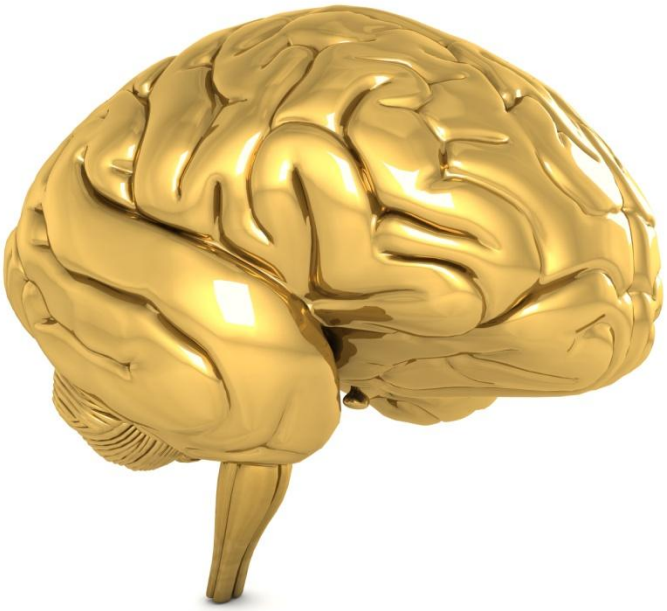
ZNS KOMPENDIUM

Prof. Dr. med. L. Klimaschewski



Verehrte Studentinnen und Studenten !

Ohne profunde neuroanatomische Kenntnisse sind Entstehung und Entwicklung von Krankheiten des Nervensystems nicht zu begreifen. Sie sind für die Ausübung des Arztberufes unentbehrlich. Die hier zusammengestellten primär morphologischen Erkenntnisse stellen die wesentlichen Grundlagen zum Verständnis von Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie dar. Sie sind notwendig, um eine rationale Diagnostik und Therapie zur Behandlung von Erkrankungen des Nervensystems durchführen zu können.

Weiterhin ist relevant, dass die funktionellen Zusammenhänge neuroanatomischer Strukturen heute erst im Zusammenhang mit den zellulären und molekularen Errungenschaften der Hirnforschung verständlich werden. So bildet die funktionelle Neuroanatomie das morphologische Fundament der Neurobiologie des Menschen - einer Wissenschaft für angehende Mediziner, die lieber verstehen als auswendig lernen.

Mit dem vorliegenden Kompendium werden die Inhalte der ZNS-Hauptvorlesung an der Medizinischen Universität Innsbruck umrissen. Es enthält alle Schemata (Zeichenvorlagen), die im Rahmen der Vorlesung und des Neuroanatomie-Praktikums besprochen werden. Das Kompendium gibt einen Einblick in die anatomischen Grundlagen des zentralen Nervensystems, bespricht aber nicht das periphere Nervensystem oder die sensorischen Systeme. Auch die Meningen, Hirngefäße und das Liquorsystem werden nicht vollständig abgehandelt. Somit kann es ein ausführliches Lehrbuch oder einen Atlas der Neuroanatomie nicht ersetzen.

Die Schemata stellen Umzeichnungen aus Abbildungen verschiedener anatomischer Lehrbücher dar, die im Literaturverzeichnis angegeben sind. Es handelt sich um teilweise modifizierte Lernvorlagen, die am Institut für Anatomie und Zellbiologie der Universität Heidelberg erstellt wurden. Besonders gedankt sei Dr. med. univ. Sonja Schottkowsky für das Schreiben der ‚Arbeitsblätter Neuroanatomie', die in dieses Kurzlehrbuch eingegangen sind und für seine Erstellung eine wertvolle Grundlage darstellten. Auch bin ich den vielen Studierenden, die mir über die Jahre Rückmeldungen zu meinen Vorlesungen gegeben haben, zu großem Dank verpflichtet.

Prof. Dr. med. Lars P. Klimaschewski, Institut für Neuroanatomie am Department für Anatomie, Histologie und Embryologie, Müllerstrasse 59, A-6020 Innsbruck (klimasbrainblog.com)

10/2026

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen (Übersicht)	1
1.1	Grundbegriffe	1
1.2	Lagebeschreibungen von Hirnstrukturen	1
1.3	Zentrales Nervensystem — peripheres Nervensystem	1
1.4	Hirnnerven — Spinalnerven	2
1.5	Animales Nervensystem — vegetatives Nervensystem	2
1.6	Graue Substanz — weiße Substanz	2
1.7	Afferentes Neuron — efferentes Neuron	2
1.8	Sensibles Neuron — motorisches Neuron	2
1.9	Gliederung des somatischen Nervensystems	3
1.10	Gliederung des vegetativen Nervensystems	4
1.11	Enterisches (intramurales) Nervensystem (ENS)	5
1.12	Periphere Organisation und Projektionen	5
1.13	Headsche Zonen – Übertragener Schmerz	6
1.14	Funktionelle Gliederung	6
2	Medulla spinalis (Rückenmark)	7
2.1	Regionen und Umgebung	7
2.2	Rückenmarkswurzeln und Spinalnerven	9
2.3	Graue Substanz	10
2.4	Weiße Substanz	12
2.5	Reflexbögen: Eigen- und Fremdreflexe	18
2.6	Segmentale Innervation (Dermatom)	20
3	Truncus cerebri (Hirnstamm)	21
3.1	Gliederung und Lage	21
3.2	Innere Gliederung	24
3.3	Auf- und absteigende Bahnen	32
3.4	Neuroanatomie wichtiger Hirnstammsyndrome	33
4	Cerebellum (Kleinhirn)	38
4.1	Übersicht	38
4.2	Funktionelle Kleinhirngliederung	39
4.3	Kleinhirnrinde	39
4.4	Kleinhirnmark	41
4.5	Kleinhirnstiele	41
4.6	Cerebelläre Funktionen	43
5	Diencephalon (Zwischenhirn)	45

5.1 Überblick 45
5.2 Thalamus dorsalis 45
5.3 Hypothalamus 51
5.4 Subthalamus (Thalamus ventralis) 56
5.5 Epithalamus 57

6 Telencephalon (Endhirn) 59
6.1 Übersicht 59
6.2 Subcorticale Kerne (Basalganglien) 60
6.3 Cortex cerebri (Großhirnrinde) 64

Literaturverzeichnis

1. Atlas der Anatomie (Tillmann – Springer)
2. Atlas der Anatomie (Sobotta – Urban und Fischer)
3. Atlas der Anatomie (Netter – Urban und Fischer)
4. Benninghoff (Drenckhahn – Urban und Fischer)
5. Funktionelle Neuroanatomie (Rohen – Schattauer)
6. Human Neuroanatomy (Augustine – Academic Press)
7. Lehrbuch Vorklinik (Schmidt, Unsicker – Deutscher Ärzteverlag)
8. Prometheus LernAtlas Neuroanatomie (Schünke et al. – Thieme)
9. Taschenatlas der Anatomie, Band 3 (Kahle, Frotscher – Thieme)
10. **Neuroanatomie: Nachschlagen, Lernen, Verstehen (Kipp, Radlanski)**

Bei Quelle 10 handelt es sich um einen Lernauftrag, d.h. aus diesem Buch und nach Vorlesungs- und Praktikumsbesuch können alle Prüfungsfragen zur Neuroanatomie an der MUI beantwortet werden.

1 Grundlagen (Übersicht)

1.1 Grundbegriffe

Cortex: Rinde, graue Substanz von Großhirn und Kleinhirn, enthält die Nervenzellkörper

Lamina, Stratum: Zellschicht des Großhirncortex, diverse Areale im ZNS (z.B. Lamina tecti), Marklamelle

Nucleus: Kern, Ansammlung von Nervenzellkörpern im Zentralnervensystem (ZNS)

Ganglion: Ansammlung von Nervenzellkörpern im peripheren Nervensystem (PNS)

Medulla: Mark (Medulla oblongata, verlängertes Mark; Medulla spinalis, Rückenmark)

Neuropil: Filz, zwischen den Zellkörpern gelegenes Geflecht aus Nervenfasern (Dendriten und Axone)

Tractus: Strang, auf- oder absteigende Bahnen

Fasciculus: Bündel, auf- und absteigende Bahnen

Funiculus: Strang, fasst mehrere Tractus bzw. Fasciculi zusammen

1.2 Lagebeschreibungen von Hirnstrukturen

Durch den aufrechten Gang kommt es während der Entwicklung zum Abknicken des Neuralrohrs. Die Hirnachse steht dadurch zur Körperachse in einem Winkel von ca. 90 Grad. Ehemals ventrale Strukturen liegen damit unten, d.h. basal. Für Zwischen- und Endhirn gilt:

- rostral = frontal = oral = vorne, Richtung Gesicht (rostrum, Schnabel)
- occipital = hinten, Richtung Hinterhaupt
- ventral = basal = unten, Richtung Schädelbasis (venter, Bauch)
- dorsal = oben, Richtung Schädeldach (dorsum, Rücken)

1.3 Zentrales Nervensystem — peripheres Nervensystem

ZNS – Zentralnervensystem: Gehirn und Rückenmark

PNS – Peripheres Nervensystem: Spinalnerven, Plexus (Nervengeflechte), periphere Nerven und Ganglien

Die Grenze zwischen ZNS und PNS bilden die Aus- bzw. Eintrittsstellen der Hirnnerven bzw. der Rückenmarkswurzeln

1.4 Hirnnerven — Spinalnerven

Hirnnerven: 12 Hirnnervenpaare verbinden den Hirnstamm mit peripheren Strukturen und gehören zum peripheren Nervensystem (PNS) bis auf die Hirnnerven I und II, die Teile des zentralen Nervensystems darstellen

Spinalnerven: 30-33 Paare; sie bilden sich aus der vorderen und hinteren Wurzel

1.5 Animales Nervensystem — vegetatives Nervensystem

Animales (cerebrospinales oder somatisches) Nervensystem: willkürliche Steuerung der Skelettmuskulatur, bewusste Wahrnehmungen von der Körperoberfläche und aus den Muskeln/Gelenken

Vegetatives (autonomes oder viscerales) Nervensystem: unwillkürliche Steuerung der inneren Organe über das autonome Nervensystem (Sympathikus und Parasympathikus), Wahrnehmungen aus den inneren Organen

Pars sympathica: ‚Fight or flight' - energiemobilisierende, aktivitätssteigernde Wirkung auf den Körper

Pars parasympathica: ‚Rest and digest' - dient der Konservierung und dem Wiederaufbau von Körperenergien

1.6 Graue Substanz — weiße Substanz

Graue Substanz: Ansammlung von Nervenzellkörpern im ZNS; besonders in Nuclei und im Cortex

Weiße Substanz: gebildet von den Fortsätzen der Nervenzellen, die zumeist von Lipid-haltigen Markscheiden (Myelin) umgeben werden und deshalb hell erscheinen

1.7 Afferentes Neuron — efferentes Neuron

Afferenzen: im ZNS ankommende Aktivitäten (zentripetaler Verlauf)

Efferenzen: vom ZNS wegführende Aktivitäten (zentrifugaler Verlauf)

1.8 Sensibles Neuron — motorisches Neuron

Sinnesreize werden über einen Rezeptor wahrgenommen und über ein sensibles Neuron in das ZNS weitergeleitet (afferent)

Motorische, efferente Impulse werden über ein motorisches Neuron dem jeweiligen Effektor (dem Erfolgsorgan, z.B. der Skelettmuskulatur) zugeleitet

Sensorik: der Begriff ist im deutschen Sprachraum zumeist beschränkt auf die im Kopfbereich lokalisierten Sinnesfunktionen und ihre Verbindungen zum Gehirn (Sehen, Hören, Riechen, Schmecken, Gleichgewicht). Nur der Geschmackssinn ist als viscerosensibel im eigentlichen Sinn zu bezeichnen.

Sensibilität: somatisch (Wahrnehmungen von der Körperoberfläche) oder visceral (Wahrnehmungen aus den inneren Organen)

Motorik: somatisch (Skelett- und sog. Kiemenbogenmuskulatur; Kau-, Gesichts- und Schlundmuskulatur sind willkürlich kontrollierbar) oder visceral (glatte Muskulatur der inneren Organe, Herzmuskulatur, Drüsen; unwillkürlich gesteuert)

1.9 Gliederung des somatischen Nervensystems

1.9.1 Sensibles Ganglion

Somatosensible Neurone finden sich im Bereich von

- Hirnnerven: Ggl. trigeminale (V), Ggl. geniculi (VII), Ggl. superius (IX, X), Ggl. inferius (IX, X)
- Spinalnerven: Ggl. spinale, liegt in der Hinterwurzel

In einem sensiblen Ganglion liegt das Perikaryon des ersten afferenten Neurons (pseudounipolare Nervenzelle) mit einem T-förmigen Axon, das sich in einen zentralen Fortsatz (zum ZNS) und in einen peripheren Fortsatz (zu den Rezeptoren der Körperoberfläche) teilt

1.9.2 Motorisches Kerngebiet

Somatomotorische Neurone finden sich im Bereich von

- Hirnnerven: Hirnnervenkerne des III., IV., V., VI., VII., IX., X., XI. und XII. Hirnnerven und
- Spinalnerven: Motorisches Vorderhorn des Rückenmarks, Axone treten durch die Vorderwurzel aus

Motoneurone stehen in direktem Kontakt mit der Skelettmuskulatur (keine weitere Verschaltung)

1.10 Gliederung des vegetativen Nervensystems

1.10.1 Visceroafferenzen

Viscerosensible Neurone liegen im Spinalganglion (ca. 5%) oder in den Kopfganglien (Ganglion superius und inferius) des IX. und X. Hirnnerven. Analog zu somatosensiblen Neuronen projiziert der zentrale Fortsatz in das ZNS, während der periphere Fortsatz mit sympathischen oder parasympathischen Nerven zu den inneren Organen bzw. zur Haut (nur sympathisch) verläuft

1.10.2 Visceroefferenzen

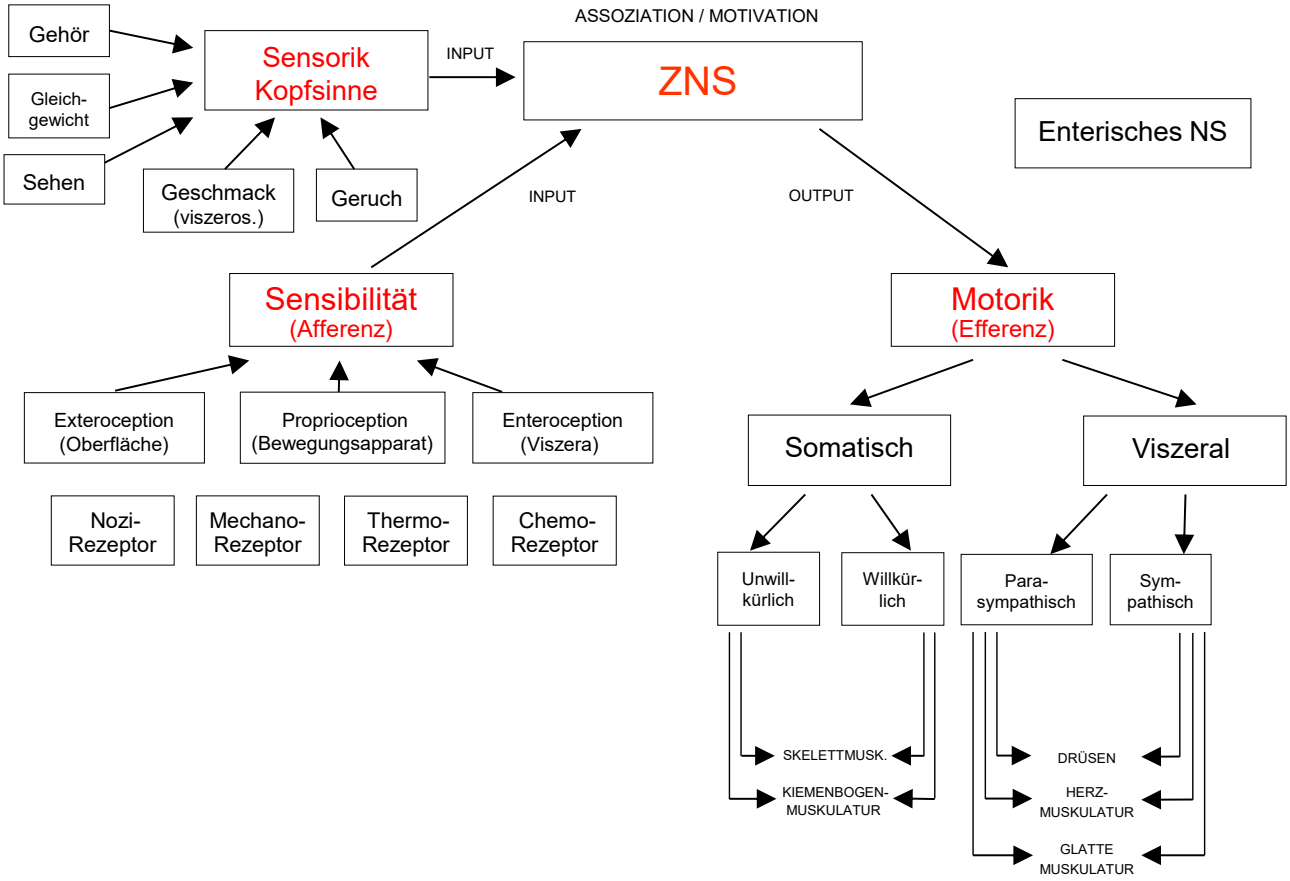
Visceroefferente Nervenbahnen bestehen aus zwei hintereinander geschalteten Neuronen. Die Synapse zwischen erstem und zweitem Neuron liegt in den vegetativen Ganglien, deshalb 1. Neuron = präganglionäres Neuron, 2. Neuron = postganglionäres Neuron

Sympathikus (spinal)	**Lage**	**Transmitter**
Präganglionäres Perikaryon	Seitenhorn des Rückenmarks (C8-L2), entwicklungsbiologisch auch S2-S4*	Acetylcholin
Postganglionäres Perikaryon	Sympathischer Grenzstrang = paravertebrale Ganglien Eingeweideplexus = prävertebrale und (entwicklungsbiologisch) auch pelvine Ganglien*	Noradrenalin (Acetylcholin für Schweißdrüsen)
Parasympathikus (cranial)	**Lage**	**Transmitter**
Präganglionäres Perikaryon	Hirnnervenkerne: Ncl. oculomotorius accessorius Ncl. salivatorius superior + inferior Ncl. dorsalis nervi vagi (mit Einschränkung auch das Seitenhorn des Rückenmarks S2-S4*)	Acetylcholin
Postganglionäres Perikaryon	Kopfbereich: Ggl. ciliare Ggl. pterygopalatinum Ggl. submandibulare Ggl. oticum Eingeweide: in der Nähe des Organs bzw. in dessen Wand (Herz, Lunge, Magen-Darm-Trakt)	Acetylcholin

*neue Erkenntnisse zum sakralen spinalen System: Espinosa-Medina et al., 2016, Science 354:893

1.11 Enterisches (intramurales) Nervensystem (ENS)

Das ENS befindet sich im Ösophagus und Magen-Darmtrakt mit Neuronenansammlungen im *Plexus submucosus* (*Meissner*, in der Tela submucosa) zur Regulation der Drüsentätigkeit und Durchblutung sowie im *Plexus myentericus* (*Auerbach*, zwischen Ring- und Längsmuskelschicht, zur Steuerung der Tunica muscularis). Das enterische Nervensystem ist zuständig für die Regulation der Verdauungsvorgänge, der Drüsentätigkeit und Darmperistaltik. Das System arbeitet eigenständig, wird aber insbesondere vom Parasympathikus beeinflusst. Im folgenden Schema erscheint es in der Visceromotorik, ist jedoch auch viscerosensibel.



1.12 Periphere Organisation und Projektionen

Radix anterior und posterior verbinden das Rückenmark mit dem Spinalnerven, der durch das Foramen intervertebrale zieht. Dorsale Äste des N. spinalis sind für die sensible und motorische Versorgung der Rückenmuskulatur und der darüber liegenden Haut zuständig, ventrale Äste ziehen segmental geordnet nach vorn (z.B. als Nn. intercostales); sie innervieren motorisch und sensibel Brust- und Bauchwand (*segmentale Innervation*). Im Bereich der Extremitäten vermischen sich ventrale Äste der Spinalnerven in den Plexus, d.h. periphere Nerven enthalten Axone aus mehreren Spinalnerven. Das Versorgungsgebiet eines peripheren Nerven stimmt nicht mit der segmentalen Innervation durch die

Spinalnerven überein. *Dermatome* sind Oberflächenareale, die von nur einem Spinalnerven versorgt werden.

1.13 Headsche Zonen – Übertragener Schmerz

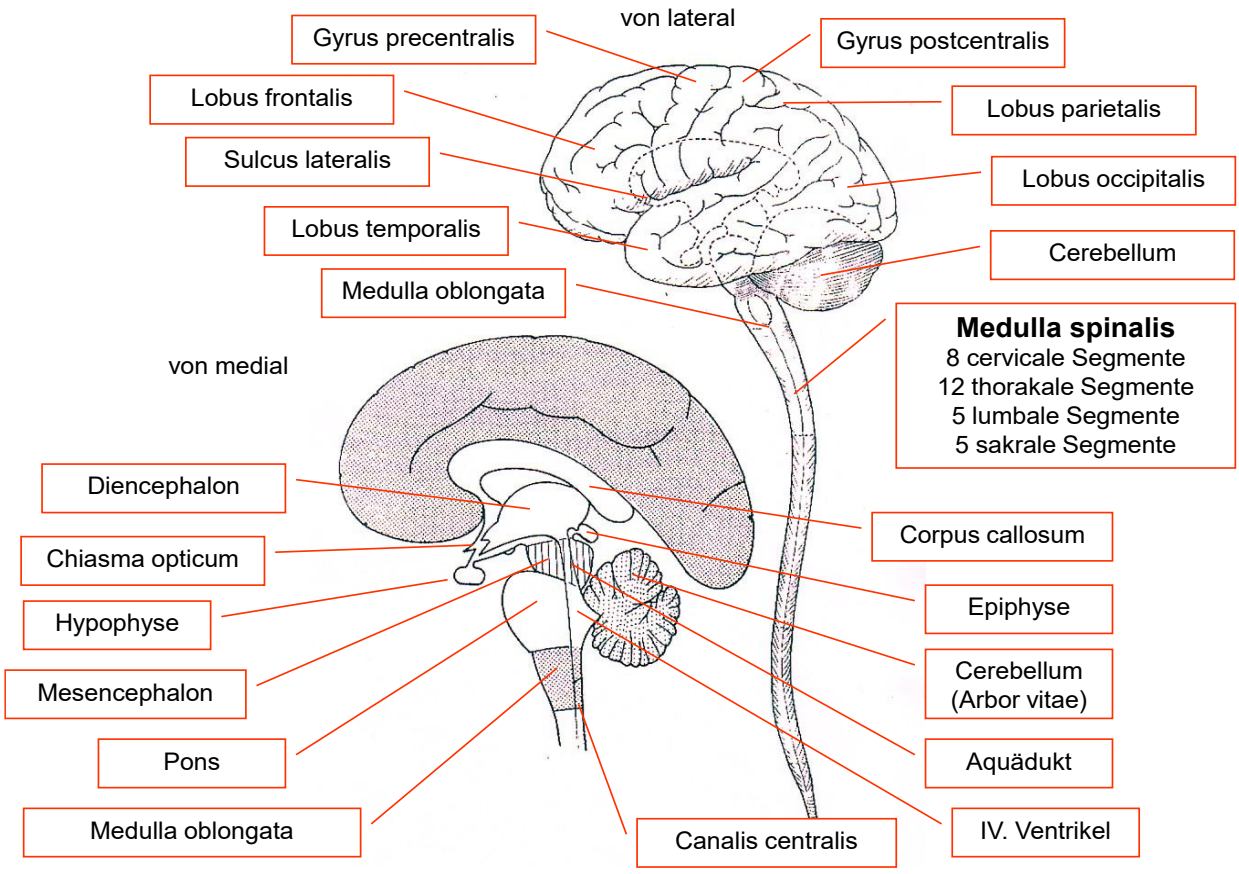
Viscerale Afferenzen, die bewusst werdende Empfindungen aus Eingeweiden leiten, werden im Hinterhorn des Rückenmarks synaptisch verschaltet, teilweise auf dieselben Neurone, die somatische Afferenzen leiten. Das Gehirn lernt im Laufe des Lebens, dass die Informationen dieses weiterleitenden Neurons zumeist somatischen, nicht visceralen Ursprungs sind (da sich mehr Rezeptoren an der Körperoberfläche befinden, die öfters aktiviert werden). Bei Schädigungen innerer Organe kommt es daher zu fälschlicher Zuordnung eines Schmerzreizes auf die Körperoberfläche (übertragener Schmerz in sog. *Headschen* Zonen).

1.14 Funktionelle Gliederung

Enteroception = Viscerosensibilität (Empfindungen aus den inneren Organen)

Exteroceptive Sensibilität = Somatosensibilität (Empfindungen von der Haut)

Proprioceptive Sensibilität = Empfindungen aus dem Bewegungsapparat, d.h. von Muskeln, Sehnen und Gelenken (wird als somatisch klassifiziert)



Abschnitte des ZNS und wichtige Orientierungspunkte

2 Medulla spinalis (Rückenmark)

2.1 Regionen und Umgebung

Das Rückenmark ist ein ca. 43 cm langer Strang und wiegt weniger als 30 g. In 5 Abschnitten befinden sich ingesamt 31 Segmente und dazugehörige Nerven, die das Rückenmark mit dem peripheren Nervensystem (PNS) verbinden. Die Rückenmarkssegmente und Spinalnerven werden mit C, Th, L, S und Co abgekürzt; die entsprechenden Wirbelkörper aber heißen HWK, BWK, LWK, SWK und CoWK.

Bereich	Abkürzung Segmente	Höhe	Anzahl Segmente
Cervikalmark	C	C1 – C8	8
Thorakalmark	Th	Th1 – Th12	12
Lumbalmark	L	L1 – L5	5
Sakralmark	S	S1 – S5	5
Coccygealmark	Co	Co1 – (Co3)	1(-3)
		Summe	31 (-33)

Die Rückenmarkssegmente liegen nicht auf derselben Höhe wie die dazugehörigen Wirbelkörper. Die Namensgebung der Segmente bezieht sich darauf, auf welcher Höhe die Spinalnerven des jeweiligen Segments aus der Wirbelsäule austreten. Da zwischen dem Hinterhauptsknochen des Schädels und dem 1. Halswirbel der 1. Spinalnerv austritt, gibt es im Cervikalmark acht Segmente bei nur 7 Halswirbeln. Die cervikalen Spinalnerven sind also nach dem darunter liegenden Wirbel benannt (so tritt der Spinalnerv C6 zwischen HWK5 und HWK6 aus). Ab Th1 werden sie nach dem darüber liegenden Wirbel benannt (z.B. verlässt der Spinalnerv L5 zwischen LWK5 und SWK1 die Wirbelsäule).

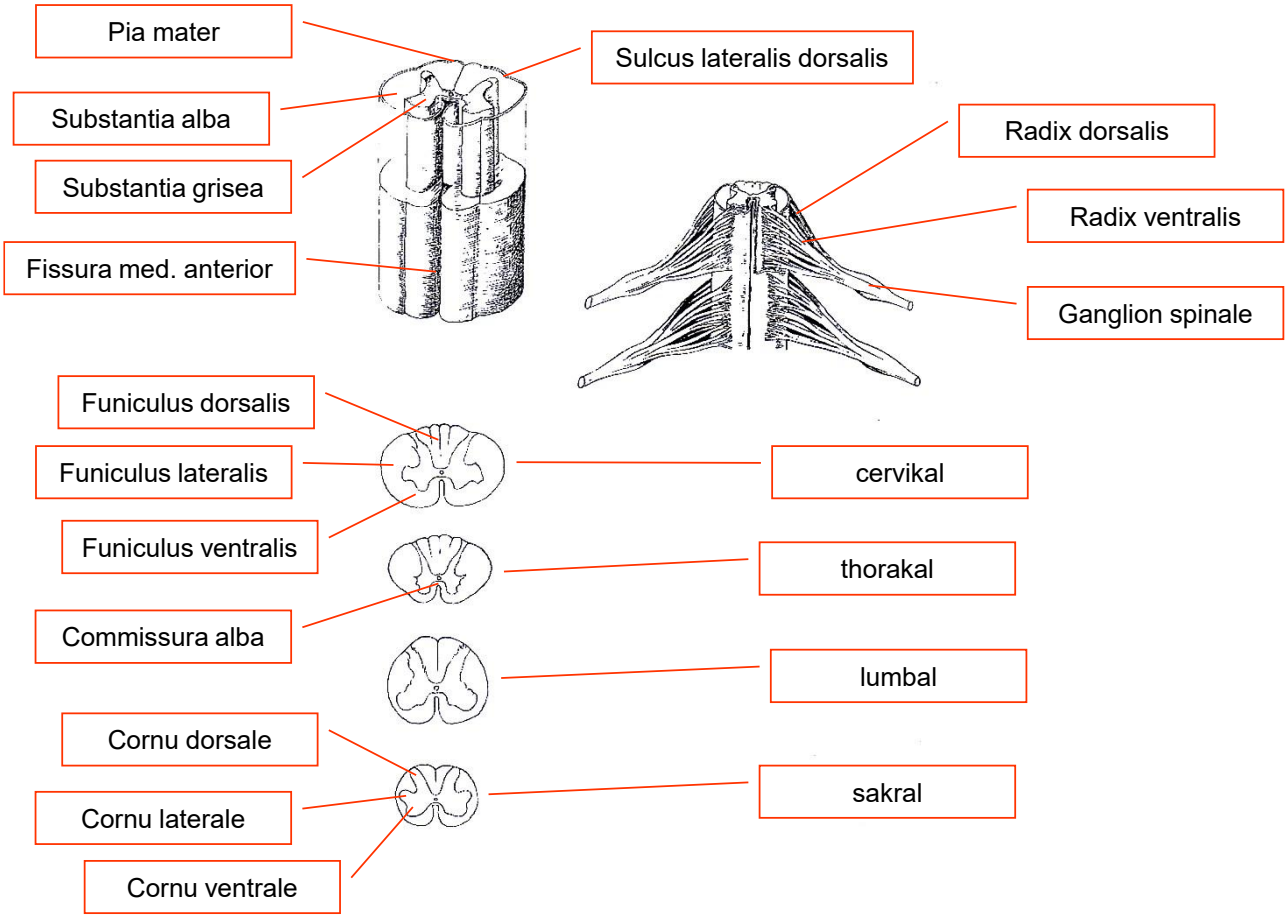
Das Rückenmark lässt sich in zwei Bereiche einteilen. Der innere Bereich enthält Nervenzellen und erscheint als *graue Substanz*. Im ventralen Bereich der grauen Substanz, dem *Vorderhorn*, liegen motorische Nervenzellen, die quergestreifte Skelettmuskeln innervieren. Die Axone dieser Neurone liegen mit ihrem Anfangsteil noch im Zentralnervensystem. Am Beginn der vorderen Wurzelfasern, im *Sulcus anterolateralis* gelangen sie in das PNS und erreichen über die peripheren Nerven schließlich die Muskulatur (bzw. autonome Ganglien im Fall visceromotorischer Neurone). Die dorsalen Wurzeln führen demgegenüber im *Sulcus posterolateralis* die sensiblen Axone aus der Peripherie in das Rückenmark hinein. Aufsteigende Bahnsysteme des Rückenmarks leiten diese afferenten Signale zum Gehirn weiter. Im äußeren Bereich des Rückenmarks befindet sich daher die myelinhaltige sog. *weiße Substanz*. Myelin bildet die lipidhaltige Ummantelung vieler Axone, die als Isolator dient und damit die Reizweiterleitung beschleunigt.

Das Rückenmark erstreckt sich der Länge nach im Spinalkanal. Der Übergang in die *Medulla oblongata* (verlängertes Mark) befindet sich im *Foramen magnum*, dem Bereich der größten Schädelbasisöffnung. Beim Säugling reicht das Rückenmark noch bis zum 3. Lendenwirbelkörper. Da die Wirbelsäule in der 2. Hälfte der Schwangerschaft schneller wächst als das Rückenmark, endet es beim Erwachsenen als *Conus medullaris* auf Höhe der LWK 1/2. Am Steißbein ist es mittels eines bindegewebigen Fadens, dem *Filum terminale*, befestigt.

Im cervikalen (C4 bis Th1) und im lumbosakralen Abschnitt (L2 bis S3) befinden sich Verdickungen, sog. *Intumescentiae*. An diesen Stellen liegen deutlich mehr Nervenzellen in der grauen Substanz, die für die Innervation von Schultergürtel und Arm bzw. Beckengürtel und Bein zuständig sind. Während der Entwicklung bekommen diese Neurone Kontakt zu den Muskeln der Extremitäten, die über Freisetzung von neurotrophen Faktoren das Überleben der Neurone in den Intumescentien sichern, während überzählige Nervenzellen des Thorakalmarks durch *Apoptose* absterben. An den Erweiterungen des Rückenmarks wird deutlich, dass Nervenzellen im Überschuss angelegt werden, es im Verlauf der Entwicklung aber zu einem ‚fine-tuning' durch gezieltes Absterben kommt.

Das Rückenmark ist umgeben von einer weichen Hirnhaut, der *Pia mater*, die der Oberfläche auch in die *Fissura mediana* hinein folgt. Das zweite, ebenfalls sehr dünne Blatt der weichen Hirnhaut ist die *Arachnoidea mater*. Demgegenüber besteht die *Dura mater spinalis* als harte Hirnhaut aus straffem Bindegewebe. Zwischen Periost des Wirbelkanals und der Dura mater befindet sich der epidurale Raum mit mehreren Venen und Fettgewebe. Der *Liquor cerebrospinalis* fließt im darunter liegenden Subarachnoidealraum, der wie die Dura weiter als das Rückenmark, nämlich bis ungefähr SWK2, reicht. Bei der Lumbalpunktion wird eine Nadel in den Subarachnoidealraum eingeführt und dadurch Liquor entnommen.

Für weitere Informationen zur Anatomie und Untersuchung sowie möglichen Regeneration des Rückenmarks nach Verletzungen wird folgendes 2023 erschienenes Sachbuch empfohlen: 'Die Regeneration von Nerven und Rückenmark - Was wir über Mechanismen und therapeutische Ansätze wissen' (über *SpringerLink* kostenfrei verfügbar für Studierende).



Wichtige Begriffe der Rückenmarksanatomie

2.2 Rückenmarkswurzeln und Spinalnerven

Eine *Radix* (Wurzel) bezeichnet die in ein Rückenmarkssegment ein- bzw. aus ihm austretenden Nervenfasern. Jede Wurzel besteht aus 5-10 Wurzelfäden, den *Fila radicularia*. Ventrale efferente und dorsale afferente Axone vereinigen sich zum *N. spinalis*, der die Wirbelsäule im *Foramen intervertebrale* verlässt. Die Aufteilung des N. spinalis in seine Äste ist in der folgenden Tabelle zusammengefassst.

Nervenast	**Funktion**
Ramus anterior	bildet Plexusnerven für Extremitäten und Interkostalnerven
Ramus posterior	innerviert autochthone Muskulatur und rückwärtige Hautbereiche
Rami communicantes	Verbindungen zum vegetativen Nervensystem
Ramus meningeus	sensible Versorgung von Dura mater spinalis, Bandscheiben und des hinteren Längsbandes

Aufgrund der höheren Wachstumsgeschwindigkeit der Wirbelsäule ab dem 3. Monat der Fetalentwicklung ist das Rückenmark um 1/3 kürzer als die Wirbelsäule. Dadurch finden sich etliche

Wurzeln unterhalb des Conus medullaris des Rückenmarks, die in ihrer Gesamtheit als *Cauda equina* (Pferdeschwanz) bezeichnet werden. Die lumbosakralen Wurzelaxone der Cauda equina können über 20 cm lang werden.

Die hintere Wurzel enthält somatosensible und viscerosensible Axone. Das *Ganglion spinale*, in dem die Zellkörper dieser Axone lokalisiert sind, stellt einen Teil der hinteren Wurzel dar. Im Bereich des ersten cervikalen Spinal- und der Coccygealnerven kann das Ganglion spinale sehr klein sein. Demgegenüber verlaufen in der vorderen Wurzel die somato- und visceromotorischen Axone. Interessanterweise führt die vordere Wurzel auch unbemarkte, sensible Axone, deren Zellkörper in den Spinalganglien liegen. Das lässt sich dadurch erklären, dass während der Entwicklung dünne, marklose Axone aus dem Spinalganglion am Beginn des Spinalnerven in beide Richtungen auswachsen können (Richtung Peripherie zu den Nerven oder rückwärts zum Rückenmark in die vordere Wurzel hinein). Wenn die Axone dann auf die Grenze zum ZNS, also auf Oligodendrocyten in der weißen Substanz, stoßen, kommen sie nicht weiter (ZNS ist inhibitorisch) und drehen um (sie machen tatsächlich einen U-Turn). Daher findet man einzelne marklose Fasern in der vorderen Wurzel.

2.3 Graue Substanz

2.3.1 Vorder-, Seiten-, Hinterhorn

In der grauen Substanz des Rückenmarks liegen die Zellkörper der Rückenmarksneurone sowie das sie umgebende *Neuropil*, bestehend aus neuronalen Zellfortsätzen, Gliazellen und Gefäßen. In der Längsachse sind die Neurone in Säulen gruppiert, die im Querschnitt als charakteristische H-Figur imponieren.

- Das *Cornu anterius* (*ventrale*, Vorderhorn) enthält somatomotorische Neurone in somatotoper Anordnung. Dabei innervieren mediale Neurone den Rumpf und proximale Muskeln, laterale die distalen Muskeln der Extremitäten; vom hinteren Bereich des Vorderhorns werden die Beuger, vom vorderen die Strecker angesteuert.
- Das *Cornu posterius* (*dorsale*, Hinterhorn) enthält somato- und viscerosensible Nervenzellen sowie Interneurone
- Das *Cornu laterale* (Seitenhorn) enthält visceromotorische Neurone für das sympathische (C8-L2) und parasympathische Nervensystem (S2-S4, aber siehe Seite 4)

Im cervikalen und lumbosakralen Bereich ist die H-Figur besonders ausgeprägt. Das thorakale Rückenmark hat weniger Neurone, da von hier keine Extremitäten innerviert werden. Dafür findet sich ein Seitenhorn. In allen drei Bereichen sind auch Interneurone lokalisiert. Eine *Commissura grisea*

befindet sich in der Mitte der grauen Substanz. In der Medianlinie der Commissur befindet sich der *Canalis centralis*, der die inneren Liquorräume des Gehirns fortsetzt, beim Menschen aber größtenteils verödet ist.

2.3.2 Eigenapparat

Nervenfaserbündel im Grenzgebiet von grauer und weißer Substanz werden als *Fasciculi proprii* oder Grundbündel bezeichnet. Sie verbinden Rückenmarkssegmente untereinander über kurze auf- und absteigende Interneurone.

Zum Eigenapparat gehören außerdem absteigende Axonkollateralen von Spinalganglienneuronen: Im Bereich des Septum medianum posterius der *Fasciculus septomarginalis* (ovales Bündel) sowie zwischen Fasciculus gracilis et cuneatus der *Fasciculus interfascicularis* (Schultze-Komma).

2.3.3 Nervenzellen: Wurzel-, Binnen- und Strangzellen

Wurzelzellen

Die Axone dieser Neurone verlaufen durch die Vorderwurzel, sie liegen also teilweise im PNS. Es handelt sich um sehr große Nervenzellen (Durchmesser bis 100 µm), die einen ausgeprägten Metabolismus und daher viel raues endoplasmatisches Retikulum aufweisen, das als Nissl-Schollen erscheint. Neben den α-Motoneuronen werden auch die zu den Muskelspindeln projizierenden γ-Motoneurone zu den Wurzelzellen gezählt.

Binnenzellen

Diese zumeist inhibitorischen Zellen verbinden Neurone der grauen Substanz. Sie verlassen das Rückenmark nicht. Es gibt

- *Schaltzellen*, die Neurone derselben Seite und desselben Segments synaptisch verbinden
- *Kommissurenzellen*, die Neurone einer Seite mit Neuronen der Gegenseite verbinden
- *Assoziationszellen*, die Neurone der gleichen Seite über mehrere Segmente verbinden

Letztere bilden die Axonbündel der Fasciculi proprii, die der grauen Substanz direkt anliegen.

Strangzellen

Sie verbinden das Rückenmark mit anderen Hirnzentren (z.B. die zweiten Neurone der Schmerzbahn) und verlaufen in den Strängen (Tractus) der weißen Substanz.

2.3.4 Cytoarchitektonische Gliederung

Die graue Substanz des Rückenmarks wird in zehn Laminae (Zellschichten) nach *Rexed* unterteilt. Sie werden von posterior nach anterior durchnummeriert und entsprechen nur teilweise bestimmten

anatomischen Kerngebieten des Rückenmarks. In der folgenden Tabelle sind die Laminae und Kerngruppen zusammengefasst.

Lamina	Kerne und Neurone
I	Nucl. dorsomarginalis
II	Substantia gelatinosa (vorwiegende Verarbeitung von Schmerzafferenzen)
III und IV	Nucl. proprius (mit zumeist propriozeptiven Afferenzen)
V und VI	Nucl. thoracicus posterior, Umschaltung spinocerebellärer Afferenzen
VII	Nucl. intermediolateralis (visceromotorisch), medialer und lateraler Anteil
VIII	Interneurone im Vorderhorn
IX	Motoneurongruppen (somatotopisch geordnet)
X	Region um den Canalis centralis

2.4 Weiße Substanz

2.4.1 Vorder-, Seiten- und Hinterstrang

Die im äußeren Bereich liegende weiße Substanz des Rückenmarks lässt Faserbündel (*Funiculi*) erkennen, die wiederum in Gruppen organisiert sind und *Fasciculi* bzw. *Tractus* heißen. Unterschieden werden:

- Funiculus anterior (Vorderstrang)
- Funiculus posterior (Hinterstrang)
- Funiculus lateralis (Seitenstrang)

Im Rückenmark liegt also die weiße Substanz außen und die graue Substanz innen, im Gehirn ist es genau umgekehrt: Die weiße Substanz, die aus den myelinisierten Bahnen besteht, liegt innen und die graue Substanz liegt im *Cortex cerebri*, der Rinde des Endhirns.

Axone mit einem gemeinsamen Ursprung und einem gemeinsamen Ziel werden zu Fasciculi bzw. Tractus zusammengefasst, wobei der erste Namensteil den Ursprung, der zweite dagegen das Terminationsgebiet benennt (z.B. der Tractus corticospinalis mit Neuronen im Cortex cerebri und axonalen Endigungen im Rückenmark). Eine axonale Bahn hingegen setzt sich aus mehreren, synaptisch miteinander verbundenen Nervenzellen verschiedener Trakte zusammen (z.B. die Schmerzbahn).

2.4.2 Somatotopische Gliederung

Innerhalb der Fasertrakte findet sich eine Gliederung nach der Herkunft bzw. nach dem Ziel der Fasern. Dadurch wird ein Überkreuzen der Axone verhindert.

Anordnung der Axone innerhalb eines motorischen Traktes

Die cervikalen Axone liegen der grauen Substanz am nächsten, es folgen die thorakalen, die lumbalen und am weitesten lateral die sakralen Axone. Dabei zweigen höhere Segmente früher als tiefere Segmente in das Vorderhorn ab, um dort synaptisch verschaltet zu werden.

Anordnung der Axone innerhalb eines sensiblen Traktes im Vorderseitenstrang

Analog zu den motorischen Bahnen kommen die Axone hier von medial nach lateral in folgender Reihenfolge zu liegen: cervikal, thorakal, lumbal und sakral. Die Axone im Vorderseitenstrang gelangen aus der grauen Substanz in die kontralaterale weiße Substanz und ziehen nach kranial, wobei Axone aus höheren Segmenten medial angelagert werden.

Anordnung der Axone innerhalb des Hinterstrangs

Die sakralen Axone gelangen zuerst in den *Funiculus posterior*, sie liegen daher am weitesten medial; es schließen sich nach lateral die lumbalen, dann die thorakalen und zuletzt die cervikalen Axone an. Die Hinterstrangbahnen ziehen also direkt von der Hinterwurzel in die weiße Substanz und steigen bis in den Hirnstamm auf. Innerhalb der Hinterstränge finden sich weiterhin absteigende Axonkollateralen, die zum Eigenapparat des Rückenmarks gehören.

2.4.3 Leitungssysteme

Man unterscheidet motorische (efferente) und sensible (afferente) Bahnen. Die sensiblen Bahnen erhalten Informationen von peripheren Rezeptoren und steigen im Rückenmark auf. Da die Körperperipherie im Gehirn spiegelbildlich repräsentiert ist, müssen diese Axone auf die gegenüberliegende Seite kreuzen. Die motorischen Bahnen kreuzen zumeist ebenfalls und leiten Informationen aus dem Gehirn in den Hirnstamm und das Rückenmark weiter. Da von kranial nach kaudal die Zahl absteigender Axone abnimmt und umgekehrt vermehrt aufsteigende Axone in das Rückenmark gelangen, ist das Volumen der weißen Substanz im cervikalen Abschnitt am größten. Die wichtigsten Bahnen des Rückenmarks werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Sensible Bahnen im Hinterstrang

Der *Fasciculus gracilis* und der *Fasciculus cuneatus* leiten Empfindungen der Haut, der Gelenke sowie der Muskeln und Sehnen. In diesen Zielorganen unterscheidet man Rezeptoren für

- Druck (Merkelsche Zellen, Ruffini-Körperchen)
- Vibration (Merkelsche Zellen, Vater-Paccinische Lamellenkörperchen)
- Berührung (Meissnersche Tastkörperchen, freie Nervenendigungen)
- Muskeldehnung und Muskeltonus (Muskelspindeln, Golgi-Sehnenorgan)

Diese Sinnesorgane sind mit den primär afferenten Neuronen in den Hinterwurzelganglien verbunden, die 50.000 (thorakal) bis 100.000 (Plexusbereich) Neurone enthalten und deren Zellen einen

Durchmesser bis über 100 µm erreichen können. Sie sind von Satelliten-Zellen umgeben, einer speziellen Variante von Schwann-Zellen.

	Fasciculus gracilis	Fasciculus cuneatus
Rezeptoren	Mechanorezeptoren der unteren Extremität und des unteren Rumpfbereiches	Mechanorezeptoren der oberen Extremität, des oberen Rumpfbereiches und des Halses
Verlauf	Pseudounipolare Neurone im Spinalganglion des jeweiligen Segments; zentripetale Axone gelangen durch die Radix dorsalis in das Rückenmark und dort direkt in den Fasciculus gracilis; sie werden im Hinterhorn nicht synaptisch verschaltet und kreuzen auch nicht auf die kontralaterale Seite	Analog Fasciculus gracilis, ab Rückenmarkseintritt weiter im Fasciculus cuneatus
Lokalisation	Hinterstrang	Hinterstrang; schließt sich ab dem Thorakalmark lateral an den Fasciculus gracilis an
Ziel	Nucl. gracilis in der Medulla oblongata (Tuberculum gracile)	Nucl. cuneatus in der Medulla oblongata (Tuberculum cuneatum)
Weiterleitung	Die 2. Neurone liegen im Nucl. gracilis, von dort gelangen ihre Axone im Lemniscus medialis (gekreuzt) zum Thalamus. Hier liegt das 3. Neuron, das bis zum Gyrus postcentralis projiziert	2. Neuron liegt im Nucl. cuneatus, dann weiter wie Fasciculus gracilis
Funktion	Tastempfindungen der Haut (Exterozeption), Tiefensensibilität (bewusster Lagesinn, Propriozeption)	Analog Fasciculus gracilis

	Tractus spinothalamicus ant. et lat.	Tractus spinocerebellaris ant. et post.
Rezeptoren	Freie Nervenendigungen und Rezeptoren in Haut, Gelenken, Muskeln und Eingeweiden	Muskelspindeln und Golgi-Sehnenorgane sowie Mechanorezeptoren in der Haut
Verlauf	Erstes Neuron im Spinalganglion; zentripetale Axone steigen noch 1-2 Segmente auf, um dann Hinterhorn-Neurone in den Laminae I und II zu innervieren; deren Axone kreuzen in der Commissura alba zur Gegenseite und ziehen nach kranial zum Thalamus; es schließen sich Axone aus dem Nucl. spinalis nervi trigemini für die Schmerz- und Thermosensibilität des Gesichtes an	Pseudounipolare, erste Spinalganglien-neurone innervieren Hinterhorn-Neurone, die sich u.a. im Nucl. thoracicus befinden (Stilling-Clarke' Säule, Ursprung des Tr. spinocerebellaris post.)
Lokalisation	Vorderseitenstrang	Im Seitenstrang außen, aufsteigende Axone, die z.T. im Rückenmark und im Hirnstamm auf die Gegenseite kreuzen (nur Tr. spinocerebellaris ant.)
Ziel	Nucl. ventralis posterior des Thalamus	Über den Pedunculus cerebellaris inferior (Tr. spinocerebellaris post.) und superior (Tr. spinocerebellaris ant.) in das Cerebellum, das grundsätzlich nur die ipsilaterale Körperhälfte abbildet
Weiterleitung	Das dritte Neuron liegt im Thalamus und projiziert in den Gyrus postcentralis	
Funktion	Grobe Druck- und Tastempfindungen (Tractus spinothalamicus ant.), Schmerz- und Temperaturempfindungen (Tractus spinothalamicus lat.)	Die Bahnen leiten propriozeptive Informationen über die Stellung der Extremitäten im Raum (wichtig für die Koordination und Feinabstimmung von Bewegungen); im cervikalen Bereich übernimmt diese Funktion der Tractus cuneocerebellaris für die propriozeptiven Afferenzen der oberen Extremität, die im Nucl. cuneatus accessorius umgeschaltet werden

Sensible Bahnen im Vorderseitenstrang

Der wichtigste Trakt in diesem Strang, der *Tractus spinothalamicus lateralis*, leitet Informationen über die Schmerz- und Temperaturwahrnehmung. Sie gelangen zusammen mit dem Lemniscus medialis über den Thalamus zum Gyrus postcentralis. Die Ursprungsneurone dieser Bahn stehen auch unter Kontrolle supraspinaler Neurone, die Serotonin und Noradrenalin verwenden und z.T. über Endorphin-haltige Interneurone hemmend auf sie einwirken können (sog. endogene Schmerzhemmung).
Die weiteren sensiblen Bahnen im Vorderseitenstrang sind:

- *Tractus spinotectalis*: Zwischen Vorder- und Seitenstrang zum Tectum des Mittelhirns ziehender Trakt. Leitet Schmerz- und Temperaturempfindungen gekreuzt zum Colliculus superior
- *Tractus spinovestibularis*: Im Vorderstrang zum Nucl. vestibularis lateralis in der Rautengrube ungekreuzt verlaufender Trakt für die reflektorische Wiederherstellung des Gleichgewichts
- *Tractus spinoreticularis*: Im Seitenstrang zum Weckzentrum der Formatio reticularis projizierende Bahnen, die nach Berührung oder Schmerz zur Aufmerksamkeitssteigerung führen (ungekreuzt)
- *Tractus spinoolivaris*: Im Vorderstrang zum Nucl. olivaris inf. projizierende, indirekte spinocerebelläre Bahn mit propriozeptiven Informationen (doppelt gekreuzt)

Pyramidal-motorische Bahnen

Der *Tractus corticospinalis lateralis* bildet den größten absteigenden Trakt im Rückenmark. Die Axone projizieren im Wesentlichen auf α-Motoneurone im Vorderhorn (z.T. über Interneurone), aber auch auf propriozeptive Regelkreise im Hinterhorn. Damit übt die Pyramidenbahn eine Kontrollfunktion über polysynaptische Reflexe aus, die auf afferenter Information beruhen. Etwa 70-90% der Fasern kreuzen im Bereich der *Decussatio pyramidum* ventral in der Medulla oblongata. Der Rest verläuft im Vorderstrang neben der Fissura mediana anterior und kreuzt erst im jeweiligen Segment zum *Tractus corticospinalis anterior*. Axone des *Tractus corticonuclearis* enden an einigen Hirnnervenkernen im Hirnstamm (gekreuzt, ungekreuzt und doppelseitig).

Diese Tractus stellen die zentrale Bahn der Willkürmotorik dar, die aber auch unwillkürliche Komponenten des sog. extra-pyramidal-motorischen Systems (EPMS) mit sich führt. Das pyramidal-motorische System steuert insbesondere willkürliche Bewegungen der distalen Muskulatur, z.B. die Feinmotorik von Unterarm und Hand. Es ist erst nach den ersten Lebensjahren vollständig ausgereift. Bei einer Läsion der Pyramidenbahn tritt das sog. *Babinski-Zeichen* auf, das auch bei vielen Neugeborenen noch nachweisbar ist. Es ist durch eine Streckung (Hyperextension) der Großzehe nach Bestreichen der lateralen Fußsohle gekennzeichnet. Normalerweise führt dieser Reiz zu einer tonischen Plantarbewegung der Zehen. Bei Primaten kommt dem pyramidal-motorischen System eine entscheidende Bedeutung zu, was sich bei Verletzungen dieser Bahnen, z.B. im Rahmen einer

Querschnittsläsion, zeigt. Regelmäßig sind hierbei aber auch extra-pyramidale Bahnen mitbetroffen, da die in den sog. Basalganglien generierten Aktivitäten auch über die Pyramidenbahn geleitet werden.

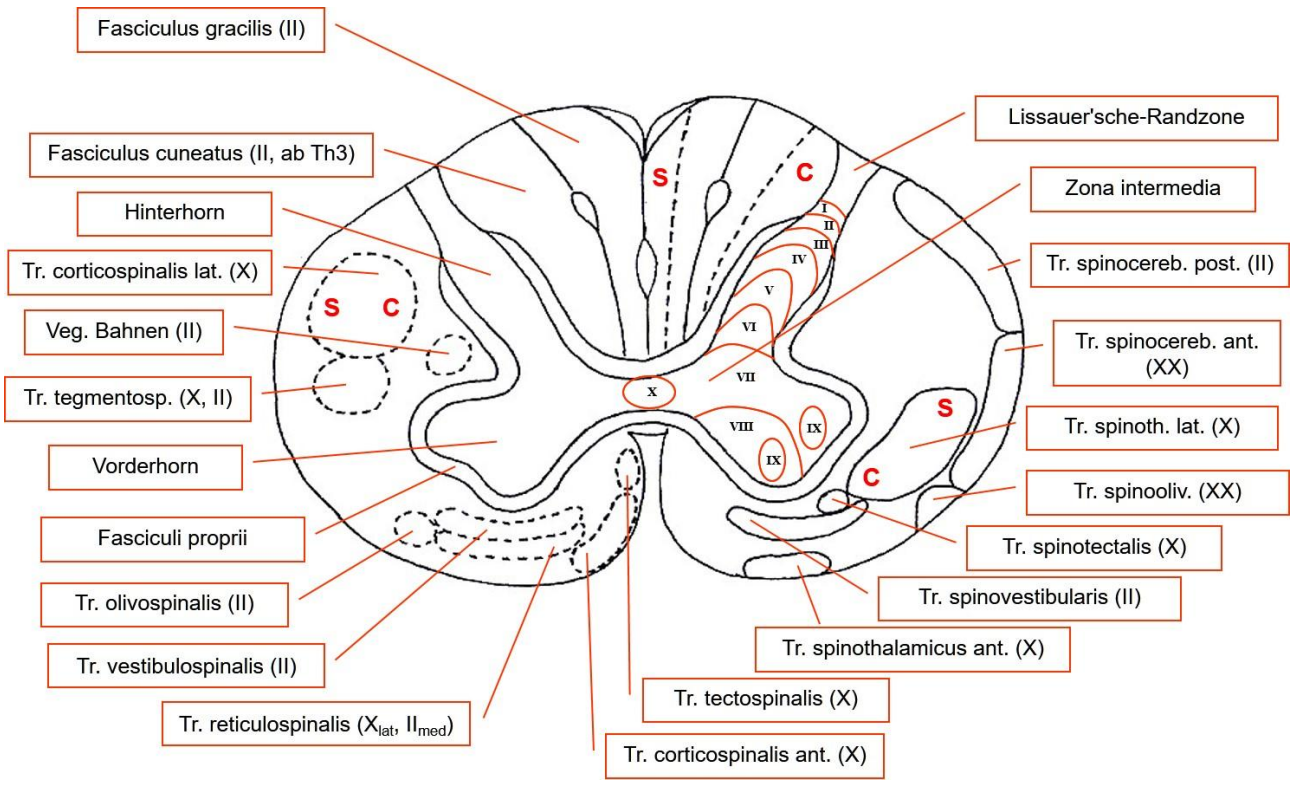
Extra-pyramidal-motorisches System (EPMS)

Das EPMS geht von Hirnstamm-Regionen aus, die direkte Verbindungen zum Rückenmark haben. Diese sind u.a.

- der Nucleus ruber (Tractus rubrospinalis, gekreuzt)
- die Nuclei vestibulares (Tractus vestibulospinalis, ungekreuzt)
- die Formatio reticularis (Tractus reticulospinalis, bilateral)

Die Axone dieser Kerngebiete verlaufen also nicht im Tractus corticospinalis zum Rückenmark. Subkortikale Kerngebiete des EPMS (Basalganglien) projizieren aber über den ventralen Thalamus zum motorischen Cortex. Die in den Basalganglien generierten Impulse gelangen von dort zusammen mit pyramidalen Axonen zu Hirnstamm und Rückenmark. Der Begriff ‚extra-pyramidal' ist daher irreführend und sollte eigentlich nicht mehr verwendet werden.

Das EPMS ist für grobmotorische Massenbewegungen durch Regulation der Rumpf- und proximalen Extremitätenmuskulatur und damit für das Halten des Gleichgewichts verantwortlich, aber auch am Muskeltonus (Grundspannung) und damit bei allen gelernten und willkürlich ausgelösten Bewegungsabläufen beteiligt. Hier die Rexed-Laminae und wichtige Bahnen auf Höhe des cervikalen Rückenmarks (X = gekreuzt, II = ungekreuzt, XX = doppelt gekreuzt, S = Lage sacraler Fasern, C = Lage cervikaler Fasern)



Amyotrophe Lateralsklerose (ALS)

Diese Erkrankung zeichnet sich durch eine progressiv verlaufende Degeneration der Motoneurone im Cortex (Ursprung des Tractus corticospinalis) und im Vorderhorn des Rückenmarks aus. Dadurch, dass erstes *und* zweites motorisches Neuron betroffen sind, kommt es zu einer seltenen Kombination aus zentraler und peripherer Lähmung. Anfangs kommt es meist zu einer Schwäche der Beine. Der Untergang der Motoneurone im Cervikalmark hat eine Lähmung der Hand und evtl. der Atemmuskulatur zur Folge. Blasen- und Mastdarmstörungen sind eine Folge des Verlustes autonomer absteigender Bahnen. Eine Degeneration der kaudalen motorischen Hirnnervenkerne verursacht Sprach- und Schluckstörungen (*progressive Bulbärparalyse*). Die genaue Ursache dieser motorischen Systemkrankheit ist nicht bekannt.

2.5 Reflexbögen: Eigen- und Fremdreflexe

2.5.1 Eigenreflex (direkter oder monosynaptischer Reflexbogen)

Ein Reflex ist eine *unwillkürliche* Antwort auf einen Reiz. Wird z.B. ein Muskel durch einen Schlag auf seine Sehne gedehnt, führt dies zur Aktivierung der Muskelspindeln. Dieser Impuls gelangt über ein schnelles afferentes Axon in das Hinterhorn des Rückenmarks und wird direkt an die Motoneurone des gedehnten Muskels weitergegeben. Reiz und Antwort erfolgen im selben Organ. Der Reflex ist praktisch unermüdbar. Da über die gleiche Afferenz auch antagonistisch wirkende Muskeln entspannt werden, hat der Eigenreflex zusätzlich eine polysynaptische Komponente.

Wichtige *Muskeldehnungsreflexe* und ihre dazugehörigen Rückenmarkssegmente sind der Bizeps- (C5-6), Trizeps- (C6-7), Quadrizeps- (L2-4) und der Triceps surae-Reflex (L5-S2). Die beiden letzteren werden auch als Patellar-Sehnen- bzw. Achilles-Sehnen-Reflex bezeichnet und dienen der Längenregulation der entsprechenden Muskeln. Patellar-Sehnen- und Achilles-Sehnen-Reflex dienen dem Arzt zur Funktionsüberprüfung der motorischen und sensiblen Nerven, die den entsprechenden Muskel innervieren, sowie der dazugehörigen Rückenmarkssegmente.

2.5.2 Fremdreflex (indirekter oder polysynaptischer Reflexbogen)

Von den Eigenreflexen sind die Fremdreflexe zu unterscheiden, die als polysynaptische *Schutzreflexe* aufgefasst werden können. Schmerz- und Berührungsempfindungen gelangen in die Substantia gelatinosa des Hinterhorns, um dort synaptische Verbindungen mit Neuronen des Eigenapparates einzugehen. Über die Fasciculi proprii können mehrere Segmente beeinflusst werden, in denen

verschiedene Motoneurongruppen aktiviert oder gehemmt werden. Reiz und Antwort erfolgen in verschiedenen Organen, die Reflexe sind leicht ermüdbar. Als Beispiele sind hier die Fluchtreflexe zu nennen. Berührt man z.B. eine heiße Herdplatte, wird die Hand schon weggezogen, bevor man den Schmerz überhaupt wahrnimmt. Tritt man auf einen Nagel, so wird der Fuß unwillkürlich gehoben. Weitere Fremdreflexe sind der

- *Bauchdeckenreflex*: Kontraktion der Bauchmuskulatur nach Bestreichen der Bauchdeckenhaut
- *Cremasterreflex*: Anhebung des Hodens nach Berühren der Oberschenkelinnenseite
- *Cornealreflex*: automatischer Lidschluss nach Berühren der Hornhaut des Auges

Rückenmarksläsion durch einen extramedullären Tumor

Oft führen solide intradurale Tumoren durch Druck auf die Hinterwurzel und Hinterstrangbahnen zuerst zu radikulären Schmerzen und Missempfindungen. Später ist auch der Seitenstrang betroffen. Es finden sich dann eine zunehmende ipsilaterale (gleichseitige) Lähmung des Beines sowie Parästhesien, die zunächst ipsilateral, später auch beidseitig, in einen Sensibilitätsverlust (extero- und propriozeptiv) übergehen können. Die Symptome nehmen von kaudal nach kranial bis auf die Höhe des betroffenen Segmentes zu. Weiterhin tritt eine Klopfempfindlichkeit der Wirbelkörper auf. Auch Blasen- und Mastdarmstörungen sind zu beobachten.

Eine halbseitige Schädigung des Rückenmarks führt zum *Brown-Sequard-Syndrom*: Auf der betroffenen Seite kommt es ein bis zwei Segmente kaudal der Läsion zu einem Ausfall der Hinterstrangsensiblität und Lähmung der Extremitäten, wohingegen auf der kontralateralen Seite ein Schmerz- und Temperaturverlust zu beobachten ist (sog. *dissoziierte Empfindungsstörung*). Auf der ipsilateralen Seite kommt es zu einer Lähmung, da der Tractus corticospinalis ausfällt.

Bei einer unvollständigen Lähmung spricht man von einer *Parese*, bei einer vollständigen von *Plegie* oder *Paralyse*. Handelt es sich um eine zentrale Lähmung, also einer Läsion im Rückenmark oder im Gehirn, so tritt im Laufe von Wochen eine *Spastik* ein, die mit verstärkten Eigenreflexen einhergeht. Die gesteigerten Eigenreflexe erfolgen vermutlich über eine vermehrte Innervation der Motoneurone durch propriospinale Afferenzen, die frei gewordene Kontaktstellen an den Motoneuronen einnehmen.

Intramedulläre Tumore wachsen oft über mehrere Segmente im Hinterstrangbereich des Rückenmarks. Durch die vertikale und horizontale Ausbreitung weisen sie eine heterogene Symptomatik auf. Mehr als die Hälfte dieser Geschwülste sind *Ependymome*.

2.6 Segmentale Innervation (Dermatom)

Das Hautsegment, das durch einen Spinalnerv sensibel versorgt wird, heißt *Dermatom*. Durch die Entwicklung der Extremitäten werden die Dermatome C5-Th1 auf den Arm, solche von L2-S2 auf die untere Extremität verlagert. Wichtig ist, dass sich Dermatome überlappen können. So wie wir den Spinalnerven ein sensibles Innervationsareal zuordnen können, so ist es auch möglich, die motorische Innervation auf eine segmentale Versorgung zurückzuführen. Die Kenntnis der segmentalen Innervation der Körperoberfläche sowie der Muskulatur ist für die klinische Diagnostik neurologischer Erkrankungen von allergrößter Bedeutung.

Bei einer Läsion eines Spinalnerven bzw. seiner Wurzeln oder des entsprechenden Rückenmarksegmentes lassen sich die typischen Symptome in den Dermatomen und Muskeln nachweisen: Schmerz, Missempfindungen, Muskelschwäche, Ausfall von Eigenreflexen sowie der Sensibilität (zumeist erst bei Ausfall zweier benachbarter Dermatome).

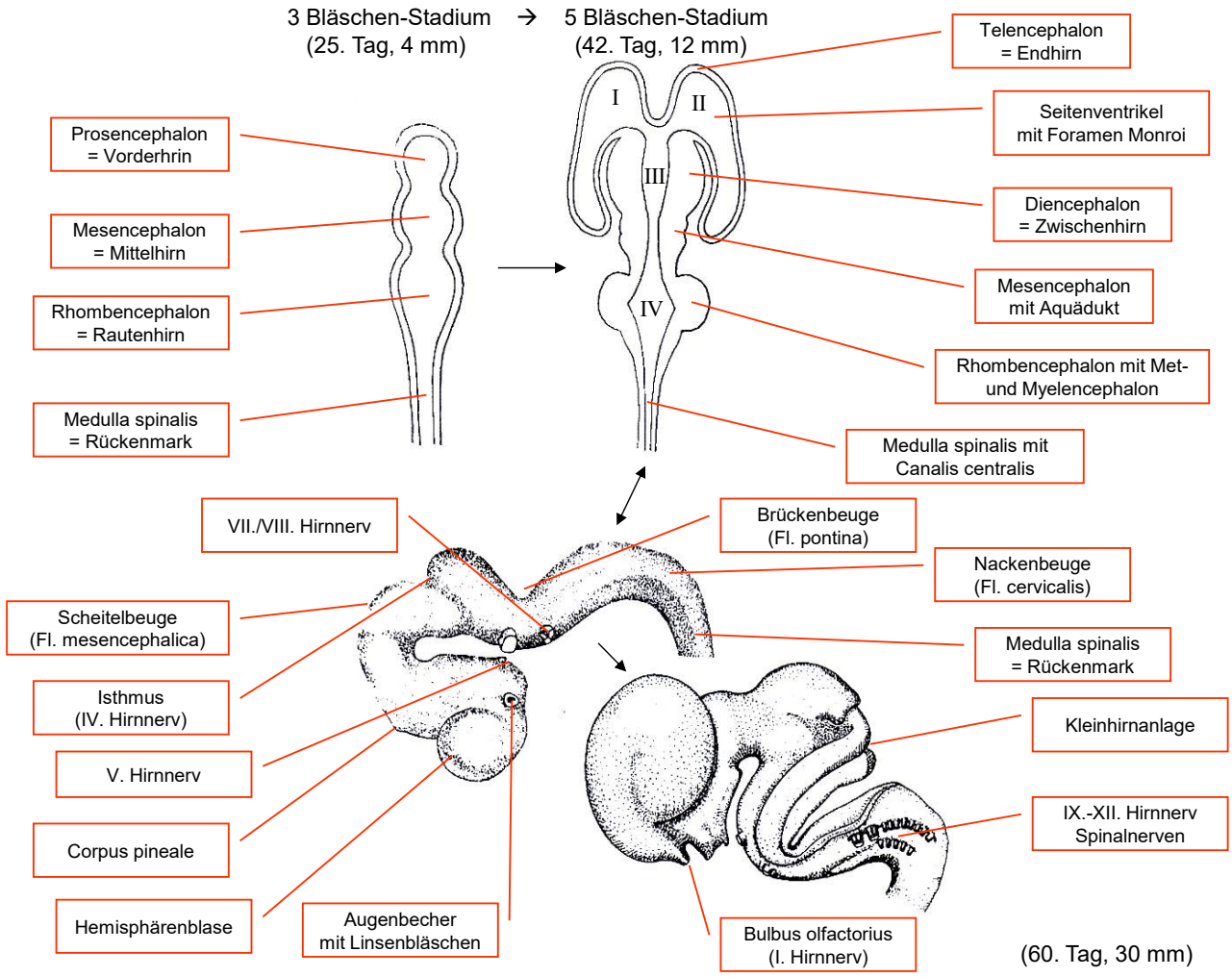
Bandscheiben mit ihrem Gallertkern und Faserring sowie die Intervertebralgelenke sind im Laufe des Lebens einer hohen Belastung ausgesetzt. Der aufrechte Gang des Menschen führt zu Druck auf Wirbelkörper und Wirbelgelenke, der abgepuffert werden muss. Hier finden sich daher am häufigsten degenerative Veränderungen im Wirbelsäulenbereich. Schmerzen im Bereich der Hals- und Lendenwirbelsäule gehören zu den am meisten genannten Beschwerden überhaupt und sind für beträchtliche Kosten im Gesundheitswesen verantwortlich.

Im HWS-Bereich sind C6 und C7 am häufigsten betroffen, in der LWS finden sich 95% aller Bandscheibenvorfälle ober- oder unterhalb von LWK5. Der auf einen Riss des Faserrings folgende, typische dorsolaterale Vorfall des Nucleus pulposus betrifft in der Regel die unterhalb austretende Wurzel mit den entsprechenden Schmerzen und Missempfindungen, sog. Parästhesien, im L5- bzw. S1-Dermatom und Schwierigkeiten bei der Hüftstreckung und Dorsalextension der Fußzehen (L5). Ist der Spinalnerv S1 betroffen, können die Plantarflexion und der Achilles-Sehnenreflex eingeschränkt sein. Mediale Bandscheibenvorfälle sind selten, können aber eine der Querschnittslähmung vergleichbare Symptomatik verursachen.

3 Truncus cerebri (Hirnstamm)

3.1 Gliederung und Lage

Mesencephalon (Mittelhirn) und *Rhombencephalon* (Rautenhirn) bilden den Hirnstamm. Er setzt das Rückenmark nach kranial fort und grenzt oben an das *Diencephalon* (Zwischenhirn). Mit dem Begriff *Rhombencephalon* fasst man die *Medulla oblongata* (verlängertes Mark), den *Pons* (Brücke) und das *Cerebellum* (Kleinhirn) zusammen, die ab der fünften Entwicklungswoche gut erkennbar sind (das Kleinhirn wird im nächsten Kapitel besprochen). Am Ende der dritten Woche ist das Rhombencephalon als unteres der drei Hirnbläschen im kranialen Bereich des Neuralrohrs zu erkennen. Aus ihm gehen zwei weitere Bläschen hervor, das spätere *Metencephalon* (Pons und Cerebellum) und das *Myelencephalon* (Medulla oblongata).



Entwicklung der Hirnstammabschnitte aus den Hirnbläschen

Medulla oblongata und Pons liegen dem Clivus der Schädelbasis auf. Dorsal befindet sich die größte Erweiterung des Subarachnoidealraumes, die *Cisterna cerebellomedullaris*. Das Kleinhirn kommt mit seinen *Tonsillen* knapp oberhalb des Foramen magnum zu liegen. Kranial liegt das Mesencephalon im *Hiatus tentorius* und wird umgeben von der *Cisterna ambiens*.

3.1.1 Oberflächenstrukturen

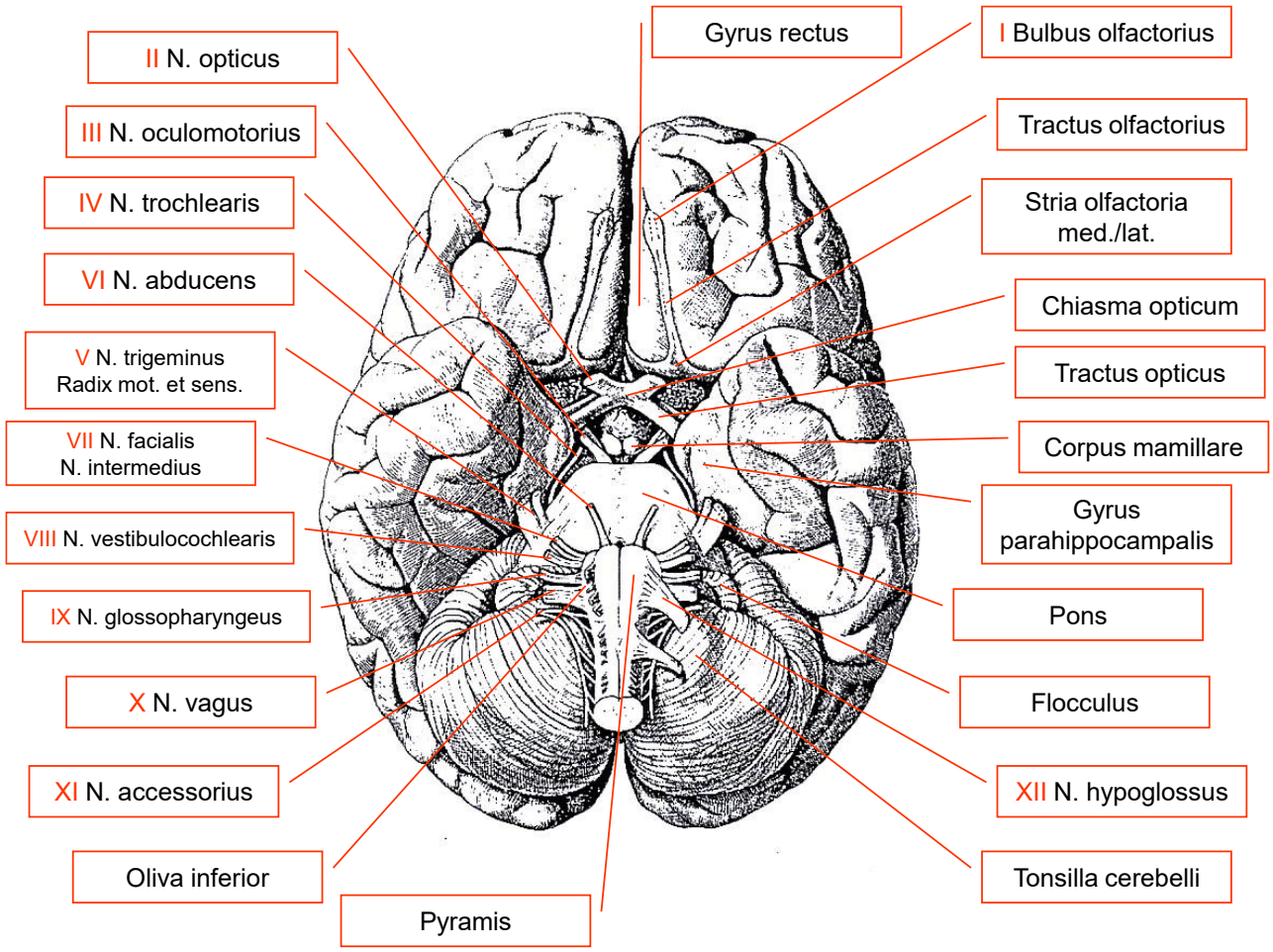
In der ventralen Mittellinie erstreckt sich vom Übergang Pons/Medulla bis zum Beginn des Rückenmarks eine *Fissura mediana anterior*, der lateral die *Pyramiden* angelagert sind. Diese Vorwölbungen enthalten die absteigenden Faserbündel des motorischen *Tractus corticospinalis* (Pyramidenbahn), deren größter Teil im Bereich der Medulla oblongata auf die Gegenseite kreuzt (*Decussatio pyramidum*). Neben jeder Pyramide befindet sich eine ovale Vorwölbung, die *Oliva* (Olive), die durch einen darunter liegenden *Nucl. olivaris inferior* gebildet wird. Medial der Olive treten im Sulcus anterolateralis (*Sulcus preolivaris*) die Axonbündel des *N. hypoglossus* (XII. Hirnnerv) aus. Lateral hinter der Olive sind die Faserbündel der drei Hirnnerven *N. glossopharyngeus* (IX), *N. vagus* (X) und *N. accessorius* (XI, kraniale Wurzel) im *Sulcus retroolivaris* erkennbar. In einer Linie mit diesen Hirnnerven finden sich kranial der *N. facialis* (VII) und der *N. vestibulocochlearis* (VIII) im *Kleinhirnbrückenwinkel*, während oberhalb des N. hypoglossus am pontomedullären Übergang der *N. abducens* (VI) austritt.

Die dorsale Ansicht der Medulla lässt einen unteren, geschlossenen Anteil erkennen, der das Rückenmark fortsetzt. Am *Obex* öffnet sich der Canalis centralis des Rückenmarks in den vierten Ventrikel, der eine rhomboide Form aufweist und sich bis in den Brückenbereich erstreckt. Im unteren Abschnitt lässt sich in der Medianebene ein *Sulcus medianus posterior* erkennen, an dessen Seite die Fasciculi gracilis et cuneatus aufsteigen. Die Kerne, an denen diese Hinterstrangbahnen endigen, wölben die *Tubercula gracile et cuneatum* hervor. Lateral von diesen Erhebungen findet sich das *Tuberculum trigeminale*, das durch den spinalen Teil des V. Hirnnerven gebildet wird.

Auf der ventralen Seite des Pons sind horizontal verlaufende Faserbündel zu erkennen, die in das Kleinhirn verlaufen. Diese pontocerebellären Axone bilden den *Pedunculus cerebellaris medius* (mittlerer Kleinhirnstiel). Median liegt der *Sulcus basilaris* (zur Aufnahme der A. basilaris). In einer Linie mit dem N. facialis tritt lateral der *N. trigeminus* in die Brücke ein (bzw. motorische Fasern aus der Brücke aus).

Das Mittelhirn ist durch seine kräftigen *Crura cerebri* (Hirnschenkel) charakterisiert, die als Pars anterior pedunculi cerebri ventral zum Rautenhirn und Rückenmark absteigenden Bahnen enthalten. Auf der dorsalen Seite findet sich eine charakteristische *Lamina quadrigemina* (Vierhügelplatte), die vier halbkugelige Vorwölbungen aufweist, die *Colliculi superiores et inferiores*. Sie sind über das *Brachium colliculi superioris et inferioris* mit dem Thalamus verbunden. Der vierte Ventrikel verjüngt sich im Bereich des oberen Pons und geht dann in den *Aquaeductus mesencephali* über. Im Mittelhirn tritt ventral der *N. oculomotorius* (III) im Bereich der *Fossa interpeduncularis* aus dem Hirnstamm aus. Der

als einziger dorsal zum Vorschein kommende *N. trochlearis* (IV) kreuzt im Hirnstamm und findet sich unter den Colliculi inferiores des Tectum.

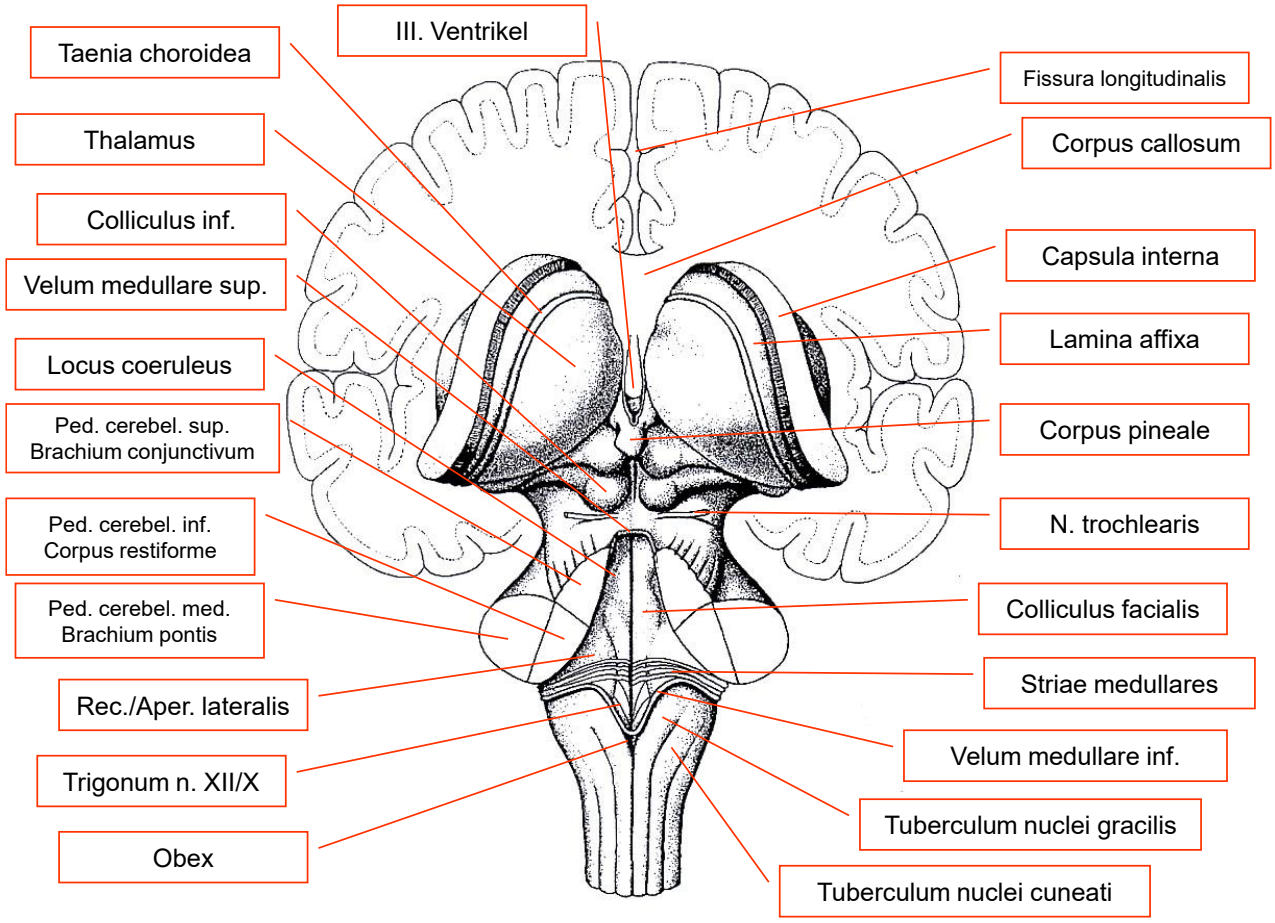


Ansicht des Hirnstamms von basal (ventral)

3.1.2 Boden des IV. Ventrikels

Nach Entfernen des Kleinhirns blickt man auf den Boden des IV. Ventrikels, die *Fossa rhomboidea* (Rautengrube). Mittig liegt der *Sulcus dorsomedianus*, der im unteren Abschnitt der Rautengrube die benachbarten Kerngebiete des XII. Hirnnerven (*Trigonum nervi hypoglossi*) voneinander trennt. Lateral vom Hypoglossus-Dreieck findet sich das *Trigonum nervi vagi*, das durch den *Nucleus dorsalis n. vagi* des X. Hirnnerven gebildet wird. Von den motorischen Arealen durch den *Sulcus limitans* getrennt ist das vestibuläre Areal mit den darunter liegenden Kernen des VIII. Hirnnerven (*Nuclei vestibulares*) lokalisiert. Das obere Ende der dorsalen Medulla oblongata wird durch die quer zum Kleinhirn verlaufenden *Striae medullares* gebildet, die sich auf Höhe der lateralen Erweiterungen des vierten Ventrikels befinden (*Recessus laterales*). Hier öffnet sich der innere Liquorraum über die *Aperturae laterales* (Foramina Luschkae) in den äußeren Liquorraum. In der Mittellinie findet sich eine weitere Austrittsstelle, die *Apertura mediana* (Foramen Magendii).

Im oberen Teil der Rautengrube ist zu beiden Seiten des Sulcus dorsomedianus die *Eminentia medialis* lokalisiert, die einen *Colliculus facialis* erkennen lässt. Dieser Name ist nicht ganz zutreffend, da der Hügel durch den darunter liegenden *Nucleus n. abducentis* gebildet wird, um den die Axone der Nervenzellen im *Nucleus n. facialis* herumziehen (sog. inneres Facialisknie). Weiter kranial und lateral scheinen bläulich durch den Boden der Rautengrube die Neurone des *Locus coeruleus* hindurch. Es ist der größte, Noradrenalin produzierende Kern im Hirnstamm.



Ansicht des Hirnstamms von dorsal

3.2 Innere Gliederung

3.2.1 Basis, Tegmentum und Tectum

Der Hirnstamm weist eine einheitliche Gliederung in längsverlaufenden Schichten auf. Ventral liegt die *Basis* (Pes trunci cerebri). Es ist der entwicklungsgeschichtlich jüngste, *neoencephale* Teil mit den *Crura cerebri* im Mesencephalon, der Pars anterior pontis sowie den Pyramiden in der Medulla oblongata. Die *Haube* (Tegmentum) befindet sich zwischen der Basis und der Ventrikelebene. Sie stellt den Hauptanteil des Hirnstamms mit auf- und absteigenden Bahnen, den Hirnnervenkernen sowie dem

Nucleus ruber, der Substantia nigra und weiteren Kerngebieten der Formatio reticularis. Das hinter der Ventrikelebene bzw. dem Aquaeductus mesencephali liegende Dach (*Tectum*) mit der Lamina tecti im Mesencephalon, dem Tegmen ventriculi quarti bestehend aus Velum medullare superius und inferius im Pons sowie einer dünnen Schicht aus Glia und Ependymzellen im Bereich der Medulla oblongata.

Die funktionelle Zuordnung der Hirnnervenkerne ist einfacher als man denkt. Neben der bekannten Unterscheidung (somatisch – visceral, motorisch – sensibel) kommt nur die *Sensorik* hinzu. Bedenke, dass im englischen Sprachgebrauch der Begriff *sensory* nicht nur die fünf Kopfsinne, sondern sämtliche afferenten Modalitäten umfasst (die gesamte Sensibilität). Die motorischen Anteile der Kiemenbogennerven (V, VII, IX, X) können aufgrund neuerer Befunde funktionell in die Somatomotorik eingereiht werden. Nur ihre Lokalisation im Hirnstamm, lateral der Kerne des VI. und XII. Hirnnerven, lässt noch auf ihre spezielle Herkunft als Kiemenbogennerven schließen.

3.2.2 Hirnnervenkerne

Wie im Rückenmark finden sich auch im Rautenhirn längs orientierte Nervenzellsäulen, die somatischen oder visceralen bzw. motorischen oder sensiblen Funktionen zugeordnet werden können. Diese liegen nicht wie im Rückenmark in einer dorsoventralen Reihe (somatosensible Kerngebiete dorsal, somatomotorische ventral), sondern sind aufgrund der Öffnung des Neuralrohres im Bereich des vierten Ventrikels von dorsolateral nach ventromedial angeordnet. Die sensorischen (auch als speziell-somatosensibel bezeichneten) Kerne des VIII. Hirnnerven, die sich im Rautenhirn entwickeln, lagern sich lateral den anderen Kerngebieten an. Die in der Literatur als ‚speziell-visceromotorisch' bezeichneten Kerne des V., VII., IX. und X. Hirnnerven sind entwicklungsgeschichtlich eindeutig den Kiemenbögen 1-5 zuzuordnen und liegen dementsprechend lateral von der somatomotorischen Kernreihe der III., IV., VI. und XII. Hirnnerven; sie können aber funktionell als somatomotorisch aufgefasst werden, da sie willkürlich kontrollierbare Skelettmuskulatur (aus Mesoderm der Kiemenbogenanlage) innervieren. Diese ist nach neueren Erkenntnissen nicht aus glatter Muskulatur hervorgegangen, sondern weist schon in frühesten Entwicklungsstadien Charakteristika quergestreifter Muskelzellen auf. Wir können also die funktionelle Einteilung der Spinalnerven in vier Gruppen auf die Hirnnervenkerne anwenden. Hinzu kommt die sensorische Funktion für den I. (Geruch), II. (Visus), VII. (Geschmack) sowie VIII. Hirnnerven (Gehör und Gleichgewicht). Damit erübrigt sich in diesem Zusammenhang die oft verwirrende Verwendung der Begriffe ‚speziell' und ‚allgemein'. Die folgende Tabelle fasst Lage und Funktion der Hirnnerven zusammen.

Nr.	Hirnnerven (Kern)	Funktion	Lokalisation
I.	Nn. olfactorii (aus dem Riechepithel)	Sensorik (Geruch)	Telencephalon
II.	N. opticus (aus der Retina)	Sensorik (Visus)	Diencephalon
III.	Ncl. n. oculomotorii	Somatomotorik (für die meisten der äußeren Augenmuskeln und Lidheber)	Oberes Mesencephalon
	Ncl. accessorius n. oculomotorii (*Edinger-Westphal*)	Visceromotorik (für M. sphincter pupillae und M. ciliaris)	Oberes Mesencephalon
IV.	Ncl. n. trochlearis	Somatomotorik (für M. obliquus sup.)	Unteres Mesencephalon
V.	Ncl. mesencephalicus n. trigemini	Somatosensibilität (Propriozeption aus Kaumuskulatur)	Mesencephalon (pseudounipolare Neurone)
	Ncl. principalis n. trigemini	Somatosensibilität (Exterozeption aus Kopf und Gesicht)	Pons
	Ncl. spinalis n. trigemini	Somatosensibilität (somatotopische Gliederung der Schmerz- und Temperaturempfindung)	Medulla oblongata, oberes Rückenmark
	Ncl. motorius n. trigemini	Somatomotorik^{KB} (für Kaumuskeln[1])	Pons
VI.	Ncl. n. abducentis	Somatomotorik (für M. rectus lat. bulbi)	Unterer Pons
VII.	Ncl. n. facialis	Somatomotorik^{KB} (für mimische Muskulatur[2])	Pons
	Ncl. salivatorius sup.	Visceromotorik (parasympathische Drüseninnervation im Kopfbereich[3])	Unterer Pons
	Ncl. spinalis n. trigemini	Somatosensibilität (Exterozeption aus Trommelfell und äußerem Ohr)	Medulla oblongata, oberes Rückenmark
	Ncl. solitarius	Viscerosensibilität (einschließlich Geschmack)	Unterer Pons und Medulla oblongata
VIII.	Ncll. vestibulares	Sensorik (Gleichgewicht)	Unterer Pons und obere Medulla oblongata
	Ncll. cochleares	Sensorik (Gehör)	Obere Medulla oblongata
IX.	Ncl. ambiguus	Somatomotorik^{KB} (für M. stylopharyngeus)	Medulla oblongata
	Ncl. salivatorius inferior	Visceromotorik (parasympathische Innervation der Gl. parotis[4])	Obere Medulla oblongata
	Ncl. spinalis n.	Somatosensibilität (Exterozeption aus	Medulla oblongata, oberes

	trigemini	Mittelohr)	Rückenmark
	Ncl. solitarius	Sensorik (Geschmack aus hinterem Zungendrittel), Viscerosensibilität[5]	Unterer Pons und Medulla oblongata
X.	Ncl. ambiguus	Somatomotorik[KB] (für Pharynx- und innere Larynxmuskulatur)	Medulla oblongata
	Ncl. dorsalis n. vagi	Visceromotorik (parasympathische Innervation von Herz, Lunge und Magen-Darm-Trakt)	Medulla oblongata
	Ncl. spinalis n. trigemini	Somatosensibilität (aus äußerem Ohr und äußerem Gehörgang)	Medulla oblongata, oberes Rückenmark
	Ncl. solitarius	Viscerosensibilität (aus Hals, Thorax, Abdomen) und Sensorik (Geschmack von Epiglottisrezeptoren)	Unterer Pons und Medulla oblongata
XI.	Ncl. ambiguus	Somatomotorik[KB] (für weichen Gaumen[6])	Medulla oblongata
	Ncl. spinalis n. accessorii	Somatomotorik (für M. trapezius und M. sternocleidomastoideus)[7]	Rückenmark
	Ncl. dorsalis n. vagi	Visceromotorik (für den N. vagus)[8]	Medulla oblongata
XII.	Ncl. n. hypoglossi	Somatomotorik (für innere und äußere Zungenmuskulatur)	Medulla oblongata

Legende: KB = für Kiemenbogen-Muskulatur, 1 = und M. mylohyoideus, M. digastricus ant., M. tensor tympani, M. tensor veli palatini, 2 = und M. stapedius, 3 = für Glandulae submandibularis, sublingualis, lacrimalis, orales, nasales, palatinae 4 = und einiger seröser Drüsen am Zungengrund, 5 = aus Mundhöhle, Naso- und Oropharynx, Carotissinus und Glomus caroticum, 6 = aber nicht für M. tensor veli palatinae (V. Hirnnerv), 7 = mit der Radix spinalis des XI. Hirnnerven verlaufend, 8 = mit der Radix cranialis des XI. Hirnnerven verlaufend

3.2.3 Weitere Kerngebiete des Hirnstamms

Die *Formatio reticularis* (netzartige Formation) stellt eine Ansammlung von locker gruppierten multipolaren Nervenzellen dar, die sich durch das Tegmentum des gesamten Hirnstamms bis in das Rückenmark und das Zwischenhirn hinein erstreckt. Dazu gehören u.a. das ARAS (aufsteigendes retikuläres aktivierendes System), das Brechzentrum, das Atemzentrum und das pontine Miktionszentrum.

Die Einteilung der Neurone kann nach neurochemischen Kriterien vorgenommen werden: Die Kerngruppen A1-A7 sind noradrenerg, A8-A16 dopaminerg, B1-B9 serotonerg und C1-C3 adrenerg. Die Serotonin bildenden *Nuclei raphes* (Raphekerne) befinden sich in der *medianen Zone* der Formatio reticularis. Serotonin wird in das Rückenmark sowie in verschiedene Endhirnareale transportiert, hier insbesondere in den Cortex. Es spielt eine wichtige Rolle bei der Depression, denn selektive Serotonin-Wiederaufnahme-Hemmer (SSRIs – selective serotonin reuptake inhibitors) wirken antidepressiv. Da Neuromelanin ein Abbauprodukt des Catecholamin-Stoffwechsels darstellt, erscheinen seine Zellkörper

bläulich (jene der im wesentlichen Dopamin produzierenden Substantia nigra aufgrund eines höheren Gehaltes an Neuromelanin schwärzlich).

Das *ARAS* empfängt sensible Reize aus dem Hinterhorn des Rückenmarks und aus den Hirnnervenkernen sowie sensorische Impulse aus den primären Sinnesarealen des Neocortex. Über efferente Axone werden dann die unspezifischen Thalamuskerne und daraufhin der gesamte Cortex aktiviert, was den Organismus in einen hellwachen Zustand versetzt.

Motorische Kerngebiete der Formatio reticularis erhalten Afferenzen aus dem prämotorischen Cortex, dem Kleinhirn und dem limbischen System. Ihre efferenten Axone verlaufen aus dem Pons über den Tractus reticulospinalis medialis oder über den Tractus reticulospinalis lateralis aus der Medulla oblongata in das Rückenmark. Sie beeinflussen den Muskeltonus insbesondere der proximalen Extremitäten und des Rumpfes.

Spezielle Kerngebiete im verlängerten Mark

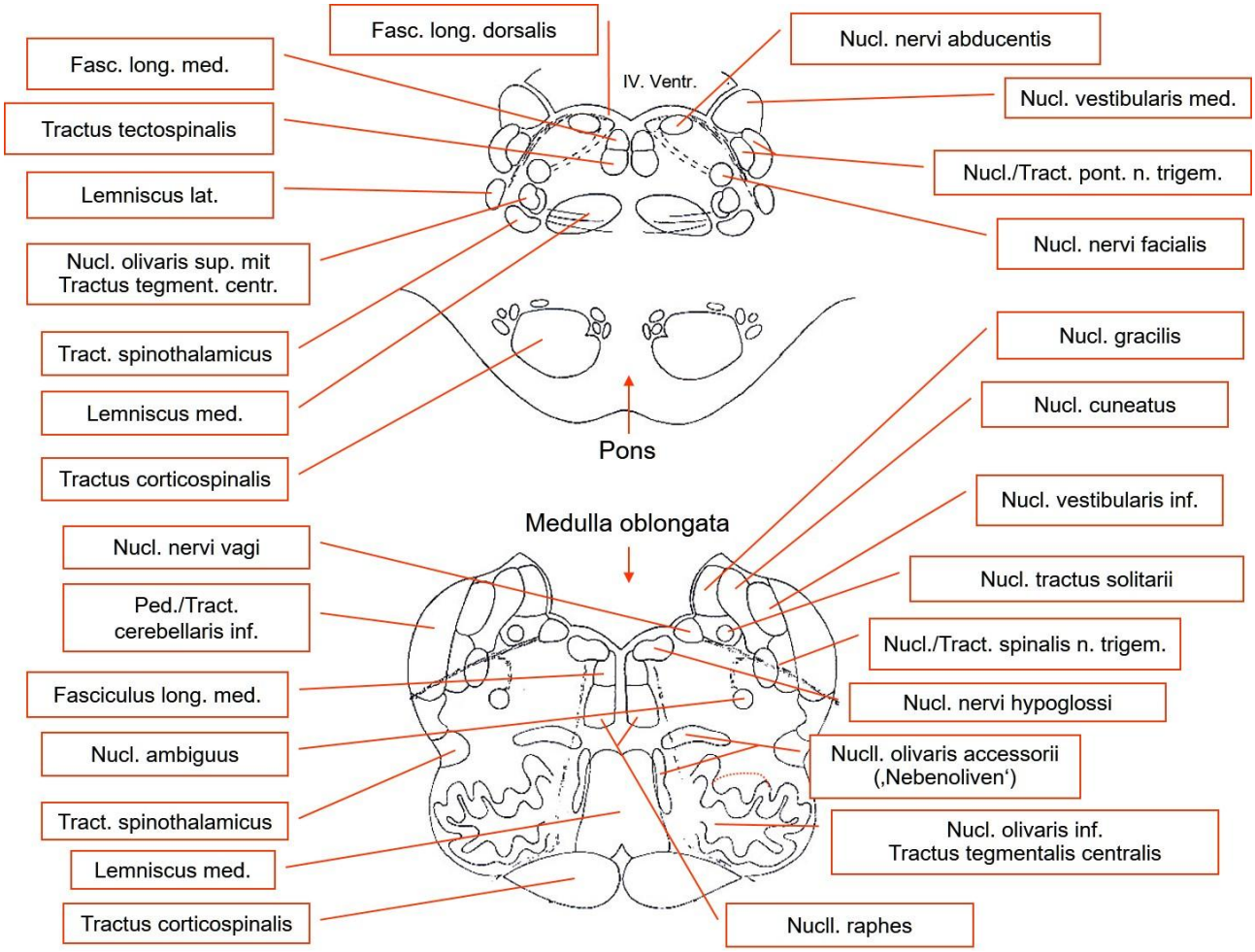
Ein wichtiger motorischer Kern ist der *Nucleus olivaris inferior*, der eine prominente Vorwölbung neben den Pyramiden bildet. Seine Afferenzen erhält er aus dem Nucleus ruber im Mittelhirn über die *zentrale Haubenbahn*, aus dem Tractus spinoolivaris sowie von Kollateralen der Pyramidenbahn. Die meisten Efferenzen steigen im Tractus olivocerebellaris zum Kleinhirn auf (Feedbackschleife: Kleinhirn → Nucleus ruber → Nucleus olivaris inf. → Kleinhirn). Der Kern sendet Impulse zur Bewegungskoordination aber auch direkt in das Rückenmark.

Im unteren Bereich am Boden der Rautengrube ist das Brechzentrum, die *Area postrema*, lokalisiert. Hierbei handelt es sich um ein gut vaskularisiertes Areal mit aufgehobener Blut-Hirn-Schranke (*zirkumventrikuläres Organ*), das in engem Zusammenhang mit dem Nucleus solitarius für zentral ausgelöstes Erbrechen verantwortlich ist. Im Bereich der Area postrema werden zentral wirksame Antiemetika wirksam (z.B. der Dopaminrezeptorantagonist Metoclopramid/Paspertin oder Ondasetron, ein Serotonin-Rezeptorblocker).

Das *Atemzentrum* erhält Afferenzen aus dem Glomus caroticum über den IX. Hirnnerv sowie aus dem Glomus aorticum über den X. Hirnnerven. Diese Rezeptororgane übermitteln Informationen über den CO_2- und O_2-Gehalt des Blutes. Weiterhin werden noch Informationen über Dehnungsreize aus der Lunge vermittelt. Die efferenten Axone ziehen zum Vorderhorn des Halsrückenmarks, um über den N. phrenicus das Zwerchfell zu kontrahieren, sowie zum thorakalen Rückenmark für die Innervation der Interkostalmuskulatur. Im Atemzentrum befinden sich ‚inspiratorische' und ‚exspiratorische' Neurone, die im rhythmischen Wechsel der Atmung aktiv sind. Es wird durch einen hohen CO_2- bzw. niedrigen O_2-Gehalt im Blut, durch körperliche Anstrengung oder psychische Erregung aktiviert.

Das *Kreislaufzentrum* erhält Afferenzen aus den Barorezeptoren über den Nucleus solitarius sowie aus dem Hypothalamus und dem limbischen System. Es ist mit dem parasympathischen Nucleus dorsalis n. vagi sowie über retikulospinale Bahnen mit dem präganglionären Sympathikus im thorakalen

Rückenmark verbunden. Neurone, die den Blutdruck mindern können, liegen im ventrolateralen Anteil des Nucleus ambiguus und in der kranialen ventro-lateralen Medulla oblongata (medulläres Depressor-Areal, A1-Zellgruppe). Der präganglionäre Sympathikus wird auch aus dem unteren Anteil des Nucleus reticularis pontis (A5), den kaudalen Raphe-Kernen (B1-B3) und der adrenergen C1-Region angesteuert (medulläres Pressorareal). Der plötzliche Ausfall dieser deszendierenden Bahnen führt z.B. zum Blutdruckabfall nach einer Rückenmarksverletzung.



Lokalisation der wichtigsten Kerne (rechts) und Bahnen (links) in Pons (oben) und Medulla oblongata (unten)

Spezielle Kerngebiete im Pons

Mehrere Kerngebiete in der ventralen Brücke (*Nuclei pontis*) stellen wichtige Relaiskerne für somatomotorische Programme dar. Sie werden über die corticopontinen Bahnen angesteuert und dienen der Weiterleitung von cortikalen Bewegungsmustern in die kontralateralen Kleinhirnhemisphären (Neocerebellum). Im Zusammenhang mit visceromotorischen Aktivitäten ist an dieser Stelle auch das *pontine Miktionszentrum* zu nennen, das die Harnblasenentleerung reguliert. Es finden sich Neurongruppen, die jeweils während der Füllungs- oder der Entleerungsphase der Blase aktiv sind. Sie

stehen in enger Verbindung mit dem nach *Langley* benannten sakralen Parasympathikus, der den M. detrusor vesicae und damit die Harnblasenkontraktion aktiviert (s. aber auch S. 4 zur entwicklungsbiologischen Herkunft dieser Neurone).

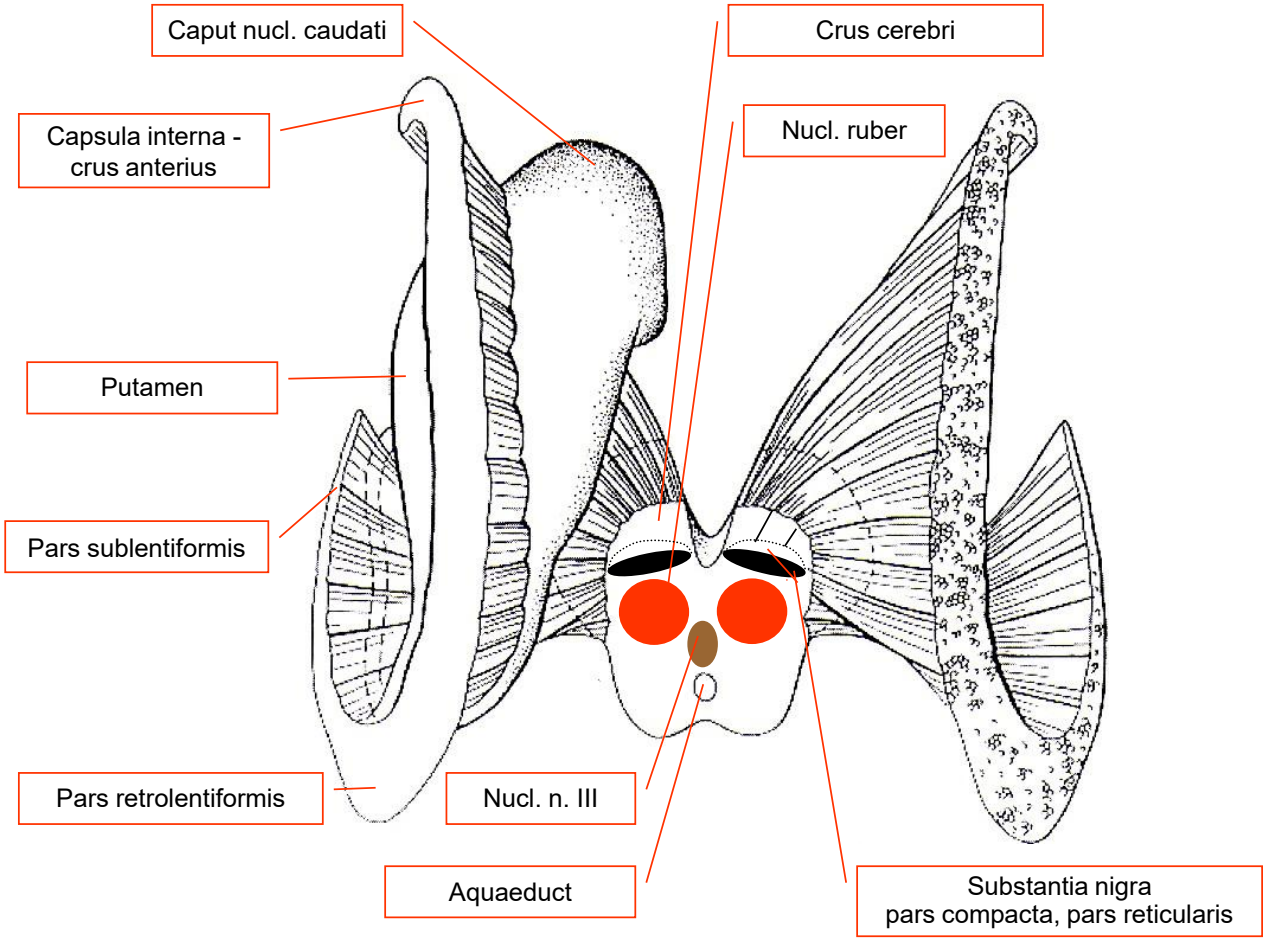
Spezielle Kerngebiete des Mittelhirns

Im Tegmentum des Mittelhirns liegt neben Teilen der Formatio reticularis der *Nucleus ruber*. Der aufgrund seines Eisengehaltes an frischen Hirnschnitten rötlich imponierende, rundliche Nucleus ist ein wichtiger Kern des extra-pyramidal-motorischen Systems (EPMS). Er steuert Körperhaltung, Muskeltonus und präzise Willkürbewegungen. Seine Afferenzen kommen mit den *Fibrae cerebellorubrales* aus der kontralateralen Kleinhirnhemisphäre sowie aus dem ipsilateralen Neocortex (*Fibrae corticorubrales*) sowie aus dem inneren *Pallidum* und dem oberen *Tectum*. Seine Efferenzen verlaufen als schwach ausgeprägter *Tractus rubrospinalis* gekreuzt zum Rückenmark. Neben einem Tractus rubroreticularis findet sich demgegenüber ein großer *Tractus rubroolivaris*, der im *Tractus tegmentalis centralis* zur Olive projiziert und letztlich Signale wieder in das Kleinhirn zurückleitet. Eine direkte Verbindung mit dem ventralen Thalamus ist bisher nur bei der Katze nachgewiesen.

Die *Substantia nigra* (nigra, schwarz) ist ein durch Neuromelanineinlagerungen dunkel erscheinender Kern an der Grenze zwischen Crura cerebri und Tegmentum. Der Untergang der dicht gepackten Dopamin-produzierenden *Pars compacta* führt zu einer der wichtigsten neurodegenerativen Erkrankung des Hirnstamms, dem *Morbus Parkinson*. Zwischen Pars compacta und den Crura cerebri liegt die plexiforme *Pars reticularis*. Die Substantia nigra erhält Afferenzen vom Striatum (*Fibrae strionigrales*) sowie vom prämotorischen und motorischen Cortex (*Fibrae corticonigrales*). Die Efferenzen ziehen als Fibrae nigrostriatales zum Striatum sowie als GABA-erge Axone aus der Pars reticularis direkt zum Thalamus. Die Substantia nigra beeinflusst mit ihrem Transmitter Dopamin über D2-Rezeptoren vor allem hemmend das Striatum. Motorikfördernde Neurone des Striatum werden über dopaminerge D1-Rezeptoren aktiviert.

Die *Pars reticularis* erhält wiederum aktivierende Fasern aus dem Nucleus subthalamicus. Diese Verbindungen bilden einen wichtigen Teil der sog. *Basalganglienschleifen*, die im letzten Kapitel genauer besprochen werden. Weitere dopaminerge Neurone finden sich insbesondere in der *Area tegmentalis ventralis*, die den *Nucleus accumbens* innerviert (Belohnungszentrum im Gehirn). Der zwischen linker und rechter Substantia nigra gelegene *Nucleus interpeduncularis* gehört zum limbischen System.

Für weitere Informationen zum Morbus Parkinson und zu anderen neurodegenerativen Erkrankungen wird ein 2027 in zweiter Auflage erschienenes Sachbuch empfohlen: 'Parkinson und Alzheimer heute' (über *SpringerLink* an der MUI kostenfrei verfügbar für Dozenten und Studierende).



Das Mittelhirn im Zusammenhang mit der Capsula interna und den Basalganglien

Dorsal vom Aquaedukt, um den herum sich das sog. periaquaeduktale Grau befindet, sind am Mittelhirndach die *Colliculi superiores* lokalisiert. Sie weisen sieben Laminae auf und werden von retinalen Axonen angesteuert, die über den Tractus opticus und das *Brachium colliculi superioris* (oberer Bindearm) verlaufen. Außerdem erhalten sie Afferenzen von den *Colliculi inferiores* sowie vom Neocortex über den *Tractus corticotectalis* (vom frontalen Augenfeld aus dem Stirnlappen sowie von der Seh- und Hörrinde). Der Tractus spinotectalis führt Axone, deren Reizung zu einer Pupillenverengung bei starken Schmerzen führt. Die efferenten Axone innervieren die Hirnnervenkerne (insbesondere des III. + VI. Hirnnerven), aber auch okulomotorische Steuerzentren in der Formatio reticularis und das Rückenmark. Durch diese Verbindungen stellen die Colliculi superiores ein *Reflexzentrum* dar, das eine wichtige Rolle beim Zustandekommen von Sakkaden spielt. Dabei handelt es sich um ruckartige Bewegungen des Auges bei der Erfassung des Blickfeldes.

Im Zusammenspiel mit der Hörrinde und dem cervikalen Rückenmark bewirken die Colliculi superiores eine Wendung von Kopf und Augen in Richtung eines Geräusches, über die Verbindung zu den motorischen Facialiskernen erfolgt der Lidschlussreflex bei näherkommenden visuellen Reizen. Demgegenüber sind die Colliculi inferiores in die Hörbahn eingeschaltet. Sie werden durch den

Lemniscus lateralis angesteuert und projizieren zum Corpus geniculatum mediale des Thalamus über das Brachium colliculi inferioris (unterer Bindearm).

Im Mittelhirn findet sich rostral der oberen beiden Hügel die *Area praetectalis* (optisches Reflexzentrum). Die dort liegenden Neurone erhalten Afferenzen aus der Retina und schalten diese um auf den *Nucleus accessorius* nervi oculomotorii (*Edinger-Westphal*) der ipsi- und kontralateralen Seite. Damit führt die Beleuchtung einer Retina zur Kontraktion des M. sphincter pupillae und zu einer Pupillenverengung beider Augen (Pupillen- oder Lichtreflex). In diesem Zusammenhang ist auch die sog. *Konvergenzreaktion* von Interesse. Wird ein in der Nähe liegender Gegenstand von beiden Augen fixiert (z.B. beim Lesen), drehen sich die Bulbi leicht nach innen. Diese Reaktion geht auf eine Kontraktion beider Mm. recti mediales zurück, die durch eine koordinierte Aktivität des *Nucleus medianus* n. oculomotorii hervorgerufen wird (unpaarer Kern von Perlia).

Bei Tumoren der Epiphyse (Pinealome) kommt es zum Vierhügelplattensyndrom: Durch Läsion der unteren Colliculi zu beidseitiger Taubheit, durch Läsion der oberen Colliculi und der Area praetectalis zu einer Blicklähmung nach oben und Ausfall der pupillären Lichtreaktion.

3.3 Auf- und absteigende Bahnen

Die größte rhombencephale Bahn stellt der *Lemniscus medialis* dar (mediale Schleifenbahn). Er wird im wesentlichen durch den *Tractus bulbothalamicus* gebildet, in dem die Axone aus den Nuclei gracilis et cuneatus verlaufen. Die exterozeptiven und propriozeptiven Impulse (bewusst werdende Tiefensensibilität aus dem Rumpf und den Extremitäten) werden nach Kreuzung der Bahn auf die Gegenseite (Decussatio lemnisci medialis) in den *ventro-posterioren Kern* des Thalamus weitergeleitet. Im Mittelhirn schließen sich von lateral der *Tractus spinothalamicus* (Schmerzbahn) und von medial der *Lemniscus trigeminalis* (Fasciculus tegmentalis ventralis) für die Kopf- und Gesichtssensibilität an.

Der Lemniscus lateralis (laterale Schleifenbahn) verbindet als Teil der Hörbahn die Nuclei cochleares mit den Colliculi inferiores des Tectums. Die Axone verlaufen gekreuzt und ungekreuzt. In die Hörbahn eingeschaltet ist auch der in der unteren Brücke ventral vom Fazialiskern gelegene *Nucleus olivaris superior* (mit dem Begriff ‚Olive' ist normalerweise der die Medulla oblongata vorwölbende Nucleus olivaris inferior gemeint). Der Nucleus olivaris superior gehört zur Hörbahn, während die sog. Nebenoliven (*Nuclei olivares accessorii posterior et medialis*) dem unteren Olivenkomplex, d.h. dem motorischen System, zugeordnet werden.

Der Tractus tegmentalis centralis (zentrale Haubenbahn) wird aus mehreren Faserbündeln gebildet, die aus den Basalganglien und dem Thalamus, aber insbesondere aus dem Nucleus ruber kommen und in den unteren Olivenkern projizieren. Der Tractus rubroolivaris verbindet die pars parvocellularis des Nucleus ruber mit dem gleichseitigen Nucleus olivaris inferior. Die zentrale Haubenbahn führt auch aufsteigende Geschmacksfasern aus dem Nucl. solitarius.

Der *Fasciculus longitudinalis posterior* (dorsales Längsbündel nach Schütz) verläuft nah am Boden des vierten Ventrikels. Er enthält reziproke Verbindungen insbesondere der parasympathischen Zentren des Hypothalamus mit den *Nuclei salivatorii* und dem *Nucleus solitarius* und zieht bis in das Rückenmark. Es finden sich auch absteigende olfaktorische Axone, die ebenfalls Speichelsekretion (bei positiv empfundenen Gerüchen), aber auch bei üblen Gerüchen den Würgereflex auslösen können.

Der *Fasciculus longitudinalis medialis* (mediales Längsfaserbündel) bildet keine einheitliche Bahn, sondern eine Ansammlung von Bahnen im Hirnstamm. Er verbindet die Augenmuskelkerne untereinander (internukleär) und diese unter Einbeziehung der Vestibulariskerne mit dem Vorderhorn des cervikalen Rückenmarks, z.B. wird bei Drehungen des Kopfes die Blickrichtung durch das mediale Längsfaserbündel stabilisiert, aber auch unter Beteiligung prä-okulomotorischer Kerne horizontale und vertikale Blickbewegungen koordiniert. Daneben lassen sich Verbindungen der Hirnnervenkerne mit solchen der Formatio reticularis nachweisen, die reflektorische Prozesse wie Würgen oder Schlucken ermöglichen.

3.4 Neuroanatomie wichtiger Hirnstammsyndrome

Hirnstammerkrankungen sind oft vaskulär bedingt. Die folgenden Tabellen fassen die häufigsten Syndrome zusammen und dienen auch der Lernkontrolle.

Laterales Medulla oblongata-Syndrom (Wallenberg) bei Verschluss der A. cerebelli inferior post.

Betroffene Struktur	Ausfallserscheinung
Nucleus ambiguus und N. IX/X	Heiserkeit, Schluckstörung, Sprechstörung
Nuclei vestibulares	Schwindel, Nystagmus
Tractus spinothalamicus	Schmerz- und Temperaturempfindung der kontralateralen Körperseite
Nucleus und Tractus spinalis n. trigemini	Schmerz- und Temperaturempfindung der ipsilateralen Gesichtshälfte
Pedunculus cerebellaris inf.	Bewegungsstörung (Ataxie) ipsilateral
Sympathikus-Bahn	Ipsilaterales Horner-Syndrom (Miosis, Ptosis)

Syndrom des Kleinhirnbrückenwinkels (z.B. beim Akkustikusneurinom)

Betroffene Struktur	Ausfallserscheinung
N. trigeminus (V)	Gesichtsempfindungen und Kornealreflex ipsilateral
N. facialis (VII)	Lähmung der mimischen Muskulatur ipsilateral
N. vestibulocochlearis (VIII)	Taubheit, Ohrgeräusche (Tinnitus), Schwindel, Nystagmus ipsilateral
Pedunculus cerebellaris med. et inf.	Ataxie (Gangstörung)

Laterales, unteres Brücken-Syndrom bei Verschluss der A. cerebelli inferior ant.	
Betroffene Struktur	**Ausfallserscheinung**
Nucleus und N. facialis (VII)	Lähmung der mimischen Muskulatur ipsilateral
Nucleus und N. vestibulocochlearis (VIII)	Taubheit, Ohrgeräusche (Tinnitus), Schwindel, Nystagmus ipsilateral
Nucleus und Tractus spinalis n. trigemini	Schmerz- und Temperaturempfindung der ipsilateralen Gesichtshälfte
Tractus spinothalamicus	Schmerz- und Temperaturempfindung der kontralateralen Körperseite
Pedunculus cerebellaris med. et inf.	Ataxie (Bewegungsstörung der Arme und Beine)
Sympathikus-Bahn	Ipsilaterales Horner-Syndrom (Miosis, Ptosis)

Paramedianes Medulla oblongata-Syndrom bei Verschluss paramedianer Äste der A. vertebralis	
Betroffene Struktur	**Ausfallserscheinung**
Nucleus n. hypoglossi (XII)	Zungenlähmung ipsilateral
Pyramidenbahn	Halbseitenlähmung (Hemiparese) kontralateral
Lemniscus medialis	Mechanorezeptive Funktionen (Berührung, Druck, Vibration, Tiefensensibilität) kontralateral

Hirnstamm-Reflexe

Der **Korneal-** oder **Lidschlussreflex** führt zu Lidschluss bei Berührung der Cornea des Auges. Nach Fremdkörpereinwirkung werden über den V. Hirnnerv (N. ophthalmicus) unter Beteiligung von Colliculus superior, Nucleus ruber und Formatio reticularis die Facialiskerne beider Seiten aktiviert (konsensueller Reflex). Dadurch kommt es über den VII. Hirnnerven zur Kontraktion des M. orbicularis oculi.

Bei Fremdkörpern im Auge wird der **Tränenreflex** ausgelöst. Dieser läuft über den V. Hirnnerv und den Trigeminuskern zum Nucleus salivatorius superior, der über den VII. Hirnnerven und den N. petrosus major das Ganglion pterygopalatinum und damit die Tränendrüse stimuliert.

Beim **Schluckreflex** führt die Berührung der Rachenschleimhaut nach Umschaltung im Nucleus solitarius zu einer koordinierten Aktivierung von Nucleus motorius n. trigemini, Nucleus n. hypoglossi, Nucleus ambiguus und Nucleus dorsalis n. vagi (V., IX., X., XII. Hirnnerv).

Für den **Würge-** oder **Brechreflex** kann es viele Auslöser geben, z.B. Hirndruck im IV. Ventrikel oder körperschädigende Substanzen im Blut oder im Liquor. Außerdem können viscerosensible Afferenzen aus dem Magen-Darm-Trakt, Afferenzen aus den Vestibulariskernen, aber auch optische Reize zu einer Aktivierung des Brechzentrums der Formatio reticularis führen. Unter Beteiligung des IX. und X. Hirnnerven sowie einigen Spinalnerven kommt es zur Kontraktion der Magen- und Bauchmuskulatur, des Zwerchfells sowie zu einer Erschlaffung des oberen und unteren Ösophagussphinkters.

Laterales, oberes Brücken-Syndrom bei Verschluss der A. cerebelli superior

Betroffene Struktur	Ausfallserscheinung
Tractus spinothalamicus	Schmerz- und Temperaturempfindung der kontralateralen Körperseite
Pedunculus cerebellaris sup.	Intentionstremor ipsilateral (Läsion unterhalb der Kreuzung) oder kontralateral (Läsion oberhalb der Kreuzung)
Sympathikus-Bahn	Ipsilaterales Horner-Syndrom (Miosis, Ptosis)
Lemniscus medialis und trigeminalis	Mechanorezeptive Funktionen (Berührung, Druck, Vibration, Tiefensensibilität) kontralateral von Körper und Gesicht

Paramedianes, unteres Brückensyndrom bei Verschluss der paramedianen Äste der A. basilaris

Betroffene Struktur	Ausfallserscheinung

Nucleus und N. abducens (VI)	Seitliche Blickparese
N. facialis (VII)	Lähmung der mimischen Muskulatur ipsilateral
Tractus corticobulbaris	Hemiparese der Zunge kontralateral
Tractus corticospinalis	Hemiparese der Extremitäten kontralateral
Lemniscus medialis	Mechanorezeptive Funktionen (Berührung, Druck, Vibration, Tiefensensibilität) kontralateral
Paramediane Formatio reticularis	Horizontale Blicksakkaden unmöglich (schnelle Blickzielbewegungen)

Paramedianes Mittelhirnsyndrom bei Verschluss der paramedianen Äste der A. cerebri post.

Betroffene Struktur	Ausfallserscheinung
Nucleus ruber und Substantia nigra	Intentionstremor und andere Bewegungsstörungen kontralateral
Nucleus und N. oculomotorius	Ptosis, Mydriasis, Parese der Augenmuskeln ipsilateral (Abduktion intakt)
Lemniscus medialis und trigeminalis	Mechanorezeptive Funktionen (Berührung, Druck, Vibration, Tiefensensibilität) kontralateral von Körper und Gesicht
Crura cerebri	Hemiparese der Extremitäten und der Gesichtsmuskulatur kontralateral

Paramedianes, oberes Brückensyndrom bei Verschluss der paramedianen Äste der A. basilaris

Betroffene Struktur	Ausfallserscheinung
Tractus corticospinalis	Halbseitenlähmung (Hemiparese) kontralateral
Tractus corticobulbaris	Hemiparese der Zunge kontralateral
Lemniscus medialis und trigeminalis	Mechanorezeptive Funktionen (Berührung, Druck, Vibration, Tiefensensibilität) kontralateral von Körper und Gesicht
Fasciculus longitudinalis medialis	Paralyse der ipsilateralen Augenadduktion, Nystagmus bei kontralateraler Abduktion
Pedunculus cerebellaris med.	Ataxie (Bewegungsstörung) und Zittern

Der **Truncus cerebri** erstreckt sich zwischen Medulla spinalis und Diencephalon mit seinen vier Abschnitten (Medulla oblongata, Pons, Cerebellum, Mesencephalon). Hinter der ventral gelegenen Basis, die entwicklungsgeschichtlich jüngere, absteigende Fasertrakte enthält, befinden sich das Tegmentum (Haube) und das Tectum (Dach). Im Tegmentum sind alle Hirnnervenkerne und diejenigen Kerne lokalisiert, die zum Überleben unerlässlich sind (z.B. das Kreislauf- und Atemzentrum). Pathologische Prozesse (Blutungen, Infarkte, Tumore) können im Hirnstamm schon bei geringer Ausdehnung dramatische Folgen haben. Eine Quetschung der Medulla oblongata (z.B. durch Fraktur des Dens axis) führt zum sofortigen Tod. Für eine schnelle Überprüfung wichtiger Hirnstammfunktionen sollte man sich folgendes merken:

Im Bereich des Mittelhirns finden sich in den Hirnschenkeln die absteigenden Bahnen der Willkürmotorik (corticobulbäre und corticospinale Fasern), dahinter motorische Kerngebiete wie der Nucleus ruber und die Substantia nigra sowie die Kerne für die inneren und äußeren Augenmuskeln (III. Hirnnerv). Außerdem ziehen wichtige Bahnen des retikulären, aktivierenden Systems (ARAS) durch. In der Brücke wird der Kornealreflex verschaltet. Es liegen hier die Kerne für den V. (Kaumuskeln, Berührungsempfindungen im Gesicht), VI. (horizontale Blickwendungen) und VII. Hirnnerven (für die mimische Muskulatur). Im verlängerten Mark finden sich Kerne für vestibuläre und akkustische Funktionen, weiterhin die Schmerzempfindung im Gesicht sowie motorische Kerngebiete für die Zunge, den Rachen und den Kehlkopf, deren Ausfall zu Sprech- und Schluckstörungen führt.

4 Cerebellum (Kleinhirn)

4.1 Übersicht

Das Kleinhirn liegt hinter der Brücke in der *Fossa cranii posterior* (hintere Schädelgrube) unter dem *Tentorium cerebelli* (Kleinhirnzelt, bestehend aus Dura mater). Zwei lateral ausladende Kleinhirn-Hemisphären umgeben den in der Medianebene lokalisierten *Vermis cerebelli* (Kleinhirnwurm). Im Sagittalschnitt ähnelt der Vermis einem verästelten Lebensbaum (*Arbor vitae*). Die Oberfläche des Kleinhirns ist, ähnlich dem Cortex cerebri, stark gefaltet. Die Windungen verlaufen aber sämtlich transversal und werden *Foliae* (Blätter) genannt. Die dazwischen liegenden Furchen werden als *Fissurae* bezeichnet. Wir unterscheiden drei *Kleinhirnlappen* (Lobus anterior, posterior und flocculonodularis), die alle sowohl Wurm- als auch Hemisphärenanteile besitzen. Eine *Fissura prima* trennt den vorderen von dem hinteren Lobus, eine *Fissura posterolateralis* den *Lobus posterior* vom *Lobus flocculonodularis*. Weitere Fissuren unterteilen die Kleinhirnlappen in Lobuli, die aber rein deskriptive Bedeutung haben und wenig funktionelle Aussagekraft besitzen. Der nach unten zeigende, über dem Foramen magnum liegende Teil der Hemisphären wird als *Tonsilla cerebelli* (Kleinhirnmandel) bezeichnet, die sich bei Hirndruck in der hinteren Schädelgrube in das Foramen vorwölbt. Damit wird ein *Einklemmungssyndrom* des Hirnstamms verursacht. Das Kleinhirn ist mit jeweils einem dünnen Velum medullare superius et inferius sowie mit großen Faserbündeln über die *Kleinhirnstiele* mit dem Truncus cerebri verbunden. In den *Pedunculi cerebellares* verlaufen alle afferenten und efferenten Bahnen. Der Pedunculus cerebellaris superior wird auch als *Brachium conjunctivum*, der Pedunculus cerebellaris medius als *Brachium pontis* und der Pedunculus cerebellaris inferior als *Corpus restiforme* bezeichnet.

Das Kleinhirn ist nicht für die Bewegungsinitiation, sondern für die motorische Feinabstimmung verantwortlich. Es sorgt für die **Aufrechterhaltung des Muskeltonus** und die **Bewegungskoordination**. Die Efferenzen des Kleinhirns gelangen über die Kleinhirnkerne zu den verschiedenen Kerngebieten des Hirnstamms, in das Rückenmark und zum Zwischenhirn. Eng mit der Gleichgewichtsregulation verbunden ist das Vestibulocerebellum, das mit dem Lobus flocculonodularis und dem Nucleus fastigii assoziiert ist. Es erhält die wesentlichen Afferenzen aus den Nuclei vestibulares. Die **Stand- und Gangsicherheit** wird über die spinocerebellären Afferenzen des Spinocerebellums sichergestellt. Dieses befindet sich im Wurm und in der paravermalen Zone. Der entwicklungsgeschichtlich jüngste Teil des Kleinhirns, das Neocerebellum, liegt in den lateralen Hemisphären und ist für den **zielsicheren Ablauf** differenzierter motorischer Programme verantwortlich, die aus der Rinde über den Nucleus dentatus und den ventralen Thalamuskern in den motorischen Cortex gelangen.

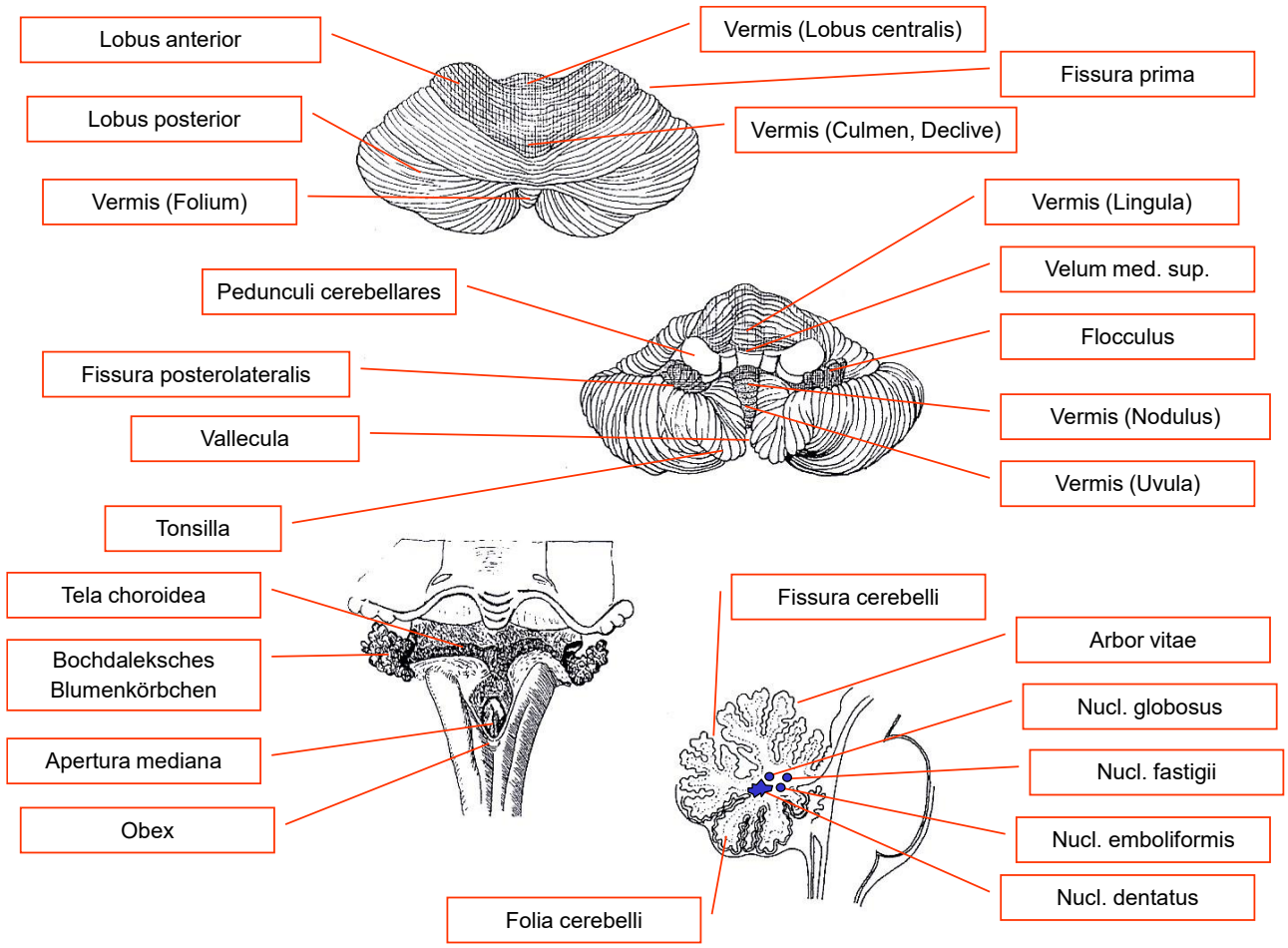
4.2 Funktionelle Kleinhirngliederung

Das Kleinhirn hat phylogenetisch unterschiedliche Anteile, die eine funktionelle Gliederung ermöglichen, aber mit den Lappengrenzen nicht übereinstimmen. Eine Ausnahme betrifft das *Vestibulocerebellum*, das den entwicklungsgeschichtlich ältesten Teil darstellt (*Archicerebellum*) und mit dem Lobus flocculonodularis gleichzusetzen ist. Der Großteil der hier endenden Afferenzen kommt von den Vestibulariskernen bzw. vom Vestibularorgan. Damit werden dem Kleinhirn Informationen über Körperlage und Körperbewegungen zugeleitet, die insbesondere auf die Stütz- und die Augenmotorik einen wichtigen Einfluss ausüben. Das *Spinocerebellum* (*Paleocerebellum*) befindet sich im Vermis (ohne Nodulus) und der paravermalen Zone (*Pars intermedia*). Hier werden Informationen über die Stellung der Extremitäten und den Muskeltonus aus dem Rückenmark (spinocerebelläre Bahnen) verarbeitet.

Der größte Teil, das *Neocerebellum*, wird auch als *Pontocerebellum* bezeichnet, da hier der Großteil der Afferenzen von den Brückenkernen endet, die wiederum Informationen vom Großhirncortex erhalten (daher auch der Begriff *Corticocerebellum*). Daneben bekommen die seitlichen Anteile der Kleinhirnhemisphären Informationen aus dem Rückenmark, aus den Vestibulariskernen, dem Nucleus olivaris inferior und aus der Formatio reticularis. Efferenzen werden über die Kleinhirnkerne an den Thalamus (Nuclei ventrales anterior et lateralis), an die Formatio reticularis (→ Tractus reticulospinalis), an den Nucleus ruber (→ Tractus rubrospinalis) sowie an die Nuclei vestibulares (→ Tractus vestibulospinalis) abgegeben. Damit wird die Koordination präziser Bewegungen, die insbesondere bei der Zielmotorik und beim Sprechen eine wichtige Rolle spielen, ermöglicht. Bemerkenswert ist, dass im Ponto- und Spinocerebellum die Körperperipherie somatotopisch abgebildet wird.

4.3 Kleinhirnrinde

Der Cortex cerebelli ist im Unterschied zum Cortex cerebri histologisch einförmiger aufgebaut. Das *Stratum moleculare* liegt außen und ist zellarm, aber reich an Synapsen. Es enthält die Dendritenbäume der *Purkinje-Zellen* und spezialisierte inhibitorische Neurone (*Sternzellen* und *Korbzellen*). Darunter befindet sich das *Stratum ganglionare* (purkinjense), das die für das Kleinhirn charakteristischen Zellen mit ihren birnenförmigen Zellkörpern enthält. Sie stellen die einzigen Output-Zellen, die von der Kleinhirnrinde zu den Kernen projizieren, dar und sind ebenfalls hemmend (GABAerg). Die einzig aktivierenden Neurone sind im *Stratum granulare* lokalisiert. Es handelt sich um eine Schicht von > 50 Milliarden, dicht gepackten kleinen Neuronen (*Körnerzellen*) und *Golgi-Neuronen*. Schließlich kommt im Kleinhirn eine besondere Sorte Astroglia vor, die *Bergmann*-Gliazellen. Ihre Zellkörper sind im Stratum ganglionare lokalisiert. Mit langen radiären Fortsätzen bilden sie Grenzmembranen um Gefäße und an der Pia mater.



Äußere Kleinhirnanatomie und Kleinhirnkerne

In die Kleinhirnrinde projizieren die *Kletterfasern*, die Axone der Neurone des *Nucleus olivaris inf.* darstellen. Sie geben Kollaterale zu den Kleinhirnkernen ab, die diese ständig erregen, und ranken sich dann an den Dendritenbäumen der Purkinje–Zellen herauf. Sie verwenden vermutlich Aspartat als Transmitter, der an N-Methyl-D-Aspartat-Rezeptoren (NMDA) bindet. Demgegenüber werden alle anderen extrinsischen Afferenzen, die in den Cortex cerebelli projizieren, als *Moosfasern* bezeichnet. Es handelt sich hier um glutamaterge Axone von Nervenzellen im Rückenmark, im Pons und in der Medulla oblongata, die auch Kollateralen zu den Kleinhirnkernen abgeben, und Körner- sowie Golgi-Zellen aktivieren. Letztere sind – wie Korb- und Sternzellen – inhibitorisch. Sie werden von Körnerzellen erregt, die im Sinne einer negativen Rückkoppelung wiederum von ihnen gehemmt werden. Golgi-Zellen dienen damit der Kontrastverstärkung (sog. Umfeldhemmung von aktivierten Purkinje-Neuronen). Ein Moosfaser-Axon kann bis zu 400 Körnerzellneurone innervieren.

Die rund 20 Millionen Purkinjeneurone besitzen große Dendritenbäume mit je bis zu 200.000 dendritischen Kontakten (*spines*) in der Molekularschicht. Dort stehen sie auf einer Breite von 200 µm wie in einem Spalier senkrecht zum Folienverlauf und werden von den längs verlaufenden Axonen der Körnerzellen aktiviert (ein Körnerzellaxon kontaktiert 300-400 Purkinje-Zellen). Die Axone der in der Molekularschicht lokalisierten Korbzellen umgeben den Zellkörper der Purkinje-Neurone mit

inhibitorischen Fortsätzen (bis zu 240 Purkinje-Neurone werden von einer Korbzelle angesteuert). Die Sternzellen liegen bevorzugt in der äußeren Molekularschicht.

4.4 Kleinhirnmark

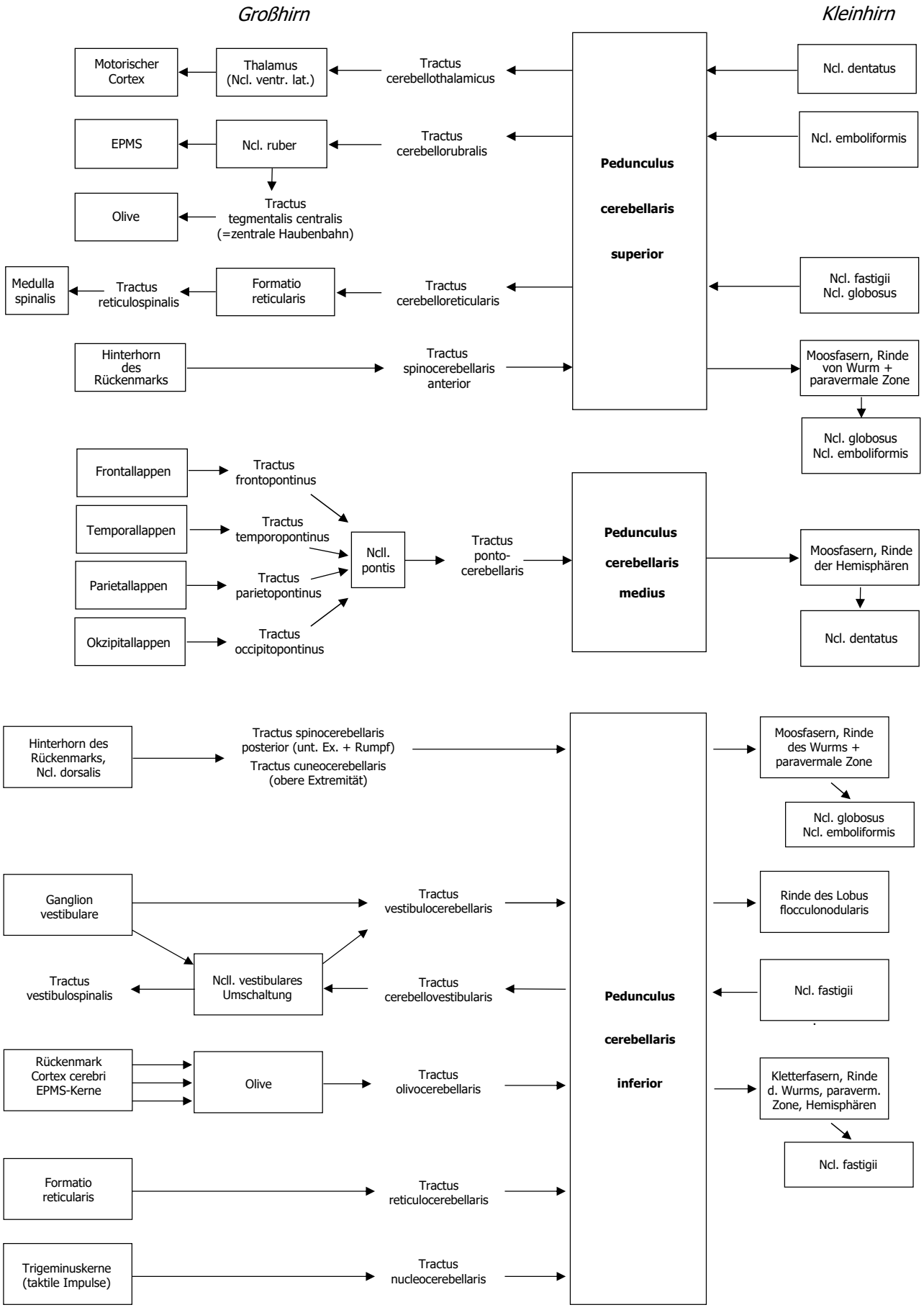
Das *Kleinhirnmark* besteht aus Nervenfasern und dazwischen liegenden Kleinhirnkernen. Der größte, der *Nucleus dentatus* (Zahnkern), befindet sich im Marklager der Hemisphären am weitesten lateral. Er erhält Projektionen vor allem aus der Rinde der Hemisphären. Der *Nucleus fastigii* (Dachkern) liegt nahe der Mittellinie im Marklager des Wurms und erhält Projektionen vor allem aus der Rinde des Lobus flocculonodularis. Der *Nucleus globosus* (Kugelkern) und der *Nucleus emboliformis* (Pfropfkern) sind zwischen Nucleus dentatus und Nucleus fastigii lokalisiert und erhalten Afferenzen vor allem aus der Rinde des Wurms und der paravermalen Zone.

Fast der gesamte Output des Kleinhirns kommt aus den Kleinhirnkernen und ist exzitatorisch. Efferenzen des Nucleus fastigii erreichen die somatomotorischen Hirnnervenkerne des Hirnstamms, die Formatio reticularis, das Vestibularis-Gebiet und die Nacken- und Halsmuskulatur versorgenden Motoneurone im Rückenmark. Der untere Olivenkern, der Nucleus ambiguus und das Halsrückenmark werden von den Nuclei globosus und emboliformis angesteuert, die besonders wichtig für das Sprechen sind. Der Nucleus dentatus projiziert in das Tegmentum des Mittelhirns, zum Nucleus ruber und zum hinteren Teil des Nucleus ventralis lateralis des Thalamus. Da dieser Kern in die primär-motorische Rinde des Gyrus precentralis projiziert, nimmt das Neocerebellum dadurch Einfluss auf die willkürlich-motorischen Programme, die für koordinierte und homogen ablaufende Bewegungen, insbesondere der distalen Extremitäten- und der Sprechmuskulatur, notwendig sind.

4.5 Kleinhirnstiele

Die Verbindungen mit dem Großhirn werden über die drei Kleinhirnstiele hergestellt. Die Bahnen im *Pedunculus cerebellaris superior* (oberer Kleinhirnstiel) ziehen zum Mesencephalon und Thalamus, der *Pedunculus cerebellaris medius* (mittlerer Kleinhirnstiel) enthält alle Afferenzen aus dem Pons und der *Pedunculus cerebellaris inferior* (unterer Kleinhirnstiel) verbindet das Kleinhirn mit dem Rückenmark und der Medulla oblongata. Das folgende Schema fasst alle relevanten Verbindungen, die durch die drei Pedunculi verlaufen, zusammen und integriert sie in die motorischen Systeme, die im letzten Kapitel besprochen werden.

Integration des Kleinhirns in die efferenten Systeme



4.6 Cerebelläre Funktionen

Das Kleinhirn ist funktionell an der unbewusst ablaufenden Koordination und Feinabstimmung von Bewegungsabläufen beteiligt, die in anderen Hirnteilen initiiert werden (das Kleinhirn selbst kann keine Bewegungen starten). Die in den Assoziationsfeldern des Cortex cerebri unter dem Einfluss von sensorischen Wahrnehmungen entstehenden Bewegungsmuster werden zum Kleinhirn weitergeleitet. Hier werden die im prozeduralen (motorischen, impliziten) Gedächtnis des Kleinhirns gespeicherten Inhalte abgerufen, um die so modifizierten Bewegungsmuster über den ventralen Thalamus dem motorischen und prämotorischen Cortex bzw. über die motorischen Kerne des Hirnstamms direkt dem Rückenmark zuzuführen. Über die Modulation des Muskeltonus erlaubt das Kleinhirn daher fein gesteuerte Veränderungen intendierter Bewegungen, so dass bei ständig wechselnden Umgebungsparametern Korrekturen vor der eigentlichen Bewegungsausführung durchgeführt werden können.

Dies wird insbesondere deutlich bei komplexen Bewegungsmustern wie z.B. beim Schreiben, Sprechen oder Tanzen, die bei Kleinhirnerkrankungen deutlich eingeschränkt sind. Daneben finden auch die nicht-motorischen Funktionen des Kleinhirns immer mehr Berücksichtigung. Das Kleinhirn spielt z.B. bei der Integration visueller und akkustischer Information eine Rolle. Verhaltensauffälligkeiten bei Patienten mit Kleinhirnläsionen deuten auch auf eine Funktion bei der psychomotorischen Steuerung des Menschen hin. Bei Suchtkranken wurde eine verstärkte Aktivierung des Kleinhirnwurmes beobachtet. Schließlich zeigen Stimulations- und Läsionsexperimente bei Tieren, dass autonome Funktionen (Atmung, Blutdruck, Blasen- und Genitalfunktionen) offenbar auch unter der Kontrolle des Kleinhirns stehen.

Cerebelläre Muskelhypotonie und Ataxie

Muskelschwäche und rasche Ermüdbarkeit der Muskulatur sind charakteristisch für Kleinhirnläsionen. Passiven Bewegungen wird nur geringer Widerstand entgegengesetzt. Die Muskelhypotonie geht einher mit einer fehlenden Koordination und Haltungsinstabilität. Der Patient schwankt beim Stehen oder zeigt einen unsicheren, breitbeinigen Gang. Störungen machen sich insbesondere bei zusammengesetzten Bewegungen bemerkbar (z.B. beim Binden einer Schleife). Weiterhin ist der Finger-Nase-Test auffällig (schnelles Abwechseln einer Zeigebewegung mit dem Finger auf die eigene Nase und auf den Finger des Untersuchers). Rasche, aufeinanderfolgende Bewegungen antagonistisch wirkender Muskeln (z.B. beim Schraubeneindrehen) sind gestört (*Dysdiadochokinese*). Ein sog. *Rebound-Phänomen* wird oft beschrieben (das plötzliche Abbremsen einer schnellen Bewegung ist nicht möglich). Außerdem ist die Sprache verändert (skandierend, undeutlich und monoton).

Weitere cerebelläre Symptome

Der cerebelläre Tremor wird als *Intentionstremor* beschrieben. Dabei tritt ein Zittern bei einer Annäherung an ein Ziel auf, das mit dem Erreichen des Ziels an Amplitude zunimmt. Der cerebelläre *Nystagmus* ist insbesondere beim Blick zur läsionierten Seite auffällig. Es handelt sich um unfreiwillige, rhythmische, Seitwärtsbewegungen des Auges mit einer langsamen und einer schnellen Rückhol-Komponente.

Muskelhypotonie, Ataxie, Rebound- und dysmetrische Phänomene sind insbesondere bei Verletzungen der Hemisphären der hinteren Kleinhirnlappen zu beobachten. Ist der hintere Wurmabschnitt oder Lobus flocculonodularis betroffen (z.B. beim *Medulloblastom*) tritt eine Haltungsinstabilität mit breitbeinigem Gang sowie ein cerebellärer Nystagmus auf. Bei Verletzungen des unteren Kleinhirnstiels steht eine cerebelläre Ataxie mit einer Fallneigung zur betroffenen Seite im Vordergrund. Ist der mittlere Pedunculus betroffen, wird eine Hypotonie und ataktische Koordinationsstörung der Beine besonders deutlich werden. Bei Ausfall des oberen Kleinhirnstiels ist daneben auch eine Fallneigung zur Seite der Läsion und ein ausgeprägter cerebellärer Tremor zu beobachten. Der Blick nach oben ist gestört, falls flocculo-oculomotorische Verbindungen betroffen sind.

5 Diencephalon (Zwischenhirn)

5.1 Überblick

Das Zwischenhirn setzt oberhalb des Mittelhirns ohne scharfe Abgrenzung den Hirnstamm fort, wird aber selbst nicht mehr dem Hirnstamm zugerechnet. Infolge des aufrechten Ganges des Menschen kommt es hier zum Abknicken der Achse des ZNS nach rostral (vorne), d.h. die Längsachse des Zwischenhirns liegt ungefähr in jener des Endhirns. Das Diencephlon befindet sich direkt in der Mitte des Gehirns. Es wird lateral von der *Capsula interna* begrenzt und bildet beidseits die Wand des III. Ventrikel. Dorsal (oben) finden sich über einer gefäßführenden *Tela choroidea ventriculi tertii*, die den *Plexus choroideus* des III. Ventrikels enthält, das *Corpus callosum* (Balken) sowie die Hemisphären mit den Seitenventrikeln. Unter dem Balken hängt der *Fornix* mit dem *Subfornikalorgan*. Bei letzterem handelt es sich um eines der *zirkumventrikulären Organe* mit fenestriertem Ependym und speziellen Ependymzellen, den *Tanycyten*. Hier ist die Blut-Hirn-Schranke unterbrochen (für die Steuerung des Salz- und Wasserhaushalts und des Durstgefühls).

Die Verbindung der ersten beiden Seitenventrikel mit dem dritten Ventrikel wird über die *Foramina interventricularia* (Monroi) hergestellt. Vorn wird der dritte Ventrikel durch die *Lamina terminalis* und die *Commissura anterior* begrenzt. Hinten (occipital) liegt das *Corpus pineale* (*Epiphyse*), mit der *Commissura posterior* und der *Commissura habenularum*. Weiterhin ist das *Pulvinar* des *Thalamus* und darunter der *Metathalamus* sichtbar. Letzterer wird von den beiden *Corpora geniculata* gebildet. Die beiden Thalami sind meist durch eine *Adhaesio interthalamica* miteinander verbunden, die eine sekundäre Verklebung grauer Substanz darstellt. Der basale (ventrale) Teil des Zwischenhirns ist von außen zwischen *Chiasma opticum*, *Tractus opticus* und den Crura cerebri des Mittelhirns sichtbar. Prominent sind hier die *Corpora mamillaria* und das *Infundibulum*, an dem die *Hypophyse* hängt, sowie das *Tuber cinereum* am Boden des dritten Ventrikels lokalisiert. Diese Strukturen gehören dem *Hypothalamus* an, der sich in der Medianebene unterhalb des *Sulcus hypothalamicus* befindet.

5.2 Thalamus dorsalis

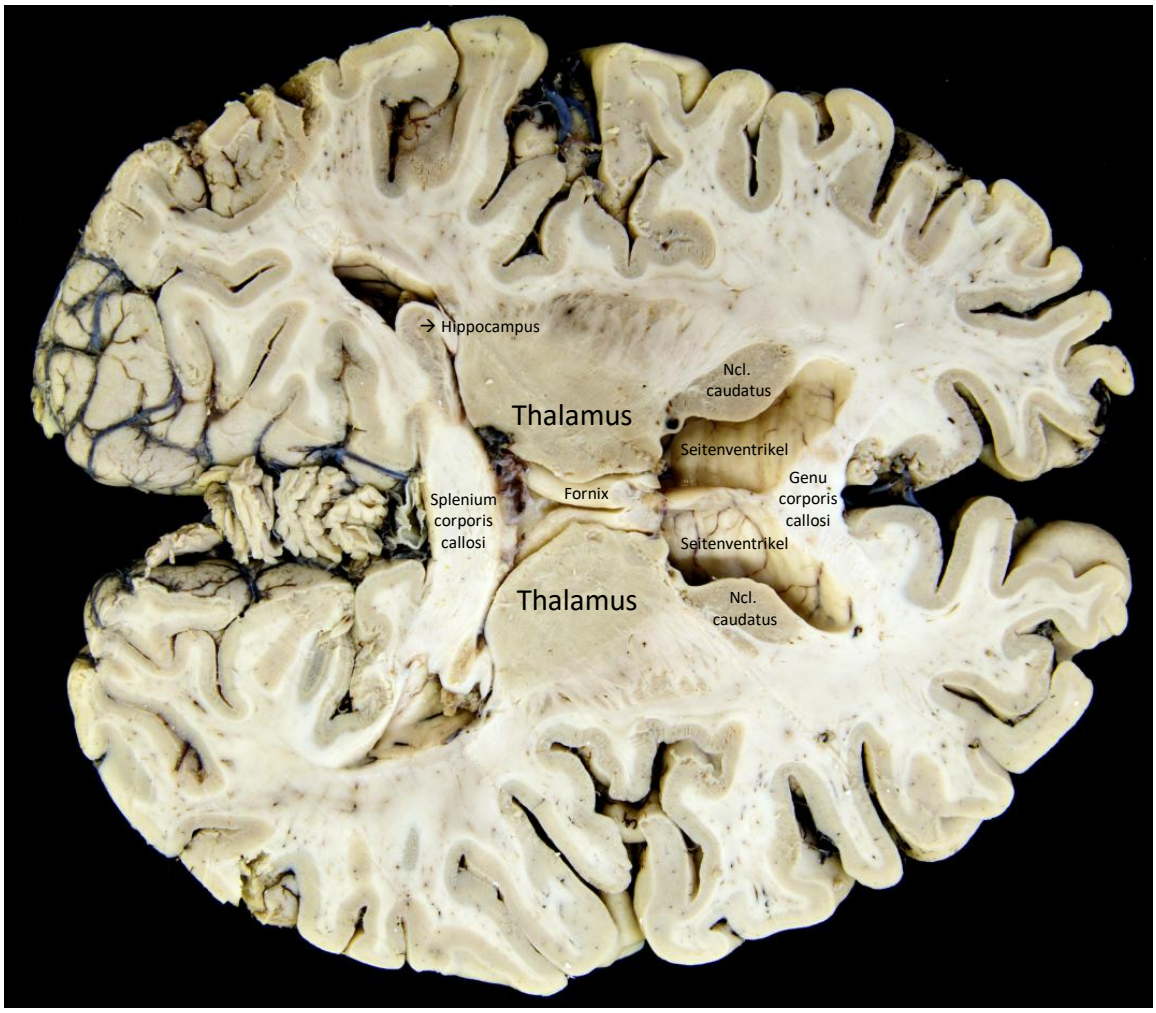
Das allgemein als der ‚Thalamus' bezeichnete, größte Kerngebiet des Diencephalons besteht aus ca. 120 differenzierbaren Neurongruppen, die bilateral symmetrisch in einer 3-4 cm langen, eiförmigen Struktur angelegt sind. Der Thalamus kontrolliert wesentlich die sensibel-sensorischen Afferenzen zum Neocortex, d.h., es müssen mit Ausnahme der olfaktorischen Impulse alle Signale auf dem Weg zum Großhirncortex durch ihn hindurch (‚Tor zum Bewusstsein'). Er stellt damit das größte Integrationszentrum des Gehirns dar. Ebenso laufen die motorischen Impulse, die im Cortex cerebri entstehen und im Kleinhirn sowie in den Basalganglien modifizert werden, wieder im Thalamus zusammen. Damit integriert er auch die beiden wichtigsten subcortical-motorischen Erregungskreise

aus dem Kleinhirn und den Basalganglien.

Der Thalamus ist afferent und efferent über die *Capsula interna* mit dem Cortex verbunden (*Radiatio thalami*). Über die Thalamusstiele (Pedunculi thalami) gelangen die Axone zu den verschiedenen Gehirnlappen. Über den vorderen Stiel zum Frontallappen, über den oberen Thalamusstiel zum Parietallappen, über den unteren Stiel zum Temporallappen und über den hinteren Thalamusstiel zum Occipitallappen. Eine *Lamina medullaris interna* trennt die medialen von den lateralen Kerngebieten. Im lateralen Bereich findet sich eine *Lamina medullaris externa* mit den *Nuclei reticulares*. Man unterscheidet im Thalamus dorsalis funktionell zwei verschiedene Gruppen von Kerngebieten:

Spezifische Thalamuskerne (*Palliothalamus*), die mit definierten Cortexarealen in Verbindung stehen (pallium, der Mantel; hiermit ist die Großhirnrinde gemeint) sowie

unspezifische Thalamuskerne (*Truncothalamus*), die keine bzw. nur indirekte (polysynaptische) axonale Verbindungen mit dem Cortex besitzen, dafür aber intensive Verbindungen mit dem Hirnstamm (Truncus cerebri), vor allem aber mit der Formatio reticularis. Diese Kerne sind funktionell insbesondere dem *a*ufsteigenden, *r*etikulären, *a*ktivierenden *S*ystem (ARAS) zuzuordnen.



Der Thalamus in der Mitte eines horizontalen (transversalen) Schnitts durch das menschliche Gehirn

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Einteilungen thalamischer Kerne. Hier wird eine sehr gebräuchliche verwendet, die auch der *Nomina anatomica* zugrundeliegt (Mai, Assheuer, Paxinos: Atlas of the human brain, 2004, Elsevier).

5.2.1 Spezifischer Thalamus

Die *Nuclei anteriores* empfangen insbesondere Afferenzen aus dem ipsilateralen Hypothalamus, besonders aus den Corpora mamillaria über den Tractus mamillothalamicus. Sie leiten diese Signale weiter in den vorderen Anteil des *Gyrus cinguli* und sind damit in limbische Strukturen eingebunden, die der Einspeicherung von expliziten Gedächtnisinhalten zugrundeliegen (Papez-Neuronenkreis). Die Verbindungen des *Nucleus laterodorsalis*, der die vordere Kerngruppe nach posterior fortsetzt, sind ähnlich.

Die ventralen (unteren) Kerngebiete werden in drei Hauptgebiete unterteilt (anterior, posterior, lateral). Die motorischen Thalamuskerne sind der *Nucleus ventralis anterior (NVA)* und der *Nucleus ventralis lateralis (NVL)*. Der NVA erhält Afferenzen aus der Pars reticularis der Substantia nigra und aus dem inneren *Pallidum*. Seine Efferenzen projizieren zu prä- und supplementär-motorischen sowie präfrontalen Cortexarealen und zum Gyrus cinguli. Der NVL liegt hinter dem NVA. Er hat ein großes, posteriores Kerngebiet, das eine massive Projektion aus dem kontralateral gelegenen Nucleus dentatus des Kleinhirns erhält. Diese wird an die primär-motorische Area 4 im *Gyrus precentralis* weitergegeben. Im posterioren NVL kann mittels stereotaktisch durchgeführter Läsionen auf bestimmte motorische Symptome neurologischer Erkrankungen (sog. *Plus-Symptome* wie Tremor, Rigidität und unfreiwillige Bewegungen) günstig Einfluss genommen. Der vordere Anteil des NVL erhält Afferenzen aus dem Pallidum mediale und schickt seine Efferenzen zur Area 6 des prämotorischen Cortex im Frontallappen.

Der *Nucleus ventralis posterior* ist der größte der Ventralkerne und thalamischer Relaykern für die sensiblen Systeme. Er wird in drei Unterkerne geliedert (lateral, medial, inferior). Spinothalamische, im lateralen Funiculus verlaufende Axone, die oberflächlichen Schmerz und Juckreiz sowie gut lokalisierbare Schmerzempfindungen aus tiefen Geweben (Gelenke, Sehnen, Faszien, Muskeln, Periost) und Temperaturempfindungen leiten, endigen im *Nucleus ventralis posterior lateralis* (NVPL) somatotopisch (die obere Extremität wird medial von der unteren Extremität repräsentiert). Schmerz und extreme Temperaturunterschiede können vom Menschen schon hier bewusst wahrgenommen, aber nicht konkret lokalisiert werden. Auch die über den Lemniscus medialis geleiteten allgemeinen Berührungsempfindungen werden im kaudalen NVPL wahrgenommen und in den somatosensiblen Cortex (Areae 1-3 im *Gyrus postcentralis*) weitergeleitet, der dann für die genaue Lokalisation und Diskrimination der Empfindungen verantwortlich ist (manche sensible Impulse gelangen auch in intralaminäre Kerne oder in das Corpus geniculatum mediale, CGM). Im NVPL, aber auch im *Nucleus ventralis posterior inferior*, endigen Efferenzen der Vestibulariskerne, die zum vestibulären Cortex (Area 2v) weitergeleitet werden, so dass dem Thalamus eine Rolle als Integrationsort proprioceptiver und vestibulärer Erregungen zukommt. Im *Nucleus ventralis posterior medialis* (NVPM) endigen Axone des

Tractus trigeminothalamicus, die somatosensible Afferenzen der Gesichts- und Kopfregion leiten, die in den Trigeminus-Kernen synaptisch umgeschaltet werden. Vom NVPM gelangen die thalamoparietalen Fasern zum Gyrus postcentralis des Parietallappens. Im medialen Bereich fällt der *Nucleus mediodorsalis* besonders auf, da er von der Lamina medullaris interna umgeben ist. Die medialen Kerne erhalten über die periventrikulären Axone Input aus thalamischen und hypothalamischen Kernen und sind reziprok mit olfaktorischen Arealen und insbesondere mit präfrontalen Cortexanteilen verbunden. In nicht-humanen Primaten wurde eine efferente Projektion zum *Mandelkern* nachgewiesen. Die Verbindung zum präfrontalen Cortex bewirkt die sog. affektive Grundstimmung, d.h. das Gefühl von Wohlsein oder Unwohlsein bzw. eine frohe oder verstimmte Stimmungslage. Verletzungen des mediodorsalen Kerngebietes können aber auch einen Mangel an Motivation, unangepasstes oder asoziales Verhaltem sowie Veränderungen in der Bewusstseinslage zur Folge haben. Der *Nucleus lateralis posterior* steht in engem Zusammenhang mit dem Pulvinar. Er erhält Afferenzen aus dem hinteren parietalen Cortex, visuellen Assoziationsarealen, dem Gyrus cinguli und dem parahippocampalen Cortex. Direkt median gelegene Kerngebiete, z.B. der Nucleus reuniens, der Nucleus parataenialis oder der Nucleus paraventricularis thalami, erhalten eine starke dopaminerge Innervation, die möglicherweise eine Rolle bei den Persönlichkeitsveränderungen im Rahmen der Schizophrenie oder der Parkinson-Krankheit spielt. Es sind afferente Verbindungen dieser Kerne mit dem Hypothalamus, dem Gyrus cinguli und der Formatio reticularis nachgewiesen worden, während efferente Axone den Temporallappen, den *Nucleus accumbens* und auch den Gyrus cinguli erreichen.

Das Pulvinar wurde in funktionellen MRI-Studien mit der Brodmann Area 39 im unteren Parietallappen in Zusammenhang gebracht. In Primaten wurden darüber hinaus Verbindungen der Pulvinarkerne zum Frontal- und Temporallappen, zur *Area striata* sowie zum limbischen System und den oberen Colliculi nachgewiesen. Über die medialen Kerne könnte die gerichtete Aufmerksamkeit bei neuen, visuell-räumlichen Informationen hervorgerufen werden. Aufgrund seiner weiten corticalen Verbindungen stellt das Pulvinar einen typischen thalamischen Assoziationskern dar, der möglicherweise auch etwas mit dem 'timestamping' zu tun hat, also der Verbindung einer sensibel-sensorischen Information mit einem bestimmten Zeitpunkt (Datum, Uhrzeit). Ansonsten wäre kein episodisches Gedächtnis möglich.

Die unterhalb des Pulvinar am Übergang zum Mittelhirn gelegenen metathalamischen Kerngebiete, die Corpora geniculata, werfen einen medialen und einen lateralen ‚Kniehöcker' auf. Das *Corpus geniculatum laterale* (CGL) stellt die thalamische Umschaltstelle der Sehbahn dar. Ein Ausfall des CGL hat eine kontralaterale, homonyme Hemianopsie zur Folge, d.h. die linken Gesichtsfeldhälften werden bei einer Schädigung des rechten CGL nicht mehr in der rechten Sehrinde (Area 17 nach Brodmann) abgebildet (und vice versa). Sein Aufbau ist laminär. In den sechs Schichten wechseln die Projektionen vom ipsi- und kontralateralen Auge ab. Jede Retinahälfte besitzt drei Repräsentationsfelder pro CGL (eine magnozelluläre und zwei parvozelluläre Schichten). Die Neurone sind z.T. für die Form von Objekten, manche für die Farbe, andere für beides verantwortlich. Das CGL ist nicht nur mit der Sehrinde, sondern auch mit der Formatio reticularis und dem Colliculus superior verbunden.

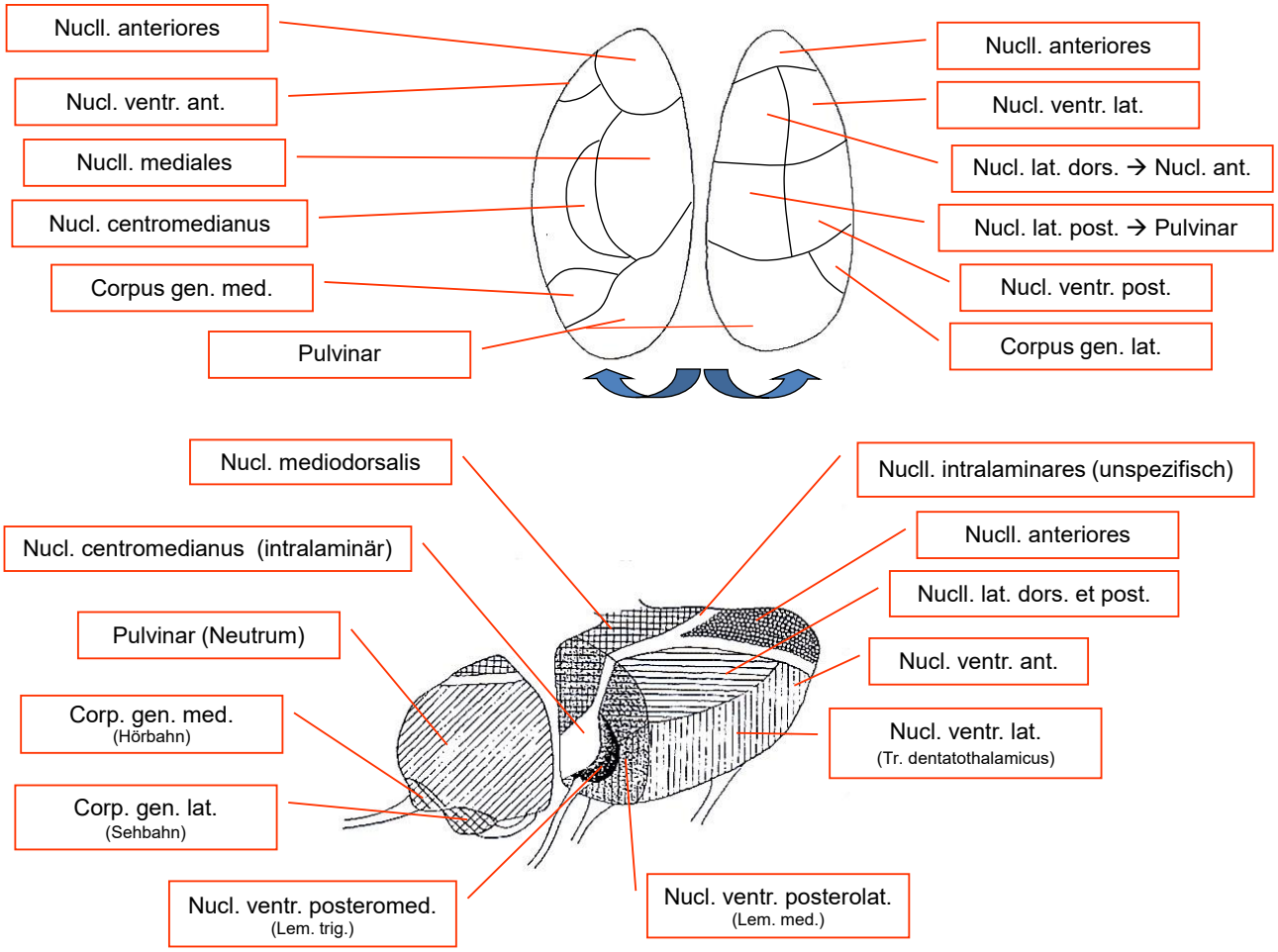
Das *Corpus geniculatum mediale* (CGM) stellt einen Teil der Hörbahn dar. Im ventralen Hauptkern des CGM (parvozellulärer Teil) endigen jene Axone, die akkustische Impulse aus beiden Cochleae über das Brachium der Colliculi inferiores weiterleiten. Vom CGM gelangen sie nach synaptischer Umschaltung zum auditorischen Cortex (Brodmann Area 41) des Temporallappens (Gyri transversi). Eine einseitige Cortexschädigung ist aufgrund der Doppelprojektion nicht mit einem signifikanten Hörverlust verbunden. Tonhöhe und –lautstärke werden vermutlich schon im CGM bewusst und nicht erst in der Hörrinde.
Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen spezifischen Thalamuskerne zusammen.

Kerngruppe	Efferenzen	Afferenzen	Funktion
Ncll. anteriores	Gyrus cinguli	Tractus mamillothalamicus	Verbindungen mit dem limbischem System Teil des Neuronenkreis von PAPEZ, Gedächtnis
Ncl. ventralis anterior	Prämotorische und präfrontale Rinde	Pallidum mediale Substantia nigra	Motorik
Ncl. ventralis lateralis	Gyrus praecentralis Prämotorische Rinde	Pallidum mediale Ncl. dentatus cerebelli	Motorik
Ncl. ventralis posterior medialis et lateralis	Gyrus postcentralis	Trigeminuskern (über Lemniscus trigeminalis); Rückenmark (über Lemniscus medialis)	Sensibilität, Sensorik
Ncll. mediales	Präfrontaler Cortex	Thalamuskerne; Hypothalamus	affektive Grundstimmung
Ncll. laterales	Lobus parietalis	Thalamuskerne Gyrus cinguli	Integration und Assoziation
Pulvinar	Cortex	Cortex	Assoziationskerne, Timestamping?
Corpus geniculatum laterale	Sehrinde	Tractus opticus von den ipsilateralen Netzhauthälften beider Retinae	Sehbahn
Corpus geniculatum mediale	Hörrinde	Über Brachium colliculi inf. vom gleichseitigen Colliculus inferior	Hörbahn

5.2.2 Unspezifischer Thalamus

Die wichtigsten Kerne des Truncothalamus stellen die *Nuclei intralaminares* dar, die innerhalb der Lamina medullaris interna liegen. Sie sind durch einen hohen Gehalt an Acetylcholin-Esterase gekennzeichnet und weisen nur indirekte, unspezifische Verbindungen zum Cortex auf. Afferenzen kommen aus dem Cortex, der Formatio reticularis, aus den Basalganglien sowie aus dem Cerebellum (Nucleus emboliformis). Die Efferenzen gelangen zum Putamen, frontalen Regionen und über spezifische Thalamuskerne auch zu anderen Cortexarealen. Der größte der intralaminären Kerne ist der Nucleus centromedianus. Er erhält vor allem Afferenzen aus der Formatio reticularis. Eine Aktivierung des aufsteigenden, retikulär-aktivierenden Systems (ARAS), z.B. durch Sinnesreize oder noradrenerge Projektionen, wird in den centromedianen Kern und über diesen zu den spezifischen Thalamuskernen weitergeleitet. Diese projizieren in den gesamten Cortex und bedingen dadurch den Wachzustand. Die intralaminären Kerne sollen aber auch für die Weiterleitung des diffusen, schlecht lokalisierbaren Schmerzes verantwortlich sein und stellen somit ein für die tiefe Hirnstimulation geeignetes Ziel dar, um ansonsten unbehandelbaren Schmerz zu unterdrücken. Im perithalamischen Bereich, lateral vom Thalamus am Rand zur Capsula interna, liegen die Neurone des *Nucleus reticularis thalami*, die mit einer Vielzahl corticaler Regionen in Verbindung stehen und vielfach Axonkollateralen corticothalamischer Neurone empfangen, um auf denselben thalamischen Kern eine hemmende Wirkung auszuüben, der von diesen corticalen Neuronen angesteuert wird. Daneben ist er auch in das ARAS eingeschaltet und soll eine wichtige Rolle bei der Entstehung der Epilepsie spielen.

Eine an der kontralateralen Körperseite auftretende Sensibiliätsstörung mit Taubheit und Anästhesie, die sich bis in das Gesicht erstreckt, tritt bei einer z.B. vaskulär bedingten Läsion des NVPL auf. Die betroffenen Arme und Beine fühlen sich geschwollen oder taub an. Schwere Schmerzsyndrome können bei Beteiligung basaler Anteile des NVPL oder NVPM auftreten. Bei Ausfall des mamillothalamischen Traktes kommt es zu einer Amnesie (Gedächtnisverlust). Die medialen und intralaminären Kerne sind zumeist betroffen, wenn Frontallappensymptome im Vordergrund stehen (Störungen des Sozialverhaltens, Gleichgültigkeit). Bei unilateralen Bewegungsstörungen, z.B. eines Myoclonus oder einer Dystonie des Unterarmes, die zusammen mit einer typischen Handstellung auftreten (sog. Thalamus-Hand mit Beugung in den Fingergrund- und Streckung in den Fingerendgelenken), kommt eine Schädigung des NVL und NVP in Frage. Aber auch schwere zentrale Paresen, ohne dass ein peripherer Kraftverlust zu beobachten wäre, treten dabei auf.



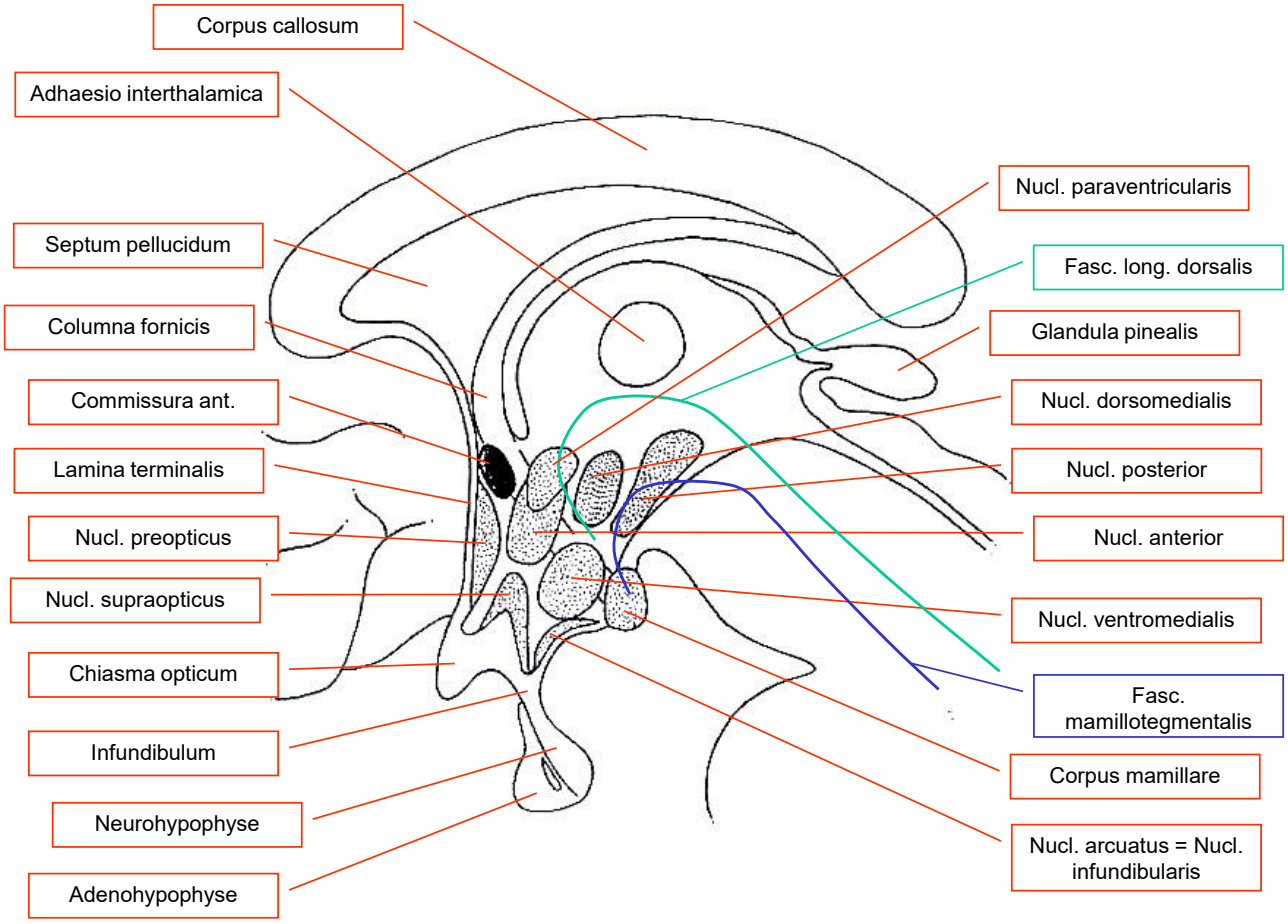
Thalamuskerne von medial und lateral (oben) bzw. perspektivisch (unten)

5.3 Hypothalamus

Der Hypothalamus befindet sich unterhalb des Thalamus dorsalis und des Sulcus hypothalamicus am Boden des III. Ventrikels. Er bildet einen Teil seiner Seiten- und die dünne Vorderwand (*Lamina terminalis*). Nach hinten erstreckt er sich bis zu einer gedachten Linie zwischen Commissura posterior und Corpus mamillare. Letztere bilden, zusammen mit dem Infundibulum der Hypophyse und dem Tuber cinereum, die oberflächlich sichtbaren Strukturen des Hypothalamus am Boden des III. Ventrikels.

Der Hypothalamus ist das oberste Integrationsorgan vegetativer Funktionen, d.h. er beeinflusst das vegetative Nervensystem (Sympathikus und Parasympathikus) und über Hormone alle endokrinen Organe. Er ist für die Aufrechterhaltung und Koordination wichtiger lebens- und arterhaltender Parameter verantwortlich, wie z.B. Atmung, Kreislauf, Flüssigkeits- und Nahrungsaufnahme, Körpertemperatur und Reproduktionsverhalten. Teilweise können diese Funktionen Kernen zugeordnet werden, die in definierten Hypothalamus-Regionen lokalisiert sind: anteriore, posteriore und intermediäre Kerngebiete. Daneben werden noch dorsale und laterale hypothalamische Areale unterschieden. Die Kerne liegen zugleich in einer von drei longitudinalen Zonen (periventrikulär, medial

und lateral), die sich von anterior nach posterior erstrecken.



Mediansagittale Ansicht hypothalamischer Kerne und seiner wesentlichen Bahnen

5.3.1 Anteriore Kerngruppe

Von den neun bekannten Kernen dieser Gruppe werden die wichtigsten tabellarisch vorgestellt:

Kerngebiet	Aufgabe	Erläuterung
Nucleus supraopticus	Produktion des Hormons Vasopressin (und Oxytocin), axonaler Transport des Peptidhormons in die Neurohypophyse	Vasopressin (antidiuretisches Hormon, ADH) ist für die Rückresorption von Wasser aus dem Nierentubulussystem zuständig
Nucleus paraventricularis	Produktion des Hormons Oxytocin (und Vasopressin), axonaler Transport des Peptidhormons in die	Oxytocin ist an der Kontraktion des Uterus bei der Geburt beteiligt (‚Wehenhormon'), in der

	Neurohypophyse	Brustdrüse bewirkt es die Freisetzung von Muttermilch
Nucleus suprachiasmaticus	Regulation des circadianen Rhythmus (wachen/schlafen, circadian rhythmisch gesteuerte Hormonproduktion)	Informationen über den Hell-Dunkel-Wechsel erhält der Ncl. suprachiasmaticus von der Netzhaut über retino-hypothalamische Axone
Nuclei preoptici	Regulation der Körpertemperatur und des Sexualverhaltens	In diesem Bereich findet sich ein interstitieller Nucleus (INAH3), der bei Männern größer ist als bei Frauen
Nucleus anterior	Regulation von Blutdruck und Herzfrequenz (inhibitorisch)	

Die Nuclei supraopticus und paraventricularis gehören zu den großzelligen (magnozellulären) Kerngebieten des Hypothalamus. Ihre wichtigste Projektion verläuft über ca. 100.000 nicht-myelinisierte Axone zur Neurohypophyse. Alle anderen Kerne besitzen kleine bis mittelgroße Zellkörper und werden zu den kleinzelligen (parvozellulären) Arealen gezählt.

5.3.2 Intermediäre Kerngruppe

Unter den acht in dieser Gruppe lokalisierten Kernen befinden sich der *Nucl. arcuatus* (synonym Nucl. infundibularis) und die *Ncll. dorsomedialis* und *ventromedialis*. Letzterer spielt eine wichtige Rolle bei der Nahrungsaufnahme (Läsionen haben eine Appetits- bzw. Gewichtszunahme zur Folge). Neurone des Nucl. arcuatus sind reich an Östrogen-Rezeptoren und daher vermutlich am Reproduktionsverhalten, an der Gonadenentwicklung, der Ovulation und der Zykluskontrolle beteiligt. Die teilweise auch in der lateralen Region gelegenen parvozellulären Neurone der *Ncll. tuberales* (Tuber cinereum) sowie andere hypothalamische Kerne sind für die Produktion von Steuerhormonen (Freisetzungs-fördernde bzw. Freisetzungs-hemmende Faktoren) verantwortlich. Diese Peptide gelangen im Bereich der Eminentia mediana aus den Axonen des Tractus tuberoinfundibularis in die Kapillaren des hypophysären Pfortaderkreislauf und von dort weiter zur Adenohypophyse. Hier stimulieren bzw. hemmen sie die Freisetzung der glandotrophen Hormone), die im Körperkreislauf zirkulieren. Der *Nucl. tuberomamillaris* verwendet GABA und Histamin als Transmitter, das eine zentrale Rolle für Wachheit und Aufmerksamkeit spielt. Die sedierende Wirkung von Antihistaminika (‚Heuschnupfenmedikamente') lässt sich dadurch erklären.

Freisetzung-fördernde Peptide	Freisetzung-hemmende Peptide
CRH (Corticotropin releasing hormone)	SRIF (Somatotropin release inhibiting factor)
GnRH (Gonadotropin releasing hormone)	MIF (Melanotropin release inhibiting factor)
TRH (Tyreotropin releasing hormone)	PIF (Prolactin release inhibiting factor = Dopamin)
GHRH (Growth hormone releasing hormone) MRF (Melanotropin releasing factor)	
PRF (Prolacting releasing factor)	

Hypophyse

Die unter einem Durablatt (*Diaphragma sellae*) gelegene Hypophyse besteht aus zwei Anteilen, der *Neurohypophyse* (Hypophysenhinterlappen) und der *Adenohypophyse* (Hypophysenvorderlappen). Die Adenohypophyse ist kein Bestandteil des Gehirns, sondern entwickelt sich aus spezialisiertem Epithel des Rachendaches (der sog. Rathke-Tasche) und lagert sich der aus dem Diencephalon hervorgegangenen Neurohypophyse an. Zu letzterer wird auch das Infundibulum, der Hypophysenstiel, gerechnet. In der Neurohypophyse finden sich neben Glia und Gefäßen nur noch die Nervenfasern der *Ncll. paraventricularis* und *supraopticus*. Hier werden die Peptidhormone Oxytocin und Vasopressin durch Neurosekretion aus den Axonen freigesetzt und in die Blutbahn abgegeben, um zu ihren Zielorganen (Uterus, Mamma, Niere) zu gelangen.

Der Hypophysenvorderlappen bildet glandotrope Hormone, die auf endokrine Drüsen einwirken. Zu ihnen gehören TSH (Thyroidea-stimulierendes Hormon), ACTH (Adrenocorticotropes Hormon), LH (Luteotropes Hormon), FSH (Follikel-stimulierendes Hormon), MSH (Melanocyten-stimulierendes Hormon), STH (Wachstumshormon) und Prolactin. Hormon-produzierende Tumoren der Hypophyse werden operativ heute zumeist durch den Sinus sphenoidalis (Keilbeinhöhle) hindurch entfernt. Weiterhin ist klinisch relevant, dass direkt oberhalb der Adenohypophyse das Chiasma opticum zu liegen kommt, d.h. Druck durch Hypophysen-Tumore kann Sehstörungen verursachen, in diesem Fall einen Ausfall beider temporaler Gesichtsfeldhälften (bitemporale Hemianopsie).

5.3.3 Posteriore Kerngruppe

Die prominentesten Vertreter dieser Gruppe befinden sich in den Mamillarkörpern (*Nucl. corporis mamillaris*). Sie stellen die kaudalsten der zur hinteren Gruppe gezählten Kerngebiete dar. Ihre medial gelegenen Neurone projizieren über das *Tegmentum* (Haube) des Hirnstamms zum thorakalen Rückenmark, in dem die im Seitenhorn gelegenen präganglionär-sympathischen Neurone aktiviert werden. Limbische Afferenzen gelangen über den Fornix aus dem Hippocampus zu den Corpora mamillaria, daneben finden sich Axone aus den Haubenkernen des Mittelhirns. Umgekehrt projiziert der Fasciculus mamillothalamicus zum anterioren Thalamus sowie der Fasciculus mamillotegmentalis zu den Haubenkernen. Hirnstamm und Rückenmark werden über den *Fasciculus longitudinalis posterior* erreicht. Dorsal (oberhalb) der Mamillarkörper befindet sich der *Ncl. posterior hypothalami*, der im Alter zur Degeneration neigt. So werden die gestörten autonomen Funktionen bei Parkinson-Kranken, z.B. das fehlende Kältezittern und eine gestörte Schweißsekretion, auch auf Veränderungen in diesem Gebiet zurückgeführt.

5.3.4 Faserverbindungen des Hypothalamus

Unter der Vielzahl von afferenten und efferenten Verbindungen sind insbesondere solche zum limbischen System (besonders zum Mandelkern), zur Inselrinde, zur Retina sowie zu den Kerngruppen der Formatio reticularis und zum Rückenmark, aber auch zur Großhirnrinde zu nennen.

Fornix

Der *Fornix* (Gewölbe) verbindet die Hippocampus-Formation mit der vorderen und lateralen Kerngruppe sowie mit den medialen Corpora mamillaria. Er liegt unter dem Balken, zieht im weiten Bogen über den III. Ventrikel und bildet mit dem Fornix der Gegenseite ein Gewölbe über der Tela choroidea des III. Ventrikels. Vom Hippocampus erstreckt sich die *Fimbria hippocampi* in beide *Crura fornicis*, die sich in der *Commissura fornicis* (hier Faseraustausch zwischen beiden Seiten) zum *Corpus fornicis* vereinen und über dem Foramen interventriculare (Foramen Monroi) wieder in zwei *Columnae fornices* teilen. Von dort spalten sich sog. precommissurale Fasern ab, die vor der Commissura anterior in die direkt unterhalb des Septum pellucidum gelegene *Area septalis* absteigen, während der postcommissurale Fornix in den Hypothalamus projiziert.

Fasciculus longitudinalis posterior (dorsalis)

Das periaquäduktal und direkt am Boden des IV. Ventrikels verlaufende Faserbündel verbindet den Hypothalamus mit verschiedenen Hirnnervenkernen (V, VII, IX, X, XII) und den parasympathischen Zentren des Hirnstamms. Bei steigendem intraventrikulärem Druck wird diese Bahn irritiert, was zu Übelkeit und Erbrechen führen kann. Außerdem verlaufen nahe dieses Bündels Axone zum pontinen Miktionszentrum (Harnblasenkontrolle). Die Aktivierung des Sympathikus erfolgt hingegen über hypothalamo-tegmentale Bahnen, die als vegetative Bahnen und als Tractus reticulospinalis präganglionäre Neurone im thorakalen Rückenmark innervieren.

Fasciculus medialis telencephali

Das mediale Vorderhirnbündel beinhaltet Axone, die Anteile des Riechhirns und die Substantia perforata anterior mit den Septumkernen und vorderen Hypothalamus-Arealen bis hin zum Tegmentum des Mittelhirns reziprok verbinden.

Stria terminalis

Oberflächlich-corticale sowie tiefe, basolaterale und basomediale Kerngebiete des *Corpus amygdaloideum* werden über diese wichtige Bahn mit dem anterioren und präoptischen Hypothalamus verbunden, darunter mit dem Nucleus striae terminalis (englisch: bed nucleus of the stria terminalis, BNST) und mit dem Nucleus paraventricularis. Dadurch werden vegetative Reaktionen bei Angst- und Aggressionszuständen initiiert.

Läsionen im Hypothalamus und Störungen in der hypothalamo-hypophysären hormonellen Achse haben oft dramatische Konsequenzen: Die Abwesenheit eines Durstgefühls oder der Verlust der ADH-Freisetzung kann einen gefährlichen Wasserverlust zur Folge haben. Störungen des Appetits führen zu einer massiven Gewichtsabnahme; auch im Rahmen der *Anorexia nervosa* werden hormonelle Veränderungen im Hypothalamus-Hypophysen-System diskutiert. Verletzungen des anterioren Hypothalamus können eine Sollwert-Verstellung der Körpertemperatur zur Folge haben, was zumeist mit einem medikamentös nicht zu behandelnden Fieber einhergeht. Hingegen bleiben bei Störungen der posterioren Kerngruppe das Kältezittern und eine periphere Vasokonstriktion bei abfallenden Außentemperaturen oft aus. Besonders auffällig sind Störungen in der emotionalen Kontrolle bei Hypothalamus-Erkrankungen, so werden bei Tumoren am Boden des III. Ventrikels z.B. Lachanfälle beobachtet. Auch wurden Veränderungen im Hypothalamus mit pathologischem Schlaf in Verbindung gebracht, z.B. bei der *Narkolepsie* (Anfälle eines unwiderstehlichen Schlafbedürfnisses tagsüber). Bei dieser Erkrankung wird interessanterweise in einigen Fällen eine Verminderung von Orexin-Peptiden beobachtet, die im Hypothalamus hergestellt werden.

5.4 Subthalamus (Thalamus ventralis)

Unterhalb und medial des telencephalen Linsenkerns (*Nucleus lentiformis*), der aus Putamen und Globus pallidus besteht, kommen diejenigen Zwischenhirn-Derivate zu liegen, die eine wichtige Rolle in der Somatomotorik spielen. Dazu gehören insbesondere der *Ncl. subthalamicus* und die *Zona incerta*. Beide Strukturen stellen wichtige Ziele für die sog. Tiefenhirnstimulation (THS) dar, die beim Morbus Parkinson zum Einsatz kommt.

5.5 Epithalamus

Der im hinteren Abschnitt des III. Ventrikels gelegene, kleinste Teil des Zwischenhirns ist der Epithalamus, zu dem die *Epiphyse*, die *Habenula* und und die *pretectalen Areale* gerechnet werden. Bei den Habenulae handelt es sich um zwei zügelartige Strukturen zu beiden Seiten der Epiphyse, die im Bereich des Trigonum habenulae die *Nuclei habenulares* beinhalten. Als phylogenetisch sehr alte Strukturen scheinen diese Kerne analog zum Hypothalamus Überlebens-sicherndes Verhalten zu kontrollieren, z.B. kann hier durch Hemmung der Dopamin-Freisetzung ein bestimmtes motorisches Programm, das nicht zum Erfolg führen oder evtl. sogar negative Folgen haben wird, gestoppt werden. Auch werden nach neueren Erkenntnissen serotoninerge Systeme beeinflusst, die eine Rolle der Nuclei habenulares bei der Entstehung der Depression, Schizophrenie und auch bei Medikamenten-induzierten Psychosen nahelegen. Die Habenulae sind über die *Commissura habenularis* und den *Tractus habenulo-interpeduncularis* untereinander und mit anderen Kernen verbunden, z.B. stellt der *Nucl. interpeduncularis* im Mittelhirn eine wichtige Umschaltstelle zur Aktivierung vegetativer Hirnstammzentren dar, die bei der Speichelsekretion eine Rolle spielen. Afferenzen aus den Septumkernen, den *Nuclei preoptici* und aus dem Mandelkern gelangen über die *Stria medullaris thalami* zu den Ncll. habenulares. In der *Commissura posterior* (epithalamica) kreuzen Faserzüge aus dem Tectum, dem Tegmentum und der Area pretectalis zur Gegenseite. Letztere gehört phylogenetisch zum Epithalamus, funktionell aber zum visuellen System.

5.5.1 Epiphyse (Glandula pinealis)

Die Zirbeldrüse befindet sich über der Vierhügelplatte an der Hinterwand des III. Ventrikels. Durch partielle Calcifizierung im Alter ist sie in der Medianebene bei Röntgenuntersuchungen gut erkennbar. Sie produziert das Hormon *Melatonin*, das als ein lichtabhängiges ‚Zeitgeberhormon' vermehrt nachts ausgeschüttet wird. Die Information über hell und dunkel, die von primitiven Organismen in der frühen Phylogenese hier mit dem sog. dritten Auge wahrgenommen wurde, wird beim Menschen von der Netzhaut über den retinohypothalamischen Trakt dem Nucleus suprachiasmaticus des Hypothalamus zugeleitet. Dieser circadiane Schrittmacher steuert eine Vielzahl von Körperfunktionen, darunter die Melatoninsekretion. Melatonin wird als hormoneller Synchronisator der circadianen Rhythmen aufgefasst, die auf diese Weise an die jeweiligen Lichtverhältnisse angepasst werden. Nach Unterbrechung der retino-hypothalamischen Verbindungen oder bei anhaltender Dunkelheit findet sich eine von Umwelteinflüssen unabhängige Melatoninrhythmik, die eine Phasendauer von etwas mehr als 24 Stunden aufweist. Der Nucleus suprachiasmaticus ist über die absteigende Sympathikusbahn mit präganglionären Neuronen im Seitenhorn des Rückenmarks (C8) verbunden, die ihrerseits aufwärts im *Truncus sympathicus* bis zum Ganglion cervikale superius projizieren. Von dort gelangen postganglionäre sympathische Fasern über die cerebralen Blutgefäße zu den Pinealocyten, die nach Stimulation β1-adrenerger Rezeptoren Melatonin ausschütten.

Zum **Diencephalon** werden der Epithalamus, der Thalamus dorsalis (allgemein der ‚Thalamus'), der Hypothalamus sowie der Subthalamus gezählt. Der Thalamus dorsalis stellt die größte Ansammlung von Nervenzellen im gesamten Nervensystem dar. Bis auf die olfaktorischen Impulse werden alle sensiblen und sensorischen Afferenzen vom Thalamus weitergeleitet und in motorische Erregungsschleifen integriert. Die sog. spezifischen Kerne stehen mit definierten Cortexarealen in reziproker Verbindung, während die unspezifischen Kerne mit dem Hirnstamm und anderen Thalamuskerngebieten verbunden sind bzw. diffus in den Cortex projizieren.

Der Hypothalamus ist ein Steuerzentrum für die Hypophyse und das autonome Nervensystem. Der Hypothalamus sichert das Überleben des Individuums und seiner Art (Art- und Selbsterhalt). Damit werden seine Kontrollfunktionen über Wachstum und Metabolismus, Reproduktion und Brutpflege, Nahrungs- und Wasseraufnahme, Temperaturstabilität, Schlaf-Wach-Rhythmus, aber auch über die autonomen Abläufe von Angriffs- und Verteidigungsverhalten verständlich. Auch der Epithalamus wird mit der Kontrolle überlebenswichtiger Verhaltensprogramme in Verbindung gebracht, wohingegen der Subthalamus zu den Basalganglien gehört und somatomotorische Funktionen übernimmt.

6 Telencephalon (Endhirn)

6.1 Übersicht

Der Begriff ‚Großhirn' wird in den Büchern unterschiedlich gebraucht und gelegentlich dem Begriff ‚Endhirn' gleichgestellt; er kann sich aber auch auf alle Gehirnteile bis auf das Kleinhirn beziehen, d.h. das Endhirn, Zwischenhirn und den Hirnstamm zusammenfassen. Das Endhirn im engeren Sinn besteht also aus den beiden Hemisphären des Gehirns, die durch eine *Fissura longitudinalis* getrennt sind, und aus jeweils fünf Lappen bestehen (frontal, parietal, temporal, occipital und insulär). In der Mittellinie befindet sich das *Telencephalon medium*, das oberhalb des Chiasma opticum gelegen die *Commissura anterior*, die *Lamina terminalis* (eine dünne Membran, die den dritten Ventrikel nach vorne begrenzt) und die *Area preoptica* umfasst. Letztere wird dem Hypothalamus zugerechnet, leitet sich aber embryologisch vom Telencephalon ab.

Jede Hemisphäre besitzt drei Pole, die sich in der *Fossa cranii anterior* (Polus frontalis), der *Fossa cranii media* (Polus temporalis) und auf dem Tentorium cerebelli (Polus occipitalis) befinden. In ihrem Innern sind die mit Liquor gefüllten Seitenventrikel (Ventriculus I und II) lokalisiert. Die insgesamt vier

Funktionelle Lokalisationen im Cortex cerebri

Die Kommunikation beider Hirnhälften ist insbesondere vor dem Hintergrund wichtig, dass Schlüsselfunktionen wie z.B. die Sprache, Händigkeit, visuell-räumliches Vorstellungsvermögen, analytisches Denken oder musisches Verständnis primär nur auf einer Seite lokalisiert sind (in der jeweils *dominanten Hemisphäre*), aber beide Seiten an der Verarbeitung und Integration sensorischer und motorischer Funktionen beteiligt werden. Diese *funktionelle Lateralisation* kann, muss aber nicht, mit einer *strukturellen Asymmetrie* einhergehen. Beispielsweise finden sich morphologische Unterschiede im kontralateralen *Gyrus precentralis* bei Rechts- bzw. Linkshändern oder im *Planum temporale* (hinterer Teil des *Gyrus temporalis superior*) in Bezug auf das Sprachverständnis (*Wernicke*-Zentrum). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass kortikale Funktionen immer an die Intaktheit neuronaler Netze (Ketten von synaptisch miteinander zusammenhängenden Nervenzellen) gebunden sind, die in der Regel über verschiedene kortikale Areale beider Hemisphären verteilt sind. An manchen Orten der Rinde (‘hot spots') sind eine Vielzahl von Nervenzellen bzw. ihre Fortsätze (*Axone*), die im Zusammenhang mit einer bestimmten Funktion stehen, auf engem Raum zusammengedrängt. Hier befinden sich diejenigen Areale, die bei hoher Aktivität in funktionell-bildgebenden Studien eine erhöhte Durchblutung anzeigen und damit mit der jeweiligen Funktion in Zusammenhang gebracht werden.

Oberflächen der Hemisphären (superior, inferior, lateral, medial) sind von den Hirnwindungen (*Gyri cerebrales*) bedeckt, so dass nur ca. 1/3 der Oberfläche sichtbar ist. Die Windungen selbst sind wiederum von dem 3-5 mm dicken *Cortex cerebri* überzogen, der zusammen mit der darunter liegenden weißen Substanz auch als Mantel (*Pallium*) bezeichnet wird.

Zwischen den Windungen liegen die *Sulci cerebrales*, von denen die ersten im 6. Monat der vorgeburtlichen Entwicklung sichtbar werden (bei Geburt ist die Gyrierung der Hemisphären komplett). Der bis auf die Inselrinde (*Insula*) einschneidende Sulcus lateralis befindet sich zwischen Frontal- und Parietallappen einerseits und Temporallappen andererseits. Der darüber liegende *Sulcus centralis* trennt den Frontal- von dem dahinter liegenden Parietallappen. Die beiden Hemisphären sind insbesondere über das *Corpus callosum* (Balken) miteinander verbunden.

6.2 Subcorticale Kerne (Basalganglien)

Die unterhalb der Hirnrinde im Marklager gelegenen Nervenzellansammlungen (Nuclei), die im Dienste der Motorik stehen, werden als *Basalganglien* bezeichnet. Es handelt sich um folgende Strukturen:

- **Striatum (Ncl. caudatus + Putamen) und Globus pallidus (Pallidum) – Telencephalon**
- **Ncl. subthalamicus – Diencephalon**
- **Substantia nigra (pars compacta) – Mesencephalon**

Allerdings entstehen nur das Striatum und das Pallidum aus dem Ganglienhügel der Hemisphärenbläschen, sind also Basalganglien im eigentlichen Sinn. Neuroembryologisch wären beispielsweise auch der basale Anteil des *Corpus amygdaloideum* und der *Nucleus accumbens* (ventrofrontales Striatum) dazuzuzählen - ihr primärer Bezug zur Somatomotorik ist aber nicht gegeben.

Putamen und *Pallidum* werden als *Nucleus lentiformis* (Linsenkern) zusammengefasst. Der mediale (innere) Anteil des Pallidum sowie die medialen Septum- und präoptischen Kerne des Hypothalamus entspringen ebenfalls dem medialen Ganglienhügel und stellen somit auch telencephale Anlagen dar. Es ist zwar in der Neurologie üblich, Derivate des Zwischen- und Mittelhirns als Basalganglien zu bezeichnen, aus entwicklungs-biologischer Sicht aber nicht korrekt.

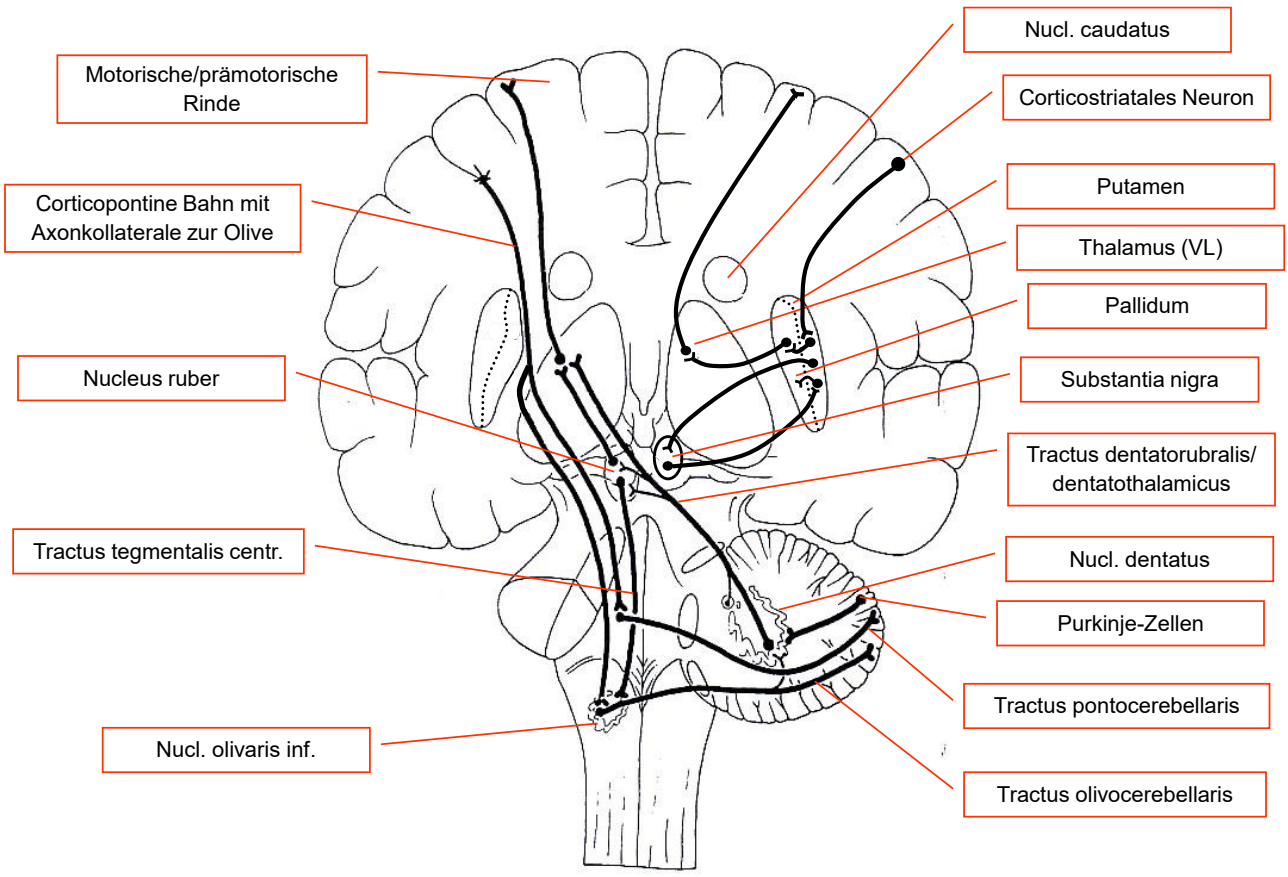
6.2.1 Corpus striatum

Das *Striatum* besteht also aus zwei Kerngebieten, dem *Ncl. caudatus* und dem *Putamen*. Beide werden von denjenigen Nervenfasern, die den Cortex mit darunter liegenden Strukturen verbinden (vorderer Anteil der Capsula interna), durchkreuzt. Dadurch verbleiben Inseln grauer Substanz, die dem Striatum seinen Namen gegeben haben (‚gestreift'). Afferenzen erhält das Striatum über die *Fibrae corticostriatales* von allen Bereichen des Neocortex, über die *Fibrae centrostriatales* vom Ncl. centromedianus des Thalamus sowie über die *Fibrae nigrostriatales* (dopaminerge Axone) aus der Substantia nigra. Seine Efferenzen wirken hemmend auf den Globus pallidus und die Substantia nigra. Es ist wichtig, dass das Striatum *nicht* direkt in den Cortex zurückprojiziert.

Das Striatum ist das oberste Integrationsorgan des sog. extrapyramidalen Systems (EPMS), dessen Hauptaufgabe es ist, Bewegungsimpulse zu hemmen oder zu bahnen und gelernte motorische Programme abzurufen. Während das Kleinhirn die Bewegungsprogramme im wesentlichen modifiziert, ist das Striatum zusammen mit dem Globus pallidus für das Abrufen automatisierter Bewegungen verantwortlich und an der Modulation der über die Pyramidenbahn geleiteten Bewegungsimpulse entscheidend beteiligt.

Kann das Striatum die Kontrolle über den Globus pallidus nicht mehr übernehmen, entsteht die *Chorea Huntington*, eine genetische (autosomal-dominante) Erkrankung, die mit spontanen und irregulären Bewegungen (*Hyperkinesien*) insbesondere des Kopfes und der distalen Extremitäten einhergeht. Das Striatum atrophiert im Verlauf dieses nicht behandelbaren Leidens (für weitere Informationen zur Neurodegeneration wird ein in zweiter Auflage 2027 erschienenes Sachbuch empfohlen: 'Parkinson und Alzheimer heute' - über *SpringerLink* kostenfrei verfügbar für Studierende).

Der untere Teil des Caput nucl. caudati wird auch als *Nucleus accumbens* bezeichnet und spielt eine Schlüsselrolle bei Abhängigkeits-Syndromen. Er reagiert auf Dopamin, das im ventral-tegmentalen Areal (VTA) des Mittelhirns hergestellt wird und in diesem Kern ein Belohnungsgefühl auslöst (insbesondere, wenn ein Ergebnis die eigene Erwartungshaltung weit übertrifft).



Neuronale Schaltkreise der Motorik

6.2.2 Globus pallidus

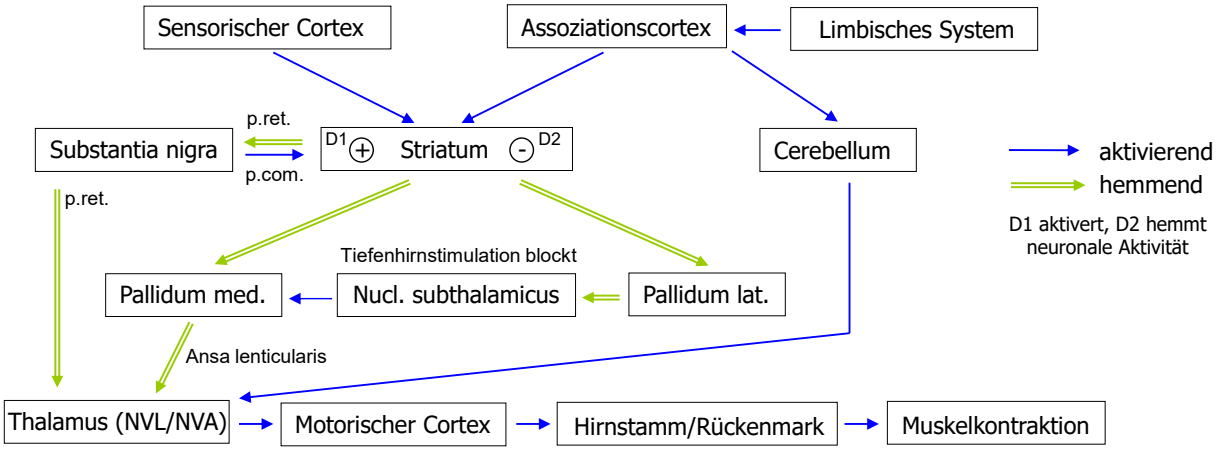
Aufgrund einer hohen Zahl myelinisierter Axone wirkt das Pallidum heller als umgebende Kerne (pallidus, pale, blass). Eine *Lamina medullaris externa* trennt es vom Putamen. Eine *Lamina medullaris interna* trennt den Globus pallidus in einen äußeren (lateralen) und inneren (medialen) Anteil. Die wichtigsten Afferenzen erhält das Pallidum vom Striatum, dem Ncl. subthalamicus (zum Pallidum mediale) und vom Thalamus. Efferenzen gelangen zum Thalamus (vom Pallidum mediale) und Ncl. subthalamicus (vom Pallidum laterale).

Der mediale Anteil hat hemmende, der laterale Anteil aktivierende Funktionen auf die Motorik.

6.2.3 Ncl. subthalamicus

Lateral vom Hypothalamus unter dem Sulcus hypothalamicus liegt der Nucleus subthalamicus. Dieses Kerngebiet bildet die rostrale Fortsetzung der im Mittelhirn lokalisierten Substantia nigra. Zusammen mit der Zona incerta und den Forel'schen Feldern bildet der Kern den *Subthalamus*. Seine Afferenzen und Efferenzen gelangen über den *Fasciculus subthalamicus* zum Pallidum (s. Kap. 5).

Über eine Aktivierung des Pallidum mediale wirkt das Kerngebiet insgesamt bewegungshemmend. Bei Ausfall tritt das sog. ballistische Syndrom auf, das mit unwillkürlichen, schleudernden oder stoßenden Bewegungen insbesondere der proximalen Armmuskulatur einhergeht (siehe auch https://www.klimasbrainblog.com/).



Flussdiagramm funktioneller Verbindungen motorischer Areale und Kerne im ZNS

6.2.4 Corpus amygdaloideum (Amygdala)

Der Mandelkern befindet sich im vorderen Temporallappenpol (Uncus-Bereich) als kraniale Fortsetzung der Cauda des *Nucleus caudatus*. Er besteht aus einem tiefen und einem oberflächlichen Anteil. Lateraler, basolateraler und basomedialer Anteil werden zu den tiefen (zentralen) Kernen gerechnet, wohingegen die corticalen, medialen und periamygdaloiden Subkerne zu den oberflächlichen Kernen gezählt werden. Afferenzen und Efferenzen erreichen bzw. verlassen das Corpus amygdaloideum im wesentlichen über die *Stria terminalis*. Sie verläuft bogenförmig in der Grenzfurche zwischen Ncl. caudatus und Thalamus bis zur *Commissura rostralis*, in der Axone aus palaeocorticalen (pars anterior) und temporalen (pars posterior) Rindenbereichen kreuzen. Wichtige Efferenzen ziehen zu den Septumkernen, zum Hypothalamus und zur Regio preoptica. Einige Faserbündel laufen in der *Stria medullaris thalami* weiter zu den Habenulakernen und dem Hirnstamm. Daraus ergibt sich, dass engste Verbindungen mit dem Riechsystem und dem vegetativen Nervensystem bestehen. Die zentralen Kerne haben dazu noch ausgeprägte Verbindungen mit dem frontalen und temporalen Neocortex. Die Hauptfunktion der Amygdala als zentrales Kerngebiet des limbischen Systems ist es, angstbesetzte Gedächtnisinhalte (emotionales Gedächtnis) zu speichern und Aggressionen auszulösen.

6.2.5 Claustrum

Unterhalb der Inselrinde (getrennt durch die *Capsula extrema*) und lateral vom Putamen (getrennt durch eine *Capsula externa*) befindet sich das Claustrum. Es hat enge Verbindungen zum und entsteht aus dem Cortex, aber seine Funktion ist weitgehend unbekannt.

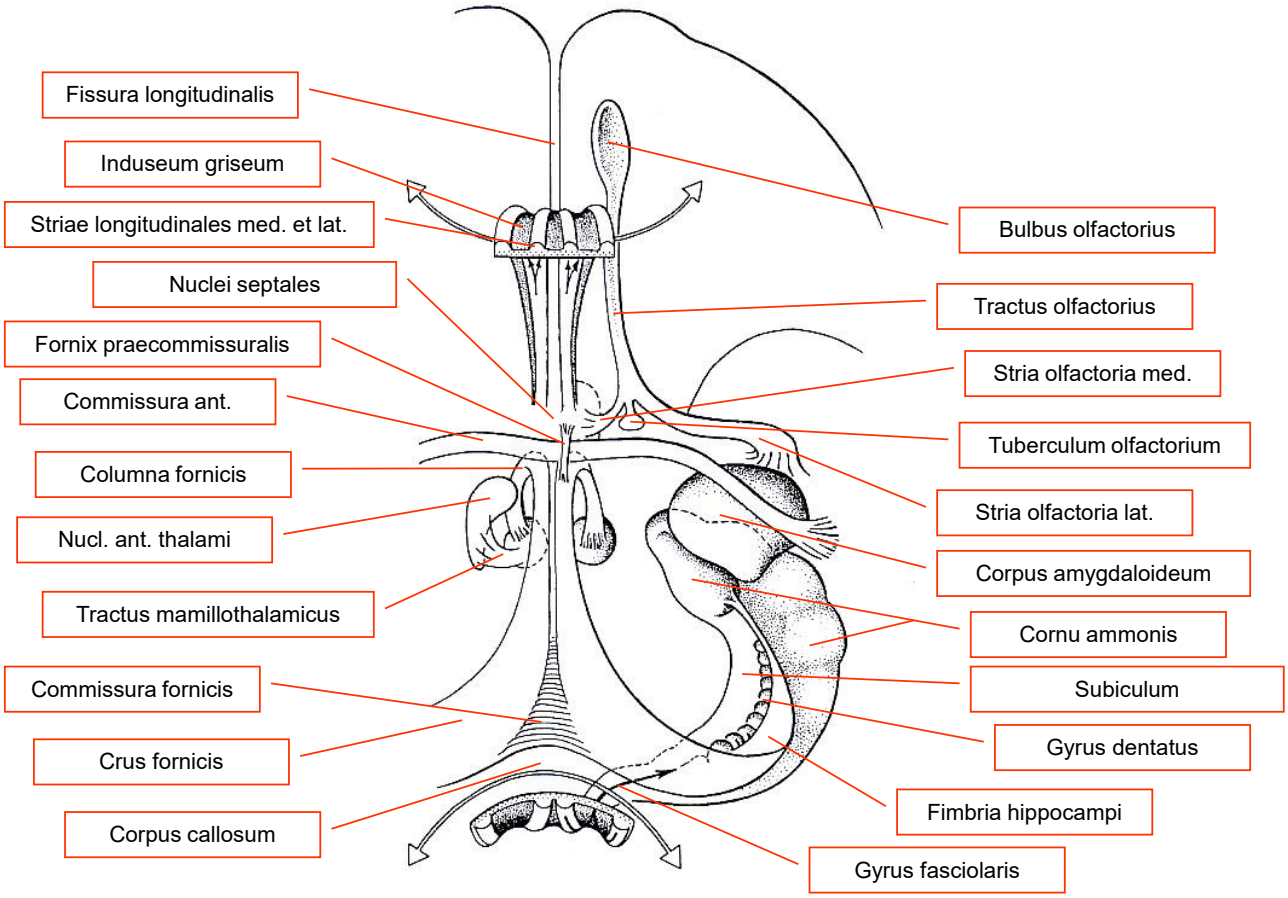
6.3 Cortex cerebri (Großhirnrinde)

Archicortex und *Paleocortex* werden als *Allocortex* zusammengefasst und dem *Isocortex* (*Neocortex*) aufgrund ihres vereinfachten Schichtenaufbaus gegenübergestellt. Folgende Zuordnungen lassen sich treffen:

- **Palaeocortex**: Bulbus und Tractus olfactorius, Tuberculum olfactorium (Bereich der Subst. perf. ant.), periamygdaloider Cortex (Gyrus semilunaris), Septumbereiche
- **Archicortex**: Hippocampus und Regio entorhinalis (Gyrus parahippocampalis), Teile des Gyrus cinguli
- **Neocortex**: Lobus frontalis, parietalis, occipitalis und temporalis

6.3.1 Palaeocortex

Der Paleocortex ist der phylogenetisch älteste Teil des Endhirns (palaios, alt). Er ist für die Geruchswahrnehmung und ihre Weiterleitung zu den olfaktorischen Zentren verantwortlich, d.h. er bildet mit seinen Strukturen das Riechhirn (Rhinencephalon), macht aber nur einen kleinen Teil des Großhirns aus. Der vordere Teil des *Gyrus parahippocampalis* wird auch als entorhinaler Cortex bezeichnet.



Blick von oben auf paleo- und archicorticale Strukturen

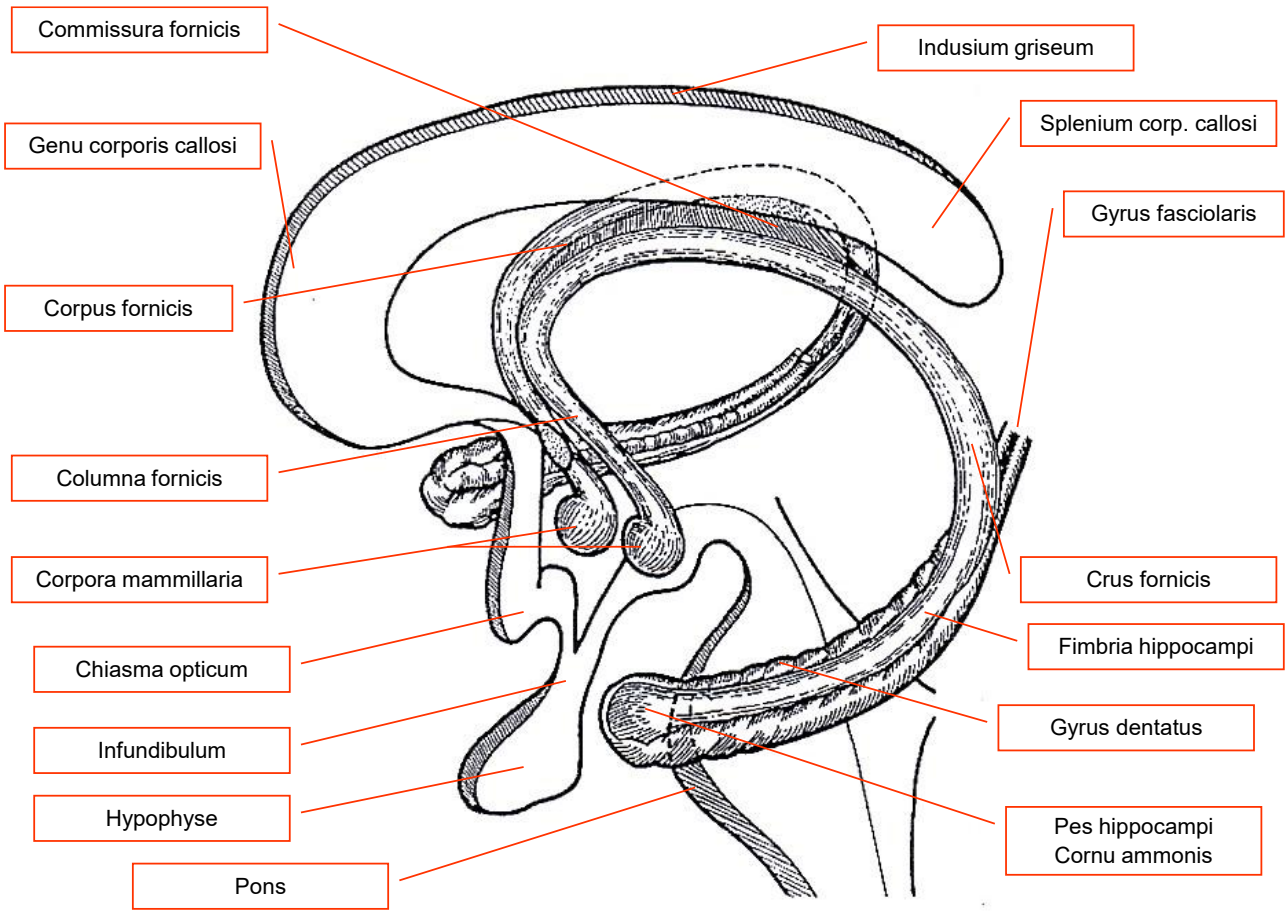
6.3.2 Archicortex

6.3.2.1 Hippocampusformation

Limbisches System

Dem limbischen Sytem wird das emotionale Empfinden und die dauerhafte Speicherung expliziter Gedächtnisinhalte zugeordnet. Es bestimmt daher Affektverhalten, Sexualität, Motivation, intellektuelle Leistungen u.a.m. Diese Funktionen stehen unter dem Gesichtspunkt des Selbst- und Arterhalts, die stets von Lust- oder Unlustgefühlen begleitet sind. Enge Verbindungen mit zentralen autonomen Bereichen werden dadurch verständlich. Als limbisches System fasst man mehrere Cortex- und Kerngebiete zusammen, die kein in sich geschlossenes System bilden, sondern in einem engen funktionellen Zusammenhang mit anderen Gehirnarealen stehen.

Der Hippocampus ist ein wichtiger Teil des limbischen Systems an der Innenseite des Temporallappens, der vom Gyrus parahippocampalis verdeckt wird und sich an der medialen Wand des Unterhorns der Seitenventrikel befindet. Über dem Gyrus parahippocampalis liegt im Sulcus hippocampi der *Gyrus dentatus*, in den sich das Ammonshorn einrollt. Dieses Cornu ammonis wird in die Felder CA1 bis CA4 eingeteilt, die sich in der Dichte der Pyramidenzellen unterscheiden. Das *Indusium griseum* stellt die Fortsetzung des Hippocampus nach dorsal dar. Es handelt sich um einen dünnen, aus grauer Substanz bestehenden Streifen, der auf dem Balken bis zu seinem rostralen Ende verläuft. Der *Fornix* sammelt die meisten hippocampalen Efferenzen und verläuft unter dem Balken zu den Corpora mamillaria und anderen hypothalamischen Kerngebieten. Afferenzen erhält der Hippocampus aus der *Area entorhinalis* (Gyrus parahippocampalis) über den Tractus perforans, aus dem *Subiculum* (über den Alveus), aus dem Assoziationscortex und aus dem *Gyrus cinguli*. Der Hippocampus ist wichtig für Emotionen und explizite (deklarative) Gedächtnisbildung, d.h. Überführung von Daten in das Kurzzeitgedächtnis (anteriorer Hippocampus) und von dort in das Langzeitgedächtnis (posteriorer Teil des Hippocampus). Weiterhin ist der Hippocampus als wesentlicher Bestandteil des *Neuronenkreises von Papez* (Nucl. ant. thalami – Gyrus cinguli – Hippocampus – Fornix – Corpus mamillare - Nucl. ant. thalami) auch für den Abruf von expliziter (in Worte und Zahlen fassbarer) Information notwendig.



Dargestellt ist der innere limbische Bogen. Zum äußeren limbischen Bogen wird der Gyrus cinguli über dem Balken und der Gyrus parahippocampalis am medialen Temporallappenrand gerechnet

6.3.3 Neocortex

6.3.3.1 Rindenfelder nach Brodmann

Obwohl der Neocortex durchgehend einen ähnlichen Schichtenaufbau besitzt, zeigt er doch Variationen, die eine Einteilung in über 50 verschiedene Rindenfelder (Areae nach *Brodmann*) zulassen. In einzelnen Feldern unterscheiden sich die Schichten in ihrer Breite und Zelldichte. In sensibel-sensorischen Arealen ist der *granuläre Cortex* vorherrschend: die Körnerschichten (Lamina II + IV) sind stark verbreitert und zellreich, z.B. im *Gyrus postcentralis* und in der Hörrinde. In der Sehrinde wird die innere Körnerschicht sogar durch eine dünne markhaltige Zone, den *Gennari-Streifen* (geteilte Lamina IV), getrennt (daher auch der Begriff *Area striata* für die Sehrinde).

Der *agranuläre Cortex* ist typisch für die motorischen Brodmann-Areale. Hier sind die Körnerschichten zurückgebildet, die Pyramidenschichten (Lamina III + V) dafür stark erweitert. Im *Gyrus precentralis* sind in der Lamina V insbesondere die Betz'schen Riesenpyramidenzellen zu finden, deren Axone als Teil der Pyramidenbahn bis in das Sakralmark reichen.

6.3.3.2 Mikroskopische Anatomie des Neocortex

I. Molekularschicht (Lamina molecularis)
II. Äußere Körnerschicht (Lamina granularis externa)
III. Äußere Pyramidenschicht (Lamina pyramidalis externa)
IV. Innere Körnerschicht (Lamina granularis interna)
V. Innere Pyramidenschicht (Lamina pyramidalis interna)
VI. Multiforme Schicht (Lamina multiformis)

Neben diesem horizontalen Schichtenaufbau findet man im Neocortex vertikale Kolumnen, die eine modulartige Verschaltung verschiedener Zellarten ermöglichen. Hierbei soll es sich um eigenständige funktionelle Einheiten handeln.

6.3.3.3 Funktionelle Einteilung

In den sog. Primärarealen des Cortex enden zum einen die Sinnesbahnen (z.B. die Sehbahn im visuellen Cortex), andererseits handelt es sich um die Ausgangsorte für motorische Impulse (z.B. der Gyrus precentralis). Die Sekundärfelder sind den Primärfeldern nachgeschaltet, d.h. hier finden Interpretation und Zuordnung von Sinnesinformationen statt (z.B. werden Laute zu Silben und Wörtern zusammengesetzt). Tertiär- oder Assoziationsfelder verbinden Primär- und Sekundärfelder verschiedener Lappen (z.B. können akkustische und visuelle Reize in Verbindung gebracht werden, so dass eine neue Assoziation entsteht).

6.3.3.4 Frontallappen

Der im Primatengehirn größte Lappen ist primär für Willkürbewegungen (Motorik) und Verhalten (Psychomotorik) verantwortlich. Komplexe motorische Programme, die z.B. die Sprache oder koordinierte Augenbewegungen betreffen, gehen von den frontalen Windungen aus. Der Frontallappen wird durch den *Sulcus centralis* vom Parietallappen getrennt. Zwischen Sulcus centralis und *Sulcus precentralis* befindet sich der *Gyrus precentralis* (Motorcortex im engeren Sinn, Area 4 nach Brodmann). Parallel zum Sulcus lateralis liegen die *Sulci frontales inferior et superior*, gelegentlich findet sich auch ein Sulcus frontalis medius. Die Sulci begrenzen die *Gyri frontales* (sup., med. und inf.). Am Gyrus frontalis inferior unterscheiden wir eine *pars orbitalis* von einer *pars triangularis* und einer *pars opercularis*.

Primär-motorische Rinde

Im Gyrus precentralis (*Brodmann Areal 4*) und median angrenzenden Bereichen (vorderer Teil des Lobulus paracentralis) befindet sich der Ursprung von ca. der Hälfte aller Pyramidenbahn-Axone. Sie projizieren zu den kontralateral gelegenen Motoneuronen in Hirnstamm und Rückenmark, die für

Muskeln in den unterschiedlichen Körperteilen (Extremitäten, Stamm, Kopf) zuständig sind. Der *Tractus corticonuclearis* projiziert zu den motorischen Kernen der Hirnnerven, wohingegen der *Tractus corticospinalis* zum Vorderhorn des Rückenmarks zieht. Die peripheren Innervationsareale sind landkartenartig (*somatotopisch*) auf dem motorischen Cortex verteilt (*motorischer Homunkulus*), wobei die für die Feinmotorik verantwortlichen Muskeln an Hand, Gesicht und Zunge besonders große Anteile einnehmen. Über dem *Sulcus lateralis* liegt der Bereich für das Gesicht, es folgen nach dorsal (oben) die Hand, der Arm, dann der Rumpf und das im Bereich der Mantelkante an der Fissura longitudinalis cerebri für das Bein zuständige Areal.

Im vorderen Anteil von Area 4 liegen hauptsächlich Neurone, die aufgrund propriozeptiver Information Bewegungen auslösen (Area 4a), dahinter befinden sich die gleiche Muskeln ansteuernden Neurone, die taktile Empfindungen umschalten (Area 4b, doppelte Repräsentation). Die Projektionsneurone des Gyrus precentralis werden vor allem durch den Ncl. ventralis lateralis des Thalamus angesteuert. Sie erhalten aber auch Input vom Gyrus postcentralis und von der prämotorischen Rinde.

Prämotorische Rinde

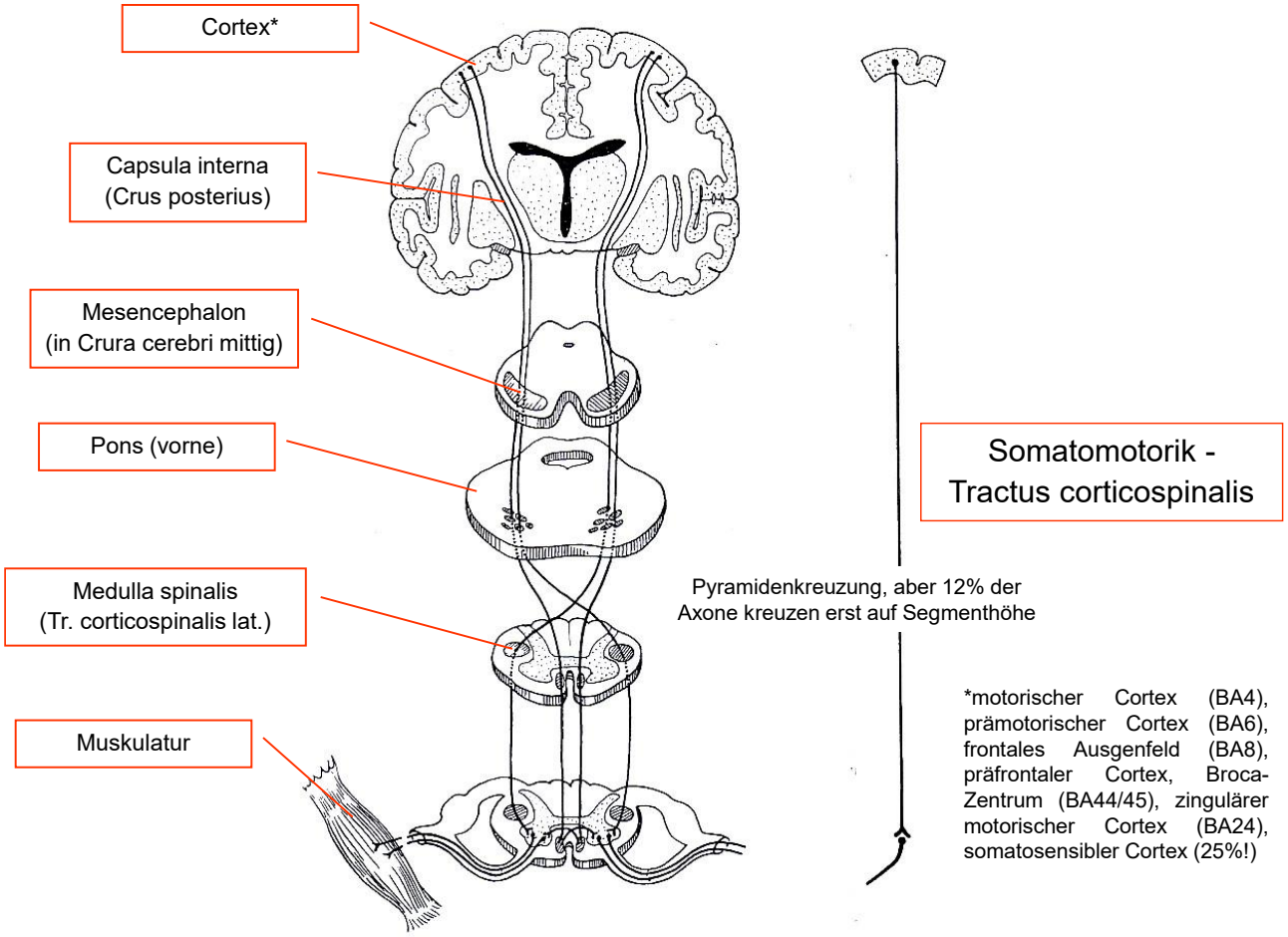
Diese auch als supplementär-motorisches Areal oder Area 6 bezeichnete Region erhält Afferenzen und entsendet Efferenzen ähnlich zum Gyrus precentralis. Zusätzliche Verbindungen bestehen über den *Tractus frontopontinus* zu den pontocerebellären Neuronen sowie zu verschiedenen Kerngebieten im Hirnstamm (Formatio reticularis, Ncl. ruber).

Frontales Augenfeld

Das frontale Blickzentrum (Area 8) liegt unmittelbar vor der prämotorischen Rinde. Es enthält Afferenzen aus der primären und sekundären Sehrinde im Occipitallappen und projiziert seinerseits über den Tractus corticonuclearis zum III. und VI. Hirnnervenkern sowie zur Formatio reticularis. Von hier aus werden Augeneinstellbewegungen auf ein gewähltes Blickziel (unwillkürlich, reflektorisch) vorgenommen.

Motorisches Sprachzentrum

Das *Broca*-Areal (Area 44 und 45) befindet sich im Bereich der pars opercularis und triangularis des *Gyrus frontalis inferior*. Wesentliche Afferenzen kommen aus der primären und sekundären Hörrinde sowie dem *Gyrus angularis*, der den *Gyrus temporalis superior* nach oben fortsetzt. Die Efferenzen gelangen zum Gyrus precentralis (Motorik der Sprechmuskulatur). Im Sprachzentrum wird die Sprache in ihrem Wort- und Satzbau geformt (Sprachbildung). Das Areal darf nicht mit dem sensorischen Sprachzentrum nach *Wernicke* im Temporallappen verwechselt werden, welches für unser Sprachverständnis zuständig ist. Das Broca-Zentrum ist in seiner Funktion zumeist nur einseitig in der dominanten Hemisphäre ausgeprägt (bei Rechtshändern immer links, bei Linkshändern rechts oder links). Es kann daher bei einem Ausfall nicht durch die kontralaterale Hemisphäre kompensiert werden. In diesem Fall spricht man von einer *motorischen Aphasie* (a-phasia, ohne Sprache).



Die Pyramidenbahn

Frontales Blasenzentrum

Im Gyrus cinguli und Gyrus frontalis medialis findet sich ein Areal mit vor allem hemmenden Einfluss auf die Harnblasen- und Enddarmentleerung.

Präfrontale Rinde

Rostral der prämotorischen Rinde gelegenes Feld, das für das Kurzzeit- bzw, Arbeitsgedächtnis und höhere geistige Leistungen notwendig ist.

6.3.3.5 Parietallappen

Gyrus postcentralis (primär-somatosensible Rinde, Areae 1-3)

Die somatotopische Gliederung ist jener im motorischen Cortex ähnlich: über dem Sulcus lateralis liegt der Bereich für Schlund und Mundhöhle, nach dorsal folgen Hand, Arm, Rumpf, Bein, Blase, Mastdarm und Genitale (*sensibler Homunculus*). Die feindifferenzierten Wahrnehmungsorgane wie z.B. Gesicht und Hand sind überproportional repräsentiert, was mit der hohen Rezeptordichte in der Peripherie zusammenhängt.

Sekundär-somatosensible Rinde (Areae 5, 7)

Hinter dem Gyrus postcentralis gelegener Cortex, der für die interpretative Zuordnung der Sinnesreize, die in den Gyrus postcentralis gelangen, zuständig ist.

Gyrus angularis (Area 39)

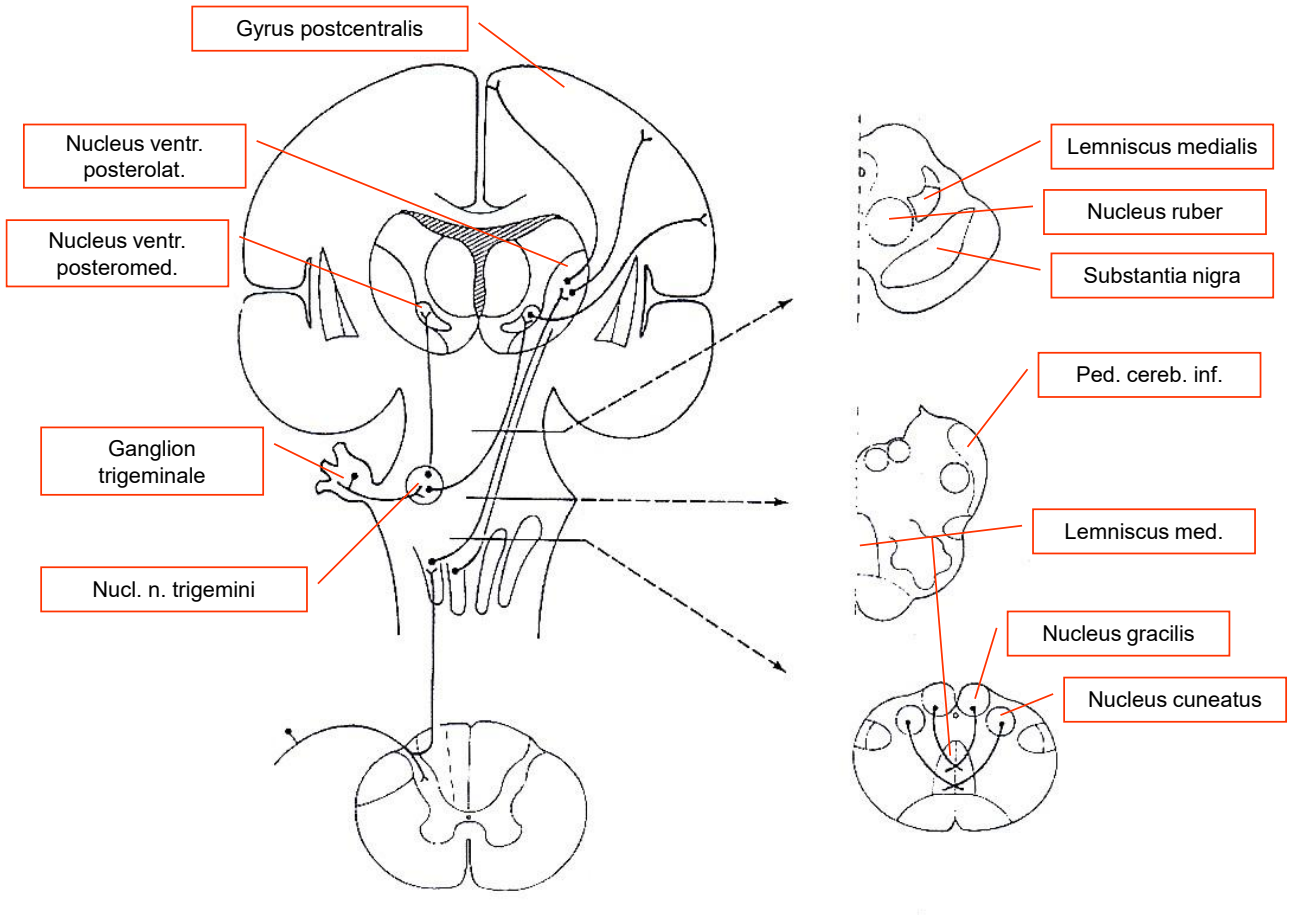
Er legt sich um den Sulcus temporalis superior, unterhalb des *Gyrus supramarginalis*, der sich am hinteren Ende des Sulcus lateralis befindet. Dieses Assoziationsfeld spielt eine wichtige Rolle bei der Verknüpfung visueller Impulse zu den passenden sprachlichen Begriffen, z.B. beim Schreiben und Lesen. Bei Schädigungen in diesem Bereich treten daher bevorzugt Lese- (Alexie) oder Schreibstörungen (Agraphie) auf.

Hinterer Parietallappen

Diese Region hinter dem Gyrus postcentralis ist für die Orientierung im Raum wichtig, sie erhält visuelle, auditive, propriozeptive und vestibuläre Informationen.

6.3.3.6 Temporallappen

Die vorderen Anteile des Lobus temporalis werden durch die *Commissura anterior* miteinander verbunden. Messungen haben ergeben, dass sie bei Frauen 12% größer ist als bei Männern und bei homosexuellen Männern 34% größer als bei heterosexuellen Männern.



Verlauf der Hinterstrangbahnen für die Exteroception und bewusste Proprioception

Primäre Hörrinde (Area 41)

Diese in der Tiefe des Sulcus lateralis an der Dorsalfläche des Temporallappens lokalisierten *Gyri temporales transversi* (Heschl'sche Querwindungen) sind Endigungsareale der Hörbahn und daher für das interpretationslose Bewusstwerden von auditorischen Impulsen aus dem Innenohr notwendig. Axone der Hörbahn enden in einer tonotopischen Gliederung: Tiefe Frequenzen anterolateral, hohe posteromedial.

Sekundäre Hörrinde (Areae 42, 22)

Lateral von der primären Hörrinde befinden sich sekundäre Areale, die in der dominanten Hemisphäre für die rationale Interpretation der auditorischen Impulse zuständig sind (Sprachverständnis, sensorisches Sprachzentrum nach *Wernicke*). In der nicht-dominanten Hälfte (zumeist rechts) liegt die Fähigkeit zur musischen Interpretation. Die Efferenzen zum motorischen Sprachzentrum laufen über die *Fibrae arcuatae cerebri* (Fasciculus arcuatus) und den Fasciculus longitudinalis superior.

6.3.3.7 Occipitallappen

Primäre Sehrinde (Area striata, Area 17)

An der Medialfläche des Occipitallappens, ober- und unterhalb des *Sulcus calcarinus*, befindet sich das Endigungsgebiet der Sehbahn mit Afferenzen aus dem *Corpus geniculatum laterale*. Die Area striata projiziert in die Areae 18 und 19, in denen es zu einer bewussten Zuordnung optischer Impulse kommt. Jedem Ort auf der Netzhaut entspricht dabei ein spezifisches Areal der primären Sehrinde, wobei die Fovea centralis (Ort des schärfsten Sehens) ca. 4/5 einnimmt; die oberen Retinaquadranten projizieren auf die obere Calcarinalippe (unteres Gesichtsfeld); die unteren Retinaquadranten projizieren auf die untere Calcarinalippe (oberes Gesichtsfeld).

Sekundäre Sehrinde (Areae 18, 19)

Sie liegt hufeisenförmig um die primäre Sehrinde. Efferenzen projizieren zum frontalen Augenfeld, dem Gyrus angularis sowie zu den *Colliculi superiores* (Verschaltung des Akkommodationsreflexes).

6.3.3.8 Inselrinde (Insula, Lobus insularis)

In der Fossa lateralis, bedeckt vom *Operculum frontale, parietale* und *temporale* (Opercula sind ‚Deckel', die sich über die langsamer wachsende Inselrinde legen), befindet sich ein Übergangsgebiet von Neocortex zu Paleocortex, das daher auch als *Mesocortex* bezeichnet wird. Die Inselrinde besitzt zwar eine Sechsschichtung wie der Neocortex, diese ist aber nicht sonderlich stark ausgeprägt; in der V. Schicht liegen die Pyramidenzellen dicht aneinander, was charakteristisch für diese Region ist und sonst nur noch im Gyrus cinguli vorkommt. Die Insel hat eine wichtige Bedeutung bei der Wahrnehmung viscerosensibler Reize (Hunger, Übelkeit), bei der Geschmacksempfindung und bei der Schmerzverarbeitung. Von hier aus gelangen visceromotorische Impulse über Hypothalamus und Corpus amygdaloideum in den Hirnstamm (Magensaftsekretion, Blutdruckanstieg usw.).

6.3.4 Bahnen der Großhirnrinde

6.3.4.1 Assoziationsbahnen

Verknüpfen einzelne Areale einer Hemisphäre miteinander.

6.3.4.2 Kommissurenbahnen

Verbinden Areale beider Hemisphären – Beispiele: Corpus callosum und Commissura anterior.

6.3.4.3 Projektionsbahnen

Verbinden den Cortex mit subcorticalen Zentren (Thalamus, Basalganglien, Hirnstamm). Sie befinden sich in der Capsula interna, externa und extrema. Die Capsula interna wird begrenzt medial vom Ncl. caudatus und dem Thalamus, lateral vom Putamen und Pallidum. Absteigende Bahnen (von rostral nach occipital) sind der Tractus frontopontinus (*crus anterius*), die corticonukleäre Bahn (*genu*), die corticospinale Bahn sowie der Tractus temporopontinus. Als aufsteigende Bahnen (von rostral nach occipital) finden sich thalamocorticale Axone sowie die Seh- und Hörstrahlung im hinteren Schenkel.