

7 Steuerung vegetativer Funktionen

7.1 Einführung

Man weiß seit dem Altertum, dass eine enge Verflechtung zwischen den Organfunktionen und psychischen Prozessen besteht. Sowohl in der Philosophie – im Zusammenhang mit dem Leib-Seele-Problem – als auch in der traditionellen Medizin hat man die Verzahnung zwischen dem psychischen Befinden und den leiblichen Prozessen als elementar angesehen.

Schon Aristoteles schreibt, dass mit Emotionen typische Körperversänderungen auftreten:

»So scheinen auch alle seelischen Vorgänge wie Zorn, Sanftmut, Furcht, Mitleid, Mut, ferner Freude, sowie Liebe und Hass in Verbindung mit dem Körper zu stehen. Denn bei allen diesen ist der Körper irgendwie beteiligt.«

Die Wirkung von psychischen Prozessen auf die inneren Organe war in der Antike elementarer Bestandteil der Heilkunde. So wurden etwa bei einem Aufenthalt der Kranken im antiken Epidauros – einer Art »Kurzentrums« – ganz bewusst deren Träume genutzt, z.B. während des sog. »Tempelschlafs«, um dem Arzt einen Weg zur Behandlung zu weisen. Dass auch späterhin im breiten Verständnis der Menschen der Zusammenhang zwischen den Organen des Leibes und den psychischen Vorgängen präsent war, lässt sich aus der Fülle von Bildern der Umgangssprache erkennen. Beispiele sind: »Das Herz ist ihm gebrochen« oder »Das schlägt mir auf den Magen«.

Die enge Beziehung zwischen Gefühlszuständen und körperlichen (vegetativen) Veränderungen wurde am Ende des 19. Jahrhunderts zu einem zentralen Thema, und zwar in den Emotionstheorien von William James (1884) und Carl Lange (1887) (s.Abschn.23.2.1). Hier werden die körperlichen Veränderungen als notwendige Bedingungen des Emotionserlebens gesehen. Demzufolge käme kein emotionales Erleben ohne die Wahrnehmung von körperlichen Prozessen – hier sind überwiegend die vegetativen Vorgänge gemeint – zustande.

Bahnbrechende Forschungsergebnisse aus den letzten 40 Jahren lassen zunehmend die ursächlichen Zusammenhänge zwischen psychischen Belastungen und Krankheitsentstehung erkennen. Eine besondere Rolle spielen hierbei die Auswirkungen der sog. Stresshormone auf das

Immunsystem (s.Abschn.17.2). Aber auch das Nervensystem selbst erfüllt neben dem endokrinen und dem Immunsystem viele Aufgaben, die sich direkt auf die Funktion der inneren Organe des Körpers beziehen.

Das vegetative Nervensystem, das auch **autonomes** oder **viszerales Nervensystem** genannt wird, dient der Steuerung der inneren Organe wie Herz, Lunge und Magen-Darm-Trakt sowie der Gefäße und der Drüsen. Eine der Hauptaufgaben des vegetativen Nervensystems besteht in der Konstanthaltung des **inneren Milieus**. Dieser Begriff geht auf den französischen Physiologen Claude Bernard (1858) zurück.

Das innere Milieu, insbesondere die chemische Zusammensetzung der Körpersubstanzen wie intra- und extrazelluläre Flüssigkeiten, muss so beschaffen sein, dass optimale und stabile Arbeitsbedingungen für die verschiedenen Systeme des Organismus herrschen. Man bezeichnet das Prinzip des fein regulierten und immer wieder in die Balance gebrachten Gesamtzustands des Körpers auch als **Homöostase**. Um eine solche Aufgabe erfüllen zu können, müssen sehr viele Rückmeldeschleifen existieren, über welche die verschiedenen zentralnervösen Regulationszentren mit Informationen über den Ist-Zustand an der Peripherie versorgt werden, auf den sie dann u. U. regulierend einwirken müssen. Da die Stabilisierung des inneren Milieus nur gelingt, wenn allzu große Abweichungen der einzelnen Parameter vom Sollwert vermieden werden, müssen die entsprechenden Regelschleifen meist eine rückführende Funktion ausüben; es handelt sich also überwiegend um negative Feedbacksysteme. Ausnahmen mit positiven Feedbackschleifen spielen z.B. bei zyklisch auftretenden Ereignissen, wie dem Menstruationszyklus, eine Rolle.

Exkurs

Historisches zum vegetativen Nervensystem

Als Begründer der modernen Lehre vom vegetativen Nervensystem mit seinen Teilsystemen gilt John Langley (1852–1925). Auf ihn geht auch die Bezeichnung »autonomes Nervensystem« zurück. In der Zeit vor Langleys grundlegender Arbeit hatte man das vegetative Nervensystem noch nicht weiter unterteilt, sondern es wurde als ein einheitliches,

wenig differenziertes Gefüge betrachtet. Es wurde interessanterweise damals alternativ zur noch heute gültigen Bezeichnung »vegetatives Nervensystem« auch »sympathisches Nervensystem« genannt. Die Bezeichnung »sympathisches System« lässt sich zurückverfolgen bis in die Schriften Homers, der die Gefühle und Empfindungen (gr. *sympathein* = (mit-)empfinden) durchaus im Bezug zu den Prozessen in den inneren Organen sah.

Langley erkannte die mit unterschiedlichen Funktionen ausgestatteten Hauptteile des vegetativen Nervensystems, den Sympathikus und den Parasympathikus. Auch dem dritten Anteil, dem Darmnervensystem, sprach er bereits Eigenständigkeit zu. Dieses Subsystem war jedoch später in Vergessenheit geraten bzw. unter die beiden anderen Anteile subsumiert worden. Erst in jüngster Zeit, insbesondere mit dem Fortschreiten der mikroskopischen Anatomie und Biochemie, wurde die Komplexität und selbstständige Regulationsfähigkeit des Darmnervensystems erkannt.

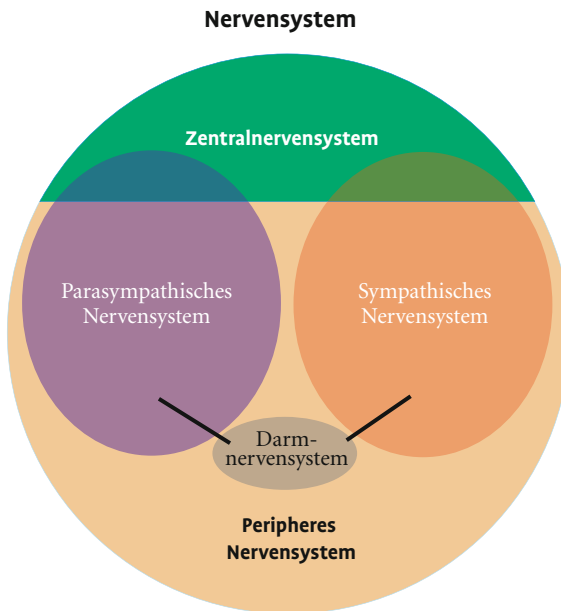


Abbildung 7.1 Zusammenhang zwischen Zentralnervensystem, peripherem Nervensystem und vegetativem Nervensystem. Das vegetative Nervensystem besteht aus sympathischem, parasympathischem und Darmnervensystem. Sympathikus und Parasympathikus besitzen sowohl im Zentralnervensystem als auch im peripheren Nervensystem Anteile

Seine regulatorischen Aufgaben erfüllt das vegetative Nervensystem im Normalfall so, dass dies nicht ins Bewusstsein dringt. Aufgrund der weitgehenden Autonomie der Steuerungsprozesse und ihrer Unabhängigkeit von willentlichen Einflüssen ist der Begriff »autonomes Nervensystem« durchaus berechtigt.

Relative Autonomie. Die Auffassung, das vegetative Nervensystem sei ein System, das völlig unabhängig von der Willkür bzw. der bewussten Wahrnehmung arbeitet, ist dennoch nicht haltbar. Auch aus den inneren Organen können wir ganz bewusst Empfindungen wahrnehmen. Beispiele hierfür sind etwa Atemnot, Übelkeit und Magenschmerzen. Ebenso sind wir – innerhalb gewisser Grenzen – in der Lage, die Funktion innerer Organe bewusst zu steuern oder zumindest zu beeinflussen. Man denke dabei z.B. an die Anregung bzw. Dämpfung der Herzaktivität durch mentale Entspannung oder Imaginationen oder an die Regulation von vegetativen Funktionen durch **Biofeedback** (s. Abschn. 16.4.4).

Regulationsebenen. Das vegetative Nervensystem hat Anteile sowohl innerhalb des Zentralnervensystems als auch im peripheren Nervensystem (s. Abb. 7.1). Im Gehirn finden sich zahlreiche Zentren, die an der Steuerung vegetativer Prozesse beteiligt sind. Das wichtigste Regulationsorgan, das auch die anderen vegetativen Zentren im ZNS beeinflusst, ist der Hypothalamus (s. Abschn. 6.4.8). Die im ZNS generierten Befehle laufen überwiegend durch das Rückenmark, um dann auf verschiedenen spinalen Ebenen auszutreten und als periphere neuronale Verbindungen zu den inneren Organen zu ziehen.

7.2 Subsysteme des vegetativen Nervensystems: Sympathikus, Parasympathikus und Darmnervensystem

Sowohl aufgrund funktioneller Unterschiede als auch auf der Basis anatomischer und neurochemischer Gegebenheiten wird heute das vegetative Nervensystem in drei Subsysteme unterteilt. Zwei davon sind sehr weit verzweigt und versorgen nahezu den gesamten Bereich der inneren Organe: das **sympathische Nervensystem** (Sympathikus) und das **parasympathische Nervensystem** (Parasympathikus). Mit einigen Ausnahmen werden die vegetativen Organe sowohl vom Sympathikus

als auch vom Parasympathikus versorgt (s. Tab. 7.1 sowie Abb. 7.2). Zu den Ausnahmen gehören etwa die Schweißdrüsen und die meisten Blutgefäße.

Das dritte System, das **Darmnervensystem**, befindet sich in den Darmwänden. Es kann aufgrund seiner Komplexität und Selbstständigkeit aus gutem Grund als drittes Subsystem des Vegetativums betrachtet werden.

Sympathisches und parasympathisches Nervensystem

Sympathisches und parasympathisches System erfüllen im Großen und Ganzen Aufgaben, die in ihrer Charakteristik komplementär sind. Man kann etwas vereinfachend davon sprechen, dass das sympathische System auf die inneren Organe denjenigen Einfluss ausübt, der sie zu Zeiten erhöhter Anforderungen – etwa durch körperliche Belastung oder durch mentale Anstrengung – adaptiert und optimiert. Dies gilt in besonderer Weise für kurzfristige, energiemobilisierende Anforderungen, wie sie etwa bei momentanen Stressbelastungen auftreten können (s. Abschn. 17.1.2). Hierbei stellen sich u.a. folgende Reaktionen ein: Die Herzleistung und der Blutdruck steigen, die Körpertemperatur erhöht sich, der Blutzuckerspiegel steigt an und die Pupillen erweitern sich. Man nennt den dadurch ausgelösten organismischen Zustand auch eine **ergotrope** Reaktionslage. Walter Cannon (1871–1945) bezeichnete diese körperliche Umstellung als typisch für die »fight and flight reaction«, also eine Reaktion, die sich etwa beim Auftreten bedrohlicher Reize, z.B. eines Angreifers, zeigt und der man mit Flucht oder Kampf begegnen muss.

Wie sich in den Untersuchungen Cannons u.a. zeigte, kann ein Tier, dessen sympathische Nerven durchtrennt wurden, zwar prinzipiell überleben, jedoch nur in einer artifizien und sehr geschützten Umgebung: Die Außentemperatur muss konstant gehalten werden, das Tier muss gefüttert werden, und Belastungen körperlicher und psychischer Art müssen ferngehalten werden.

Wie sich in den Untersuchungen Cannons u.a. zeigte, kann ein Tier, dessen sympathische Nerven durchtrennt wurden, zwar prinzipiell überleben, jedoch nur in einer artifizien und sehr geschützten Umgebung: Die Außentemperatur muss konstant gehalten werden, das Tier muss gefüttert werden, und Belastungen körperlicher und psychischer Art müssen ferngehalten werden.

Forscherpersönlichkeit

Walter B. Cannon (1871–1945) war Professor für Physiologie an der Harvard University. Er bearbeitete ein sehr umfangreiches Forschungsfeld, das sich von der Röntgenologie bis hin zur Endokrinologie erstreckte. Er hat als Erster das Prinzip der Homöostase beschrieben, nach dem der tierische und menschliche Organismus das Bestreben hat, ein inneres und äußeres Gleichgewicht zu halten und es bei Störeinflüssen wieder herzustellen. Auf Cannon geht auch das

Konzept der Notfallreaktion als ein einheitliches Reaktionsmuster auf verschiedene bedrohliche Reize zurück. Außerdem hat er wesentliche Beiträge zur Aufklärung der Neurotransmitter-Prozesse im autonomen Nervensystem geleistet. In der Psychologie wurde er v.a. auch wegen seiner Auseinandersetzung mit der Emotionstheorie von William James und Carl Lange (s. Abschn. 23.2.1) bekannt.

Eine vermehrte parasympathische Aktivität bewirkt an den **Effektororganen** (also den Ausführungsorganen) eine Arbeitsweise, die den Phasen der Ruhe, Entspannung und Regeneration angemessen ist (nach Cannon die »rest and digest situation«). Dabei herrscht die **trophotrope** Reaktionslage, der Körper kann seine Reserven wieder auffüllen und sich regenerieren. Für das Herz-Kreislauf-System bedeutet dies etwa einen Rückgang der Pulsfrequenz, für den Magen-Darm-Trakt eine Zunahme der verdauungsfördernden Motorik.

Funktioneller Synergismus. In einer gegebenen Situation, die durch ein bestimmtes Ausmaß an Anforderungen gekennzeichnet ist, arbeiten die beiden Systeme normalerweise so, dass ein Hochfahren des einen mit einem Herunterfahren des anderen einhergeht (s. Tab. 7.1). Wenn auch die Richtung der Effekte von

Sympathikus und Parasympathikus am einzelnen Organ gegenläufig ist, so liegt hier dennoch kein Antagonismus im Sinne eines Gegeneinanderarbeitens vor. Die zerebrale Steuerung der beiden Subsysteme sorgt dagegen im Rahmen eines funktionellen Synergismus der beiden Subsysteme für eine optimal an die Situation angepasste Funktionseinstellung.

Die spezielle Wirkung am Erfolgsorgan wird nicht allein durch die Beteiligung bestimmter sympathischer oder parasympathischer Nervenfasern erzielt, sondern v.a. auch durch die beteiligten Rezeptortypen und -subtypen (vgl. hierzu etwa die gegenläufige Wirkung der einzelnen Adrenozeptortypen, s. Abschn. 5.2.2). Die Ausstattung vegetativer Muskelzellen mit bestimmten Rezeptoren ist in der Zeit veränderlich und kann an bestimmte Anforderungssituationen angepasst werden.

Tabelle 7.1 Innervation der inneren Organe durch Sympathikus und Parasympathikus (nach Trepel, 2008)

Erfolgsorgan	Sympathikus-Wirkung	Parasympathikus-Wirkung
Auge		
▶ Musculus dilatator pupillae	Pupillenerweiterung	keine
▶ Musculus sphincter pupillae	keine	Pupillenverengung
▶ Musculus ciliaris	keine	Akkommodation (Naheinstellung)
Drüsen		
▶ Tränendrüse	keine	Sekretion
▶ Schweißdrüsen	Sekretionssteigerung	keine
▶ Speicheldrüsen	Sekretionsminderung, Sekreteindickung	Sekretionssteigerung, Sekretverdünnung
▶ Magendrüsen	keine	Sekretionssteigerung
▶ Darmdrüsen	keine	Sekretionssteigerung
▶ Nebennierenmark	Sekretion (v. a. von Adrenalin und Noradrenalin)	keine
Herz		
▶ Pulsfrequenz	Steigerung	Senkung
▶ Erregungsleitungsgeschwindigkeit	Steigerung	Senkung
▶ Kontraktionskraft	Steigerung	keine
Blutgefäße		
▶ Gastrointestinaltrakt	Konstriktion	Dilatation
▶ Skelettmuskulatur	Dilatation	keine
▶ Haut	Konstriktion	keine
▶ Herz	Dilatation	keine
▶ Penis/Klitoris	keine	Dilatation
Lungen		
▶ Bronchialmuskulatur	Dilatation	Konstriktion
▶ Bronchialdrüsen	Sekretionsminderung	Sekretionssteigerung
Gastrointestinaltrakt		
▶ Motilität	Minderung der Peristaltik	Steigerung der Peristaltik
▶ Sphinktermuskeln	Kontraktion (Verschluss)	Dilatation (Öffnung)
Harnblase		
▶ Wandmuskulatur	keine	Kontraktion (Blasenentleerung)
▶ Musculus sphincter vesicae (Schließmuskel)	Kontraktion (Blasenverschluss)	keine
Penis	Ejakulation	Erektion

Sympathischer Teil des autonomen Nervensystems

Parasympathischer Teil des autonomen Nervensystems

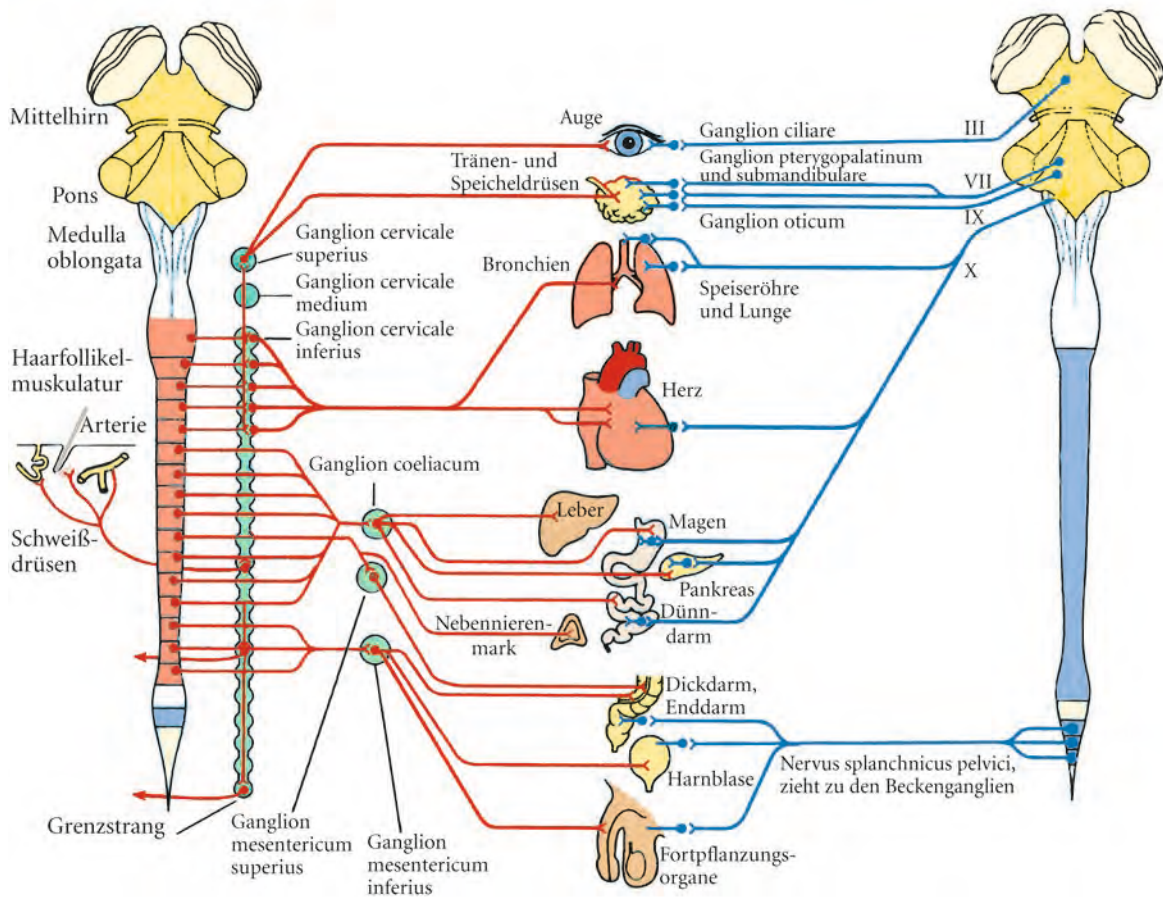


Abbildung 7.2 Innervationswege von Sympathikus und Parasympathikus. Nahezu alle inneren Organe werden beidseitig innerviert, d.h. sowohl vom sympathischen als auch vom parasympathischen Teil des vegetativen Nervensystems

Von besonderer Wichtigkeit ist, dass der Sympathikus sowohl neuronal über den Neurotransmitter Noradrenalin als auch zusätzlich humoral (auf endokrinen Wegen) über Adrenalin wirkt (s. Abschn. 7.3). Die unterschiedlichen Affinitäten der beiden Botenstoffe zu den verschiedenen Rezeptortypen in den einzelnen Organen führen dazu, dass der Sympathikus an jeweils verschiedenen Organen unterschiedliche Wirkungen hervorrufen kann.

Darmnervensystem

Das Darmnervensystem (enterisches Nervensystem, intramurales Nervensystem) besteht aus einer Ansammlung von sensorischen und motorischen Neuronen, die

größtenteils durch Interneuronen miteinander verbunden sind. Die Zellkörper der Neuronen sind in Ganglien gebündelt, von wo aus sich die neuronalen Aussprossungen zu einem überaus engmaschig verzweigten Netz fortsetzen. Die Zahl der Neuronen des Darmnervensystems liegt bei ca. 100 Millionen und entspricht damit derjenigen des Rückenmarks. Im Bereich des Verdauungstrakts dient dieses System in erster Linie dazu, die Muskulatur der Darmwände anzuregen, etwa zur Durchmischung und zum Transport des Speisebreis. In der Leber und der Bauchspeicheldrüse reguliert es u.a. die Absorptions- und Sekretionsprozesse. Das Darmnervensystem arbeitet weitgehend unabhängig vom übrigen Nervensystem. Wegen der Größe der

Neuronenzahl und dem Ausmaß der Vernetzung wird dieses System auch gern als »kleines Gehirn« oder »Gehirn des Darms« bezeichnet.

Trotz seiner weitgehend autonomen Funktionsweise besitzt es zahlreiche Zuflüsse von Sympathikus und Parasympathikus. Diese sorgen für Koordinierung mit den anderen vegetativen Organen. Dabei ist die Wirkung der sympathischen Verbindungen auf die Muskulatur in den Wänden der Hohlorgane hemmend und diejenige der parasympathischen Fasern erregend. Interessanterweise verlassen auch sehr viele sensorische Fasern – ca. die vierfache Zahl der effektorischen Fasern – das Darmnervensystem. Über den sensori-

schen Pfad werden z. B. der Füllungsstatus des Darms, extreme Dehnungen und Informationen über die chemische Zusammensetzung der Nahrung zurückgemeldet. Zahlreiche Transmitter und Neuropeptide sind an der fein abgestimmten Steuerung der Verdauungsprozesse durch das enterische Nervensystem beteiligt. Hierzu zählen Acetylcholin (zugleich der Haupttransmitter des Parasympathikus) sowie Serotonin und andere Monoamine. Viele Neuropeptide wurden zuerst im Darmnervensystem entdeckt, bevor ihre Bedeutung als Botenstoff im Gehirn bekannt wurde. Dazu gehören z. B. Substanz P, Somatostatin, VIP (vasoaktives intestinales Peptid) und GRP (Gastrin-Releasing-Peptid).

Exkurs

Darmbakterien und Gehirnfunktionen

Seit wenigen Jahren wird eine völlige neue Forschungslinie zum Zusammenspiel zwischen dem Magen-Darm-Trakt und dem Gehirn verfolgt. Man weiß heute, dass von der enormen Vielfalt von Bakterien im Darm (dem sog. Darm-Mikrobiom) eine Reihe von Stoffen produziert wird, die auf bestimmte Gehirnfunktionen einwirken können. Beispielsweise existieren Bakterien, die neuroaktive Substanzen wie GABA und Serotonin produzieren. Diese können ihre Wirkung auf das Gehirn entweder über Endigungen des Vagus-Nervs im Darmtrakt oder durch den Transport im Kreislaufsystem ausüben.

Dass auch komplexe Gehirnleistungen im Zusammenhang mit der Aktivität des Mikrobioms stehen, zeigte etwa eine Studie an Mäusen, bei denen die komplette Darm-Besiedelung mit Bakterien durch starke Antibiotika abgetötet war. Als Folge davon ging die Lernleistung der Tiere zurück und sie wiesen Verhaltensauffälligkeiten auf, z. B. im Zusammenhang mit der Furchtkonditionierung. Derzeit halten es manche Forscher für möglich, dass auch degenerative Erkrankungen beim Menschen wie die Alzheimer-Demenz und die Parkinson-Krankheit vom Darm-Mikrobiom beeinflusst werden.

Zusammenfassung

Das vegetative Nervensystem ist das Steuerungs- und Regulationsinstrument für die Funktionen der inneren Organe. Eine seiner Hauptaufgaben ist die Aufrechterhaltung der Homöostase. Es beinhaltet sympathische und parasympathische Anteile sowie das enterische (Darm-)Nervensystem.

Sympathikus und Parasympathikus lassen sich als funktionelle Antipoden betrachten. Der Sympathikus erfüllt eher ergotrope (Leistungs-)Funktionen, d. h., er tritt insbesondere bei Anspannung, körperlicher Aktivität und Stress in Aktion. Der Parasympathikus erfüllt dagegen trophotrope (regenerierende) Funktionen; er wird vorwiegend während körperlicher Ruhephasen aktiv.

7.2.1 Neuroanatomie und -chemie des sympathischen und parasympathischen Nervensystems

Allgemeine Anatomie von Sympathikus und Parasympathikus

Vegetative Steuerung auf der zerebralen Ebene. Nachdem noch in den 1970er-Jahren die gängige Meinung war, der Hypothalamus bilde die Spitze der Steuerungshierarchie für vegetative Reaktionen quasi in Alleinherrschaft, weiß man heute, dass ein ganzes Netzwerk von Gehirnstrukturen – das sog. »Central Autonomic Network« – mit der vegetativen Regulation befasst ist. Nach wie vor kommt allerdings auch aus heutiger Sicht dem Hypothalamus und insbesondere dessen Nucleus paraventricularis eine ganz entscheidende integrierende Rolle bei der vegetativen Regulation zu. Dies wird daran deutlich, dass

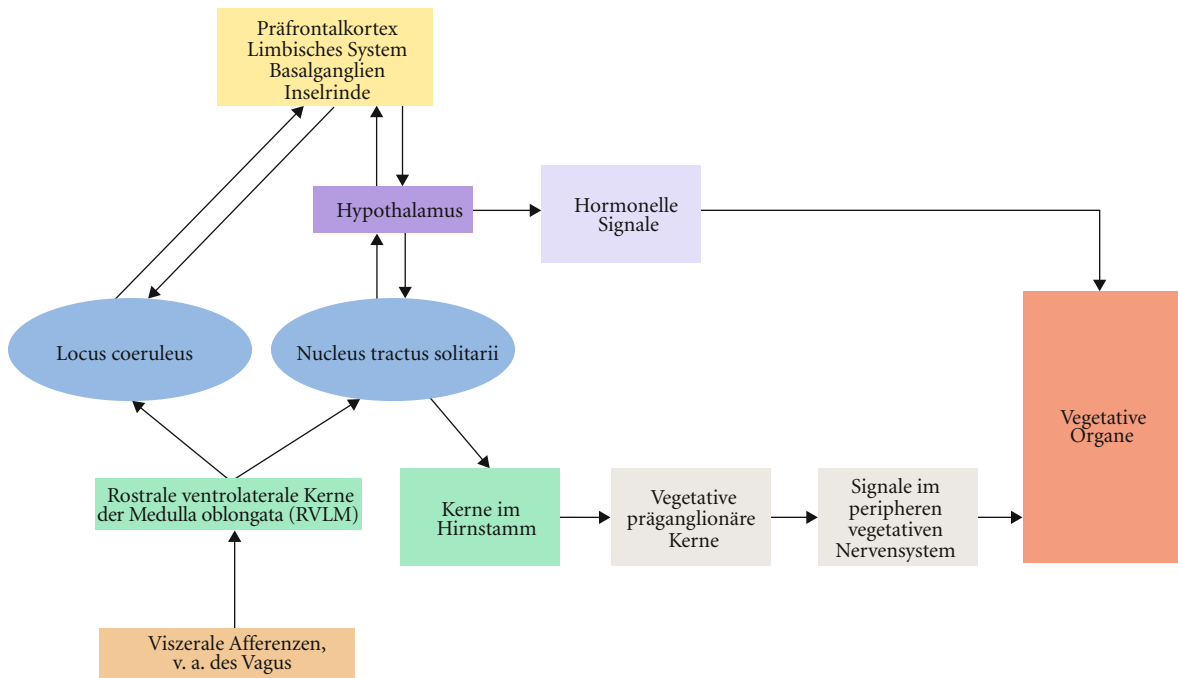


Abbildung 7.3 Central Autonomic Network. Es sind nur die wichtigsten Strukturen und deren Verschaltungen, die an der vegetativen Steuerung beteiligt sind, wiedergegeben

eine akute Schädigung des Hypothalamus etwa durch Verletzung oder Minderdurchblutung meist unmittelbar zum Tode führt, da die Regulation des inneren Milieus in dieser Akutsituation völlig entgleist. Das Central Autonomic Network (s. Abb. 7.3) mit seinen zahlreichen Feedbackschleifen beinhaltet Strukturen des Kleinhirns, des limbischen Systems – hier ist die Amygdala von besonderer Bedeutung –, des Septums, Teile der Basalganglien, des orbitofrontalen Kortex, der Inselrinde, Bereiche des somatosensorischen Kortex, Strukturen der Formatio reticularis und den Nucleus tractus solitarii.

Die wichtigste Eingangsstation für afferente vegetative Signale ist der rostrale ventrolaterale Teil der Medulla oblongata (RVLM). Von hier aus ziehen Fasern zum Nucleus tractus solitarii, der sich ebenfalls in der Medulla oblongata befindet. Der Nucleus tractus solitarii untergliedert sich weiter in verschiedene Subkerne, die unterschiedliche Aufgaben bei der vegetativen Regulation erfüllen. Vom Nucleus tractus solitarii wird die Information dann an verschiedene höhere Zentren, v.a. den Hypothalamus, weitergegeben, um dort bedarfsabhängig komplexere und integrierte Steuerbefehle für das Vegetativum zu generieren. Diese laufen dann teilweise zurück zum Nucleus tractus solitarii, um schließ-

lich von hier aus auf die präganglionären Neuronen (s.u.) weitergegeben zu werden.

Ein weiteres Output-System zur vegetativen Regulation ist, wie wir schon wissen (s. Abschn. 6.4.8), das hormonelle System, das vom Hypothalamus-Hypophysen-System gesteuert wird. Von besonderer Bedeutung für die Interaktion zwischen vegetativen Prozessen und höheren Gehirnfunktionen dürfte der Weg vom RVLM über den Locus coeruleus zur Hirnrinde sein. Der Locus coeruleus ist ein Kerngebiet, das noradrenerge (also aktivierende) Fasern zu sehr vielen Bereichen der Hirnrinde sendet. Demgemäß hat eine Anregung bzw. Hemmung des Locus coeruleus durch vegetative Afferenzen einen weit gestreuten Einfluss auf den Aktivierungszustand der Hirnrinde.

Vom ZNS zum vegetativen Endorgan. In Abbildung 7.4 ist in vereinfachter Weise der grundlegende Unterschied zwischen der neuronalen Endstrecke zum Muskel des Bewegungsapparats im somatischen Nervensystem (s. Abschn. 9.1.1) und das Analoge im sympathischen bzw. parasympathischen Nervensystem dargestellt. Während beim somatomotorischen Neuron der Zellkörper in der grauen Substanz des Rückenmarks bzw. im Hirnstamm (bei den Hirnnerven)

liegt und direkt Fortsätze bis zum Erfolgsorgan (dem Muskel) sendet, wird im vegetativen Nervensystem in der Peripherie, also außerhalb des ZNS, noch einmal synaptisch umgeschaltet. Die Zellkörper der hierbei beteiligten Neuronen sitzen in **Ganglien**. Diese Informationsweitergabe geschieht demgemäß von einem sog. **präganglionären** auf ein sog. **postganglionäres** Neuron in der Peripherie (s. Abb. 7.4). Das präganglionäre Neuron hat seinen Zellkörper im Rückenmark bzw. im Hirnstamm (s. auch Abb. 7.2). Der Übertragungsweg für motorische Signale aus dem ZNS an die viszerale Organe besteht also prinzipiell aus zwei Neuronen, gegenüber nur einem Neuron im somatomotorischen System.

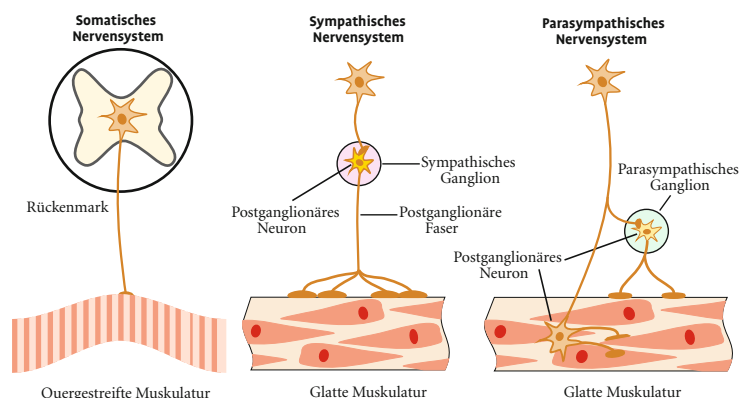


Abbildung 7.4 Neuronaler Übertragungsweg zwischen ZNS und Endorgan im somatischen, sympathischen und parasympathischen Nervensystem. Im somatomotorischen System versorgt ein motorisches Neuron im Rückenmark (bzw. im Hirnstamm für die motorische Versorgung des Kopf- und Halsraums) direkt die quergestreifte Muskulatur. Im vegetativen Nervensystem sind zwei Neuronen hintereinandergeschaltet

Exkurs

Vegetative Symptome bei neurologischen Erkrankungen

Die enge Verzahnung zwischen vegetativen Funktionen und den unterschiedlichen Gehirngebieten manifestiert sich in zahlreichen neurologischen Erkrankungen.

Beim sog. Shy-Drager-Syndrom (auch: Neurogene orthostatische Hypotonie mit Multisystematrophie) liegt ein Neuronenverlust bzw. eine neuronale Funktionseinschränkung meist im Bereich der Basalganglien vor. Parallel dazu – möglicherweise auch als Folgeprozess – stellt sich eine Degeneration präganglionärer vegetativer Neuronen im Rückenmark ein. Die Erkrankung tritt meist erst ab dem sechsten Lebensjahrzehnt auf, wobei Männer deutlich häufiger betroffen sind. Im Vordergrund stehen Funktionseinbußen im vegetativen Bereich, hier v.a. im Urogenitaltrakt. Daneben zeigt sich häufig eine Dysfunktion im kardiovaskulären System, wozu etwa die defizitäre Blutdruckregulation bei Lagewechsel (**orthostatische Hypotonie**) gehört. Die Patienten leiden vielfach an Gangstörungen, verminderter Schweißsekretion und Ohnmachtsanfällen. Die durchschnittliche Lebenserwartung nach Erstmanifestation der Krankheit beträgt etwa 8¼ Jahre; selten überleben Patienten einen Zeitraum von 20 Jahren. Todesursachen sind meist Komplikationen im Bereich der Atemwege und des

Herz-Kreislauf-Systems. Die Ätiologie der Erkrankung liegt bis heute im Dunkeln. Eine befriedigende Therapiemöglichkeit besteht nicht.

Auch bei der Parkinson-Krankheit, die ebenfalls die Basalganglien betrifft, tritt – auch schon im Frühstadium – eine Fülle vegetativer Symptome auf. Im Anfangsstadium leiden die Patienten häufig unter Mundtrockenheit, später wird ein vermehrter Speichelfluss (Hypersalivation) als besonders störendes Symptom beklagt. Die Talgsekretion ist deutlich erhöht und führt häufig zum sog. Salbengesicht. Eine Verminderung der Schweißsekretion (Hypohidrose) liegt bei der Mehrzahl der Parkinson-Patienten schon im Anfangsstadium vor. Bei manchen Patienten kommt es beim Übergang vom Liegen oder Sitzen zum Stehen zu einem deutlichen Blutdruckabfall (orthostatische Hypotonie). Damit gehen Schwindelgefühl und Kollapsneigung beim Aufstehen einher. Störungen der Harnblasenentleerung gehören zu den häufigsten Symptomen des Parkinson-Syndroms. Bereits bei kleinen Blasenfüllmengen kann es zu Harnrang und -abgang kommen. Die Entleerung des Darms geschieht beim Parkinson-Patienten meist verzögert, sodass viele Patienten über Völlegefühl und Darmentleerungsstörungen klagen. V.a. Männer

unter 50 Jahren berichten häufig einen Libidoverlust, begleitet von Potenz- und Ejakulationsstörungen, was vielfach zu erheblichen psychischen Belastungen führt.

Auch als Folge eines Schlaganfalls treten nicht selten vegetative Störungen auf. Je nach Ort der Schädigung im Gehirn können Inkontinenzprobleme,

Fieber und Tachykardien (= extrem beschleunigter Herzschlag) bis hin zum plötzlichen Herztod auftreten. Oft kommt es – abgesehen von Tachykardien – zu anderen gravierenden Herzrhythmusstörungen, die häufig die Implantation eines Herzschrittmachers erforderlich machen.

Spezielle Anatomie des Sympathikus

Der periphere Anteil des Sympathikus nimmt seinen Ursprung in Zellkörpern, die im Seitenhorn des Rückenmarks im Bereich des Brust- und Lendenmarks liegen (Thorakal- und Lumbalsegmente C8 bis L2, vgl. Abb.6.3). Aus diesem Grund nennt man das sympathische System gelegentlich auch thorakolumbales System. Die Axone dieser Neuronen verlassen über die Vorderwurzel das Rückenmark und treten aus der Wirbelsäule aus.

Grenzstrang. Links und rechts der Wirbelsäule (paravertebral), beginnend im Bereich der Halswirbel und endend auf der Höhe der Lendenwirbel, bilden die sympathischen Ganglien je einen sog. **Grenzstrang** (Truncus sympathicus). Es handelt sich dabei um ein senkrecht verlaufendes nervales System, das in ziemlich regelmäßigen Abständen Verdickungen, die Grenzstrangganglien (paravertebrale Ganglien), aufweist (s.Abb.7.2). Alle sympathischen Verbindungen zu den Effektororganen durchlaufen den Grenzstrang, nachdem das Axon des sympathischen Rückenmarksneurons aus der Wirbelsäule ausgetreten ist. Ein Teil dieser Verbindungen erfährt in den Ganglien des Grenzstrangs eine Umschaltung vom ersten sympathischen Neuron auf das zweite, ein Teil zieht unverschaltet weiter. Im ersten Fall erstreckt sich das Axon des zweiten Neurons dann bis zum Endorgan hin, wie es etwa für das Herz der Fall ist. Im zweiten Fall erreicht die Faser des ersten Neurons ein sympathisches Ganglion außerhalb des Grenzstrangs, ein sog. prävertebrales Ganglion. Auch wenn – wie im letzteren Fall – eine Sympathikusfaser den Grenzstrang nur passiert, so nimmt sie doch häufig über Verzweigungen innerhalb eines Grenzstrangganglions synaptische Kontakte mit anderen sympathischen Neuronen auf. In den prävertebralen Ganglien findet für die im Grenzstrang unverschaltet gebliebenen Fasern die Umschaltung auf das zweite Neuron statt. Dieses übernimmt dann seinerseits die Versorgung des vegetativen Endorgans.

Die Organisation des sympathischen Nervensystems hat zur Folge, dass auch die sympathische Innervation der vegetativen Organe im Kopf- und Halsbereich – z. B. des Auges oder der Speicheldrüsen – den Umweg über das thorakale Rückenmark, den Grenzstrang und meist über ein prävertebrales Ganglion nimmt. Aus diesem Grund können Verletzungen oder krankhafte Prozesse (Tumoren) in der Hals- und oberen Brustregion auch zu Fehlfunktionen etwa des Auges führen.

Spezielle Anatomie des Parasympathikus

Auch im parasympathischen System bilden zwei Neuronen die Übertragungskette für effektorische vegetative Signale aus dem ZNS. Allerdings unterscheidet sich die anatomische Organisation dieser Leitungsbahnen deutlich von der des sympathischen Systems (s.Abb.7.2). Das präganglionäre Neuron des Parasympathikus liegt entweder im Hirnstamm oder in den Sakralsegmenten des Rückenmarks (Steißmark). Aus den im Hirnstamm lokalisierten Zellkörpern kann der Informationstransport längs der Fasern von vier verschiedenen Hirnnerven stattfinden (s.Abschn.6.4.7). Dies sind der Nervus oculomotorius (III. Hirnnerv), der Nervus facialis (VII. Hirnnerv), der Nervus glossopharyngeus (IX. Hirnnerv) und der Nervus vagus (X. Hirnnerv). Die parasympathischen Neuronen des Kopfbereichs ziehen beispielsweise zu den Augenmuskeln, den Drüsen der Gaumen- und Nasenschleimhaut und den Tränendrüsen.

Der Vagus-Nerv. Der Vagus-Nerv steigt, paarig mit einem linken und einem rechten Zweig, von der Schädelhöhle aus in den Thorax ab. Auf der Höhe der Bronchien geht die paarige Ausgestaltung des Vagus verloren, und er zieht als ein vielfach und weitverzweigtes nervales Gebilde (sog. Plexus) abwärts. Von hier aus wird der Hals-, Brust- und obere Bauchbereich bis hin zum Anfang des Dickdarms innerviert. Die Vagusfasern laufen dann zu parasympathischen Ganglien, die entweder unmittelbar vor dem Erfolgsorgan liegen oder

erst in seiner Wand. Hier findet eine Umschaltung auf das postganglionäre Neuron statt. Die parasympathische Innervation der meisten inneren Organe geschieht also durch den Vagus. Für diesen Bereich bedeutet demnach »parasympathisch innerviert« dasselbe wie »vagal innerviert«.

Die wichtigsten Effekte gesteigerter Vagusaktivität sind: Verlangsamung des Herzschlags, Verengung der Bronchien und Steigerung der Sekretbildung in den Bronchien, Zunahme der Magen-Darm-Motilität, Kontraktion der Harnblasenmuskulatur, Zunahme der sekretorischen Aktivität der Verdauungsdrüsen und Steigerung der Durchblutung im Genitalbereich (s. auch Tab. 7.1).

Parasympathische Versorgung des Beckenbereichs. Die präganglionären parasympathischen Fasern, die das Rückenmark im Sakralbereich verlassen (Segmente S2 bis S4, s. Abb. 6.3), werden in den Ganglien des Beckenraums (Plexus hypogastricus bzw. Plexus pelvici) auf postganglionäre Neuronen umgeschaltet. Sie dienen der Versorgung der Beckenorgane, also z.B. der Harnblase und der Genitalorgane sowie der unteren Anteile des Dickdarms und Enddarms.

Hinsichtlich der prinzipiellen Organisation der postganglionären Verbindung gibt es – wie wir gesehen haben – einen deutlichen Unterschied zwischen Sympathikus und Parasympathikus: Im sympathischen System liegen die Zellkörper der postganglionären Neuronen in Ganglien nahe dem Rückenmark (Grenzstrang bzw. prävertebrale Ganglien), im parasympathischen System dagegen sind die Ganglien nahe dem Erfolgsorgan oder im Erfolgsorgan selbst lokalisiert. Die postganglionären Fasern im parasympathischen System sind deshalb i. Allg. sehr kurz.

7.2.2 Besonderheiten der synaptischen Endigungen im vegetativen Nervensystem

Die postganglionären Fasern im vegetativen Nervensystem sind unmyelinisiert. In der Nähe der Effektorzellen sind sie stark verzweigt und entlang der Kolateralen zeigen sich kleine Verdickungen, die sog. **Varikositäten** (s. Abb. 7.5). Diese entsprechen der präsynaptischen Endigung. In den Varikositäten befindet sich der Übertragungstoff. Man hat hier jedoch nicht den typischen synaptischen Endknopf als Abschluss eines Axons, wie er etwa für das Zentralnervensystem

typisch ist, sondern es liegt eine Aneinanderreihung solcher Varikositäten vor. Die Varikositäten haben einen Durchmesser von ungefähr einem Tausendstel Millimeter und folgen in einem Abstand von einigen Tausendstel Millimetern aufeinander. Demnach finden sich über die Länge von einem Millimeter Axon einige Hundert Varikositäten.

Der Abstand zwischen den Varikositäten und den Muskelfaserzellen ist vergleichsweise groß, sodass der Neurotransmitter über relativ weite Strecken diffundieren muss, bevor er die Zielzelle erreicht. Dies hat zur Konsequenz, dass durch die Ausschüttung des Transmitters aus einer einzelnen Varikosität durchaus mehrere Zellen erregt werden können. Natürlich ist auch die Zeitverzögerung bei der hier vorliegenden größeren Distanz zwischen präsynaptischer und postsynaptischer Zelle beträchtlich. Diese Sachverhalte machen deutlich, dass die neuronale Ausgestaltung des vegetativen Nervensystems gegenüber dem ZNS generell besser für langsamer ablaufende, aber dafür großflächiger greifende Effekte z.B. in der glatten Muskulatur der Darmwand geeignet ist.

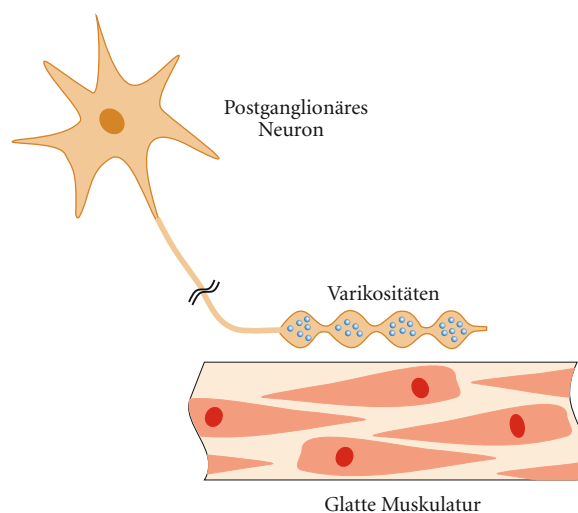


Abbildung 7.5 Varikositäten. Bei den Varikositäten handelt es sich um Aufreibungen des Axons eines postganglionären Neurons in der Nähe der Muskelfaserzellen eines inneren Organs. Varikositäten entsprechen den präsynaptischen Endigungen im ZNS

7.3 Transmitter im vegetativen Nervensystem

Schon sehr früh bei der Erforschung des vegetativen Nervensystems – d.h. in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts – erkannte man, dass hier im Wesentlichen zwei Überträgerstoffe, Acetylcholin und Noradrenalin, wirksam sind. Aufgrund der Erkenntnis, dass die neurochemische Vermittlung der Impulsleitung durch zwei Transmitter geschieht, gelangte man dann sehr bald zu der Annahme, dass innerhalb des vegetativen Nervensystems zwei Subsysteme vorliegen müssten.

Acetylcholin und Noradrenalin. In Abbildung 7.6 ist dargestellt, wo die beiden Neurotransmitter Acetylcholin und Noradrenalin im vegetativen System als synaptische Überträgerstoffe wirken. Sowohl im sympathi-

schen als auch im parasympathischen System erfolgt die Übertragung vom präganglionären auf das postganglionäre Neuron durch Acetylcholin.

Der Acetylcholin-Rezeptor auf dem postganglionären Neuron ist vom nikotinergen Typ (s. Abschn. 5.2.1). Das bedeutet, dass sich sowohl sympathische als auch parasympathische Erregung durch die Zufuhr von Nikotin an dieser Stelle stimulieren lässt.

Die Übertragung vom postganglionären Neuron auf das Endorgan geschieht im sympathischen System im Regelfall durch Noradrenalin. Eine Ausnahme bilden hierbei die Schweißdrüsen. Sie sind zwar ausschließlich sympathisch innerviert, jedoch ist hier der Überträgerstoff das Acetylcholin.

Im parasympathischen System ist der Überträgerstoff vom postganglionären Neuron auf das Effektor-

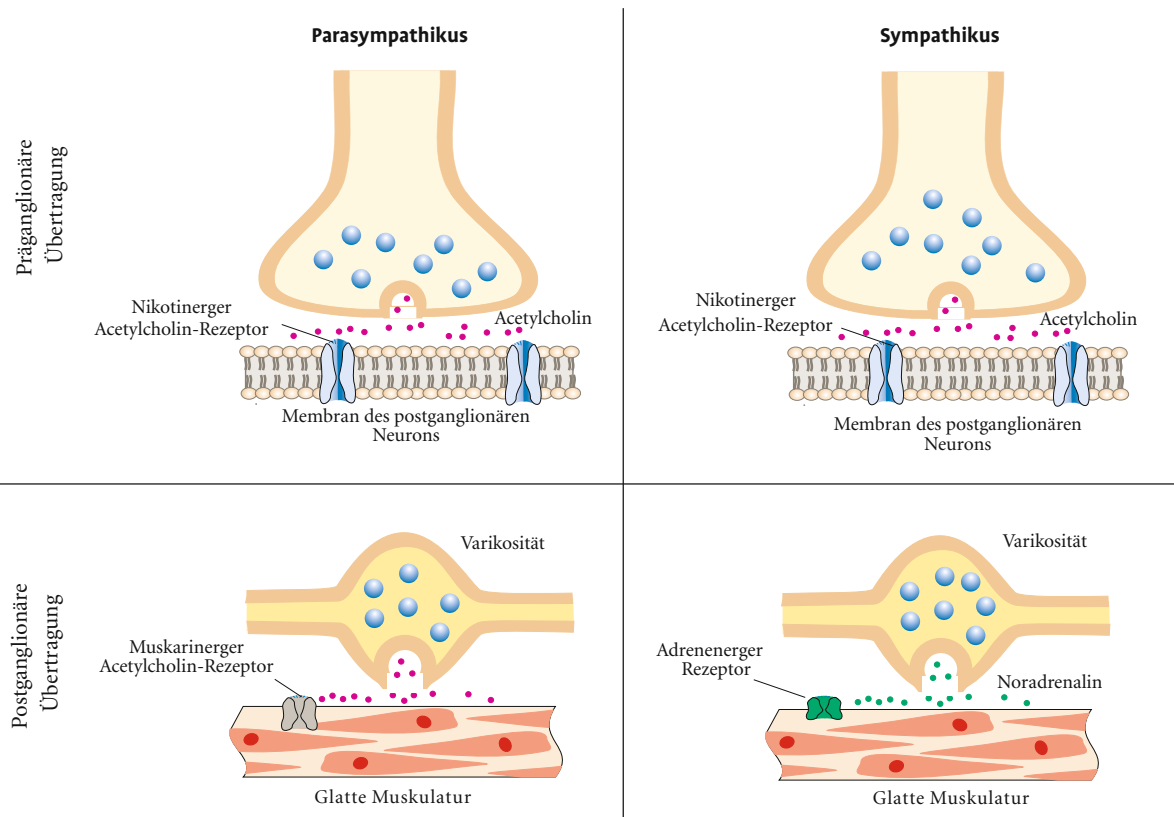


Abbildung 7.6 Neurochemie der Übertragung im vegetativen Nervensystem. Im Parasympathikus (links) und Sympathikus (rechts) erfolgt die präganglionäre Übertragung durch Acetylcholin. Acetylcholin bindet hier an nikotinerge Rezeptoren. Im Parasympathikus ist der Transmitter, der die Übertragung vom postganglionären Axon auf das Effektororgan besorgt, ebenfalls Acetylcholin. Hier wird die Wirkung von Acetylcholin über muskarinerge Rezeptoren vermittelt. Im Sympathikus ist der wichtigste Neurotransmitter in den postganglionären Axonen das Noradrenalin

organ immer das Acetylcholin. Der cholinerge Rezeptor am Erfolgsorgan ist ein muskarinerge Rezeptor. Das besagt, dass sich dieser Rezeptor auch durch Muskarin (ein Gift, das in vielen Pilzarten vorkommt) aktivieren lässt. Da es unterschiedliche muskarinerge Subtypen mit ebenfalls teilweise gegensätzlicher Wirkung gibt, gilt auch hier, dass die jeweilige Rezeptorausstattung des Organs über die cholinerge Wirkung entscheidet. Neben Acetylcholin und Noradrenalin, den klassischen Übertragungstoffen im autonomen Nervensystem, sind in den meisten Neuronen des vegetativen Nervensystems auch Neuropeptide enthalten, die als Kotransmitter freigesetzt werden (s.u.).

Die Ausschüttung der beiden unterschiedlichen Neurotransmitter bei sympathischer bzw. parasympathischer Aktivität führt schließlich zu den unterschiedlichen Reaktionen des Endorgans.

Adrenalin und Noradrenalin als Hormone. Im zirkulierenden Blutstrom kommt Acetylcholin in freier Form kaum vor, da es an den cholinergen Endigungen nach der Ausschüttung in den synaptischen Spalt sehr schnell wieder abgebaut wird. Dagegen können Katecholamine wie das Noradrenalin durchaus in wirksamer Konzentration im Blut vorliegen. Die Ursache dafür ist, dass auch vom **Nebennierenmark** Katecholamine ausgeschüttet werden. Das Nebennierenmark ist seinerseits sympathisch innerviert (s.Abb.7.2). Adrenalin wird gemeinsam mit Noradrenalin ausgeschüttet, und zwar etwa im Verhältnis 80% Adrenalin zu 20% Noradrenalin; auch das dritte Katecholamin, Dopamin, wird hier gebildet und ausgeschüttet, allerdings in sehr viel niedrigerer Konzentration. Adrenalin bindet ebenso wie das Norad-

renalin an die sog. Adrenozeptoren (vgl.Abschn.5.2.2), von denen verschiedene Subtypen existieren. Zirkulierendes Noradrenalin bzw. Adrenalin verlängert und verstärkt die Reaktionen der sympathisch innervierten Organe. Außerdem erhöht es die Aktivität von vielen Zelltypen, die selbst keine direkten sympathischen Zuflüsse haben. Auch kann die Kontraktionskraft der quergestreiften Muskulatur durch zirkulierendes Adrenalin gesteigert werden. Es ist hierbei jedoch zu beachten, dass Adrenalin und Noradrenalin mit unterschiedlicher Stärke an die verschiedenen Adrenozeptorsubtypen binden und dass über die einzelnen Subtypen u.U. verschiedene Effekte vermittelt werden. So kann eine eher adrenerge Stimulation eines Organs durch das Nebennierenmark andere Effekte hervorrufen als eine noradrenerge über direkte sympathische postganglionäre Fasern, obwohl beide letztendlich sympathischen Ursprungs sind.

Ein Beispiel für die unterschiedlichen Effekte von α - und β -Rezeptoren (s.Abschn.5.2.2) findet sich etwa bei den Blutgefäßen. In den Wänden der großen Arterien, die zur Versorgung der Muskulatur des Bewegungsapparates dienen, trifft man sowohl α - als auch β -Rezeptoren. Die Aktivierung der β -Rezeptoren durch Noradrenalin hat eine gefäßerweiternde Wirkung durch Hemmung der Kontraktion. α -Rezeptoren dagegen entfalten hier eine erregende, also kontrahierende Wirkung. Ob also in einem bestimmten Organ Sympathikusaktivierung zu einer Kontraktion oder Erschlaffung der glatten Muskulatur führt, hängt sowohl von dem Zahlenverhältnis α - zu β -Rezeptoren in dem innervierten Gewebesektor ab als auch von den Konzentrationsverhältnissen zwischen Adrenalin und Noradrenalin.

Exkurs

Sympathomimetika und Sympatholytika, Parasympathomimetika und Parasympatholytika

Eine ganze Reihe von Pharmaka greifen an den Rezeptoren des vegetativen Systems an. Dazu gehören etwa Arzneimittel zur Therapie von Bluthochdruck, niedrigem Blutdruck, Asthma bronchiale, koronarer Herzkrankheit, Migräne, Koliken, Herzrhythmusstörungen und vielen anderen Erkrankungen unterschiedlicher Organe. Die Pharmakologie hat zahlreiche Substanzen gefunden, die an den Rezeptoren des vegetativen Nervensystems agonistische (dem ursprünglichen Botenstoff entsprechende) oder antagonistische (dem ursprünglichen Botenstoff entgegengesetzte) Wirkungen erzielen. So gibt es an adrenergen Rezeptoren wirkende Agonisten, die die

Sympathikuswirkung imitieren (**Sympathomimetika** oder synonym Sympathikomimetika) oder blockieren (**Sympatholytika** oder synonym Sympathikolytika). An muskarinergen Acetylcholinrezeptoren wirkende Pharmaka können hier ebenfalls entweder aktivierend (**parasympathomimetisch**) oder blockierend (parasympatholytisch) wirken.

Man kennt heute viele Pharmaka, die sehr selektiv nur an einen Rezeptorsubtyp binden. So werden z.B. bei Asthma heute selektive β_2 -Sympathomimetika als Sprays eingesetzt, die zwar die Bronchien erweitern (hier hohe β_2 -Rezeptordichte), aber kaum aktivierende Wirkung auf die Herzaktivität zeigen (hier

vorwiegend β_1 -Rezeptoren). β_1 -Rezeptorenblocker (Sympatholytika) können dagegen z.B. bei Bluthochdruckpatienten die erregende Wirkung des Sympathikus auf das Herz verringern ohne nennenswerte Nebenwirkungen auf die Atemfunktion. Ein sehr bekanntes Parasympatholytikum ist das Atropin. Es blockiert die Parasympathikuswirkung an den postganglionären Synapsen der vegetativen Organe. Die

Wirkung zeigt sich dann in einer stärkeren Ausprägung der Sympathikuseffekte an den von beiden (Sympathikus und Parasympathikus) innervierten Organen, so z.B. in einer Zunahme der Herzaktivität (in der Notfallmedizin relevant) oder in einer Erweiterung der Pupille (für die augenärztliche Untersuchung).

Weitere Neurotransmitter. Seit Ende der 1970er-Jahre weiß man, dass neben den beiden »klassischen Neurotransmittern« im vegetativen Nervensystem, dem Acetylcholin und dem Noradrenalin, eine Reihe von **Kotransmittern** die postsynaptischen Reaktionen beeinflussen können. Als solche wirken etwa das Stickstoffmonoxid (NO), Adenosintriphosphat (ATP) und die Neuropeptide Somatostatin, Neuropeptid Y, vasoaktives intestinales Peptid (VIP) und Enkephalin. Die Neuropeptide können gleichzeitig mit dem Acetylcholin bzw. Noradrenalin aus der präsynaptischen Endigung aus-

geschüttet werden oder auch zeitversetzt. Dies geschieht i. Allg. bei höherfrequenten Impulsfolgen. Ihre Wirkung ist typischerweise deutlich länger als die der klassischen Neurotransmitter; sie liegt zumeist im Bereich von Minuten. Eine Sonderstellung nimmt das Stickstoffmonoxid ein. Es hat neben seiner **neuromodulierenden** Funktion auch die Wirkung eines Neurotransmitters im strengen Sinne. So ist bekannt, dass beim Menschen die Gefäßrelaxation im Bereich des Urogenitaltrakts teilweise über Stickstoffmonoxid als Neurotransmitter vermittelt wird.

Zusammenfassung

Bei der neuronalen Transmission im Sympathikus und Parasympathikus unterscheidet man einen präganglionären Anteil (Zellkörper des Neurons im Rückenmark oder Hirnstamm) und einen postganglionären Anteil (Zellkörper des Neurons in einem peripheren Ganglion). Die Zellkörper der präganglionären Neuronen des Sympathikus sind vorwiegend im thorakolumbalen Seitenhorn des Rückenmarks anzutreffen. Die Zellkörper der postganglionären Neuronen befinden sich entweder in den Ganglien im Grenzstrang neben der Wirbelsäule oder in prävertebralen Ganglien außerhalb des Grenzstrangs.

Der präganglionäre Neurotransmitter im Sympathikus ist Acetylcholin, der postganglionäre Noradrenalin. Die Membran des postganglionären Neurons besitzt nikotinerge Rezeptoren, während die Erfolgsorgane unterschiedliche Kombinationen α - und β -adrenerge Rezeptoren aufweisen. Die jeweilige Rezeptorausstattung bestimmt die (teilweise entgegengesetzte) Wirkung.

Die präganglionären Neuronen des Parasympathikus befinden sich zu einem Teil im Hirnstamm (**kranialer Anteil**), von wo sie sich über vier Hirnnerven (Nervus oculomotorius (III), Nervus facialis (VII), Nervus glossopharyngeus (IX) und Nervus vagus (X)) zu den parasympathischen Ganglien der Brust- und Bauchorgane erstrecken. Der andere Teil entspringt dem Sakralmark und innerviert die Ganglien im Bereich der Urogenitalorgane und des unteren Bauchraums. Alle parasympathischen Neuronen (prä- und postganglionär) verwenden Acetylcholin als Transmittersubstanz. Die Ganglienneuronen besitzen auch hier nikotinerge Rezeptoren, während das Erfolgsorgan mit unterschiedlichen muskarinergen Rezeptortypen ausgestattet ist. Die Ganglien des Parasympathikus befinden sich im Gegensatz zu den paravertebralen Ganglien des Sympathikus in nächster Nähe des Erfolgsorgans oder in dessen Wänden.

7.4 Vegetatives Nervensystem und Immunsystem

Es herrscht eine enge Verzahnung zwischen dem vegetativen Nervensystem und dem Immunsystem, die man in ihrer Vielgestaltigkeit erst seit einigen Jahren zu erkennen beginnt. Eine der Grundlagen für dieses Ineinandergreifen ist die Tatsache, dass die meisten Organe, die Zellen des Immunsystems beherbergen – z.B. die Milz und die Lymphknoten –, auch vom sympathischen Nervensystem mit Nervenfasern versorgt werden.

Durchtrennt man bei Ratten die nervale Verbindung zur Milz, so ist damit die Noradrenalinversorgung der Milz vollständig unterbrochen. Setzt man diese Tiere dann einem unkontrollierbaren Stressor aus, z.B. einer elektrischen Reizung am Fuß, zeigt sich im Gegensatz zu gesunden Kontrolltieren keine stressinduzierte Verminderung der T-Zellen. Offenbar ist im intakten Organismus das sympathische Nervensystem ein wichtiger Vermittler für die diesbezügliche Immunreaktion auf Stress.

Transmittersubstanzen und Neuropeptide, die in Zellen des vegetativen Nervensystems gebildet werden, können über spezifische Rezeptoren auf den Zellmembranen von immunkompetenten Zellen Funktionen des Immunsystems beeinflussen. Dies wurde z.B. für die B- und T-Zellen (s. Abschn. 17.2) des Immunsystems nachgewiesen, an deren Oberfläche β_2 -Adrenozeptoren identifiziert werden konnten.

Die genauere Kenntnis der Zusammenhänge zwischen vegetativem Nervensystem und Immunsystem trägt seit einigen Jahren ganz fundamental zum Verständnis der stressbedingten Krankheiten bei. Sie lässt v.a. auch zunehmend plausibel erscheinen, dass Abbau von Stressoren bzw. ein in Balance befindliches psychophysisches System durchaus einen protektiven Charakter hinsichtlich bestimmter Krankheiten wie Allergien, Infektionen etc. haben können.

7.5 Viszerale Afferenzen

Bis vor wenigen Jahrzehnten wurde das vegetative Nervensystem meist als ein rein effektorisches System aufgefasst. Dies ging auf die irrige Annahme zurück, dass die neuroanatomische Basis für viszeroafferente Signaltransport fehlerhaft bzw. kaum ausgebildet sei. Heute weiß man dagegen, dass eine sehr reichhaltige sensible

Neurotransmission von den inneren Organen zum ZNS existiert und fast alle vegetativen Nerven sowohl efferente als auch afferente Fasern beherbergen. Man geht heute davon aus, dass es im vegetativen Nervensystem etwa dreimal so viele afferente wie efferente Fasern gibt.

Vertiefung

Eine Unterscheidung des sensiblen vegetativen Systems in ein parasympathisches sensibles und sympathisches sensibles System auf der Basis der Neuroanatomie erscheint verschiedenen Autoren als nicht sinnvoll. Einer der Gründe wird darin gesehen, dass die afferenten Fasern teilweise räumlich weit getrennt von den efferenten Fasern verlaufen, also außerhalb der sympathischen und parasympathischen Nerven. Man spricht daher oft in einem allgemeineren Sinne von »viszerale Afferenzen«, ohne den Bezug zu Sympathikus bzw. Parasympathikus.

Die Sensorzellen des vegetativen Systems befinden sich meist in den Wänden der inneren Organe und der Blutgefäße. Sie registrieren z.B. den Füllungs- und Dehnungszustand von Hohlorganen oder die Zusammensetzung des Blutes. Die afferenten Signale erreichen das Gehirn entweder über Rückenmarksverbindungen oder über die sensorischen Fasern der Hirnnerven, insbesondere des Nervus vagus. Im Gehirn selbst finden sich Projektionsgebiete für afferente Information u.a. auf der Höhe der Medulla oblongata, insbesondere im Bereich des Nucleus tractus solitarii. Von hier aus bestehen Verbindungen zu den Vagus-Kerngebieten, die etwa den Schluckakt und die Funktionen der Magen-Darm-Organen beeinflussen. Zu den höher liegenden viszeroafferenten Projektionsgebieten zählen der Hypothalamus, der Thalamus und auf der Ebene des Kortex v.a. die Inselrinde und der somatosensorische Kortex (s. Abb. 7.3).

Viszerale Schmerzen. Auf Rückenmarksebene liegen zahlreiche Verschaltungen viszeraler Afferenzen mit somatosensorischen vor, d.h., es existieren Rückenmarksneuronen, auf die beide konvergieren. Dies kann zur Folge haben, dass in höher gelegenen Zentren ein viszerale Signal fälschlicherweise in der Körperoberfläche lokalisiert wird. Von besonderer Bedeutung ist dies bei viszerale Schmerzen. Hier kann der Fall eintreten, dass ein Eingeweideschmerz als von der Kör-

peroberfläche kommend wahrgenommen wird. Diese Übertragung von viszerale Schmerzen auf Hautareale geschieht bevorzugt auf jene Areale, die von demjenigen Rückenmarkssegment innerviert werden, an dem auch die viszeroafferente Schmerzinformation ankommt. Die den jeweiligen Organen zugeordneten Areale der Körperoberfläche nennt man **Head-Zonen** (Näheres dazu s. Abschn. 16.3.3).

Man kennt aus der medizinischen Praxis zahlreiche Belege für das reflektorische Zusammenspiel zwischen vegetativer und somatischer Information auf Rückenmarksebene. So ist es z.B. ein wohlbekanntes Phänomen, dass etwa bei entzündlichen Prozessen im Magen-Darm-Bereich die quergestreifte Muskulatur der Bauchdecke über eine Verschaltung des viszerale Inputs mit somatomotorischem Output ihren Anspannungsgrad erhöht. Außerdem kann es in diesem Fall dazu kommen, dass jenes Dermatom, das durch dasselbe Rückenmarksegment innerviert wird wie das entzündete innere Organ, eine Hautrötung zeigt. Dies ist eine Konsequenz der Gefäßerweiterung in diesem Bereich.

Man geht auch davon aus, dass die Linderung von Schmerzen im vegetativen Bereich durch bestimmte Hautreize, etwa Nadelstiche bei der Akupunktur oder Wärme und Druck, darauf zurückgeht, dass die somatosensorischen Afferenzen von der Haut in dem entsprechenden Rückenmarksegment mit den efferenten Fasern verschaltet sind, die dann zum erkrankten inneren Organ hinlaufen.

Weiterführende Literatur

- Benninghoff, A. & Drenckhahn, D. (2004). Anatomie, Bd. 2 (16. Aufl.). München: Urban & Fischer.
- Haensch, C.A. & Jost, W. (2009). Das autonome Nervensystem: Grundlagen, Organsysteme und Krankheitsbilder. Stuttgart: Kohlhammer.
- Jänig, W. (2005). Vegetatives Nervensystem. In R.F. Schmidt & H.G. Schaible (Hrsg.), Neuro- und Sinnesphysiologie (5. Aufl.; S. 132–181). Heidelberg: Springer.
- Thews, G. & Vaupel, P. (2005). Vegetative Physiologie (5. Aufl.). Heidelberg: Springer.