

1 Anatomie des autonomen Nervensystems

Winfried Neuhuber

Als anatomische Strukturen, die dem *autonomen Nervensystem (ANS)* zugeordnet werden, sind der Sympathische Grenzstrang (*Truncus sympathicus*), die Nervengeflechte (*Plexus*) in Brust-, Bauch und Beckenorganen (*intramurale P.*) sowie vor der Aorta abdominalis und um die Blutgefäße, *Ganglien* im Bereich des Kopfes sowie *Anteile der Hirnnerven III, VII, IX und X* seit etwa 200 Jahren fest etabliert. Somit ist das ANS als Teil des peripheren Nervensystems (PNS) in unserer Vorstellung verankert. Die Erkenntnis aber, dass weite Teile des Zentralnervensystems (ZNS), sogar der Großhirnhemisphären sich mit autonomer Regulation befassen, ist relativ neu. Im Folgenden sollen die Anatomie der peripheren und zentralen Anteile des ANS kurz zusammengefasst werden. Zur ausführlicheren Lektüre sei auf zwei neue Monographien verwiesen (Furness 2006a, Jänig 2006).

Dem Vorschlag Langleys entsprechend wird das ANS in *Sympathikus, Parasympathikus* und *Enterisches Nervensystem* (Darmwandnervensystem, ENS) gegliedert (Langley 1921). Für die Eigenständigkeit des Letztern gab es bereits zu Langleys Zeiten genügend funktionelle Hinweise und die Besonderheiten des ENS wurden durch Forschungsergebnisse der letzten 30 Jahre bestätigt und weiter ausgearbeitet (Furness 2006a). Allerdings mehren sich Hinweise, dass auch die lokalen Gangliengeflechte in anderen Organen zu komplexen Integrationsleistungen fähig sind, was sich letztlich in ihrer Anatomie widerspiegelt (Furness 2006b, Jänig 2006). Somit erscheint es angebracht, das ANS in *Sympathikus, Parasympathikus, intramurale Ganglienplexus* und *zentrale Anteile* zu gliedern. Allerdings ist die Abgrenzung von Sympathikus und Parasympathikus oft schon anatomisch schwierig und die funktionelle Analyse fördert eher ein komplexes »Miteinander« als ein antagonistisches »Gegeneinander« der beiden zutage.

Eine Frage, die immer wieder aufgeworfen wurde, ist die nach *afferenten Neuronen*, die generell dem ANS oder gar seinen einzelnen Abschnitten spezifisch zuzuordnen wären. Es handelt sich wohl um ein Scheinproblem, das einer zu wörtlichen Auslegung des Langley'schen Textes zu verdanken ist. Langley wusste natürlich um die Existenz von Reflexen, die im ANS ablaufen; somit musste es afferente Neurone in diesem Bereich geben. Er sah sich jedoch außerstande, diese Neurone zu definieren, da es für ihn kein *morphologisches* Kriterium gab, an dem er sie von Afferenzen des zerebrospinalen (»somatischen«) Nervensystems unterscheiden konnte (für einen Physiologen eine bemerkenswerte Haltung!). Auch andere frühe Untersucher, wie z. B. der Erlanger Internist L. R. Müller bezogen afferente Neurone selbstverständlich in ihre Konzepte des ANS (*Vegetatives Nervensystem*, »Lebensnerven«, Müller 1931)

ein. Nichtsdestoweniger wurde unter Berufung auf Langley das ANS die längste Zeit als rein efferentes System begriffen. Allerdings mehrten sich in den letzten Jahren die Hinweise, dass *viszerale* (»*autonome*«) *Afferenzen*, deren Zellkörper in thorakolumbalen und sakralen Spinalganglien und den sensorischen Ganglien der Hirnnerven VII, IX und X liegen und deren Axone in praktisch allen Nervenästen des ANS ziehen, sich aufgrund ihrer peripheren Endigungsformationen, zentralen Endigungsmuster, weiteren supraspinalen Verbindungen und ihres neurochemischen Phänotyps von jenen, die z. B. die Haut innervieren, unterscheiden. Darüber hinaus sind primärafferente Neurone des ENS allein schon durch ihre Lage in der Darmwand und ihre auf diese beschränkten Verbindungen charakterisiert (Furness 2006a). Andererseits kann die Koordination autonomer Funktionen wie Kreislaufregulation, Atmung, Verdauung und Entleerung von Hohlorganen nur glücken, wenn neben viszeralen auch somatische Afferenzen berücksichtigt werden.

1.1 Peripheres ANS

Ein Charakteristikum des ANS ist die Aufteilung des Weges zum Erfolgsorgan in eine prä- und eine postganglionäre Strecke: *Präganglionäre Neurone*, deren Zellkörper im ZNS (Rückenmark und Hirnstamm) liegen, senden ihre Axone über Spinal- bzw. bestimmte Hirnnerven zu autonomen Ganglien, Nervenzellanhäufungen im Bereich des PNS (Langley 1921, Müller 1931). In diesen Ganglien sitzen die Perikaryen der *postganglionären Neurone* (die eigentlich richtiger »ganglionär« zu nennen wären), deren Axone, dem Verlauf von Spinal- bzw. Hirnnervenästen oder Gefäßen folgend, zum Erfolgsorgan (glatte Muskulatur, Drüsen) ziehen. Die in den autonomen Ganglien erfolgende synaptische Umschaltung von prä- auf postganglionäre Neurone, im Wesentlichen cholinerg-nikotinisch vermittelt, eröffnet die Möglichkeiten der Integration, da sowohl Konvergenz (Projektion von mehreren präganglionären auf ein postganglionäres Neuron) als auch Divergenz (Projektion eines präganglionären auf mehrere postganglionäre Neurone) zum Tragen kommen.

Die Lage der autonomen Ganglien wird klassischerweise für den Sympathikus als organfern (paravertebrale und prävertebrale Ganglien), jedoch organnah oder gar intramural für den Parasympathikus beschrieben. Somit ist die Länge präganglionärer Axone im Parasympathikus, insbesondere im N. vagus größer als jene der postganglionären, während im Sympathikus auch postganglionäre Axone ziemlich lange Strecken überbrücken müssen, z. B. von einem lumbalen oder sakralen Grenzstrangganglion bis zur Zehenspitze, um dort Schweißdrüsen und Gefäße zu innervieren. Andererseits gibt es in den Beckenganglien so genannte »kurze adrenerge Neurone« zur Innervation der Reproduktionsorgane, deren Axone oft nur wenige Millimeter lang sind (Neuhuber 2004a).

Die Kontakte zwischen postganglionären autonomen Neuronen und Effektoren wurden gern als Synapsen »par distance« oder »en passant« beschrieben. Neuere Befunde zeigen jedoch, dass auch im ANS der typische Neuroeffektorkontakt eine sehr nahe Membranbeziehung von etwa 20 nm in einem umschriebenen Bereich darstellt (Gabella 1995, Jänig 2006).

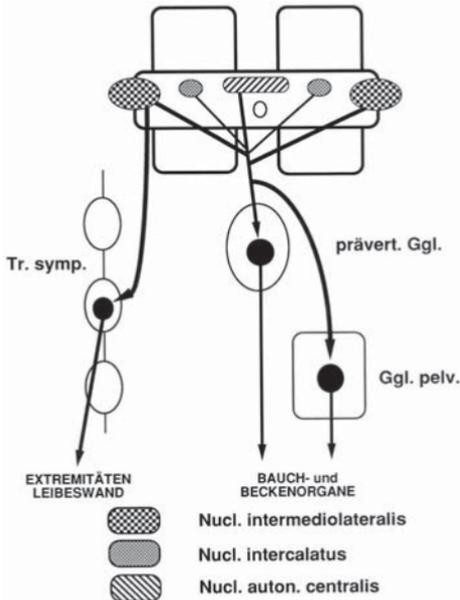
1.1.1 Sympathikus

1.1.1.1 Präganglionäre Neurone

Die *präganglionären Neurone* des Sympathikus (SPN) liegen, periodisch rostrokaudal gruppiert, in der Zona intermedia der Rückenmarksegmente C8–L3, weshalb man auch vom *thorakolumbalen System* spricht (s. Übersichtsabbildung 2.2). Dabei finden sich die meisten dieser Zellkörper im klassischen *Ncl. intermediolateralis (IML)* des Seitenhorns, zum Teil auch in der weißen Substanz des Seitenstrangs, während andere medial davon im *Ncl. intercalatus (IC)* sowie nahe dem Zentralkanal im *Ncl. autonomicus centralis* liegen (Abb. 1.1). Die mediolaterale Position korreliert in hohem Maße mit dem Zielgebiet der nachgeschalteten postganglionären Neurone: lateral gelegene SPN kontrollieren Extremitäten und Leibeswand, während weiter medial gelegene, insbesondere jene um den Zentralkanal die Innervation von Eingeweiden besorgen. Die Dendriten der IML Neurone sind mediolateral, dorsoventral und longitudinal ausgerichtet, jene des IC hauptsächlich mediolateral, die der zentralen autonomen Neurone hauptsächlich rostrokaudal, was einerseits die Erreichbarkeit für descendierende Bahnen, andererseits die Synchronisierung der neuronalen Aktivität über mehrere Segmente durch rostrokaudale Dendritenbündel begünstigt. Die Axone aller SPN, in der Regel myelinisiert, ziehen durch die Vorderwurzeln in die Spinalnerven, von denen sie über die *Rami communicantes albi* in die Ganglien des sympathischen Grenzstrangs übertreten (Jänig 2006, Neuhuber 2004a).

Die Zuordnung der SPN folgt einem groben segmentalen Prinzip. Präganglionäre Neurone der Segmente C8–T1 projizieren hauptsächlich zum Ggl. cervicale superius, von dem die postganglionäre Innervation von Kopf und Hals, somit auch des *M. dilatator pupillae* ausgeht, daher der Name *Centrum ciliospinale* für diese Segmente. SPN der Segmente T1–7 sind für die Innervation der Thoraxorgane, jene in T5–L1 für die Bauchorgane und schließlich jene in T12–L3 für die Innervation der Beckenorgane bestimmt. Für die Extremitäten gilt Ähnliches: T1–5 für die obere, T12–L3 für die untere Extremität. Allerdings überlappen sich diese Territorien nicht unbeträchtlich.

Als *Transmitter* verwenden präganglionäre sympathische Neurone *Acetylcholin*, das auf nikotinische Rezeptoren der postganglionären Neurone wirkt, zum Teil auch *Stickoxyd (NO)*.

**Abb. 1.1:**

Schema der Lokalisation präganglionärer sympathischer Neurone im Rückenmark, ihrer Projektionen in para- bzw. prävertebrale Ganglien und ihrer Beziehungen zur Körperperipherie. Die beiden senkrecht stehenden und das verbindende querliegende Rechteck symbolisieren die graue Substanz des Rückenmarks mit Vorder-, Hinter- und Seitenhorn. Präganglionäre Neurone liegen im Seitenhorn (Ncl. intermediolateralis) sowie weiter medial in der Zona intermedia (Ncl. intercalatus und autonomicus centralis), letzterer dorsal des Zentralkanal(s). Postganglionäre Neurone des Truncus sympathicus, die überwiegend Extremitäten und Leibeswand versorgen, erhalten ihren präganglionären Zustrom ausschließlich aus dem Ncl. intermediolateralis. Postganglionäre Neurone der prävertebralen und

pelvinen Ganglien, die Bauch- und Beckenorgane versorgen, erhalten präganglionären Einstrom aus den medial gelegenen Ncll. intercalati und autonomici centrales, neben jenem aus dem Ncl. intermediolateralis (Quelle: Neuhuber WL (1996) Funktionelle Anatomie des autonomen Nervensystems. *Nervenheilkunde* 15:383–390. *Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Schattauer Verlags*).

1.1.1.2 Postganglionäre Neurone

Die *postganglionären Neurone* des Sympathikus (SPoN) liegen in den *paravertebralen Ganglien* des sympathischen Grenzstrangs, den *prävertebralen Ganglien* des Retroperitoneums und den *Beckenganglien*. Sie sind multipolar, von Satellitenzellen umgeben und eingebettet in das endoneurale Bindegewebe des Ganglions. Neben diesen *Hauptzellen* gibt es die sogenannten *small intensely fluorescent cells* (SIF-Zellen), die in Gruppen liegen und als katecholaminerge Interneurone fungieren.

Die Ganglienkette des *Truncus sympathicus* zeigt eine segmentale Organisation, die allerdings nicht exakt mit der des Rückenmarks korreliert (Groen 1986). Mit 2–3 *Halsganglien*, Ggl. cervicale superius, medium (variabel) und inferius, 10–13 *Brustganglien*, typischerweise vor den Rippenköpfchen gelegen, 4 *Lendenganglien*, 4–5 *Sakralganglien*, medial der Foramina sacralia pelvina gelegen, und schließlich dem Ganglion impar vor der Spitze des Os sacrum erstreckt sich der Grenzstrang von knapp unterhalb der Schädelbasis durch den gesamten Hals und Rumpf, übertrifft also an Ausdehnung das präganglionäre

Ursprungsgebiet im Rückenmark (s. Übersichtsabbildung 2.2). Das größte Ganglion, *Ggl. cervicale superius*, ist spindelförmig und 2–3 cm lang; es enthält beim Menschen etwa 1 Million Nervenzellen. Die thorakalen und lumbalen Ganglien enthalten je etwa 100.000 Neurone, die sakralen Ganglien sind wesentlich kleiner (Gibbins 1990). Das untere Halsganglion verschmilzt mit dem obersten Brustganglion zum *Ggl. stellatum* (cervicothoracicum), wobei es zur individuell variablen Ausbildung von Nervenschlingen um die A. subclavia kommt (Ansa subclavia; Abb. 1.2 und 1.3). In diesem Bereich liegt meist auch ein kleineres Ggl. vertebrale, aus dem sich der N. vertebralis der gleichnamigen Arterie anschließt (Neuhuber 2004a). Die Axone der SPoN, in der Regel unmyelinisiert, verlassen die Grenzstrangganglien über die *Rami communicantes grisei* in Richtung Spinalnerven und untere Hirnnerven oder schließen sich größeren benachbarten Blutgefäßen, wie der A. carotis externa und interna (*N. oder Plexus caroticus externus bzw. internus*) oder der V. jugularis interna an (Abb. 1.2). Rr. communicantes grisei findet man entlang des gesamten Grenzstrangs, während Rr. communicantes albi auf die Segmente der SPN beschränkt sind, d. h. C8/Th1–L3. Die Rr. communicantes des Brustgrenzstrangs sind unter der Pleura leicht von den Ganglien zu den Interkostalnerven zu verfolgen (Abb. 1.3). Die Rr. communicantes grisei des Halsgrenzstrangs ziehen zwischen den prävertebralen Muskeln und den Scaleni zu den darunter liegenden Nervenstämmen des Plexus brachialis und cervicalis, jene des Lumbalgrenzstranges verlaufen unter den Ursprungsarkaden des M. psoas major zum Plexus lumbalis und die des Sakralgrenzstrangs nach lateral zu den sakralen Spinalnerven (Abb. 1.4). Jeder periphere Nerv erhält dadurch postganglionäre sympathische Axone. Der Tr. sympathicus fungiert somit als *Verteiler* des sympathischen Einflusses auf den gesamten Körper (Neuhuber 2004a).

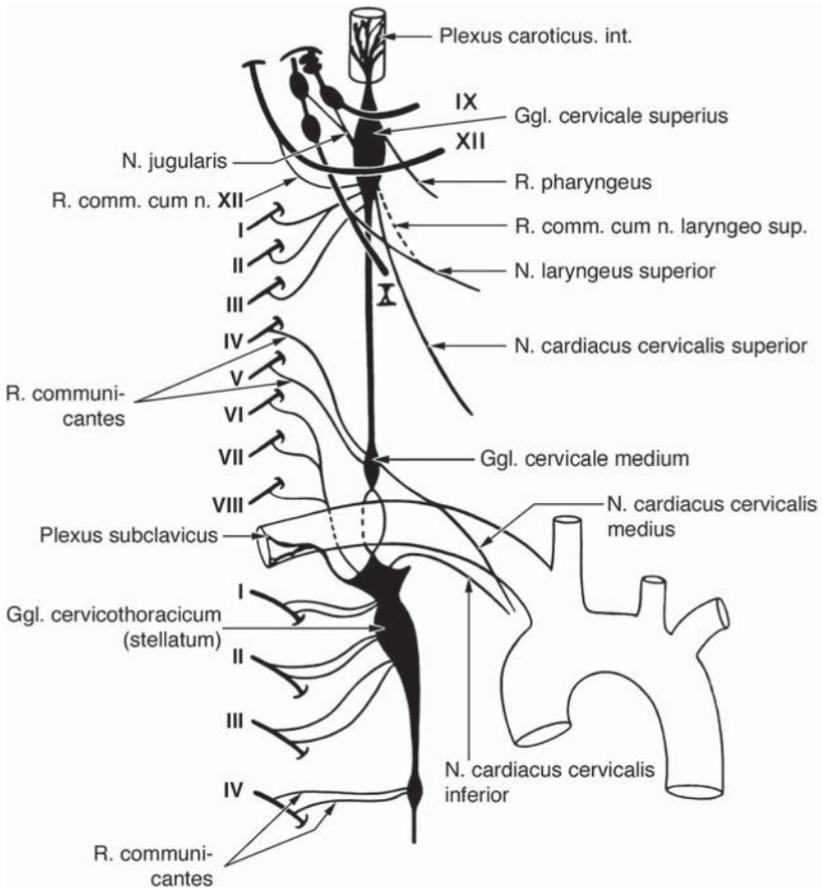
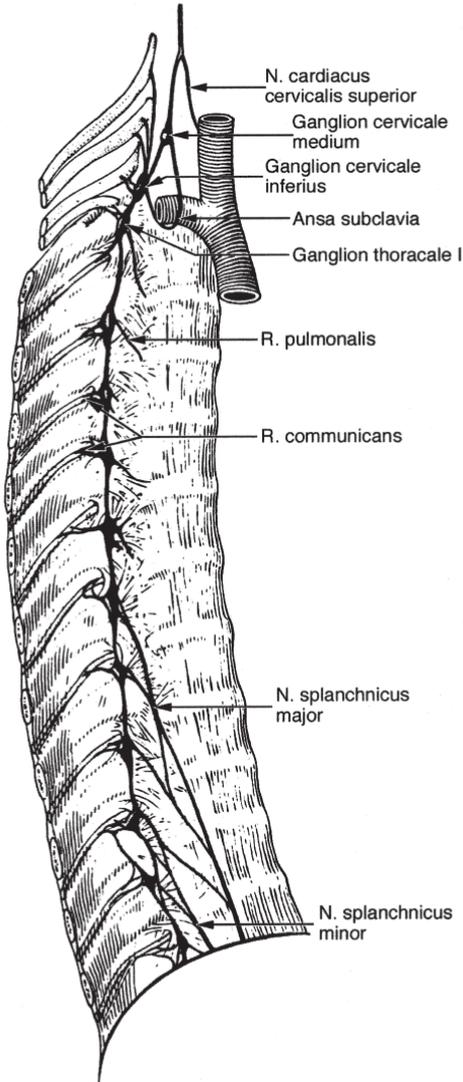


Abb. 1.2: Schematische Darstellung des Hals- und oberen Brustgrenzstranges. Aus den drei Ganglien, Ggl. cervicale superius, medium und cervicothoracicum, das aus der Verschmelzung von Ggl. cervicale inferius und thoracale primum entstanden ist, entspringen die Nn. cardiaci cervicales superior, medius und inferior. Rr. communicantes verbinden die Grenzstrangganglien mit Spinal- und Hirnnerven (mit römischen Ziffern bezeichnet) (nach Ferner, H (Hrsg) Lehrbuch der Anatomie des Menschen, Bd. 3. München: Urban & Schwarzenberg 1975. *Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Verlags.*)

**Abb. 1.3:**

Übersicht über den Brustgrenzstrang und seine Verbindungen. Er hängt mit dem Halsgrenzstrang über die Ansa subclavia zusammen, mit den Spinalnerven, die hier als Interkostalnerven auftreten, über Rr. communicantes, die nach lateral ziehen. Äste zu Brust- (N. cardiacus, R. pulmonalis) und Baucheingeweiden (Nn. splanchnicus major et minor) verlaufen nach medial; letztere durchsetzen das Diaphragma (Bogenlinie am unteren Rand der Abbildung) (nach Ferner, H (Hrsg.) Lehrbuch der Anatomie des Menschen, Bd. 3. München: Urban & Schwarzenberg 1975. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Verlags).

1.1.1.3 Nervi splanchnici, Äste zu den Thoraxorganen und prävertebrale Plexus

Das Herz, die großen Gefäße, der Tracheobronchialbaum und die Lunge werden von Ästen des Grenzstrangs versorgt, die bereits am Hals als *Nn. cardiaci superiores, medii* und *inferiores*, und im Thorax als *Nn. cardiaci thoracici* und *Rr. pulmonales* abzweigen (vgl. Abb. 1.2 und 1.3). Auch der Ösophagus wird von feinen Ästen des Grenzstrangs erreicht. Die *Nn. splanchnici* ziehen vom thorakalen, lumbalen und sakralen Grenzstrang nach medio-kaudal zu den prävertebralen bzw. Beckenganglien. Der *N. splanchnicus (thoracicus) major* zweigt vom 5.–9. Ganglion des Brustgrenzstrangs ab, gefolgt vom *N. splanchnicus minor* aus dem 10. und 11. Ganglion und bisweilen von einem *N. splanchnicus minimus* aus dem 12. Ganglion (vgl. Abb. 1.3). Die *Nn. splanchnici thoracales* durchsetzen, oft getrennt vom Grenzstrang selbst, das Diaphragma und strahlen in den Komplex des prävertebralen Ganglion coeliacum-mesentericum superius ein (Abb. 1.5). Die *Nn. splanchnici lumbales* ziehen von den lumbalen Grenzstrangganglien in den der Aorta ventral aufliegenden Plexus intermesentericus und zum Ggl. mesentericum inferius sowie in den kaudal anschließenden *Pl. hypogastricus superius*, der sich, über das Promontorium ziehend, in die beiden *Nn. hypogastrici* aufspaltet (Abb. 1.4). Die *Nn. splanchnici sacrales* (nicht zu verwechseln mit den parasymphatischen *Nn. splanchnici pelvini!*) schließlich ziehen von den sakralen Grenzstrangganglien zum *Pl. hypogastricus inferior* (Ggl. pelvinum, Abb. 1.4). Charakteristisch für die *Nn. splanchnici* ist, dass sie größtenteils präganglionäre Axone führen, die in den prävertebralen Ganglien und im Ganglion pelvinum (*Pl. hypogastricus inferior*) umgeschaltet werden (Neuhuber 2004a).

Die *prävertebralen (präaortalen) Gangliengeflechte* liegen der Aorta abdominalis ventral auf und enthalten Ganglienmassen um ihre großen Abgänge: Ggl. coeliacum mit etwa zwei Millionen Neuronen, Ggl. mesentericum superius und inferius (die kleiner und beim Menschen schwer abgrenzbar sind) sowie beidseits ein Ggl. renale und verbindende Stränge mit eingelagerten kleinen Ganglien, die als *Pl. intermesentericus* bezeichnet werden (vgl. Abb. 1.5). Aus diesen Ganglien gehen Äste hervor, die die postganglionären Axone enthalten und sich als Plexus den gleichnamigen Arterienästen anschließen, die sie zu den einzelnen Organen geleiten. Diese präaortalen Geflechte bündeln sich vor der Aortenbifurkation zum Plexus hypogastricus superior, der ebenfalls verstreute kleine Ganglien enthält, über das Promontorium ins kleine Becken zieht und sich in die beiden *Nn. hypogastrici* aufspaltet (Abb. 1.4). Dies ist der *Hauptweg* für die präganglionäre *sympathische Versorgung der Beckenorgane*. Nicht unerwähnt soll bleiben, dass sich der *Truncus vagalis posterior* über seinen *R. coeliacus* mit dem Ggl. coeliacum verbindet, sodass sich in den prävertebralen Plexus auch efferente, präganglionär parasymphatische, und afferente Axone des *N. vagus* finden (vgl. Abb. 1.5) (Neuhuber 2004a, Wang und Powley 2007).

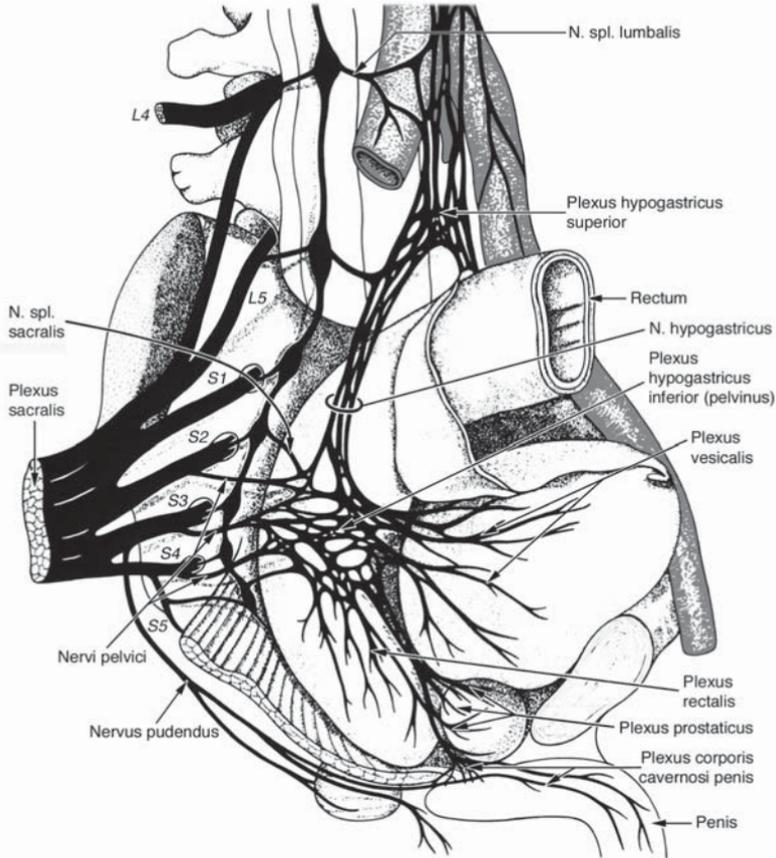


Abb. 1.4: Der kaudale lumbale und sakrale Grenzstrang in einer Ansicht von rechts nach Wegnahme der rechten Wandstrukturen und Gefäße des männlichen kleinen Beckens. Der Grenzstrang steht über Rr. communicantes nach lateral mit Spinalnerven (L4 bis S5 in dieser Darstellung), nach medial über Nn. splanchnici lumbales und sacrales mit dem prävertebralen (präaortalen) Geflecht, das sich in den Pl. hypogastricus superior fortsetzt, bzw. dem Pl. hypogastricus inferior (pelvinus) in Verbindung. Die Nn. pelvici (splanchnici pelvini) führen präganglionäre parasympathische Axone aus den Spinalnerven S2 bis S4, der N. hypogastricus sympathische präganglionäre Axone aus den unteren thorakal- und oberen Lumbalsegmenten zu. Die aus dem Pl. hypogastricus inferior entspringenden Geflechte zu den einzelnen Beckenorganen führen größtenteils postganglionäre parasympathische und sympathische Axone. Beachte den aus dem Pl. prostaticus hervorgehenden Pl. corporis cavernosi penis (Nn. cavernosi), der, seitlich der Prostata gelegen, den Beckenboden durchsetzt und zu den Schwellkörpern zieht. (nach Ferner, H (Hrsg.) Lehrbuch der Anatomie des Menschen, Bd. 3. München: Urban & Schwarzenberg 1975. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Verlags).

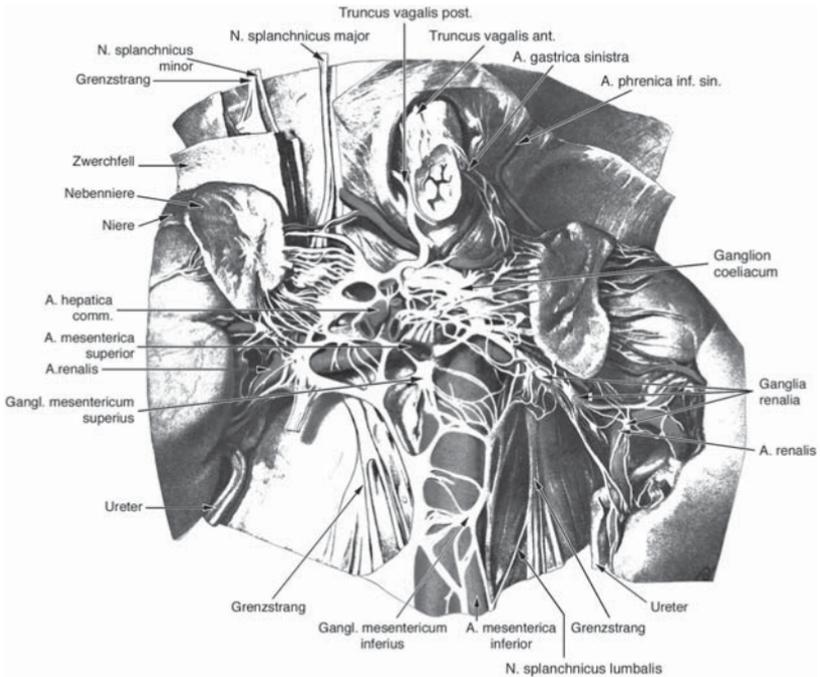


Abb. 1.5: Überblick über die prävertebralen Ganglien. Ein dichtes Nervengeflecht mit eingelagerten Ganglien umgibt die Aorta abdominalis und ihre großen Abgänge, Tr. coeliacus (repräsentiert durch A. hepatica communis und A. gastrica sinistra), A. mesenterica superior, A. mesenterica inferior und die Aa. renales. Von kranial durchsetzen die Nn. splanchnici major et minor sowie der Truncus vagalis posterior das Diaphragma und strahlen in den Komplex des Ggl. coeliacum ein. Kaudal des Diaphragmas zweigen vom lumbalen Grenzstrang Nn. splanchnici lumbales zum prävertebralen Geflecht ab (nach Ferner, H (Hrsg.) Lehrbuch der Anatomie des Menschen, Bd. 3. München: Urban & Schwarzenberg 1975. *Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Verlags*).

Mehrere SPoN werden von einem SPN synaptisch kontaktiert, wobei für das Ggl. cervicale superius Verhältnisse von 1 : 170 beschrieben wurden (Neuhuber 2004a). Andererseits konvergieren mehrere SPN auf einzelne SPoN, sodass sympathischen Ganglien eine wichtige Integrationsaufgabe zukommt. Noch komplexer ist die Integrationsfunktion der prävertebralen Ganglien, da sie außer den Synapsen der SPN auch solche von intestinofugalen Neuronen erhalten, also Information aus dem enterischen Nervensystem sowie Kollateralen von spinalen Primärafferenzen aus den Bauch- und Beckenorganen (Jänig 2006; vgl. Abb. 1.3 a).

Die pauschale Bezeichnung des Sympathikus als *adrenerges System* ist schon allein deshalb inkorrekt, weil *Noradrenalin* nicht der einzige Transmitter ist,