

Nichtinvasives Neuromonitoring in der Anästhesie

Zusammenfassung

Obwohl das Gehirn aufgrund seiner Abhängigkeit von einer kontinuierlichen Zufuhr von Sauerstoff und Energieträgern das vulnerabelste Organ unseres Körpers ist, zählt es gleichzeitig zu den perioperativ am schlechtesten überwachten Organen. Ursache hierfür ist der aufgrund der Schädelkalotte erschwerte Zugang für nichtinvasive Neuromonitoring-Verfahren. Diese Hürde konnte in den letzten Jahrzehnten mit Hilfe der Elektroenzephalographie inklusive der Evozierten Potentiale, der transkraniellen Doppler-Sonographie sowie der Nah-Infrarotspektroskopie zunehmend überwunden werden, sodass die Integrität der Neurone und neuronaler Leitungsbahnen, die Hirndurchblutung und die Oxygenierung des Gehirns immer besser nichtinvasiv überwacht werden können. Primäres Ziel dieses Monitoringverfahren ist es, eine inadäquate Zufuhr von Sauerstoff und Energieträgern auf Ebene des Neurons zu erkennen, um dann mit geeigneten therapeutischen Maßnahmen dieses Missverhältnis zwischen Zufuhr und Bedarf zu beheben. Leider fehlt bis heute ein Monitoringsystem, das dieses Ziel direkt und nicht über die Erfassung von Surrogatparametern erreicht. Dennoch hat es sich erwiesen, dass perioperatives Neuromonitoring bei speziellen Indikationsstellungen dazu beitragen kann, das klinische Ergebnis zu verbessern.

Summary

Although the brain is one of the most vulnerable organs of our body due to

Non-invasive neuromonitoring in anaesthesia

K. Engelhard

► **Zitierweise:** Engelhard K: Nichtinvasives Neuromonitoring in der Anästhesie. Anästh Intensivmed 2021;62:410–416. DOI: 10.19224/ai2021.410

its absolute dependence on continuous supply with oxygen and energy, it is at the same time the organ with the poorest perioperative monitoring. The reason is most likely the difficult approach for non-invasive neuromonitoring devices to the brain due to the ridged bone structure of the skull. This limitation was overcome in the last decades by the invention of electroencephalography and evoked potentials, transcranial Doppler sonography, and near infrared spectroscopy. With it, the function of cerebral cells, brain perfusion, and cerebral oxygenation can be non-invasively monitored. The ultimate goal of these monitoring systems is the detection of an inadequate supply of the neuron with oxygen and energy in order to initiate the adequate treatment to avoid further deteriorations. Unfortunately, a monitoring system which can directly assess the integrity of the neuron is lacking. Nevertheless, the existing neuromonitoring systems are already able to improve the perioperative outcome for specific indications.

Einführung

Mittels Neuromonitoring kann die Integrität des zentralen und peripheren Nervensystems überwacht werden.

Da das Gehirn über **keine relevanten Speicher für Sauerstoff und Energieträger** verfügt, ist es auf deren kontinuierliche Zufuhr angewiesen. Perioperativ

Zertifizierte Fortbildung

CME online

BDA- und DGAI-Mitglieder müssen sich mit ihren Zugangsdaten aus dem geschlossenen Bereich der BDA- und DGAI-Webseite unter der Domain www.cme-anesthesiologie.de anmelden, um auf das Kursangebot zugreifen zu können.

Interessenkonflikt

Die Autorin gibt an, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Schlüsselwörter

Elektroenzephalographie – Evozierte Potentiale – Transkranielle Doppler-Sonographie – Nah-Infrarotspektroskopie – Hirndurchblutung – Cerebraler Metabolismus

Keywords

Electroencephalography – Evoked Potentials – Transcranial Doppler Sonography – Near-infrared Spectroscopy – Cerebral Perfusion – Cerebral Metabolism

soll daher mittels Neuromonitoring (Tab. 1) frühzeitig eine Mangelversorgung durch ein nicht an den cerebralen Metabolismus angepasstes Sauerstoff- und Glukoseangebot detektiert werden. In Abbildung 1 werden Interventionsmöglichkeiten bei einem Abfall der cerebralen Oxygenierung unter Berücksichtigung aller Einflussparameter und deren Überwachungsmöglichkeiten dargestellt. Dies ist insbesondere bei Patienten mit cerebrovaskulären Erkrankungen oder älteren Patienten aufgrund der häufig **eingeschränkten Kompensationsfähigkeit** des Gehirns gegenüber Minderperfusion sinnvoll (Tab. 2). Während gefäß- und kardiochirurgischen Eingriffen und zur Prävention bzw. Detektion der oft spät erkannten perioperativen Schlaganfälle ist das Neuromonitoring ebenfalls geeignet (Tab. 3). So können

- eine cerebrale Minderperfusion oder Hypoxie,
 - eine metabolische Dysfunktion,
 - non-convulsive Krampfanfälle bzw.
 - systemische Schädigungen
- frühzeitig erkannt und therapiert werden.

Das **Neuromonitoring peripherer Nervenbahnen** sollte immer dann eingesetzt werden, wenn aufgrund der anatomi-

schen Komplexität des Operationsgebietes die Überwachung eines Nervens sinnvoll ist, um diesen vor einem iatrogenen Schaden zu schützen (z. B. Monitoring des N. facialis bei Resektion eines Akustikusneurinoms oder der Parotis, Monitoring des N. laryngeus recurrens bei Schilddrüsenoperationen).

Das perioperative Monitoring sollte **nichtinvasiv** sein, was besonders dadurch erschwert wird, dass das Gehirn aufgrund der rigiden Schädelkalotte für nichtinvasives Monitoring nur schwer zugänglich ist. Das spiegelt sich auch darin wider, dass das Gehirn zu den perioperativ am schlechtesten überwachten Organen gehört. Da die Integrität der Neurone nicht direkt überwacht werden kann, bedient man sich sogenannter **Surrogatparameter** (Tab. 1).

- Das **Elektroenzephalogramm** (EEG) zeichnet die Aktivität der Neurone in den oberflächlichen Gehirnarealen auf, während die **Evozierten Potentiale** (EP) über zentrale oder periphere Reizung von Nervenleitungsbahnen oder motorischen Arealen des Gehirns auch die tiefergelegenen Nervenbahnen erfassen.

- Mittels **transkranieller Doppler-Sonographie** (TCD) wird die Geschwindigkeit des Blutflusses in den größeren Hirngefäßen gemessen, die unter bestimmten Bedingungen direkt mit dem Blutfluss korreliert.
- Die **Nah-Infrarotspektroskopie** (NIRS) erfasst die Sauerstoffsättigung des Blutes in einem umschriebenen Hirnareal.

Im Folgenden werden diese Verfahren zur perioperativen Überwachung der Hirnintegrität näher diskutiert.

Verfahren des perioperativen Neuromonitorings

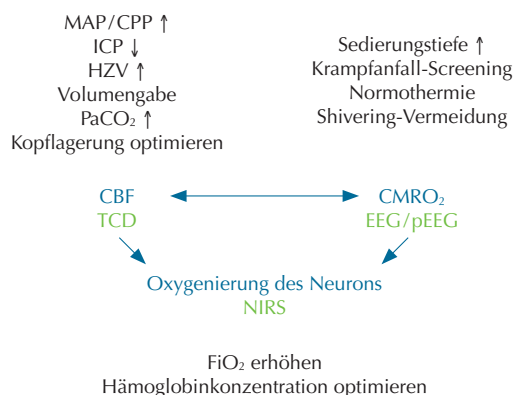
Elektroenzephalogramm (EEG)

Das EEG ist ein nichtinvasives und kontinuierliches cerebrales Monitoringverfahren zur Erfassung der spontanen hirnelektrischen Aktivität.

Die über Oberflächenelektroden abgeleiteten hirnelektrischen Signale repräsentieren hauptsächlich die **synaptische Aktivität kortikaler Neurone**. Da weniger als 35 % aller kortikalen Neurone dem knöchernen Schädel benachbart sind, ist eine Aussage zur gesamten hirnelektrischen Aktivität mittels EEG limitiert. Das kortikale EEG wird darüber hinaus durch das **Einstrahlen subkortikaler Projektionsbahnen** moduliert. Das EEG ist ein Parameter der Integrität der neuronalen Funktion, welche z. B. durch Veränderungen physiologischer Variablen, durch Pharmaka, erhöhten intrakraniellen Druck oder cerebrale Ischämie beeinflusst werden kann. Während das EEG als **Funktionsparameter** außerordentlich sensibel ist, kann die zugrundeliegende Ätiologie neurofunktioneller Veränderungen durch das EEG allein nicht diagnostiziert werden.

Die Elektrodenposition muss der Anatomie der hirnversorgenden Arterien entsprechen, da ansonsten ischämische Provokationen der Gewebetopographie nicht sicher zuzuordnen sind.

Abbildung 1



Interventionsmöglichkeiten bei sinkender cerebraler Oxygenierung. Primäres Ziel ist eine Sicherstellung der Versorgung der Neurone mit Sauerstoff. Dieses Ziel kann mittels über Neuromonitoring erfasste Surrogatparameter überwacht werden (**CBF**: cerebraler Blutfluss; **CMRO₂**: cerebraler Metabolismus; **MAP**: arterieller Mitteldruck; **CPP**: cerebraler Perfusionsdruck; **ICP**: intrakranieller Druck; **HZV**: Herzzeitvolumen; **PaCO₂**: Kohlendioxidpartialdruck; **FiO₂**: inspiratorische Sauerstofffraktion; **TCD**: transkranielle Doppler-Sonographie; **EEG**: Elektroenzephalogramm; **pEEG**: prozessiertes EEG; **NIRS**: Nah-Infrarotspektroskopie).

Tabelle 1

Übersicht über die verfügbaren nichtinvasiven, perioperativen Neuromonitoringverfahren (TIVA: Total Intravenöse Anästhesie).

	Vorteile	Nachteile
EEG / pEEG	<ul style="list-style-type: none"> • Surrogatparameter für neuronale Funktion • Überwachung der Narkosetiefe (vor allem bei TIVA und bei Kombination mit regionalen Narkoseverfahren) • Detektion von Medikamenteneffekten • sensible Erfassung temporärer Minderdurchblutung während neurovaskulärer Eingriffe und einer intraoperativen Ischämie • Detektion intraoperativer nicht-convulsiver Krampfanfälle 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Aussage über Ätiologie neurofunktioneller Veränderungen • keine Erfassung tiefergelegener Gehirnareale • keine prädiktive Aussage zu intraoperativer Wachheit • kein Einfluss auf perioperative Mortalität
EP	<ul style="list-style-type: none"> • Überwachung der Integrität gefährdeter Hirnareale, zu- und wegführender Nervenbündel sowie peripherer Nerven • intraoperatives Mapping zur Detektion von im Operationsgebiet liegenden peripheren Nerven 	<ul style="list-style-type: none"> • störanfällige Signale (insbesondere MEP) • aufwändige Vorbereitung • Erfahrung in der EP-Analyse notwendig
TCD	<ul style="list-style-type: none"> • Messung der Blutflussgeschwindigkeit • Detektionen von Emboli im Stromgebiet • Detektion eines erhöhten ICP und eines cerebralen Vasospasmus • Kontrolle der statischen/dynamischen cerebrovaskulären Autoregulation • Messung der CO₂-Autoregulation 	<ul style="list-style-type: none"> • bei etwa 10 % der Patienten kein Signal ableitbar • Langzeitanwendung nicht empfohlen (Sonde kann thermische Hautläsionen verursachen) • anwenderabhängige Ergebnisse • spezielle Halterung für Fixierung der Sonde nötig
NIRS	<ul style="list-style-type: none"> • kontinuierliche Messung der cerebralen Sauerstoffversorgung • Korrelation mit klinischem Endergebnis nach kardiochirurgischen Operationen • verbesserte Aussagefähigkeit wenn Dauer und Ausprägung der Veränderungen der NIRS-Werte beachtet werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Störung durch extrakranielles Gewebe im Messgebiet • nur regionale Überwachung möglich • isolierte intracerebrale Störungen werden nicht zuverlässig erkannt • kein exakter Schwellenwert da große interindividuelle Schwankungen • positiv prädiktiver Wert ist nicht zuverlässig

Die anteriore-posteriore Montage (10–20 System) ist geeignet, Wirkungen von Pharmaka zu beschreiben. Ein topographisch umfassendes EEG-Monitoring kann durch 16- oder 32-Kanal-Ableitungen erreicht werden. Für die intraoperative neuronale Funktionsdiagnostik sind jedoch auch 2- oder 4-Kanalableitungen geeignet.

Im Rahmen **neurovaskulärer Eingriffe** (Karotidesobliterationen, intrakranielle Aneurysmachirurgie, interventionelle Neuroradiologie) können durch

- eine temporäre Ligatur von Arterien,
- eine inadäquate Shuntfunktion,
- einen erhöhten Retraktordruck oder
- Mikroembolisationen

fokal ischämische Insulte auftreten [1].

Eine cerebrale Ischämie ist innerhalb von 60 s durch folgende EEG-Veränderungen gekennzeichnet: ipsilaterale Reduktion oder Verlust der Anzahl schneller Frequenzen hin zu einer Zunahme langsamer Frequenzbänder.

Die Unterscheidung zwischen hypoxisch/ischämischen EEG-Veränderungen und Anästhetikaeffekten kann bei fokalen Insulten durch **interhemisphärische Differenzen** erfolgen. In jedem Falle sollte eine Anästhesietechnik angestrebt werden, welche nur geringe intraoperative Veränderungen der Dosierung (und damit des EEG-Signals) erforderlich

macht, um auch bei globalen Insulten hypoxisch/ischämische EEG-Veränderungen spezifizieren zu können.

Prozessierte EEG-Parameter (pEEG)

Das native EEG kann durch digitale Verarbeitung der analogen Signale als sogenanntes **Powerspektrum** (z. B. absolute Power, relative Power, Median, spektrale Eckfrequenz, Bispektralindex) dargestellt werden, was perioperative EEG-Veränderungen einfacher erkennbar macht. Die bekanntesten Monitoringsysteme für pEEG-Parameter sind Narcotrend™, M-Entropy™ und BIS™. Ursprüngliches Ziel war es, mittels Bispektralindex die **Narkosetiefe** bestimmen zu können und somit ein Instrument zur Detektion **intraoperativer Wachheit** zu haben [2]. Allerdings zeigte sich, dass eine BIS-gesteuerte Anästhesie (Zielbereich: 40–60) einer an der end-tidalen Gaskonzentration orientierten Inhalationsanästhesie (MAC > 0,7) in Hinblick auf intraoperative Awareness nicht überlegen ist. Folglich wird während einer Inhalationsanästhesie die Überwachung der Narkosetiefe nicht als Standard zur Vermeidung der intraoperativen Awareness empfohlen [3]. Sie kann jedoch sinnvoll sein,

- wenn eine Kombination mit regionalen Anästhesieverfahren geplant ist,
- wenn der Patient ein hohes Risiko für intraoperative Awareness hat oder schon einmal ein solches Ereignis erlebt hatte,
- wenn der Patient kardiovaskulär vorerkrankt ist oder
- wenn intraoperativ besonders hohe oder niedrige Blutdruckwerte trotz idealem MAC auftreten [2].

Im Gegensatz hierzu wird für eine **total-intravenöse Anästhesie** mit neuromuskulärer Blockade die Überwachung mittels pEEG-Parametern immer empfohlen [4].

Die BIS-gesteuerte Vermeidung einer zu tiefen Narkose kann die Inzidenz eines **postoperativen Deliriums** reduzieren [5]. Insbesondere die Vermeidung eines „**Burst Suppression**“-Musters, was immer mit einer zu tiefen Narkose

Tabelle 2

Patientenassoziierte Indikationen für ein intraoperatives Neuromonitoring.

Indikation	Parameter	Monitoring
Cerebrovaskuläre Stenosen	Detektion einer cerebralen Ischämie	EEG/pEEG: ipsilaterale Reduktion/Verlust schneller Frequenzen zugunsten langsamer Frequenzen
	Detektion einer cerebralen Hypoxie	NIRS: Abfall um 10–20 % des Ausgangswertes oder absolut unter 50 %
Hohes Risiko für intraoperative Awareness	Überwachung der Narkosetiefe	pEEG: BIS Ziel 40–60
Hohes Risiko für ein postoperatives Delir	Überwachung der Narkosetiefe	pEEG: BIS Ziel 40–60
	Detektion einer cerebralen Hypoxie	NIRS: Abfall um 20 % des Ausgangswertes oder absolut unter 50 %

Tabelle 3

Operationsbedingte Indikationen für ein intraoperatives Neuromonitoring (TIVA: Total Intravenöse Anästhesie).

Indikation	Monitoring	Parameter
Kraniotomie	EEG/EP	Überwachung der kortikalen Integrität und efferenter und afferenter Nervenbahnen
Neuronale Läsionen nach z. B. Schädelhirntrauma oder intrakranieller Blutung	TCD	Erhöhter ICP (Verlust des diastolischen Signals) Vasospasmus (massiver Anstieg der Blutflussgeschwindigkeit)
Karotisendarteriektomie	EEG/EP	Entscheidungshilfe für intraoperativen Shunt; Ischämiedetektion
	TCD	Entscheidungshilfe für intraoperativen Shunt Ischämie- und Emboliedetektion Detektion cerebraler Hyperperfusion nach Rekanalisierung der Carotis interna
Operationen in der Nähe der Hirnnerven	EP	Mapping des N. laryngeus recurrens (Struma) bzw. des N. facialis (Parotis, vestibuläres Schwannom)
Kardiochirurgie Interventionelle Herzklappen Operationen	pEEG	Detektion einer cerebralen Minderperfusion Bestimmung der Narkosetiefe
	TCD	Ischämie- und Emboliedetektion
	NIRS	Cerebrale Hypoxie: Abfall unter 50 % bzw. um > 20 % vom Ausgangswert
Wirbelsäuleneingriff	EP	Monitoring efferenter und afferenter Nervenbahnen
	NIRS	Cerebrale Hypoxie: Abfall unter 50 % bzw. um > 20 % vom Ausgangswert
TIVA / Kombination mit regionalen Anästhesieverfahren	pEEG	Überwachung der Narkosetiefe (Ziel BIS 40–60)

assoziiert ist, sollte vor allem bei älteren Patienten vermieden werden [6,7]. Allerdings senkt die aktive Vermeidung eines niedrigen BIS (in Kombination mit Alarmierung bei arterieller Hypotonie

und bei niedrigem MAC; „triple low“) entgegen ursprünglicher Annahmen die perioperative Mortalität nicht [8,9].

Evozierte Potentiale (EP)

Allgemeine Prinzipien

Evozierte Potentiale stellen eine nichtinvasive Technik zur Abschätzung der Integrität afferenter Projektionsbahnen und der Identifikation von intraoperativ besonders gefährdeten Nervenstrukturen dar.

Beim **Monitoringverfahren** werde die Nervenbahnen kontinuierlich überwacht und eine Gefährdung der Nervenbahnen durch Veränderung der Potentiale sicht- und hörbar gemacht [10]. Hierzu gehören

- die motorisch EP (MEP),
- die somatosensorisch EP (SSEP),
- die akustisch EP (AEP) und
- die spontan frei laufende Elektromyographie (EMG).

Beim **Mappingverfahren** (Kartierungsverfahren) werden Nervenstrukturen durch den Chirurgen mit Hilfe einer Stimulationselektrode gezielt aufgesucht und aktiviert, um sie zu identifizieren [10]. Hierzu gehören

- getriggerte EMG und
- getriggerte SSEP.

Insbesondere für Operationen an der Schädelbasis und dem Hirnstamm kann so die Funktionalität der Hirnnerven überwacht werden (z. B. der N. facialis zur Resektion eines vestibulären Schwannoms bzw. bei Operationen an der Parotis oder der N. laryngeus recurrens im Rahmen einer Schilddrüsenoperation) [11].

Im Gegensatz zum EEG, welches im Wesentlichen die spontane kortikale Aktivität darstellt, repräsentieren die EPs Veränderungen der elektrischen Aktivität zentraler und peripherer Bahnen auf exogene Stimuli. Die über dem Skalp abgeleiteten Amplituden der EPs sind sehr klein (0,5–5 µV) und daher werden die Potentiale einzelner Stimulationen aufsummiert und gemittelt.

EP werden durch elektrische oder mechanische Impulse auf die Haut in der Nähe eines peripheren Nervens (z. B.

N. medianus, N. ulnaris, N. tibialis) provoziert und nach Latenzzeiten und Amplituden quantifiziert. Die über dem Skalp abgeleiteten Potentiale beinhalten frühe Komponenten (Ursprung im peripheren Nerven und Hirnstamm) sowie Komponenten mittlerer und langer Latenzen (Ursprung im Kortex und Subkortex).

Ähnlich dem EEG sind auch die EPs sensibel gegenüber Veränderungen physiologischer und pharmakologischer Variablen (z. B. Blutdruck, arterielle Blutgase, Hämatokrit, Vigilanz, Hirndurchblutung, Pharmaka und der Körpertemperatur).

Die Kontrolle dieser Faktoren ist während eines perioperativen EP-Monitorings konsequenterweise relevant, um z. B. im Rahmen neurovaskulärer oder rückenmarksnaher Eingriffe die Zunahme der Latenz und die Abnahme der Amplitude einer cerebralen Ischämie und nicht einem Anästhetikaeffekt zuordnen zu können.

Somatosensorisch evozierte Potentiale (SSEP)

Die Messung von **SSEP** ist zur Erkennung einer cerebralen Ischämie im Rahmen der **Karotischirurgie** sinnvoll, da hierdurch sowohl der **Kortex** als auch der **Hirnstamm** überwacht werden. So kann der Verlust des EP nach Abklemmen der A. carotis communis eine Entscheidungshilfe zur Anlage eines intraluminalen Shunts geben; gleichzeitig kann nach Freigabe des Gefäßes die Shuntfunktion geprüft werden. Hierdurch lassen sich postoperative neurologische Defizite reduzieren. Eine **fokale Ischämie** als Folge von unbeabsichtigten oder beabsichtigten Ligaturen intrakranieller Gefäße während cerebraler Aneurysmachirurgie kann ebenfalls durch ein SSEP-Monitoring erkannt werden. Liegen intrakranielle Tumore in der Nähe des sensorischen Kortex oder dessen zuführenden Bündeln kann mittels SSEP die Funktionalität dieser Strukturen intraoperative kontinuierlich überwacht werden. Wegen der limitierten regionalen Auflösung der SSEP ist eine postoperative neurologische Verschlechterung dennoch nicht auszuschließen. Die

Zunahme der Latenz und die Reduktion der Amplitude bis hin zum Signalverlust kann bei Patienten mit erhöhtem ICP als Ischämie- und Prognoseparameter verwertet werden.

Motorisch evozierte Potentiale (MEP)

Mittels MEP kann die Integrität des **motorischen Kortex**, des **kortikospinalen Trakts** und der **peripheren Nerven** überwacht werden [12]. Eine Amplitudenminderung der MEP von 50–80 % gilt als Warnkriterium, dass sich ein neurologisches Defizit ausbildet [10,13]. In der Skoliosechirurgie ist die gleichzeitige Kombination von MEP und SSEP besonders zur Detektion potenzieller Nervenläsionen geeignet [14]. Die MEP werden durch Narkosetiefe, Temperatur und Blutdruck des Patienten stark beeinflusst [10,15].

Akustisch evozierte Potentiale (AEP)

Die Überwachung von **AEP** gestattet eine näherungsweise Abschätzung der **Vigilanz und der intraoperativen Wahrnehmung**. AEP-Monitoring ist ebenfalls gerechtfertigt bei intrakraniellen Eingriffen im Bereich der Schädelbasis, des Hirnstamms und des akustischen Systems. AEP (Hirnstammpotentiale) sind im Vergleich zum EEG oder den SEP weniger sensibel gegenüber hypoxisch/ischämischen Provokationen und erhöhtem ICP.

Transkranielle Doppler-Sonographie (TCD)

Die TCD ist eine nichtinvasive, kontinuierliche und am Patientenbett durchführbare Methode zur Messung der cerebralen Blutflussgeschwindigkeit in den basalen Hirnarterien [16].

Die Aa. cerebri anteriores, mediae und posteriores können durch **transtemporalen Zugang** oberhalb des Processus zygomaticus angeschallt werden. Tierexperimentelle und klinische Studien haben gezeigt, dass die TCD eine **semi-quantitative Darstellung von Veränderungen der Hirndurchblutung** erlaubt. So kann im Verlauf rekanalisierender Operationen an hirnversorgenden Ar-

terien (z. B. Karotisendarteriektomie) oder im Rahmen der Kardiochirurgie eine cerebrale Ischämie frühzeitig erkannt werden. Darüber hinaus können intraarterielle Embolien, die z. B. durch losgelöste Gefäßplaques entstehen, zuverlässig detektiert werden [17]. Da diese Embolie zu Mikroläsionen im Gehirn führen, wäre es sinnvoll, durch Rückkopplung der durch die Emboli provozierten akustischen Signale mit dem Operateur die intraoperative Embolierate zu reduzieren [18,19]. Die TCD ist auch geeignet, die nach erfolgreicher Rekanalisierung der A. carotis interna auftretenden **cerebralen Hyperämien** zu detektieren, welche ein erhöhtes Risiko für eine intrakranielle Blutung darstellen [20].

Patienten mit **erhöhtem intrakraniellen Druck** (ICP) sind unvorhersehbar durch Phasen reduzierter Hirndurchblutung bedroht. Diese Ereignisse können noch vor der klinischen Dekompensation am **Verlust des diastolischen Flussprofils** frühzeitig erkannt werden [21]. Die nichtinvasive Bestimmung des ICP mittels TCD-Parametern entwickelt sich nach anfänglichen Problemen langsam zu einer Alternative zur invasiven ICP-Messung [22–24]. Darüber hinaus gestattet die TCD die Überwachung von **Medikamenteneffekten** auf die Hirndurchblutung sowie die Diagnostik und die Verlaufsbeobachtung eines **cerebralen Vasospasmus** (massiver Anstieg der Blutflussgeschwindigkeit). Weiterhin können mittels spezieller Funktionstests bei Patienten mit cerebralen Läsionen die **cerebrovaskuläre Autoregulation** und die **CO₂-Reaktivität** als Basis für ein optimiertes Blutdruck- und Beatnungsmanagement erfasst werden.

Nah-Infrarotspektroskopie (NIRS)

Die NIRS ist ein nichtinvasives und kontinuierliches Verfahren zur Messung der regionalen cerebralen Gewebeoxygenierung.

Die Technologie basiert auf der Fähigkeit von Licht, im nah-infraroten Bereich den Schädel zu penetrieren und Absorptionsspektren von Oxyhämoglobin,

Desoxyhämoglobin und Cytochrom aa₃ zu messen. Das von den ausschließlich auf der Stirn des Patienten aufgeklebten NIRS-Elektroden emittierte Licht erreicht nach Passage von Skalp und Spongiosa das Nervengewebe. Die Messung repräsentiert in einem Gewebekegel eines definierten Volumens die Oxygenierung arterieller, kapillärer und venöser Provenienzen.

Es existiert eine gute Übereinstimmung zwischen der NIRS und der jugularvenösen Sättigung während systemischer Hypoxie (z. B. nach Kreislaufstillstand oder im Lungenversagen). Im Gegensatz hierzu scheint jedoch eine isolierte cerebrale Ischämie oder Hypoxie nicht immer sicher durch die NIRS darstellbar zu sein.

Bei **kardiochirurgischen Eingriffen** kann mittels NIRS die adäquate cerebrale Oxygenierung exzellent überwacht werden, welche mit dem klinischen Endergebnis der Patienten korreliert. Während die Normwerte des NIRS zwischen 60–80 % liegen, weisen Werte unter 50–55 % auf eine **eingeschränkte cerebrovaskuläre Reserve** hin und gehen mit einer schlechteren kognitiven Funktion einher [25]. Prä- und intraoperative NIRS-Werte unter 50 % sind ebenso ein negativer Prädiktor für die 30-Tage-Morbidität und -Letalität nach kardiologischen Eingriffen wie lange Phasen, in denen der NIRS-Wert mehr als 10 % vom Ausgangswert abfällt [26–28].

In Abbildung 1 sind die therapeutischen Optionen dargestellt, falls der NIRS-Wert um mehr als 10–20 % des Ausgangswertes oder absolut unter 50 % fällt. So kann

- die **Hirndurchblutung** erhöht (z. B. durch Erhöhung des Perfusionsdrucks, des Herzzeitvolumens oder aber des PaCO₂),
- der **cerebrale Metabolismus** supprimiert (z. B. durch Erhöhung der Sedierungstiefe oder Vermeidung einer Hyperthermie),
- das **inspiratorische Sauerstoffangebot** gesteigert sowie
- die **Hämoglobinkonzentration** optimiert werden.

Allerdings ist die aktive Intervention, um NIRS-Werte im Normbereich zu halten, nicht mit einer Verbesserung des klinischen Endergebnisses assoziiert [29]. In Kombination mit einem pEEG-Parameter verbessert sich allerdings die Aussagekraft des NIRS-Monitorings während kardiologischen Operationen [30].

Im Gegensatz hierzu kann die cerebrale Oxygenierung bei **passageren krisenhaften Anstiegen des intrakraniellen Drucks** nur unzureichend überwacht werden. Die schlechte Korrelation zwischen der NIRS und der jugularvenösen Sättigung ist unter diesen Bedingungen vermutlich als Kontamination des NIRS-Signals durch nicht cerebrales Gewebe (Skalp, Spongiosa) zu werten, welches bei isolierten cerebralen Belastungen normal perfundiert bleibt und höhere Oxygenierungswerte vortäuscht.

Literatur

1. Thirumala PD, Thiagarajan K, Gedela S, Crammond DJ, Balzer JR: Diagnostic accuracy of EEG changes during carotid endarterectomy in predicting perioperative strokes. *J Clin Neurosci* 2016;25:1–9
2. Hajat Z, Ahmad N, Andrzejowski J: The role and limitations of EEG-based depth of anaesthesia monitoring in theatres and intensive care. *Anaesthesia* 2017;72 Suppl 1:38–47
3. Avidan MS, Jacobsohn E, Glick D, Burnside BA, Zhang L, Villafranca A, et al: Prevention of intraoperative awareness in a high-risk surgical population. *N Engl J Med* 2011;365:591–600
4. Pandit JJ, Andrade J, Bogod DG, Hitchman JM, Jonker WR, Lucas N, et al: The 5th National Audit Project (NAP5) on accidental awareness during general anaesthesia: summary of main findings and risk factors. *Anaesthesia* 2014;69:1089–1101
5. Siddiqi N, Harrison JK, Clegg A, Teale EA, Young J, Taylor J, et al: Interventions for preventing delirium in hospitalised non-ICU patients. *Cochrane Database Syst Rev* 2016;3:CD005563
6. Koch S, Spies C: Neuromonitoring in the elderly. *Curr Opin Anaesthesiol* 2019;32:101–107
7. Fritz BA, Kalarickal PL, Maybrier HR, Muench MR, Dearth D, Chen Y, et al: Intraoperative Electroencephalogram Suppression Predicts Postoperative Delirium. *Anesth Analg* 2016;122:234–242
8. Sessler DI, Sigl JC, Kelley SD, Chamoun NG, Manberg PJ, Saager L, et al: Hospital stay and mortality are increased in patients having a "triple low" of low blood pressure, low bispectral index, and low minimum alveolar concentration of volatile anesthesia. *Anesthesiology* 2012;116:1195–1203
9. Sessler DI, Turan A, Stapelfeldt WH, Mascha EJ, Yang D, Farag E, et al: Triple-low Alerts Do Not Reduce Mortality: A Real-time Randomized Trial. *Anesthesiology* 2019;130:72–82
10. Campos-Fríz M, Hubbe U: Technik und Nutzen des multimodalen intraoperativen Neuromonitorings bei komplexen Wirbelsäuleneingriffen älterer Patienten. *Orthopäde* 2018;47:330–334
11. Schneider R, Machens A, Randolph GW, Kamani D, Lorenz K, Dralle H: Opportunities and challenges of intermittent and continuous intraoperative neural monitoring in thyroid surgery. *Gland Surg* 2017;6:537–545
12. Neuloh G, Pechstein U, Cedzich C, Schramm J: Motor evoked potential monitoring with supratentorial surgery. *Neurosurgery* 2004;54:1061–1070
13. Kothbauer KF, Deletis V, Epstein FJ: Motor-evoked potential monitoring for intramedullary spinal cord tumor surgery: correlation of clinical and neurophysiological data in a series of 100 consecutive procedures. *Neurosurg Focus* 1998;4:e1
14. Macdonald DB, Al Zayed Z, Khoudair I, Stigsby B: Monitoring scoliosis surgery with combined multiple pulse transcranial electric motor and cortical somatosensory-evoked potentials from the lower and upper extremities. *Spine* 2003;28:194–203
15. Malcharek MJ, Loeffler S, Schiefer D, Manceur MA, Sablotzki A, Gille J, et al: Transcranial motor evoked potentials during anesthesia with desflurane versus propofol – A prospective randomized trial. *Clin Neurophysiol* 2015;126:1825–1832
16. Robba C, Cardim D, Sekhon M, Budohoski K, Czosnyka M: Transcranial Doppler: a stethoscope for the brain-neurocritical care use. *J Neurosci Res* 2018;96:720–730
17. Saedon M, Dilshad A, Tiivas C, Virdee D, Hutchinson CE, Singer DR, et al: Prospective validation study of transorbital Doppler ultrasound imaging for the detection of transient cerebral microemboli. *Br J Surg* 2014;101:1551–1555
18. Aackerstaff RG, Jansen C, Moll FL: Carotid Endarterectomy and Intraoperative Emboli Detection: Correlation of Clinical, Transcranial Doppler,

Review Articles

Medical Education

- and Magnetic Resonance Findings. *Echocardiography* 1996;13:543–550
19. Laman DM, Wieneke GH, Van Duijn H, Van Huffelen AC: High embolic rate early after carotid endarterectomy is associated with early cerebrovascular complications, especially in women. *J Vasc Surg* 2002;36:278–284
 20. Hirooka R, Ogasawara K, Sasaki M, Yamadate K, Kobayashi M, Suga Y, et al: Magnetic resonance imaging in patients with cerebral hyperperfusion and cognitive impairment after carotid endarterectomy. *J Neurosurg* 2008;108:1178–1183
 21. Robba C, Cardim D, Tajsic T, Pietersen J, Bulman M, Rasulo F, et al: Non-invasive Intracranial Pressure Assessment in Brain Injured Patients Using Ultrasound-Based Methods. *Acta Neurochir Suppl* 2018;126:69–73
 22. Calviello LA, De Riva N, Donnelly J, Czosnyka M, Smielewski P, Menon DK, et al: Relationship Between Brain Pulsatility and Cerebral Perfusion Pressure: Replicated Validation Using Different Drivers of CPP Change. *Neurocrit Care* 2017;27:392–400
 23. Zweifel C, Czosnyka M, Carrera E, De Riva N, Pickard JD, Smielewski P: Reliability of the blood flow velocity pulsatility index for assessment of intracranial and cerebral perfusion pressures in head-injured patients. *Neurosurgery* 2012;71:853–861
 24. Cardim D, Griesdale DE, Ainslie PN, Robba C, Calviello L, Czosnyka M, et al: A comparison of non-invasive versus invasive measures of intracranial pressure in hypoxic ischaemic brain injury after cardiac arrest. *Resuscitation* 2019;137:221–228
 25. Carlson BW, Neelon VJ, Carlson JR, Hartman M, Bliwise DL: Cerebral oxygenation in wake and during sleep and its relationship to cognitive function in community-dwelling older adults without sleep disordered breathing. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2011;66:150–156
 26. Heringlake M, Garbers C, Kabler JH, Anderson I, Heinze H, Schon J, et al: Preoperative cerebral oxygen saturation and clinical outcomes in cardiac surgery. *Anesthesiology* 2011;114:58–69
 27. Colak Z, Borojevic M, Ivancan V, Gabelica R, Biocina B, Majeric-Kogler V: The relationship between prolonged cerebral oxygen desaturation and postoperative outcome in patients undergoing coronary artery bypass grafting. *Coll Antropol* 2012;36:381–388
 28. Holmgaard F, Vedel AG, Langkilde A, Lange T, Nilsson JC, Ravn HB: Differences in regional cerebral oximetry during cardiac surgery for patients with or without postoperative cerebral ischaemic lesions evaluated by magnetic resonance imaging. *Br J Anaesth* 2018;121:1203–1211
 29. Rogers CA, Stoica S, Ellis L, Stokes EA, Wordsworth S, Dabner L, et al: Randomized trial of near-infrared spectroscopy for personalized optimization of cerebral tissue oxygenation during cardiac surgery. *Br J Anaesth* 2017;119:384–393
 30. Couture EJ, Deschamps A, Denault AY: Patient management algorithm combining processed electroencephalographic monitoring with cerebral and somatic near-infrared spectroscopy: a case series. *Can J Anaesth* 2019;66:532–539.

Korrespondenzadresse**Prof. Dr. med. Kristin Engelhard**

Klinik für Anästhesiologie
 Universitätsmedizin Mainz
 Langenbeckstraße 1
 55131 Mainz, Deutschland
 Tel.: 06131 17-7273

E-Mail: engelhak@uni-mainz.de

ORCID-ID: 0000-0003-3102-2627