

Ohne Schwung

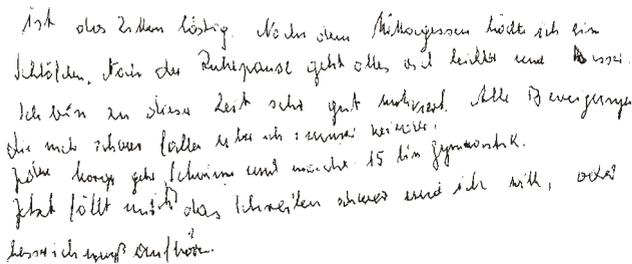
Ein funktionelles System umfasst mehrere zentralnervöse und z.T. auch periphere „Stationen“, die gemeinsam bestimmte Aufgaben erfüllen. Für das **motorische System** sind zentralnervös v. a. der Cortex cerebri, Basalganglienschleifen mit Verbindung zu motorischen Thalamuskernen, das Kleinhirn sowie pyramidale und extrapyramidale Bahnen von Bedeutung. Bei einer Störung im Bereich der Basalganglienschleifen verändern sich das Bewegungstempo, die Haltung und der Muskeltonus.

Lustlosigkeit und Schulterschmerz

Ludwig B. ist müde. Seit zwei Wochen schafft er es kaum, sich morgens aus dem Bett zu quälen. Appetitlos und lustlos schleppt er sich durch den Tag. Er fühlt sich unbeweglich und stolpert öfter als früher. Zusätzlich zittert v. a. seine linke Hand seit neuestem, wenn er nichts damit tut.

Noch vor einem halben Jahr war der 57-Jährige stets auf Achse. Als engagierter Steuerberater arbeitete er nicht nur im eigenen Büro, sondern fuhr auch oft direkt zu seinen Kunden. Dann begannen eines Tages die Schmerzen in seiner linken Schulter und verschlimmerten sich mit jeder Woche. Auf Rat eines Orthopäden schluckte Ludwig B. entzündungshemmende Medikamente, die aber wenig halfen. Zu den Schmerzen gesellten sich bald Lust- und Kraftlosigkeit. Sein Hausarzt sprach von einer Depression und riet ihm, einen Nervenarzt aufzusuchen.

seine anderen Beschwerden schildert, hat der Arzt bereits einen Verdacht. Er bittet den Steuerberater, einige Sätze zu schreiben. Dabei sieht er, dass die Buchstaben besonders zum Zeilenende hin kaum erkennbar klein werden. Bei der Untersuchung fällt dem Neurologen eine Bewegungseinschränkung der Extremitäten auf, die links ausgeprägter ist als rechts. Der Tonus der Arm- und Beinmuskeln scheint insgesamt erhöht zu sein. Als Dr. S. den Gang seines Patienten begutachtet, bemerkt er, dass die Schritte des Mannes langsam sind und seine Arme kaum mit-schwingen, besonders aber seine linke Hand in Ruhe feinschlägig zittert. Alle Symptome, die der Neurologe dokumentiert - Hypokinese (verminderte Beweglichkeit), Rigor (Muskelstarre) und Tremor (Zittern) -, kann er einem Morbus Parkinson zuordnen. Auch die depressive Stimmungslage, Schulterschmerzen und das Alter des Patienten passen zu einer Erstmanifestation dieser Erkrankung.



Ich das Zittern häufig. Als ich einen Mitbewohner häßte ich ein
Schloßchen, kein der Ruhepunkt geht oder es leicht und
Ich bin zu stressiert sehr gut nachher. Alle Bewegungen
die mich schwer fallen habe ich immer weniger.
Jahre lang gab ich keine und mache 15 km Fahrrad
Jahre fällt mir das Schreiben schwer und ich nicht, oder
sonst ich muss aufpassen

Therapie: Dopaminagonist

Für die weiterführende Diagnostik schickt Dr. S. den Steuerberater in eine neurologische Klinik. Als sich der Patient nach drei Wochen wieder in der Praxis vorstellt, ist dem Entlassungsbericht u.a. zu entnehmen,

Gestörte Bewegungssteuerung

„Doktor, ich bin heute fast überfahren worden“, berichtet Herr B. dem Neurologen Dr. S. „Als ich die Straße überquerte, kam ein Auto von links angefahren. Ich wollte stehen bleiben, schaffte es aber nicht und wäre fast in den Wagen hineingelaufen“, erzählt der Mann relativ ausdruckslos weiter. Als er ihm auch

dass die kraniale Bildgebung unauffällig, aber der L-Dopa-Test positiv war. Letzteres bedeutet, dass sich die Symptome nach der Gabe eines L-Dopa-Präparates besserten. Von dem Erfolg kann sich Dr. S. selbst überzeugen: Die Bewegungen des Patienten verlaufen glatter, die Schulterschmerzen sind schwächer und Herr B. wirkt wieder viel zuversichtlicher.

In einem funktionellen System werden verschiedene kortikale und nukleäre Hirngebiete und ihre Verknüpfungen mit Blick auf ihre gemeinsame Aufgabe zusammengefasst. Zu den meisten funktionellen Systemen gehören auch Anteile des peripheren Nervensystems.

13.1 Somatomotorisches System



Lerncoach

Die einzelnen Strukturen innerhalb des somatomotorischen Systems kennst du größtenteils bereits aus anderen Kapiteln. Konzentriere dich beim Lesen dieses Abschnitts daher darauf, wie sie untereinander verschaltet sind, um beim Ausführen einer Bewegung mitwirken zu können.

13.1.1 Überblick

Planung und Initiierung von Bewegungen erfolgen im Wesentlichen im prämotorischen und supplementär motorischen Kortex (s. Lehrbücher der Physiologie). Diese erhalten Rückkopplungen aus motorischen Thalamuskernen (S.151) und über diese indirekt v. a. aus den Basalganglien und dem Kleinhirn. Darüber können initiierte Bewegungen abgestimmt und moduliert werden. Vom prämotorischen Kortex wird das abgestimmte Bewegungsprogramm an den primär somatomotorischen Kortex weitergeleitet. Hier beginnt die **Pyramidenbahn**. So wird die schnelle Verbindung vom primär somatomotorischen Kortex (**1. Motoneuron, oberes Motoneuron**) zu den Motoneuronen im Hirnstamm bzw. Rückenmark (**2. Motoneuron, unteres Motoneuron**) bezeichnet, die im Wesentlichen der *Willkürmotorik* dient. Sie besteht aus:

- **Fibrae corticonucleares**, die an den motorischen Hirnnervenkernen im Hirnstamm enden, und
- **Fibrae corticospinales**, die sich als **Tractus corticospinalis** fortsetzen und (meist über Interneurone) auf α -Motoneurone im Vorderhorn des Rückenmarks projizieren.

Letztere innervieren die Skelettmuskulatur in der Peripherie mit dem Erfolg der Muskelkontraktion.

Klinischer Bezug

Motorische Ausfallserscheinungen: Je nach Ort der Läsion innerhalb des somatomotorischen Systems kann es zu sehr unterschiedlichen klinischen Syndromen kommen. Sind Strukturen der modulierenden Rückkopplungsschleifen geschädigt, führt dies nicht zu Lähmungen der Muskulatur, sondern zu Störungen des Bewegungsablaufs, s. Parkinson-Syndrom (S.248) und zu Kleinhirnerkrankungen (S.137). Schädigungen des 1. oder 2. Motoneurons dagegen haben partielle Lähmun-

gen (Paresen) oder einen kompletten Ausfall der Muskulatur (Plegie) zur Folge.

Dabei ist eine *Läsion des 1. Motoneurons* im Gehirn oder Rückenmark mit Ausnahme der akuten Phase (S.87) durch eine *spastische Parese* gekennzeichnet (zentrale Parese durch Wegfall des hemmenden Einflusses auf γ -Motoneurone) mit Tonuserhöhung, gesteigerten Muskeleigenreflexen, positiven Pyramidenbahnzeichen und abgeschwächten Fremdre reflexen bei herabgesetzter Muskelkraft. Ist das **2. Motoneuron geschädigt**, tritt eine *schlafte Lähmung* auf, bei der (begleitend zur herabgesetzten Muskelkraft) auch der Tonus und die Muskeleigenreflexe abgeschwächt sind. Auch eine Atrophie der betroffenen Muskeln setzt schnell ein. Da bis auf das Perikaryon im Vorderhorn des Rückenmarks der längste Anteil des betroffenen Neurons (Axon) zum PNS zählt, spricht man auch von einer *peripheren Lähmung*. Durch gezieltere neurologische Untersuchung lassen sich dann Rückschlüsse auf den wahrscheinlichen Ort der neuronalen Läsion (Vorderwurzel, peripherer Nerv) oder eine muskuläre Ursache ziehen.

Sind sowohl das 1. als auch das 2. Motoneuron betroffen (wie z. B. bei der *Amyotrophen Lateralsklerose* = ALS), kommt es zur Kombination von Muskelatrophie (durch Untergang von Motoneuronen) und Spastizität mit Pyramidenbahnzeichen und gesteigerten Reflexen (durch Seitenstrangbefall). Der Verlauf dieser neurodegenerativen Erkrankung ist unaufhaltsam progredient und kann derzeit durch Medikamente (z. B. Riluzol) nur minimal verzögert werden.

Der unwillkürlichen Steuerung und Koordination der Somatomotorik dient das sog. **extrapyramidal-motorische System**, das jedoch funktionell mit dem pyramidal-motorischen System eng verknüpft ist: Kollaterale der Pyramidenbahn ziehen – genau wie die Fasern aus dem prämotorischen und supplementär motorischen Kortex – sowohl zu subkortikalen Kerngebieten als auch über den Pons zum Kleinhirn. So entstehen polysynaptische Verbindungen im Sinne von Rückkopplungsschleifen:

- Die **Verschaltungen der Basalganglien** sind für die Ausführung komplexer erlernter Bewegung (z. B. Schreiben) sehr wichtig.
- Für den geordneten Ablauf einer Bewegung sind zudem **Kleinhirnschleifen** von Bedeutung, in die neben dem Cerebellum z. B. die Ponskerne, der untere Olivenkomplex und (als Zwischenstation) der Nucleus ruber eingebunden sind. Die „Stationen“ dieser Rückkopplungsschleifen stehen mit weiteren Hirnstammstrukturen in Verbindung, die ebenfalls Einfluss auf die Motorik nehmen.

Efferenzen aus vielen der beteiligten Kerngebiete (Kleinhirnerkerne, Ncl. ruber, Colliculi superiores, Complexus olivaris inferior = untere Olive, Formatio

reticularis und Vestibulariskerne), die als extrapyramidale Bahnen zusammengefasst werden können, dienen der unwillkürlichen Steuerung und Koordination der Somatomotorik.

13.1.2 Pyramidal-motorisches System

Die Pyramidenbahn (**Tractus pyramidalis**, **Abb. 13.1**) ist für die willkürliche Motorik verantwortlich. Sie übermittelt v. a. Signale vom motorischen Kortex

- an motorische Hirnnervkerne im Hirnstamm über **Fibrae corticonucleares**,
- an Motoneurone im Vorderhorn des Rückenmarks über **Fibrae corticospinales**.

Die Axone der Pyramidenbahn enden kontralateral und haben Glutamat als Transmitter. Der *Ursprung* dieses Fasersystems liegt hauptsächlich im primär somatomotorischen Kortex (S.169) (Gyrus precentralis, Area 4), im prämotorischen und supplementär motorischen Kortex (S.170) sowie dem Kortex für die Okulomotorik (frontales Augenfeld im Gyrus frontalis medius) (S.162).

Ein kleiner Teil stammt auch aus dem somatosensorischen Kortex (s. u.). Nach dem Verlassen des Kortex bilden die Fasern der Pyramidenbahn einen Teil der Corona radiata (S.179) und verlaufen dann – weiterhin immer somatotop geordnet – durch die Capsula interna (Genu und Crus posterius, s. **Tab. 9.2**). Weiter ziehen die Fasern durch den mittleren Teil der mesenzephalen Crura cerebri (Pedunculi cerebri).

Im Pons (Pars basilaris) ist die Pyramidenbahn in Faserbündel aufgespalten als Teil der Fibrae pontis longitudinales (S.95). Auf der ventralen Seite der Medulla oblongata vereinigen sich die Faserbündel zu einem Strang (→ Pyramis).

Während ihres Verlaufs durch den Hirnstamm verlassen die Fibrae corticonucleares auf unterschiedlichen Höhen die Pyramidenbahn, um an motorischen Hirnnervkernen zu enden. Am Ende der Medulla oblongata liegen somit nur noch Fibrae corticospinales vor.

Die Mehrzahl dieser Fasern (ca. 70–90%) kreuzen hier in der Decussatio pyramidum, um *kontralateral* als **Tractus corticospinalis lateralis** im Funiculus late-

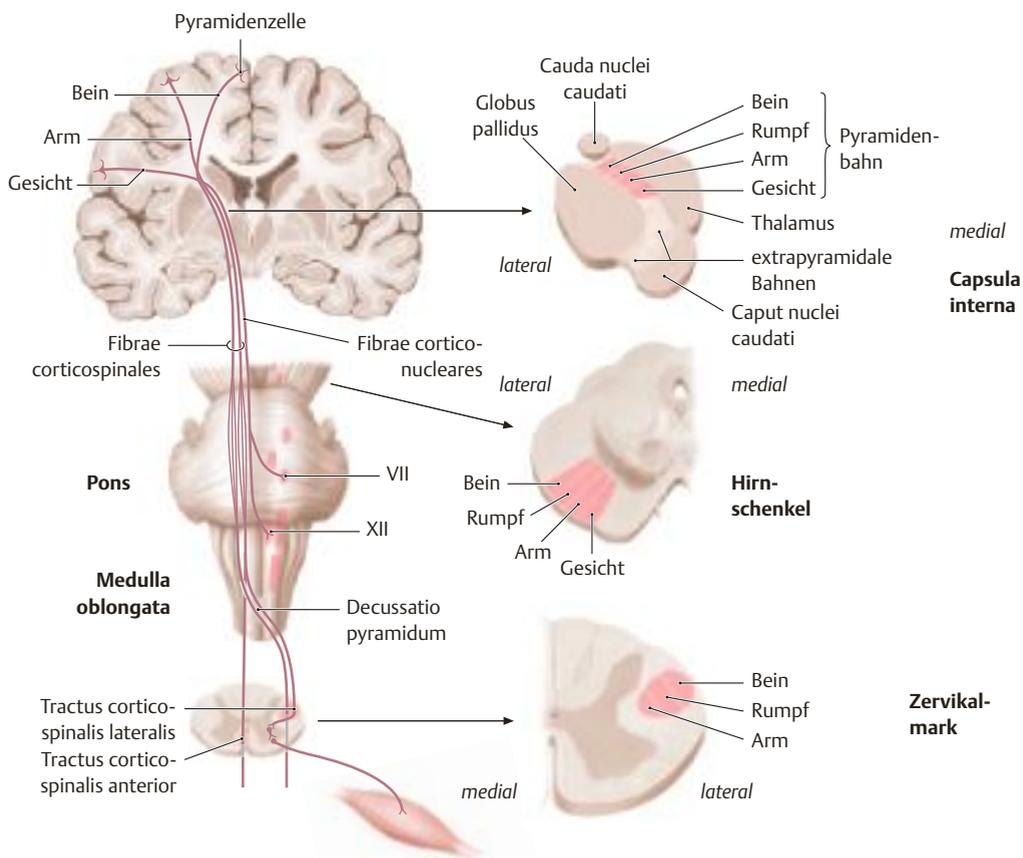


Abb. 13.1 Verlauf der Pyramidenbahn. (aus Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Prometheus, LernAtlas der Anatomie. Kopf, Hals und Neuroanatomie. Illustrationen von Voll M. u. Wesker K. 5. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2018)

ralis des Rückenmarks abzusteigen. Die nicht gekreuzten Fasern verlaufen als **Tractus corticospinalis anterior ipsilateral** im Funiculus anterior abwärts, um dann auf Höhe ihres Zielsegments die Seite zu kreuzen.

Die Fibrae corticonucleares kreuzen zur Gegenseite und enden an den motorischen Hirnnervenkernen V, VII, IX, X, XI und XII (direkt an Motoneuronen oder über Interneurone). Die Kerne V, IX und X werden zudem von ipsilateralen Fasern erreicht. Der Faserverlauf zum Kern des N. facialis (S.125) ist differenziert.

Das frontale Augenfeld (Area 8 nach Brodmann) entsendet Fibrae corticonucleares (diese werden manchmal auch als **Fibrae corticomesecephalicae** bezeichnet), die im Hirnstamm abzweigen und u.a. zur Area preectalis, zum Colliculus superior und zur Formatio reticularis ziehen. Nach Umschaltung erfolgt dann die Projektion auf die Hirnnervkerne III, IV und VI.

Die Fasern, die aus den o. g. motorischen Kortexarealen stammen, **enden** an:

- α -Motoneuronen (direkt, nur ein geringer Teil der Fasern), deren Axone das Rückenmark über die Vorderwurzel verlassen, um die quergestreifte Skelettmuskulatur zu innervieren, s. motorische Endplatte (S. 19),
- Interneurone, die dann die Signale zu α -Motoneuronen leiten,
- Interneurone, die die Signale über weitere Interneurone an α -Motoneurone leiten.

13.1.3 Extrapyramidal-motorisches System

Das extrapyramidal-motorische System dient der Abstimmung unterschiedlicher motorischer Programme im Rahmen einer Bewegungsvorbereitung. Es kann als eine Art „Servo-System“ für die Pyramidalmotorik aufgefasst werden, indem es „glatte“ Bewegungen mit ermöglicht.

Basalganglienschleifen

Basalganglienschleifen (**Abb. 13.2**) sind polysynaptische Schleifen, die mit dem Kortex in Verbindung stehen.

Die **Hauptschleife** (auch als **direkter Weg** der Basalganglienverschaltung bezeichnet) enthält das Striatum (Nucleus caudatus und Putamen), den Globus pallidus medialis und die Nuclei ventrales anteriores und laterales des Thalamus.

Das Striatum erhält Afferenzen aus allen Kortexarealen (Transmitter: Glutamat \rightarrow exzitatorisch), über die Fibrae nigrostriatales aus der Pars compacta der Substantia nigra (Transmitter: Dopamin \rightarrow je nach Rezeptor unterschiedliche Wirkung, s. u.) und aus dem Ncl. centromedianus des Thalamus (Transmitter: Glutamat).

Es projiziert hemmend (Transmitter: GABA) zum Globus pallidus medialis. Von dort zieht (genau wie von der Pars reticularis der Substantia nigra) eine hemmende Projektion zu den Nuclei ventrales anteriores und laterales des Thalamus. Letztere schicken erregende Fasern zum prämotorischen und supplementär motorischen Kortex, von wo aus ein Anschluss an das pyramidal-motorische System gegeben ist. Die Projektion des Striatum zum Globus pallidus medialis (in der **Hauptschleife**) ist also letztlich **motorikfördernd**: Striatum hemmt Globus pallidus medialis \rightarrow Globus pallidus medialis **hemmt vermindert** Thalamuskern \rightarrow Thalamuskern **aktivieren vermehrt** den Kortex.

Die **Nebenschleifen** (auch als **indirekter Weg** der Basalganglienverschaltung bezeichnet) modulieren den Informationsfluss in der Hauptschleife. Dabei projizieren die Efferenzen des Striatum nicht direkt in den Globus pallidus medialis und die Substantia nigra (Pars reticularis), sondern über „Zwischenstationen“ im Globus pallidus lateralis und Ncl. subthalamicus. Weitere Verbindungen entsprechen denen der Hauptschleife.

Wie das Striatum erhält der Nucleus subthalamicus erregende Afferenzen aus dem Kortex und projiziert zum Globus pallidus medialis und zur Substantia nigra, Pars reticularis. Diese Projektionen des Ncl. subthalamicus sind exzitatorisch. Das heißt, im Globus pallidus medialis können diese exzitatorischen Impulse die inhibitorischen Signale aus dem Striatum (s. Hauptschleife) sowie die aus dem Globus pallidus lateralis abtufen.

Der Nucleus subthalamicus wird durch den Globus pallidus lateralis gehemmt. Letzteres wird wiederum durch das Striatum gehemmt (Transmitter: GABA). Das bedeutet, die Projektion vom Striatum zum Globus pallidus lateralis ist letztlich **motorikhemmend**: Striatum hemmt Globus pallidus lateralis \rightarrow Globus pallidus lateralis **hemmt vermindert** Nucleus subthalamicus \rightarrow Nucleus subthalamicus **aktiviert vermehrt** Globus pallidus medialis \rightarrow Globus pallidus medialis **hemmt vermehrt** Thalamuskern \rightarrow Thalamuskern **aktivieren vermindert** den Kortex.

Die Aktivität des motorischen Kortex wird also durch Inhibition und Disinhibition der motorischen Thalamuskern reguliert, was insbesondere bei der Bewegungsplanung von Bedeutung ist.

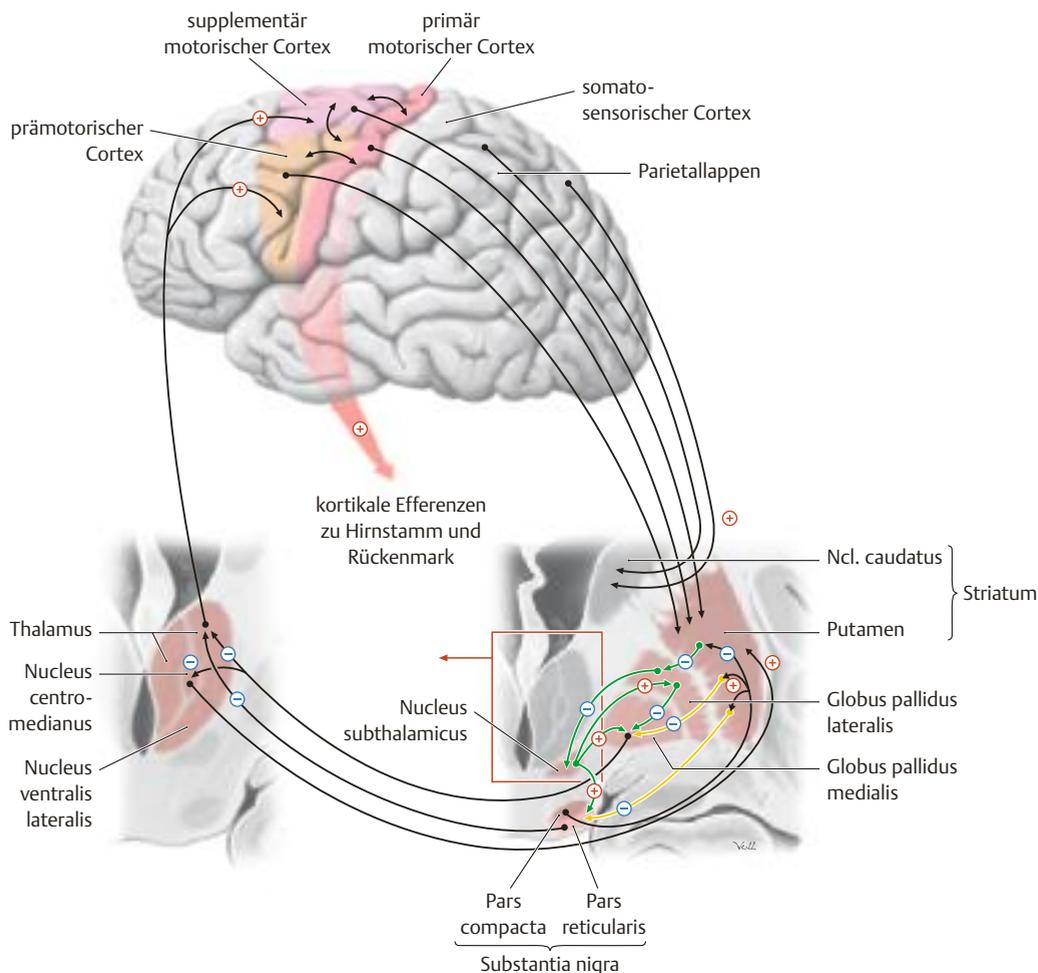


Abb. 13.2 Basalganglienschleifen und ihre Verknüpfungen mit motorischen Kortexarealen. (aus Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Prometheus, LernAtlas der Anatomie. Kopf, Hals und Neuroanatomie. Illustrationen von Voll M. u. Wesker K. 5. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2018)

MERKE

Das Striatum empfängt dopaminerge Fasern von der Substantia nigra (Pars compacta) und glutamaterge Fasern vom Cortex cerebri. Striatale Efferenzen sind GABAerg. Sie ziehen weder direkt zum Rückenmark noch direkt zurück zum Cortex, sondern u. a. zu beiden Anteilen des Globus pallidus. So bewirken sie über die Hauptschleife (direkter Weg) eine Steigerung, über die Nebenschleifen (indirekter Weg) eine Hemmung der motorischen Aktivität.

Der Informationsfluss in direktem und indirektem Weg kann durch weitere Projektionen in diese Schaltkreise hinein modifiziert werden. Die dopaminergen Neurone der Substantia nigra (Pars compacta) inhibieren den motorikhemmenden Teil des Striatum (über D2-Rezeptoren) und erregen mit ei-

nigen Fasern den motorikfördernden Teil des Striatum (über D1-Rezeptoren). D. h. diese Projektion hat einen fördernden Einfluss auf die Motorik.

MERKE

Die dopaminergen Fasern aus der Pars compacta der Substantia nigra haben (über verschiedene Dopaminrezeptoren im Striatum) unterschiedliche Auswirkungen auf die Motorik.

Klinischer Bezug

Morbus Parkinson: Im Verlauf dieser Erkrankung kommt es zu einer Degeneration nigrostriataler dopaminergischer Projektionen. Dies führt zu:

- verminderter Aktivierung des motorikfördernden Teils (direkter Weg) des Striatum, d. h. die inhibitorischen

sche Wirkung des Globus pallidus medialis ist verstärkt,

- verminderter Hemmung des motorikhemmenden Teils (indirekter Weg) des Striatum; das bedeutet: vermehrte Hemmung des Globus pallidus lateralis → verminderte Hemmung des Nucleus subthalamicus → vermehrte Erregung des Globus pallidus medialis, d. h. die inhibitorische Wirkung des Globus pallidus medialis ist verstärkt.

Insgesamt wird über beide Wege die hemmende Wirkung des Globus pallidus medialis auf den Thalamus gesteigert und motorikfördernde Effekte der thalamokortikalen Verbindung reduziert. Dies führt zu einer allgemeinen Reduktion einer spontanen Bewegung (**Abb. 13.3**), **Hypokinese**. Im klinischen Sprachgebrauch wird synonym auch von **Akinese** gesprochen, was jedoch eigentlich einer völligen Bewegungsstarre entspricht und erst in weit fortgeschrittenen Stadien der Erkrankung auftritt. Der Ablauf von Bewegungen ist verlangsamt und Mitbewegungen sind aufgehoben (fehlendes Schwingen der Arme beim Gehen). Es sind ferner zu beobachten: eine starre Mimik (Maskengesicht), seltener Lidschlag, Mikrografie, Schluckstörungen, undeutliche und monotone Artikulation, Gangstörungen (z. B. kurze Schritte, Füße werden kaum angehoben), Haltungsänderung (nach vorn gebeugter Kopf und Rumpf sowie leicht angewinkelte und adduzierte Arme, s. **Abb. 13.3**), herabgesetzte reflektorische Ausgleichsbewegungen (→ Stolpern, gehäuft Stürze).

Die Reduktion der dopaminergen Projektion zum Striatum führt zu einer Aktivitätssteigerung von cholinergen Interneuronen im Striatum. Das cholinerge Übergewicht wird für die Symptome **Ruhetremor** (Pillendreher) und **Rigor** verantwortlich gemacht. Der Rigor ist ein erhöhter Muskeltonus. Bei passiver Bewegung im Handgelenk bemerkt der Untersucher einen gleichmäßig anhaltenden Widerstand, der ruckartige Unterbrechungen aufweist (**Zahnradphänomen**).

Auch **limbische Schleifen** beeinflussen die Signalübertragung im direkten und indirekten Weg (Psychomotorik). Die Pars reticularis wird durch Axone aus den striatalen Striosomen gehemmt, die selbst Afferenzen aus limbischen Kortexarealen bekommen.

Der Globus pallidus medialis erreicht mit seinen Axonen nicht nur die motorischen Nuclei ventralis anterior und lateralis, sondern auch den Nucleus centromedianus.

Letzterer projiziert auch zu limbischen Kortexarealen und frontalen Assoziationsarealen. Zudem ziehen auch Projektionen aus dem Corpus amygdaloideum zum Striatum (→ Beteiligung der Basalganglien an emotionalen Prozessen).

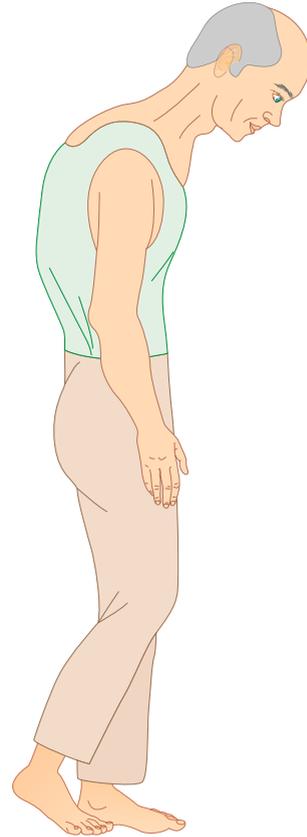


Abb. 13.3 Haltung eines Parkinson-Kranken.

Ferner lässt sich eine **thalamische Nebenschleife** nachweisen:

Die intralaminären Kerne des Thalamus, die inhibitorische Afferenzen aus dem Globus pallidus medialis erhalten, erregen das Striatum. Letztes inhibiert vermehrt den Globus pallidus medialis.

Kleinhirnschleifen

Das Kleinhirn kann keine Bewegungen initiieren. Es ist unbewusst v. a. für **Kontrolle von Muskeltonus, Gleichgewichtserhaltung, Korrekturen und Glättung von Bewegungsabläufen** verantwortlich, s. Kap. Kleinhirn (S. 135).

Diese Leistungen werden durch die so genannten Kleinhirnschleifen erreicht. Dazu steht das Kleinhirn sowohl mit dem Kortex (afferent über die Ponskerne und efferent über den motorischen Thalamus) als auch mit verschiedenen subkortikalen Zentren, die im Rahmen der Motorik eine Rolle spielen, in Verbindung. Eine direkte Verbindung besteht z. B. zum Ncl. ruber (S. 98) und der unteren Olive (Complexus olivaris inferior) (S. 94), die beide auch kortikale Afferenzen erhalten. Ebenfalls besteht eine Rückkopplung zwischen Kleinhirn und Formatio reticularis

(S. 100) sowie Vestibulariskernen (S. 261). Die Ausbildung von Rückkopplungsschleifen lässt sich vereinfacht entsprechend der funktionellen Kleinhirnannteile (S. 136) mit Afferenzen der drei Rindenareale, Projektion in die verschiedenen Kleinhirnkerne und deren efferenten Verbindungen beschreiben:

- Das **Pontocerebellum** erhält via Brückenkerne Afferenzen aus nahezu allen Kortexarealen. Über den **Ncl. dentatus** mit Efferenzen zu motorischen Thalamuskernen, die wiederum zu motorischen Kortexarealen projizieren, ist es an der *Planung und Ausführung von Bewegungen* beteiligt. Zudem besteht von ähnlichen Rindenarealen ausgehend eine Schleife, die das Kleinhirn ebenfalls über den Ncl. dentatus verlässt und über den Ncl. ruber (Pars parvocellularis) sowie die untere Olive wieder dort ankommt. Die Funktion dieser Neuronenkette ist die präzise Ausführung von Bewegungen (→ *Zielmotorik, Sprechmuskulatur*).
- Einen ähnlichen Weg nehmen auch Efferenzen der **Ncll. globosus** und **emboliformis**, mit dem Unterschied, dass sie die Pars magnocellularis des Ncl. ruber erreichen. Hier beginnt der Tractus rubrospinalis (S. 250). Spinozerebelläre Afferenzen erreichen wiederum Rindenareale des nach ihnen benannten **Spinocerebellum**, die auf die Ncll. globosus und emboliformis projizieren. Über diese Verbindungen kann das Kleinhirn regulierend auf den Muskeltonus einwirken.
- Neben Afferenzen aus den Vestibulariskernen erhalten zum **Vestibulocerebellum** zählende Rindenregionen von Vermis und Lobus anterior auch Signale aus der Formatio reticularis. Rückläufige Fasern verlassen das Kleinhirn größtenteils über den **Ncl. fastigi**. Die Tractus vestibulo- und reticulospinalis spielen für die *Gleichgewichtsregulierung* und die *Stützmotorik* eine Rolle. Zudem kann das Vestibulocerebellum über seine Projektion zu den Vestibulariskernen, die wiederum mit den Augenmuskelkernen in Verbindung stehen, die Blickmotorik beeinflussen.

So sind also verschiedene Hirnstammstrukturen in die Kleinhirnschleifen eingebunden, über die Informationen des Kleinhirns weitergegeben werden. Die Motoneurone im Rückenmark werden dabei von den subkortikalen Zentren über die extrapyramidalen Bahnen (s. u.) weitergeleitet. Über die sensiblen Bahnen des Rückenmarks ist dann wiederum eine Rückmeldung an das Kleinhirn und – über den Thalamus – an den somatosensorischen Kortex möglich. Durch das enge funktionelle Zusammenwirken von motorischem und somatosensiblen System erklärt sich der Begriff „Somatomotorik“.

Extrapyramidale Bahnen

Die extrapyramidalen Bahnen entspringen von subkortikalen motorischen Zentren, die u. a. Verbindungen mit unterschiedlichen Arealen des zerebralen Kortex und dem Kleinhirn haben.

Sie verlaufen im Vorderseitenstrang des Rückenmarks und enden direkt oder unter Vermittlung von Interneuronen überwiegend an γ -Motoneuronen, deren Axone intrafusale Muskelfasern von Muskelspindeln erreichen (seltener ziehen sie auch zu α -Motoneuronen).

Der Tractus reticulospinalis

Aus der Formatio reticularis entspringen:

- auf Höhe des Pons: Tractus pontoreticulospinalis (verläuft ipsilateral),
 - auf Höhe der Medulla oblongata: Tractus bulbotreticulospinalis (verläuft ipsi- und kontralateral).
- Die Bahnen erregen Rumpfmuskulatur und proximale Extremitätenmuskeln.

Der Tractus rubrospinalis

Diese Bahn ist beim erwachsenen Menschen nur gering ausgeprägt und erreicht nach Kreuzung in der mesenzephalen Decussatio tegementalis anterior nur das zervikale Rückenmark. Sie hat exzitatorische Effekte auf Flexoren und inhibitorische auf Extensoren.

Der Tractus tectospinalis

Der Tractus tectospinalis entspringt im Colliculus superior (visuelles Reflexzentrum) der Vierhügelplatte, kreuzt in der Decussatio tegementalis dorsalis und zieht im Vorderstrang zum Zervikalmark. Er koordiniert Kopf- und Halsbewegungen (bei Blickbewegungen).

Die Tractus vestibulospinales

Die Tractus vestibulospinales medialis und lateralis (größtenteils ipsilateral verlaufend) bewirken eine Erhöhung des Tonus in den Extensoren bei gleichzeitiger Entspannung der Beuger.

Der Tractus olivospinalis

Diese Bahn kommt von den Nuclei olivares inferiores. Ihre Ausprägung und Bedeutung beim Menschen ist nicht genau bekannt.



Check-up

Rekapituliere die Faserverbindungen des Striatum und nutze in diesem Zusammenhang die Gelegenheit, den Inhalt des Kap. Subkortikale Kerne (S. 174) zu wiederholen.

13.2 Somatosensibles System



Lerncoach

In den somatosensiblen Teilsystemen sind (mit Ausnahme der Weiterleitung von unbewusster Propriozeption) drei Neurone hintereinandergeschaltet: Das erste außerhalb des ZNS, das zweite im Rückenmark oder Hirnstamm, das dritte im Thalamus. Nutze diese grundsätzliche Gemeinsamkeit als Hilfe, um dir Umschaltort und Verlauf (Kreuzungsstelle) innerhalb der einzelnen Bahnsysteme klarzumachen. So fällt es dir leichter, dir auch die ebenfalls vorhandenen Unterschiede einzuprägen.

13.2.1 Überblick

Im somatosensiblen System werden verschiedene Reize über unterschiedliche Rezeptoren aufgenommen. Man unterscheidet:

- **Oberflächensensibilität:** Berührung/Tastempfindung, Druck, Vibration, Wärme, Kälte, Schmerz → über **Exterozeptoren:** u. a. Mechanorezeptoren, Thermorezeptoren, Nozizeptoren.
- **Tiefensensibilität (Propriozeption):** Stellung der Gelenke, Geschwindigkeit und Richtung von Bewegungen, Muskelkraft für die Bewegungen → über **Propriozeptoren:** u. a. Muskel- und Sehnen-spindeln, Gelenkrezeptoren.

Die Reize werden über periphere Nerven in das Rückenmark bzw. in den Hirnstamm geleitet. Im ZNS erfolgt nach Umschaltung auf ein zweites Neuron die Weiterleitung zum Thalamus oder zum Kleinhirn (Endziel). Im Thalamus findet die Umschaltung auf ein drittes Neuron statt, das zur Endhirnrinde (Endziel) projiziert.

Es werden zwei Wege im somatoafferenten System unterschieden:

- **spinoafferentes System:** über das Rückenmark (für den Körper ohne Kopf),
- **trigeminoafferentes System:** über den Hirnstamm (für den Kopf, hier vor allem über den N. trigeminus).

13.2.2 Verschaltungsprinzip somatoafferenter Bahnen

Der Weg vom peripheren Rezeptor bis zum somatosensorischen Kortex besteht im Allgemeinen aus drei hintereinandergeschalteten Neuronen:

- **1. Neuron:** Perikarya im Spinalganglion (S.41),
- Umschaltung auf **2. Neuron** im Rückenmark oder in der Medulla oblongata → Kreuzung der Axone (des 2. Neurons) auf Rückenmarksebene oder im Hirnstamm,
- Umschaltung auf das **3. Neuron** im Thalamus → Projektion des 3. Neurons zum Kortex.

Ausnahmen von diesem Verschaltungsprinzip bilden die spinozerebellären Bahnen und die Fortleitung trigeminaler Propriozeption.

13.2.3 Spinoafferente Systeme

Die Lage der Perikarya des 2. Neurons, der Ort der Kreuzung und die Funktionen (geleitete Sinnesmodalität) unterscheiden sich in den Systemen der spinoafferenten Bahnen (**Abb. 13.4**):

- Hinterstrangsystem,
- Vorderseitenstrangsystem,
- spinozerebelläres System.

Hinterstrangsystem (mediales Lemniskussystem)

Funktionen. Fein diskriminierende Mechanosensibilität, bewusste Propriozeption (besonders aus Muskel- und Sehnenrezeptoren).

1. Neuron. Die Perikarya des sog. primär afferenten Neurons (S.16) liegen im Spinalganglion. Die (zentralen) Axone lagern sich als **Fasciculus gracilis** und **Fasciculus cuneatus** zusammen, s. Tractus spinobulbaris (S.83).

2. Neuron. Die Perikarya liegen im **Nucleus gracilis** (für die untere Körperhälfte) und **Nucleus cuneatus** (für die obere Körperhälfte mit Ausnahme des Gesichts). Ihre Axone kreuzen in der Medulla oblongata als Fibrae arcuatae internae in der **Decussatio lemnisci medialis**.

3. Neuron. Die Perikarya liegen im Nucleus ventralis posterolateralis (**VPL**) des Thalamus. Ihre Axone enden im Gyrus postcentralis.

MERKE

Die Perikarya der Axone, die im Lemniscus medialis verlaufen, liegen in den Nuclei cuneatus und gracilis.

Vorderseitenstrangsystem (anterolaterales System)

Funktionen und Anordnung der Neurone

Funktionen. Schmerz, Temperatur und grobe Mechanorezeption (Tast- und Berührungsempfindungen).

1. Neuron. Die Perikarya befinden sich im Spinalganglion. Die Axone des ersten Neurons gelangen über das laterale Bündel der Hinterwurzel zum Rückenmark und teilen sich T-förmig im **Tractus posterolateralis** (S.81). Diese Fortsätze verlaufen einige Segmente auf- und abwärts, bevor sie in das (ipsilaterale) Hinterhorn eintreten.

2. Neuron. Im Hinterhorn des Rückenmarks liegen die Perikarya (S.83), deren Axone in der Commissura alba anterior zur Gegenseite kreuzen und größtenteils als **Tractus spinothalamicus (lateralis)** für Schmerz und Temperatur; **anterior** für grobe Mechanorezeption) im Seitenstrang zum Thalamus aufsteigen.

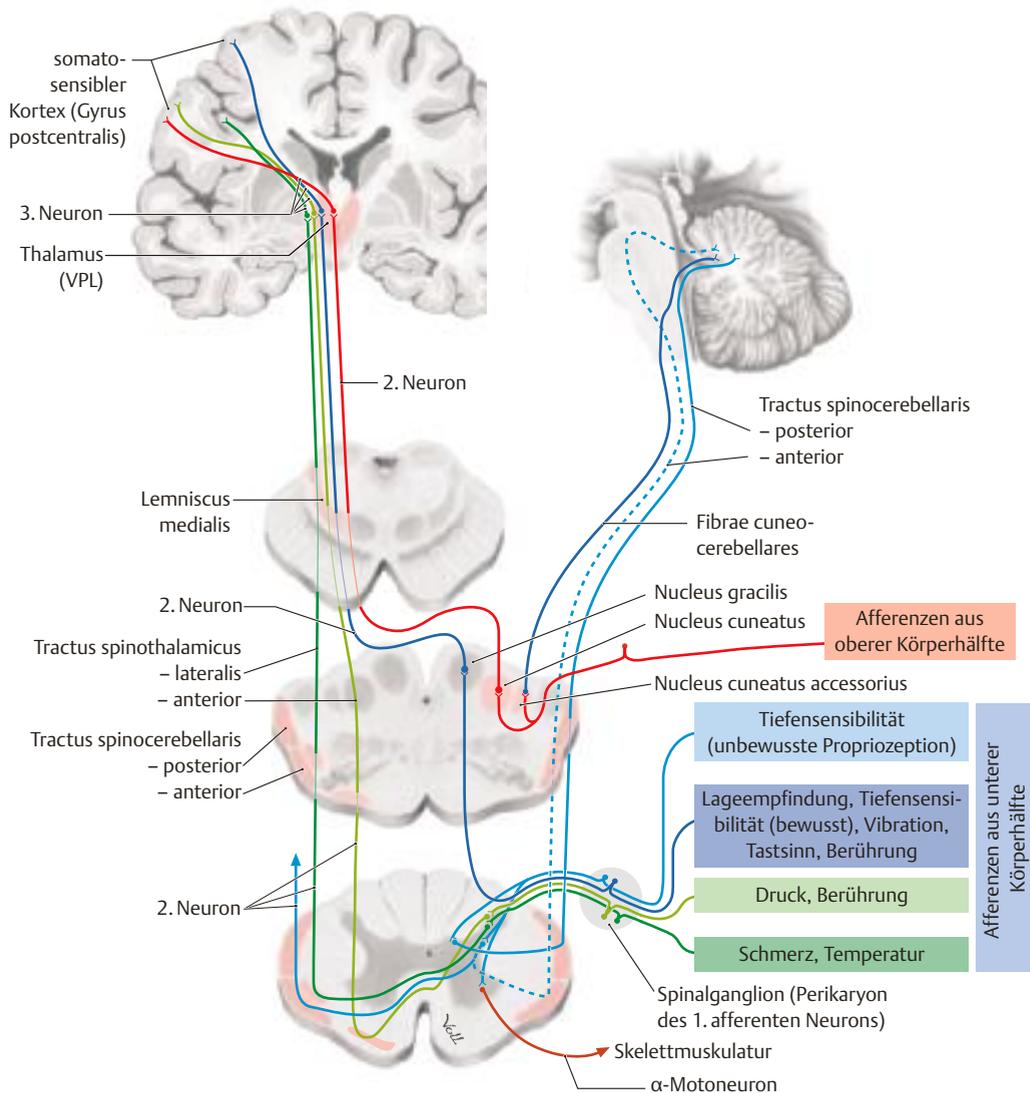


Abb. 13.4 Übersicht über die spinoafferenten Bahnen. (aus Aumüller G, Aust G, Conrad A et al. Duale Reihe Anatomie. 4. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2017 (dort nach Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Prometheus, LernAtlas der Anatomie. Kopf, Hals und Neuroanatomie. Illustrationen von Voll M. u. Wesker K. 5. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2016))

3. Neuron. Diese Perikarya liegen im Nucleus ventralis posterolateralis (VPL) bzw. in intralaminären Kernen, die zugehörigen Axone projizieren zum somatosensorischen Kortex bzw. in unspezifische Kortexteareale.

Klinischer Bezug

Chordotomie: Bei schwersten einseitigen Schmerzzuständen infolge maligner Tumoren kann eine perkutane zervikale Chordotomie durchgeführt werden. Dabei wird die Schmerzbahn kontralateral einseitig lädiert (z. B. durch Elektrokoagulation). Bei dem Eingriff ist die Nachbarschaftsbeziehung des Tractus spinothalamicus zur Pyramidenbahn zu beachten. Nach einem solchen Eingriff ist auch das Temperaturempfinden gestört.

Weiterleitung von Schmerzsignalen

Die Registrierung von Schmerz erfolgt über freie Nervenendigungen, die als **Nozizeptoren** anzusehen sind. Es werden unterschieden:

- mechanische Nozizeptoren (Ansprechen auf z. B. Kneifen, Quetschen, Stich),
- thermische Nozizeptoren (Ansprechen auf z. B. Hitze),
- polymodale Nozizeptoren (Ansprechen auf verschiedene Reize, z. B. auch chemische Schmerzreize).

Nach dem Ort des Schmerzreizes kann man zwischen folgenden **Schmerzformen** unterscheiden:

- somatischer Schmerz: oberflächlich aus der Haut oder tief aus z. B. Knochen und Gelenken und
- viszeraler Schmerz: aus Eingeweiden (z. B. bei Koliken oder Entzündungen). Die Weiterleitung erfolgt immer über unmyelinisierte Fasern, ist jedoch sonst derjenigen somatischer Schmerzen vergleichbar (s. auch Head-Zonen) und wird daher nicht gesondert abgehandelt.

Die Schmerzleitung aus den Nozizeptoren erfolgt über:

- myelinisierte **A δ -Fasern** (S.24) → schneller Schmerz, genau lokalisiert (Leitungsgeschwindigkeit: 13–30 m/s),
- nicht-myelinisierte **C-Fasern** (S.25) → langsamer, dumpfer Schmerz von polymodalen Nozizeptoren (Leitungsgeschwindigkeit: 0,5–2 m/s).

Die Perikarya der primär afferenten Neurone (1. Neuron) der Schmerzbahn liegen in den Spinalganglien. Ihre Fortsätze ziehen ins Rückenmark zur Umschaltung auf das 2. Neuron; die weitere Verschaltung und Weiterleitung ist für den schnellen und langsamen Schmerz unterschiedlich:

- Die Afferenzen des schnellen Schmerzes werden hauptsächlich in Lamina I auf Strangzellen umgeschaltet, deren Axone im selben oder in unmittelbar benachbarten Segmenten in der *Commissura alba anterior* zur Gegenseite kreuzen. Diese Fasern werden als **neospinothalamischer Teil des Tractus spinothalamicus lateralis** bezeichnet. Diese Axone des 2. Neurons enden im Nucleus ventralis posterolateralis des Thalamus. Von dort projiziert das 3. Neuron zum Gyrus postcentralis.
- Die Afferenzen des langsamen Schmerzes enden in der Substantia gelatinosa (Lamina II und III) und werden hier auf Interneurone umgeschaltet. Letztere geben die Signale weiter an Strangzellen der Lamina V. Dieser Weg wird auch als (phylogenetisch älterer) **paläospinothalamischer Teil des Tractus spinothalamicus lateralis** beschrieben. Die Axone der Strangzellen kreuzen zu einem großen Teil die Seite und enden im Wesentlichen in intralaminären Thalamuskernen (s. **Tab. 8.1**). Von

dort erfolgen Projektionen in unterschiedliche Kortexte (s. u.).

Eng verknüpft mit dem paläospinothalamischen Weg sind Schmerzbahnen, die nicht direkt via Thalamus im Kortex terminieren, sondern an subkortikalen Strukturen enden. Diese Bahnen sind im Wesentlichen:

- **Tractus spinomesencephalicus**: endet an der Substantia grisea centralis (S.98). Die Substantia grisea centralis enthält die Ursprungsneurone des absteigenden schmerzhemmenden Systems.
- **Tractus spinoreticularis**: endet in der Formatio reticularis, die wiederum u. a. zu unspezifischen Thalamuskernen und zum Corpus amygdaloideum projiziert.

Über die paläospinothalamische Projektion und über die Projektionen zu den subkortikalen Strukturen erhalten auch das limbische System (S.264) und das ARAS (S.102) direkte Zuflüsse aus der Schmerzbahn. Das erklärt die starke Weckreaktion und die ausgeprägte emotionale (affektive) Komponente von Schmerzen. Über diese Projektionen werden letztlich sehr unterschiedliche Regionen des zerebralen Kortex erreicht (z. B. präfrontaler, zingulärer, insulärer Kortex), was zur Vielschichtigkeit bei der Wahrnehmung von Schmerzen passt.

Spinocerebelläres System

Das ebenfalls zur Somatosensibilität gehörige spinocerebelläre System unterscheidet sich von den anderen spinoafferenten Systemen dadurch, dass hier nur zwei Neurone hintereinandergeschaltet sind.

Funktionen. Unbewusste Propriozeption (aus Muskelspindeln, Sehnen- und Gelenkrezeptoren)

1. Neuron. Seine Perikarya liegen im Spinalganglion.

2. Neuron. Bei diesen Strangzellen unterscheidet sich sowohl die Lage der Perikaryen im Rückenmark als auch der weitere Faserverlauf abhängig von der Zugehörigkeit zum Tractus spinocerebellaris anterior oder posterior:

- **Tractus spinocerebellaris anterior**: Die meisten Axone der in den Laminae V–VIII gelegenen Zellkörper kreuzen zur Gegenseite und kreuzen im Mittelhirn zurück. Einige verlaufen auch ipsilateral. Das Kleinhirn erreicht der Tractus spinocerebellaris anterior über den Pedunculus cerebellaris superior (S.141). Sein funktionelles Äquivalent für die unbewusste Propriozeption ist der Tractus spinocerebellaris superior. Hier erfolgt die Umschaltung im Ncl. centrobasis.
- **Tractus spinocerebellaris posterior**: Die Axone von Strangzellen im Ncl. thoracicus posterior ziehen ipsilateral und erreichen das Kleinhirn über den Pedunculus cerebellaris inferior (S.141).

Einige Afferenzen aus der oberen Körperhälfte ziehen auch zunächst mit dem Fasciculus cuneatus, um