

1 Einführung

1.1 Warum Neuromonitoring?

Operative Eingriffe im Bereich des Nervensystems sind aufgrund der Verletzlichkeit nervaler Strukturen mit erheblichen Risiken verbunden. So lag die Morbidität bei neurochirurgischen Operationen im Bereich des Gehirns noch in der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts bei nahezu 100% bei gleichzeitig hoher Mortalität. Damals ging es primär um den **Erhalt des Lebens**.

Diese Situation hat sich mit Verfügbarkeit neuer bildgebender Verfahren (CT und MRT) und den mikrochirurgischen Operationstechniken (Operationsmikroskop) entscheidend geändert. Lage und Ausdehnung der zu entfernen- den Läsion und ihre topografischen Beziehungen zu funktionell wichtigen Hirnarealen konnten jetzt dargestellt werden. Damit wurde eine exakte Operationsplanung möglich. Operationsmikroskop und mikrochirurgisches Instrumentarium erlaubten die schonende Entfernung auch tief gelegener Läsionen unter Nutzung natürlicher Spalträume (Cisternen). Mikrochirurgie und moderne Bildgebung haben zu einer entscheidenden Reduktion von Mortalität und Morbidität geführt. Damit konnten operative Eingriffe am Nervensystem jetzt mit einem kalkulierbaren Risiko durchgeführt werden. Es ging damit nicht mehr so sehr nur um den Erhalt des Lebens, sondern vielmehr um den **Erhalt der Funktion** im Sinne des **funktionell orientierten Operierens**.

Trotz dieser technischen Fortschritte verblieb weiterhin ein signifikantes Risiko neurologischer Komplikationen bei Eingriffen im Bereich des Nervensystems. Dies gilt insbesondere, da mit der Weiterentwicklung der Operationstechniken auch die Indikation zu operativen Maßnahmen erweitert wurde. Risiken für neurologische Ausfälle betrafen nicht nur neurochirurgische, sondern auch HNO-ärztliche, orthopädische, gefäßchirurgische oder auch allgemeinchirurgische Eingriffe, wenn immer nervale Strukturen betroffen waren. Da diese Eingriffe in der Regel in Allgemeinnarkose durchgeführt werden, konnte der neurologische Status erst nach dem Aufwachen aus der Narkose beurteilt werden, zu einem Zeitpunkt also, zu dem die operativen Maßnahmen längst abgeschlossen und nicht mehr korrigierbar waren. Um eine weitere Reduktion der operativen Morbidität zu erreichen, war also ein neuer Ansatz erforderlich, der die Überwachung gefährdeter nervaler Strukturen während des operativen Eingriffes in Allgemeinnarkose ermöglicht.

Hier setzt das Intraoperative Neuromonitoring (IONM) an: Mithilfe von Nerven- und Muskelaktionspotenzialen sowie von evozierten Potenzialen sollen neurale Strukturen während operativer Eingriffe in Allgemeinnarkose überwacht werden, um die Gefahr neurologischer Ausfälle zu reduzieren und zu minimieren. Weiterhin soll das Monitoring bei der operativen Präparation Hinweise auf die räumliche Beziehung zu nervalen Strukturen geben, um eine Schädigung zu vermeiden. Von besonderer Bedeutung ist, dass der Chirurg die Ergebnisse des Monitoring in seine operativen Abläufe einbezieht, dass er sich vom Monitoring leiten lässt und seine Operationsstrategie nach den Potenzialbefunden ausrichtet. Die Ergebnisse des Monitoring sollen gleichsam den Operationsablauf steuern. Mit dem IONM soll – ausgehend von der funktionserhaltenden Chirurgie – eine neue Ära eingeleitet werden, die Ära der **funktionell gesteuerten Chirurgie**.

1.2 Historische Aspekte

Das Intraoperative Neuromonitoring nahm in der **Neurochirurgie** seinen Anfang mit dem **Rückenmarkmonitoring** mittels **somatosensibel evozierter Potenziale (SEP)** in den 70er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts. Es zeigte sich jedoch schon früh, dass die Wertigkeit des Rückenmarkmonitoring mit SEP in der Neurochirurgie stark eingeschränkt ist. Dies gilt insbesondere, da gerade bei neurochirurgischen Patienten die Funktion in aller Regel bereits präoperativ gestört ist, sodass SEP oftmals schlecht ausgeprägt oder überhaupt nicht erhältlich sind. Obwohl in dieser Situation die Relevanz des Monitoring hoch ist, ist die Validität gering. Aus diesen Gründen hat das Rückenmarkmonitoring mit SEP in der Neurochirurgie an Bedeutung verloren.

Das **Rückenmarkmonitoring mit SEP** wurde in der Folge vermehrt in der **Orthopädie**, etwa bei **Skoliose-Operationen**, eingesetzt. Bei diesen orthopädischen Patienten ist die Funktion präoperativ in aller Regel intakt. Entsprechend sind

gut ausgeprägte SEP zu erhalten. Daher ist die Validität des Monitorings hoch. So konnte in einer Multicenter-Studie die Effektivität des SEP-Rückenmarkmonitorings zur Reduktion neurologischer Komplikationen bei Skoliose-Operationen nachgewiesen werden. In der **Neurochirurgie** konzentrierte man sich nach Einführung der elektrischen und magnetoelektrischen transkraniellen Stimulation in den 80er-Jahren auf die intraoperative Ableitung **motorisch evozierter Potenziale (MEP)** zum Rückenmarkmonitoring. Anfängliche Schwierigkeiten, intraoperativ in Allgemeinanästhesie verwertbare Muskelaktionspotenziale zu generieren, konnten nach Einführung der Technik der Fazilitierung und insbesondere der repetitiven Stimulation, die sich später allgemein durchgesetzt hat, überwunden werden.

Parallel hierzu fand in den 80er-Jahren die intraoperative Überwachung der **Hirnnerven VII (Nervus facialis)** und **VIII (Nervus vestibulocochlearis)** weite Verbreitung. So wurde in der **HNO-Heilkunde** das Monitoring des Nervus facialis bei operativen Eingriffen im Bereich der **Ohrspeicheldrüse** (Glandula Parotis) mit großem Erfolg eingesetzt. In der **Neurochirurgie** fand die intraoperative Überwachung der Hirnnerven VII und VIII bei Eingriffen im Bereich des **Kleinhirnbrückenwinkels** (Akustikusneurinom) breites Interesse. In umfangreichen kontrollierten Studien konnte die Wertigkeit des Monitorings der Hirnnerven VII und VIII bei HNO-chirurgischen und neurochirurgischen Eingriffen mit statistischer Signifikanz belegt werden. Somit gehört das Monitoring der Hirnnerven VII und VIII seit den 90er-Jahren zum Standard in der Neurochirurgie und der HNO-Heilkunde.

Später wurde das Monitoring bei operativen Eingriffen im Bereich der **Schädelbasis** auf die **Hirnnerven III bis XII** erweitert, während die intraoperative Überwachung des Nervus opticus (II) mittels visuell evozierter Potenziale (VEP) bisher noch keine breite Anwendung gefunden hat. Gleichzeitig wurden **SEP** und **MEP** in zunehmendem Umfang bei **vaskulären** (Aneurysmen, Angiome) und **tumorchirurgischen** (niedriggradige Gliome) Eingriffen in der **Neurochirurgie** eingesetzt. Die intraoperative Überwachung des **Nervus recurrens** fand in der **Allgemeinchirurgie** (Strumachirurgie) weite Verbreitung. In der **kolorektalen Chirurgie** haben Techniken zur Überwachung der **Sphinkterfunktion** vermehrtes Interesse gefunden. Schließlich werden in der **Gefäßchirurgie** (thorakale und abdominelle Aneurysmen) in vermehrtem Umfang **SEP** zur Überwachung der Rückenmarksfunktion eingesetzt.

Aktuell gehört das intraoperative neurophysiologische Monitoring zum Standardrepertoire in verschiedenen Fachdisziplinen: Neurochirurgie, Orthopädie, HNO-Heilkunde, Gefäßchirurgie und Allgemeinchirurgie. Das IONM basiert auf dem Monitoring-Konzept.

1.3 Monitoring-Konzept

Entscheidende Voraussetzung für ein erfolgreiches elektrophysiologisches Monitoring ist, dass Potenzialveränderungen in einem möglichst frühen Stadium drohender Funktionsstörungen auftreten, in einem Stadium also, in dem eine Korrektur der operativen Maßnahmen noch möglich ist, um neurologische Ausfälle zu vermeiden. **Drohende Funktionsstörungen** müssen also durch **Potenzialänderungen** in einem **funktionell reversiblen Stadium** zu erkennen sein. Der Operateur muss die Möglichkeit haben, auf Veränderungen der Potenziale zu reagieren, um sowohl Potenzialänderungen als auch die damit verbundene neurologische Beeinträchtigung rückgängig zu machen. Derartige Reaktionen können etwa in einer Verringerung der Retraktion neuraler Strukturen durch Spatelzug, einer Reduktion der Manipulation von Nerven und Gefäßen, im Wechsel der Präparationsstelle oder einfach in einer Pausierung der Präparation bestehen. Auf der anderen Seite sollen **unbeeinträchtigte Potenziale** dem Operateur eine **Rückversicherung** dahingehend geben, dass der bisherige Operationsverlauf keine zusätzlichen neurologischen Ausfälle erwarten lässt.

Für alle im Rahmen des IONM eingesetzten Modalitäten (Nerven- und Muskelaktionspotenziale, evozierte Potenziale) muss somit gezeigt werden, dass die **Anforderungen des Monitoring-Konzeptes** erfüllt werden: **Veränderte Potenzialbefunde** müssen eine **drohende neurologische Funktionsstörung im reversiblen Stadium anzeigen**, **unbeeinträchtigte Potenzialbefunde** sollen dem Operateur eine **Rückversicherung bezüglich der Unbedenklichkeit der bisher unternommenen Operationsschritte** geben. Hier stellen sich besondere Aufgaben an das Monitoring-Team.

1.4 Monitoring-Team

Dem Monitoring-Team kommen vielfältige Aufgaben zu. Zunächst muss in Abhängigkeit von dem präoperativen neurologischen Status sowie von Art und Umfang des operativen Eingriffs die einzusetzende **Technik** (zu überwachende Bahnsysteme, Modalitäten, Stimulations- und Ableitungsverfahren usw.) definiert werden. Dies erfolgt in enger Absprache mit dem Operateur. Ebenso ist eine Absprache mit der Anästhesie erforderlich, um das zur Minimierung der Narkoseeinflüsse bestgeeignete **Narkoseverfahren** auszuwählen. Nach anästhesiologischer Einleitung und Lagerung des Patienten im Operationssaal werden die Elektroden angebracht, es folgt die Verkabelung mit dem Gerät. Danach werden die Anschlüsse überprüft. Nach Stabilisierung der Narkose und vor Beginn der operativen Maßnahmen werden die **Ausgangswerte (Baselines)** registriert.

Während des operativen Eingriffes werden die neurophysiologischen Untersuchungen in regelmäßigen Abständen wiederholt, die **Kurven werden beobachtet**, der **Operateur wird über kritische Veränderungen informiert**. Von besonderer Bedeu-

tung ist, dass das Monitoring-Team über die operativen Abläufe informiert ist, die wesentlichen operativen Schritte kennt und insbesondere während der kritischen Phasen eine lückenlose Überwachung der gefährdeten Strukturen gewährleistet. Der Operateur muss sich darauf verlassen können, dass kritische Änderungen der Potenziale rechtzeitig erkannt und mitgeteilt werden. Nach Abschluss der operativen Maßnahmen und vor Beendigung der Narkose werden die letzten Ableitungen ergänzt. Danach werden die Elektroden entfernt. Anschließend werden die intraoperativen **Aufzeichnungen dokumentiert**.

Um diesen vielfältigen Aufgaben gerecht zu werden, ist eine solide **Ausbildung** erforderlich, die nicht nur eine elektrophysiologische Expertise, sondern auch medizinische Aspekte umfasst. Üblicherweise wird das Monitoring von einem MTA mit **elektrophysiologischer Qualifizierung** durchgeführt. Eine Betreuung durch einen elektrophysiologisch ausgebildeten Arzt ist grundsätzlich erforderlich. Das Ausmaß der notwendigen ärztlichen Betreuung hängt entscheidend von der Erfahrung und Qualifizierung des MTA ab. Der Umfang des Monitoring-Teams orientiert sich an der Inanspruchnahme des IONM an der jeweiligen operativen Einrichtung (Dauer der operativen Eingriffe, Anzahl der gleichzeitig zu betreuenden Monitoring-Systeme usw.).

1.5 Medizinprodukteberater

Qualifikation und Pflichten des Medizinprodukteberaters sind nach § 31 des Medizinproduktegesetzes (MPG) geregelt:

„Wer berufsmäßig Fachkreise fachlich informiert oder in die sachgerechte Handhabung der Medizinprodukte einweist (Medizinprodukteberater), darf diese Tätigkeit nur ausüben, wenn er die für die jeweiligen Medizinprodukte erforderliche Sachkenntnis und Erfahrung für die Information und, soweit erforderlich, für die Einweisung in die Handhabung der jeweiligen Medizinprodukte besitzt.“

Ein Medizinprodukteberater hat

- „eine Ausbildung in einem naturwissenschaftlichen, medizinischen oder technischen Beruf erfolgreich abgeschlossen“ und wurde „auf die jeweiligen Medizinprodukte bezogen geschult“ oder
- „durch eine mindestens einjährige Tätigkeit, die in begründeten Fällen auch kürzer sein kann, Erfahrungen in der Information über die jeweiligen Medizinprodukte und, soweit erforderlich, in der Einweisung in deren Handhabung erworben“.

Es gehört zu den Aufgaben des Medizinprodukteberaters, besondere **Vorkommnisse** und potenzielle **Gefahren** in Zusammenhang mit den von ihm vertretenen Produkten dem **Hersteller zu melden**.

2 Anatomische und physiologische Grundlagen

2.1 Lage- und Richtungsbezeichnungen

Lage- und Richtungsbezeichnungen sind für die **Orientierung am menschlichen Körper** erforderlich. Begriffe wie „oben“ und „unten“ sind irreführend, da sie von der aktuellen Position des Körpers abhängen. Die anatomischen Lage- und Richtungsbezeichnungen beziehen sich auf die **Hauptebenen** und die **Hauptachse** des Körpers und sind deshalb eindeutig, weil sie von der aktuellen Position des Körpers unabhängig sind.

Der menschliche Körper lässt sich mit drei **Hauptebenen** beschreiben (»Abbildung 2-1): Die grün dargestellte Transversalebene beschreibt eine horizontale Fläche quer zur Längsachse des Körpers. Die blaue Frontalebene teilt den Körper in vorne und hinten, die rote Sagittalebene in rechts und links (jeweils aus Sicht des Patienten).

Die Richtungen werden relativ zur **Neuralachse** oder **Neuraxis** angegeben (»Abbildung 2-2 und »Abbildung 2-3). Es handelt sich um eine gedachte Achse, die entlang des Zentralnervensystems über das Rückenmark bis zur Vorderseite des Gehirns verläuft. Im Bereich des Gehirns beschreibt diese Achse in Höhe des Thalamus einen Knick, sodass sich die Richtungsbezeichnungen verschieben. Während sich beispielsweise in der Peripherie des Körpers der Begriff „kaudal“ mit „nach unten hin“ übersetzen lässt, bedeutet dieser Begriff im Gehirn „nach hinten“. In der Praxis orientieren sich Richtungsbezeichnungen

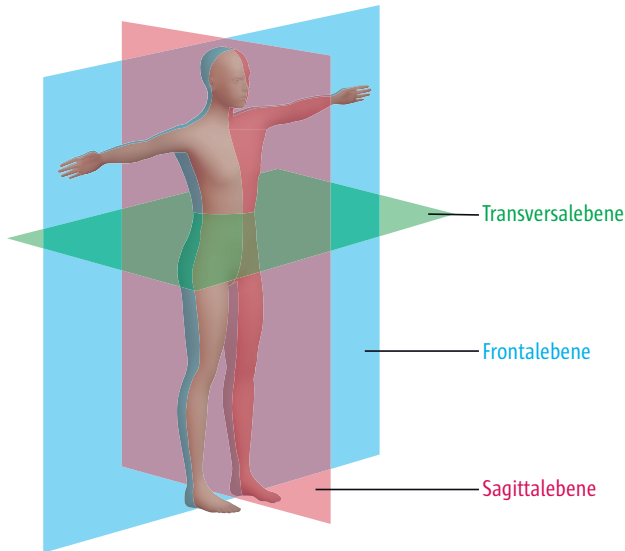


Abb. 2-1 Hauptebenen des menschlichen Körpers

im Gehirn an den Bezeichnungen der Großhirnlappen (Lobi), z.B. okzipital (zum Okzipitallappen hin gelegen), temporal (zum Temporallappen hin gelegen) und frontal (zum Frontallappen hin gelegen).

Die wichtigsten **Lage- und Richtungsbezeichnungen** sind nachfolgend aufgezählt.

- **anterior:** vorn liegend, identisch mit ventral
- **posterior:** hinten liegend, identisch mit dorsal
- **ventral:** bauchwärts, identisch mit anterior
- **dorsal:** rückenwärts, identisch mit posterior
- **kranial:** zum Schädel hin
- **kaudal:** zur Cauda equina (Pferdeschwanz) hin
- **superior:** oben liegend
- **inferior:** unten liegend
- **distal:** vom Körperzentrum weg
- **proximal:** zum Körperzentrum hin
- **ipsilateral:** auf der gleichen Seite
- **kontralateral:** auf der gegenüberliegenden Seite
- **lateral:** seitlich
- **median:** in der Mitte
- **paramedian:** neben der Mitte
- **temporal:** schläfenwärts
- **nasal:** nasenwärts
- **okzipital:** zum Hinterkopf hin
- **rostral:** an der Kopfvorderseite
- **oral:** im Mund, mundwärts

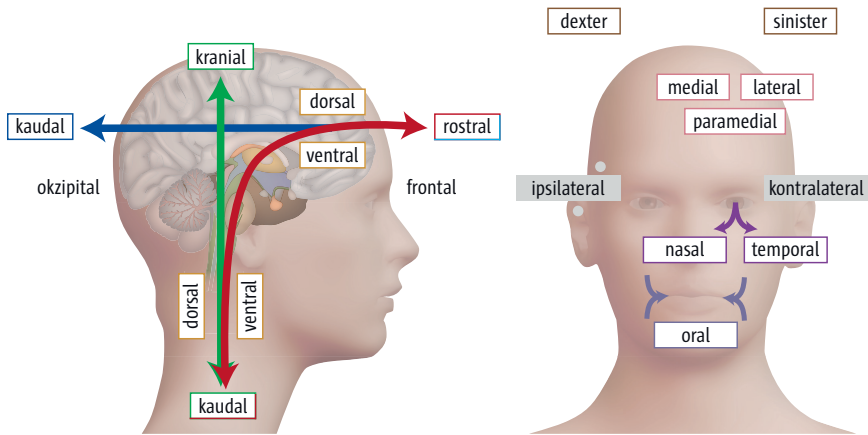


Abb. 2-2 Lage- und Richtungsbezeichnung an Schädel und Gehirn

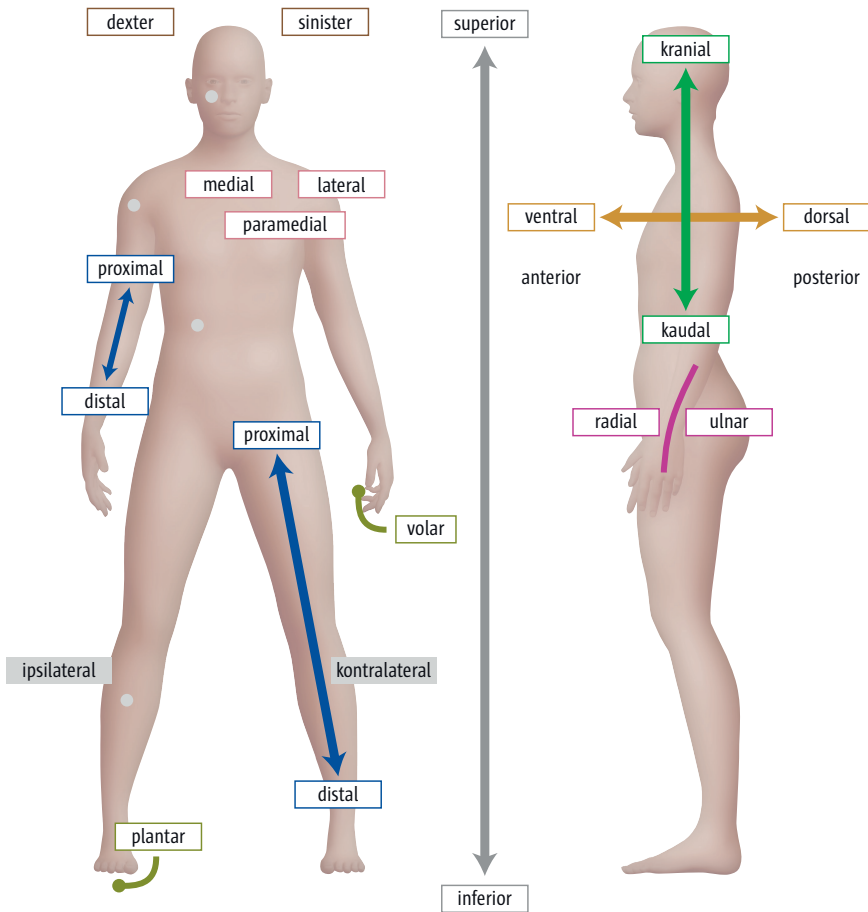


Abb. 2-3 Lage- und Richtungsbezeichnungen am Körper

- **radial:** zur Speiche (Radius) hin (Lagebezeichnung am Unterarm)
- **ulnar:** zur Elle (Ulna) hin (Lagebezeichnung am Unterarm)
- **plantar:** fußsohlenseitig
- **volar:** hohlhandseitig
- **dexter:** rechts (vom Patienten aus)
- **sinister:** links (vom Patienten aus)

2.2 Das Nervensystem

Das Nervensystem stellt das **Steuerungszentrum** des Körpers dar. Sein Grundprinzip lässt sich am besten mit den Begriffen „**Wahrnehmung – Verarbeitung – Reaktion**“ beschreiben. Über die Sinnesorgane und ihre Endstrukturen (Rezeptoren) werden Signale aus der Umgebung und aus dem Körperinneren empfangen und über Leitungen (Afferenzen) mit unterschiedlichen Zwischenstationen in die Regulationszentren im Gehirn und Rückenmark weitergeleitet. Von hier aus erfolgen dann passende Antworten über austretende Verbindungen (Efferenzen) an die ausführenden Zielorgane (Effektoren). Dieses Steuerungssystem erlaubt dem Körper, auf Reize und Veränderungen der Umwelt oder in seinem Inneren adäquat zu reagieren.

Das **menschliche Nervensystem** lässt sich anatomisch und funktionell gliedern:

- **Anatomisch** differenziert man zwischen dem **zentralen (ZNS)** und dem **peripheren (PNS) Nervensystem**.
- **Funktionell** unterscheidet man zwischen dem **somatischen/animalischen** und dem **vegetativen/autonomen Nervensystem**.

Das **zentrale Nervensystem (ZNS)** setzt sich aus dem **Gehirn** und dem **Rückenmark** zusammen. Das **periphere Nervensystem (PNS)** umfasst die das Gehirn und Rückenmark verlassenden **Nerven**.

Das **somatische/animalische Nervensystem** besteht aus Teilen des zentralen und peripheren Nervensystems. Es ist für die **bewusste Wahrnehmung äußerer Reize und willentliche Aktionen** (z.B. über die Muskeln) zuständig.

Das **vegetative/autonome Nervensystem** arbeitet unwillkürlich (autonom) und regelt **lebenswichtige Funktionen** wie z.B. Atmung, Kreislauf, Verdauung, Wasserhaushalt, d.h. es ist vor allem für die Tätigkeit der inneren Organe verantwortlich.

Die beiden wesentlichen Teile des **vegetativen Nervensystems** sind das **sympathische** und das **parasympathische System**, die ihre Funktion als Gegenspieler ausüben. Während das sympathische System den Organismus für die „Flucht“ vorbereitet, dämpft das parasympathische System die äußeren Körperaktivitäten und regt die Funktion der inneren Organe an.