz) empfohlen.

Filtereinstellung (bezieht sich auf 6 dB/Oktave Filter): untere Grenzfrequenz 100 – 150 Hz; obere Grenzfrequenz 3.000 Hz.

Elektrodenposition: Vertex (Cz); Referenz am ipsilateralen Ohr läppchen oder Mastoid. Zur besseren Identifikation der Welle I wird eine Ableitung mit einer Nadelelektrode aus dem Gehörgang empfohlen.

Elektrodenarten: Es können sowohl Nadel- als auch Klebe-Elektroden verwendet werden. Die Elektrodenübergangswiderstände sollen zwischen 1 und 10 Kiloohm liegen und untereinander möglichst gleich niedrig sein (Unterschied möglichst ≤ 5 Kiloohm²). Wegen der unterschiedlichen Ableiteigenschaften von Oberflächen- und Nadelelektroden sollten bei einer Ableitung nur gleichartige Elektroden verwendet werden.² Eine Änderung des Milieus (pH-Wert am Elektrolyt-Metall-Übergang) unter der Elektrode (z.B. durch Schweiß) führt auch zu Änderungen des Elektrodenpotenzials, was bei der Verwendung von Oberflächenelektroden zu beachten ist.²

Mittelungsschritte: 1.000 – 2.000. Jede Messung muss mindestens einmal wiederholt werden, um die Reproduzierbarkeit der Wellen zu belegen. Überdies ist auf eine wirksame Unterdrückung von Artefakten zu achten.

2.3 SOMATOSENSORISCH EVOZIERTE POTENZIALE (SEP)

Die Ableitung der SEP nach bilateraler Medianusstimulation ist als Irreversibilitätsnachweis des Hirnfunktionsausfalls bei primären supratentoriellen und bei sekundären Hirnschädigungen nach Vollendung des zweiten Lebensjahres geeignet (5, 16-19). Die SEP können - unabhängig von der Körpertemperatur - auch zur Beurteilung der Bedeutung zentral dämpfender Medikamente eingesetzt werden (1). Bei primären infratentoriellen Hirnschädigungen und kombinierten Hirnschädigungen mit primärer Beteiligung der infratentoriellen Hirnanteile sind die SEP nicht als ergänzende Untersuchung geeignet. Voraussetzung für den Einsatz dieser Methode ist der Ausschluss einer Halsmarkschädigung.

Folgende SEP-Muster belegen die Irreversibilität des klinischen Hirnfunktionsausfalls:

² Diese Vorgabe ist noch nicht Bestandteil der Richtlinie der Bundesärztekammer (1).

Bei der Wahl einer **Fz-Referenz** entspricht ein Ausfall der in der kaudalen Medulla oblongata generierten – und über den Halswirbelkörper 2 (HWK2) ableitbaren – Komponente N13b bei Fehlen des kortikalen Primärkomplexes einem Abbrechen der Impulswelle am zerviko-kraniellen Übergang (16). N13a kann im weiteren Verlauf auch erlöschen.

Bei der Wahl einer **extrakraniellen Referenz** (Hand/Arm/Schulter) und Ableitung über der sensiblen Hirnrinde (C3' und C4') bricht die Kette der Far-field-Potenziale mindestens nach der Komponente P11 ab.

Der isolierte bilaterale Ausfall der kortikalen SEP ist nicht als Irreversibilitätsnachweis geeignet.

Die SEP müssen gemäß den Empfehlungen der DGKN (siehe Ableitetechnik) abgeleitet werden und von einem darin erfahrenen Arzt kontrolliert und beurteilt werden (1). Der Befundbericht soll neben den üblichen Informationen (Fragestellung, Befundbeschreibung, Beurteilung) die folgenden Angaben enthalten: Ableitezeit (Datum, Uhrzeit), Namen des an der Untersuchung beteiligten Medizinischen Technologen (frühere Berufsbezeichnung: medizinisch-technischer Assistent) und des untersuchenden/befundenden Arztes, Ableitung gemäß DGKN-Empfehlungen erfolgt (ja/nein, ggf. Erläuterung), Reproduzierbarkeit der Kurven bzw. der Artefakte (gut oder mäßig oder nicht), Beschreibung der Wellen (nachweisbare und nicht nachweisbare) bei jedem einzelnen Kanal (4 Kanäle), Form der Archivierung der abgeleiteten EP (Papierausdruck oder digital).

Ableitetechnik

Stimulation Rechteckimpulse; Dauer 0,1 – 0,2 ms; Frequenz 3 – 5 Hz; Reizstärke 2 – 3 mA über der motorischen Schwelle; Kathode proximal.

Analysezeit (bei fehlender Reizantwort verdoppeln): Armnerven-Stimulation 40 – 50 ms.

Filtereinstellung (bezieht sich auf 6 dB/Oktave Filter): Untere Grenzfrequenz 5 – 10 Hz (kortikales SEP) bzw. 20 bis 50 Hz (spinales SEP); obere Grenzfrequenz 1000 – 2000 Hz.

Elektrodenposition: Referenz Fz: Erb'scher Punkt, Dornfortsätze C7 und C2, kortikale C3', C4'.

Elektrodenarten: Es können sowohl Nadel- als auch Klebe-Elektroden verwendet werden. Die Elektrodenübergangswiderstände sollen zwischen 1 und 10 Kiloohm liegen und untereinander möglichst gleich niedrig sein (Unterschied möglichst ≤ 5 Kiloohm²). Wegen der unterschiedlichen Ableiteigenschaften von Oberflächen- und Nadelelektroden sollten bei einer Ableitung nur gleichartige Elektroden verwendet werden.² Eine Änderung des Milieus (pH-Wert am Elektrolyt-Metall-Übergang) unter der Elektrode (z.B. durch Schweiß) führt auch zu Änderungen des Elektrodenpotenzials, was bei der Verwendung von Oberflächenelektroden zu beachten ist.²

Mittlungsschritte: 512 – 2048; das Potenzial muss mindestens einmal reproduziert werden. Überdies ist auf eine wirksame Unterdrückung von Artefakten zu achten.

3. Doppler-/Duplexsonografie

Die Doppler- bzw. Duplexsonografie kann bei allen Hirnschädigungen und in jedem Lebensalter zum Nachweis des zerebralen Zirkulationsstillstandes eingesetzt werden (5, 20-27). Beim Nachweis des zerebralen Zirkulationsstillstandes sind potentiell reversible Ursachen der klinischen Symptome des Hirnfunktionsausfalls ausgeschlossen und es kann die Irreversibilität des Hirnfunktionsausfalls bei Erwachsenen und Kindern ab dem vollendeten zweiten Lebensjahr ohne Wartezeit und klinische Verlaufsuntersuchungen festgestellt werden (1). Voraussetzung für den Einsatz dieser Methode ist ein altersentsprechend suffizienter arterieller Mitteldruck (mehr als 60 mmHg bei Erwachsenen und Kindern ab dem vollendeten fünften Lebensjahr; bei Kleinkindern unterhalb des vollendeten fünften Lebensjahres soll der arterielle Mitteldruck mehr als 50 mmHg und bei Säuglingen unterhalb eines Alters von 12 Monaten mehr als 40 mmHg betragen) (1, 28). Eine zuverlässige Beurteilung der Doppler- bzw. Duplexsonografie ist bei Patienten mit veno-venöser extrakorporaler Membranoxygenierung (vvECMO) möglich. Bei einer veno-arteriellen extrakorporalen Membranoxygenierung (vaECMO) ist die Doppler-/Duplexsonografie als apparatives Zusatzverfahren bislang nicht ausreichend validiert und daher nicht anzuwenden (1).

² Diese Vorgabe ist noch nicht Bestandteil der Richtlinie der Bundesärztekammer (1).

Die charakteristischen doppler-/duplexsonografischen Signale eines zerebralen Zirkulationsstillstandes sind Folge eines anhaltenden pathologischen Anstiegs des intrakraniellen Drucks über den arteriellen Mitteldruck. Bei großen offenen Schädel-Hirn-Verletzungen, Dekompressions-Kraniektomien und vereinzelt bei sekundären Hirnschädigungen kommt es, wenn der intrakranielle Druck nicht über den mittleren arteriellen Druck ansteigen kann, nicht zu einem zerebralen Zirkulationsstillstand. Diese Situation kann auch ohne Schädel-Verletzung bei Neugeborenen und bei Kindern bis zum vollendeten zweiten Lebensjahr vorliegen, da sich die Schädelnähte und die Fontanellen erst im zweiten Lebensjahr vollständig verschließen (1, 21). Wird allerdings trotz Kalottendefekt bzw. inkomplettem Fontanellenverschluss ein zerebraler Zirkulationsstillstand (z.B. mittels Doppler-/Duplexsonografie) festgestellt, ist dieses Ergebnis ohne Einschränkungen zu werten (1). Andernfalls ist die Irreversibilität des Hirnfunktionsausfalls entweder durch klinische Verlaufsuntersuchungen nach den normierten Wartezeiten oder durch geeignete elektrophysiologische Befunde (EEG oder FAEP oder nach Vollendung des zweiten Lebensjahres SEP) nachzuweisen (1).

Im Gegensatz zur Dopplersonografie ermöglicht die transkranielle Duplexsonografie durch die Darstellung des Hirngewebes, das die intrakraniellen Arterien umgibt, den Nachweis der Penetration des Ultraschalls durch den Schädelknochen und die Lokalisation der intrakraniellen Arterien jeweils unabhängig vom Vorliegen eines Blutflusses in diesen Arterien. Als Signalverstärker eingesetzte Ultraschallkontrastmittel erhöhen die Sensitivität der Duplexsonografie, um die für einen zerebralen Zirkulationsstillstand charakteristischen Strömungssignale an den intrakraniellen Arterien nachzuweisen (28, 29). Biphaseische Strömungssignale (oszillierende Strömungssignale) sind nur dann vereinbar mit einem zerebralen Zirkulationsstillstand, wenn das Integral (Fläche) der anterograden und retrograden Anteile des Dopplerfrequenzspektrums innerhalb eines Herzzyklus gleich ausgeprägt ist; es wird aber nicht gefordert, dass hier eine Messung durch das Ultraschallgerät erfolgen soll, in der Praxis wird das durch den Untersucher abgeschätzt (1). Um die Detektion niedriger bzw. langsamer Flüsse mittels der Doppler- bzw. Duplexsonografie sicher zu stellen, sind die Geräteeinstellungen entsprechend zu wählen: geeignete Dopplerfrequenz, erhöhte Sendeleistung und Empfangsverstärkung, Messvolumen bei intrakranieller Dopplersonografie 15 mm, ausgeblendete Hüllkurve, Hochpassfilter („Wandfilter“) ≤ 50 Hz.

Zum Nachweis des zerebralen Zirkulationsstillstandes müssen im Abstand von mindestens 30 Minuten

- mittels **Dopplersonografie** intrakraniell die Aa. cerebri mediae, Aa. carotides internae und eventuell detektierbare weitere Hirnbasisarterien, extrakraniell die Aa. vertebrales und, wenn die korrespondierenden intrakraniellen Gefäßsegmente nicht darstellbar sind, die Aa. carotides internae

oder

- mittels **Duplexsonografie** intrakraniell die M1-Segmente der Aa. cerebri mediae, die Aa. carotides internae, die V4-Segmente der Aa. vertebrales und die A. basilaris sowie eventuell detektierbare weitere Hirnbasisarterien

untersucht werden und dabei folgende Befunde nachweisbar sein:

- biphaseische Strömungssignale (oszillierende Strömungssignale) mit gleich ausgeprägtem Integral der antero- und retrograden Komponente

oder

- frühsystolische Spitzen, die kleiner als 50 cm/s sind und unter 200 ms anhalten, wobei kein weiteres Strömungssignal im verbleibenden Herzzyklus detektierbar sein darf.

Ein Fehlen der Strömungssignale bei transkranieller Beschallung der Hirnbasisarterien kann nur dann als sicheres Zeichen eines zerebralen Zirkulationsstillstandes gewertet werden, wenn derselbe Untersucher bei gleicher Geräteeinstellung bei einer früheren Untersuchung eindeutig ableitbare intrakranielle Strömungssignale dokumentiert hat oder wenn an den extrakraniellen hirnversorgenden Arterien (Aa. carotides internae, Aa. vertebrales) die Zeichen des zerebralen Zirkulationsstillstandes nachweisbar sind (1). Primär fehlende Strömungssignale dürfen nicht als Irreversibilitätsnachweis gewertet werden, da intrakranielle Strömungssignale bei unzureichender Schalltransmission durch den Knochen, intrakranieller Luftansammlung und massiver Gefäßverlagerung trotz noch erhaltener Hirndurchblutung fehlen können.

Die Untersuchung muss durch einen in dieser Methode speziell erfahrenen Arzt durchgeführt werden (1). Die Untersuchungszeiten müssen dokumentiert werden: Datum, Uhrzeiten (von/bis) beider Untersuchungsdurchgänge mit Beginn im Abstand von mindestens 30 Minuten (1). Der Befundbericht soll neben

den üblichen Informationen (Fragestellung, Befundbeschreibung, Beurteilung, Untersuchungszeiten) die folgenden Angaben enthalten: Blutdruck (arterieller Mitteldruck oder systolischer und diastolischer Blutdruck), Benennung der dargestellten Gefäße mit der Art der jeweils detektierten Strömungssignale (frühsystolische Spitzen, biphasische Strömung mit gleich ausgeprägtem Integral der antero- und retrograden Komponente, erhaltene Perfusion, kein Strömungssignal nachweisbar), im Falle fehlender transkranieller Strömungssignale ggf. Vergleich mit der von demselben Untersucher durchgeführten Voruntersuchung, Name des untersuchenden/befundenden Arztes, Form der Archivierung der abgeleiteten Strömungssignale (Papierausdruck oder digital).

Hamburg, März 2023

Die Mitglieder der Kommission:

U. WALTER

S. BRANDT

S. FÖRDERREUTHER

A. GÜNTHER

H.-C. HANSEN

J. HAUEISEN

F. SALIH

D. WEISE

Literatur

1. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesärztekammer. 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, Fünfte Fortschreibung. Dtsch Arztebl 2022; https://www.bundesaerztekammer.de/fileadmin/user_upload/BAEK/Themen/Medizin_und_Ethik/RichtlinieIHA_FuenfteFortschreibung.pdf
2. Besser R, Ferbert A, Hinrichs H, Kaps M, Lücking CH, Müllges W, Rappelsberger P, Stöhr M. Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für klinische Neurophysiologie (Deutsche EEG-Gesellschaft) zur Bestimmung des Hirntodes. *Klin Neurophysiol* 2001; 32: 39–41
3. Walter U, Brandt SA, Förderreuther S, Hansen HC, Hinrichs H, Kaps M, Müllges W, Weise D. Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Klinische Neurophysiologie und Funktionelle Bildgebung zur Diagnostik des irreversiblen Hirnfunktionsausfalls. *Klin Neurophysiol* 2019; 50: 17–22
4. Ganes T, Lundar T. EEG and evoked potentials in comatose patients with severe brain damage. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1988; 69: 6–13
5. Welschehold S, Boor S, Reuland K, Thömke F, Kerz T, Reuland A, Beyer C, Gartenschläger M, Wagner W, Giese A, Müller-Forell W. Technical aids in the diagnosis of brain death: a comparison of SEP, AEP, EEG, TCD and CT angiography. *Dtsch Arztebl Int* 2012; 109: 624–630
6. Jørgensen EO. EEG without detectable cortical activity and cranial nerve areflexia as parameters of brain death. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1974; 36: 70–75
7. Jørgensen EO, Malchow-Møller A. Natural history of global and critical brain ischaemia. Part I: EEG and neurological signs during the first year after cardiopulmonary resuscitation in patients subsequently regaining consciousness. *Resuscitation* 1981; 9: 133–153
8. Schmitt B, Simma B, Burger R, Dumermuth G. Resuscitation after severe hypoxia in a young child: temporary isoelectric EEG and loss of BAEP components. *Intens Care Med* 1993; 19: 420–422
9. Bjelland TW, Klepstad P, Haugen BO, Nilsen T, Dale O. Effects of hypothermia on the disposition of morphine, midazolam, fentanyl, and propofol in intensive care unit patients. *Drug Metab Dispos* 2013; 41: 214–223
10. Walter U, Noachtar S, Hinrichs H. Digitale Elektroenzephalographie in der Hirntoddiagnostik: Technische Anforderungen und Ergebnisse einer Umfrage zur Richtlinienkompatibilität digitaler EEG-Systeme bei Anbietern in Deutschland. *Nervenarzt* 2018; 89: 156–162
11. Deutsche EEG-Gesellschaft. Stellungnahme der Technischen Kommission zum papierlos registrierten EEG. *EEG-Labor* 1990; 12: 151–154
12. Firsching R, Frowein RA, Wilhelms S, Buchholz F. Brain death. Practicability of evoked potentials. *Neurosurv Rev* 1992; 15: 249–254
13. Ruiz-López MJ, Martínez de Azagra A, Serrano A, Casado-Flores J. Brain death and evoked potentials in pediatric patients. *Crit Care Med* 1999; 27: 412–416
14. Facco E, Munari M, Gallo F, Volpin SM, Behr AU, Baratto F, Giron GP. Role of short latency evoked potentials in the diagnosis of brain death. *Clin Neurophysiol* 2002; 113: 1855–1866
15. Jardim M, Person OC, Rapoport PB. Brainstem auditory evoked potentials as a method to assist the diagnosis of brain death. *Pro Fono* 2008; 20: 123–128
16. Stöhr M, Wagner W, Pfadenhauer K, Scheglmann K. *Neuromonitoring*. Steinkopff Verlag Darmstadt 1999.
17. Stöhr M, Riffel B, Trost E, Ullrich A. Short-latency somatosensory evoked potentials in brain death. *J Neurol* 1987; 234: 211–214
18. Buchner H, Ferbert A, Hacke W. Serial recording of median nerve stimulated subcortical somatosensory evoked potentials (SEPs) in developing brain death. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1988; 69: 14–23
19. Ruiz-García M, Gonzalez-Astiazarán A, Collado-Corona MA, Rueda-Franco F, Sosa-de-Martínez C. Brain death in children: clinical, neurophysiological and radioisotopic angiography findings in 125 patients. *Childs Nerv Syst* 2000; 16: 40–45

- 20.** von Reutern GM. Zerebraler Zirkulationsstillstand. Diagnostik mit der Dopplersonographie. Dtsch Ärztebl 1991; 88: A-4379–4385
- 21.** Ducrocq X, Hassler W, Moritake K, Newell DW, von Reutern GM, Shiogai T, Smith RR. Consensus opinion on diagnosis of cerebral circulatory arrest using Doppler-sonography: Task Force Group on cerebral death of the Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology. J Neurol Sci 1998; 159: 145–150
- 22.** Ducrocq X, Braun M, Debouverie M, Junges C, Hummer M, Vespignani H. Brain death and transcranial Doppler: experience in 130 cases of brain dead patients. J Neurol Sci 1998; 160: 41–46
- 23.** Hadani M, Bruk B, Ram Z, Knoller N, Spiegelmann R, Segal E. Application of transcranial doppler ultrasonography for the diagnosis of brain death. Intens Care Med 1999; 25: 822–828
- 24.** de Freitas GR, André C. Sensitivity of transcranial Doppler for confirming brain death: a prospective study of 270 cases. Acta Neurol Scand 2006; 113: 426–432
- 25.** Marinoni M, Alari F, Mastronardi V, Peris A, Innocenti P. The relevance of early TCD monitoring in the intensive care units for the confirming of brain death diagnosis. Neurol Sci 2011; 32: 73–77
- 26.** Poularas J, Karakitsos D, Kouraklis G, Kostakis A, De Groot E, Kalogeromitros A, Bilalis D, Boletis J, Karabinis A. Comparison between transcranial color Doppler ultrasonography and angiography in the confirmation of brain death. Transplant Proc 2006; 38: 1213–1217
- 27.** Kaps M, Schreiber SJ, Walter U. Doppler- und Duplexsonografie in der Diagnostik des irreversiblen Hirnfunktionsausfalls. Klin Neurophysiol 2016; 47; 26–32
- 28.** de Graaff JC, Pasma W, van Buuren S, Duijghuisen JJ, Nafiu OO, Kheterpal S, van Klei WA. Reference Values for Noninvasive Blood Pressure in Children during Anesthesia: A Multicentered Retrospective Observational Cohort Study. Anesthesiology 2016; 125: 904–913
- 29.** Llompart-Pou JA, Abadal JM, Velasco J, Homar J, Blanco C, Ayestarán JI, Pérez-Bárcena J. Contrast-enhanced transcranial color sonography in the diagnosis of cerebral circulatory arrest. Transplant Proc 2009; 41: 1466–1468
- 30.** Welschehold S, Geisel F, Beyer C, Reuland A, Kerz T. Contrast-enhanced transcranial Doppler ultrasonography in the diagnosis of brain death. J Neurol Neurosurg Psychiatry 2013; 84: 939–940