

Zentrale Repräsentation des Raumes

Wilfrid Coenen

2.1 Die Sonderstellung des Menschen in der Natur – 6

2.1.1 Raumorientierung und Gestaltwahrnehmung – 6

2.1.2 Denken: Probeweises Handeln im vorgestellten Raum – 7

2.1.3 Zentrale Datenverarbeitung – 8

2.2 Neurophysiologische Aspekte der Bewegungsentwicklung – 8

2.2.1 Sensomotorik – 8

2.2.2 Das Sensorsystem – 12

2.1 Die Sonderstellung des Menschen in der Natur

Leben, so heißt es, ist Bewegung. Bewegung geschieht in der Ordnung von Raum und Zeit. In den einzelnen Phasen der frühkindlichen Entwicklung werden die Funktionen dieses raum-zeitlichen Prinzips sichtbar; ihre Kenntnis ist sowohl für das Verständnis der physiologischen Entwicklungsabläufe als auch der pathologischen Abweichungen unentbehrlich. Die **Differenzierung der raum-zeitlichen Bewegungsfunktionen** ist Voraussetzung für die Entfaltung jener Fähigkeiten, denen der Mensch seine Sonderstellung in der Natur verdankt: angefangen von der Körperbewegung in aufrechter Haltung und der Verfeinerung des Handgeschicks über die Entwicklung von Begriffen und Wortsprache bis hin zum schöpferischen und geistigen Gestalten in Wissenschaft und Kunst.

Stammesgeschichtlich begann dieser Sonderweg des Menschen mit einem in der Phylogenese einzigartigen Akt, der den Menschen buchstäblich über die anderen Lebewesen erhebt: Die **Aufrichtung des Körpers gegen die Schwerkraft** zum zweibeinigen Stand und die Fähigkeit zur räumlichen Bewegung in dieser aufrechten Körperhaltung. Dadurch verbesserte sich das Gesichtsfeld des Menschen, zusätzlich begünstigt durch die freie Beweglichkeit des Kopfes gegenüber dem Rumpf, wie sie in dieser Weise von Vierbeinern nicht erreicht wird. Vor allem aber befreite diese aufrechte Körperhaltung die **Hände** von den Aufgaben der Stützleistung und Fortbewegung. Erst dadurch konnten sie sich zu einem Werkzeug entwickeln, das mit seinen sensorischen, sensiblen und feinmotorischen Fähigkeiten in der Natur einmalig ist. Ermöglicht wurden diese Errungenschaften durch die **Entwicklung des Neokortex** und bestimmter anatomischer Sonderkonstruktionen, von denen in späteren Kapiteln noch die Rede sein wird.

■ ■ Der Mensch – ein Generalist

Mit der Vielseitigkeit seiner körperlichen Ausstattung erweist sich der Mensch den Tieren überlegen, die nur in einzelnen Leistungen hoch spezialisiert sind. Eibl-Eibesfeldt (2000) bezeichnet den Menschen mit seiner Fähigkeit zur vielseitigen Anpassung als **Generalist** und fügt hinzu, dass auch seine Sinne ihn als solchen ausweisen. Ein »Mängelwesen« sei er nur in dem Sinne, dass er zum Überleben Kultur benötige: Kleidung, Behausung, Feuer, Waffen usw.

» Der körperliche Generalist ... ist dazu mit einem hochentwickelten ZNS ausgerüstet, das Informationen speichern und intelligent verarbeiten kann, und das vor allem über Strukturen verfügt, die es ihm erlauben, Sprache zu erwerben und sich mit Hilfe dieser Wortsprache über Vergangenes, Zukünftiges und Abwesendes zu unterhalten. (Eibl-Eibesfeldt 2000)



■ Abb. 2.1 Vor dem Wettkampf

Eibl-Eibesfeldt (2000) erwähnt in diesem Zusammenhang einen von Lorenz (1943) beschriebenen **fiktiven Wettkampf** (■ Abb. 2.1):

Ein dreundzwanzigjähriger Büroangestellter, normal entwickelt, durchschnittlich gesund, aber keineswegs Sportler, tritt gegen Vertreter beliebiger Arten aus dem Tierreich in folgenden Disziplinen an: 100 Meter sprinten, mit Kopfsprung in einen See springen, aus 4 Metern Tiefe gezielt drei Gegenstände hochtauchen, ca. 100 Meter zum anderen Ufer schwimmen, an einem Seil von 5 Metern hochklettern und anschließend 10 km gehen.

In Spezialdisziplinen sind viele Tiere dem Menschen überlegen: Die Gazelle läuft schneller, der Delphin schwimmt schneller, der Affe klettert besser. Dennoch wird kein Tier imstande sein, den Büroangestellten in diesem Sechskampf zu besiegen.

Ob ein Neugeborenes tatsächlich zum Generalist heranreift, wie es im Bauplan des zentralen Nervensystems vorgesehen ist, hängt wesentlich vom ungestörten Verlauf der frühkindlichen Entwicklung ab, in der sich die basalen Funktionen der Körperkontrolle und des Handgeschicks herausbilden.

2.1.1 Raumorientierung und Gestaltwahrnehmung

Die individuelle menschliche Entwicklung besteht in der ununterbrochenen Abfolge von Erkenntnisleistungen, deren Anordnung und Inhalt das Ergebnis entwicklungsgeschichtlicher Anpassung ist. In seiner **natürlichen Erkenntnistheorie** beschreibt K. Lorenz (1986) die Anschauung von Raum und Zeit als fundamentale Erkenntnisleistung – ein Aspekt, der auch für das Verständnis der Pathophysiologie kindlicher Bewegungsstörungen von großer Bedeutung ist. Lorenz geht davon aus, dass das begriffliche Denken des Menschen durch eine Integration mehrerer vorher schon existenter Erkenntnisleistungen zustande kommt.



■ Abb. 2.2 Abfolge von Erkenntnisleistungen

» Unter diesen ist die Fähigkeit der Raumvorstellung als Erste zu nennen. Die Anschauungsformen von Raum und Zeit sind ... in Wirklichkeit nur eine, nämlich die Anschauungsformen von Bewegung in Raum und Zeit. (Lorenz 1986)

Dies schließt als unverzichtbare kognitive Leistung die gezielte Willkürbewegung mit ihrer sensorischen Rückkoppelung ein! Eine weitere artspezifische Erkenntnisleistung, die ebenso wie das begriffliche Denken auf der Raumvorstellung gründet, ist die **Gestaltwahrnehmung** zusammen mit dem **explorativen Verhalten**, dem fühlen-den Untersuchen von Umweltdingen (■ Abb. 3.15–3.18). Mit diesen beiden Leistungen vollzog sich nach Lorenz (1986) entwicklungsgeschichtlich der erste Brückenschlag vom **Greifen zum Be-greifen**, und er führt weiter aus, dass **begriffliches Denken** und **Entwicklung der Wortsprache** Hand in Hand gehen. In ■ Abb. 2.2 ist die Abfolge von Erkenntnisleistungen schematisch dargestellt. Den Zusammenhang zwischen Raumvorstellung bzw. Raumorientierung und Sprachentwicklung sieht auch Heesch (1988), der Sprachmuster von Naturvölkern untersuchte. Nach seiner Annahme diente die Sprache ursprünglich der Orientierung und wurde erst in zweiter Linie zur sozialen Interaktion herangezogen.

➤ **Wichtig**
Bewegung geht also einher mit der Raumvorstellung und ist Voraussetzung für den Denkvorgang, dem ein gezieltes Handeln folgt.

2.1.2 Denken: Probeweises Handeln im vorgestellten Raum

Aus Verhaltensbeobachtungen von Menschenaffen ist bekannt, dass sie »ohne einen Muskel – es seien denn die Augenmuskeln – zu bewegen, im rein vorgestellten Raum

probeweise Handlungen vollziehen können« (Lorenz 1943). Auf diese Weise ist der Affe imstande, eine Aufgabe zu lösen, die z.B. in der Beschaffung schwer erreichbarer Nahrung besteht.

Im **Experiment** soll ein Orang-Utan eine Banane holen, die in einer Ecke des Raumes an einem Faden hängt und so angebracht ist, dass der Affe sie aus eigenem Vermögen nicht erreichen kann. Als Hilfsmittel steht ihm nur eine Kiste zur Verfügung, die aber in der diametral gegenüberliegenden Ecke des Raumes steht. Der Affe sitzt da und lässt seine Blicke ratlos zwischen der links unten stehenden Kiste und der rechts oben hängenden Banane wandern. Er findet keine Lösung, wendet sich ab, tut uninteressiert. Nach kurzer Zeit aber widmet er der Versuchsanordnung wieder seine Aufmerksamkeit: Jetzt gehen seine Augen zur Kiste, von da zu der Stelle am Fußboden unter der Banane, von dort hoch zur verlockenden Frucht, wieder senkrecht herunter zum Boden und von dort zurück zur Kiste. Dann erfolgt plötzlich der erhellende Einfall: Er nimmt die Kiste, schiebt sie unter die Banane und holt sie sich. Der ganze Vorgang spielte sich in wenigen Sekunden ab.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Vorstellung einer räumlichen Beziehung der Dinge zueinander und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen dem Denkvorgang entsprechen. Lorenz bezeichnet das Denken als **probeweises Handeln im vorgestellten Raum**, das jeder Problemlösung vorausgeht.

Beispiel

Zum »probeweisen Handeln im vorgestellten Raum« eine eigene Beobachtung: Im Freibad strebt ein kleiner Junge von eineinhalb Jahren dem Planschbecken zu, in der einen Hand ein Eimerchen, in der anderen eine Schaufel. Am Rande des Beckens bleibt er stehen, denn es führen drei Stufen hinunter, und es ist kein Geländer zum Festhalten da. Der Junge lässt Eimerchen und Schaufel los und krabbelt auf allen Vieren rückwärts die Stufen hinab. Da steht er unten, aber ohne sein Spielzeug, das er von dort nicht erreichen kann. Er klettert zurück, nimmt seine Spielsachen wieder auf und versucht ein zweites Mal, damit ins Wasser zu steigen, vergeblich. Also legt er alles wieder ab, krabbelt ins Becken hinunter – und steht wieder mit leeren Händen da. Nun klettert er abermals zurück, steht einige Augenblicke unbeweglich da, während sein Blick vom Wasser zur Treppe geht, von dort zu seinen Spielsachen, den gleichen Weg wieder zurück, einmal, zweimal: Dann nimmt er Eimerchen und Schaufel in die Hand, wirft sie im Bogen ins Planschbecken, krabbelt hinterher und hantiert nun zufrieden mit seinen Spielsachen.

➤ Wichtig

Die Definition des Denkens als probeweises Handeln im vorgestellten Raum ist von größter Wichtigkeit für das Verständnis bestimmter Störungsbilder im Kindesalter, bei denen motorische Auffälligkeiten und Störungen der Raumorientierung mit kognitiven Störungen einhergehen, ohne dass die Intelligenz gemindert ist.

2.1.3 Zentrale Datenverarbeitung

Das Programm der frühkindlichen Entwicklung besteht in der **Ausbildung der Steuerungsvorgänge** für die Aufrichtung des Körpers gegen die Schwerkraft und die räumlichen Bewegungen in dieser Körperhaltung. Die Anschauungsformen von Raum und Zeit stehen dem Kind dabei a priori zur Verfügung, als artspezifische Gegebenheit, erworben durch evolutionäre Anpassung. Diese apriorische Gegebenheit ist substantiell vorhanden in Anatomie und Physiologie der Sinnesorgane und deren Verschaltung über das periphere und zentrale Nervensystem mit den arthromuskulären Strukturen des Bewegungsapparates. Es handelt sich hier um ein enorm lernfähiges System, in dem die organische Reifung zentralnervöser Strukturen einhergeht mit der Differenzierung der Wahrnehmungsverarbeitung in den Sinnesorganen, die für die Steuerung von Körperhaltung und Bewegung verantwortlich sind. Sehen und Hören vermitteln eine räumliche Vorstellung vom näheren und weiteren Umfeld, mit den Hautrezeptoren wird die unmittelbare Umgebung erfasst, Labyrinthorgan und Propriozeptoren liefern das Bild von Stellung und Bewegung des Körpers im Raum und der Stellung von Kopf, Rumpf und Extremitäten zueinander. Lorenz ist der Meinung, dass diese Sinnesorgane »... der Anschauungsform des dreidimensionalen euklidischen Raumes zugrunde liegen, ja, dass sie in gewissem Sinne diese Anschauungsformen sind« (Lorenz 1983).

Orthograde Körperkontrolle und Raumorientierung sind das **Ergebnis der Verarbeitung biologischer Daten aus den Sinnesorganen**. Die Sensorik hat als programmierendes Element damit den Hauptanteil an Haltungs- und Bewegungsleistung (Janda 1993), während motorische Zentren und Bewegungsapparat die Befehlsempfänger und Ausführungorgane darstellen (► Abschn. 4.1, Sensorik: Leitfunktion der Motorik).

➤ Wichtig

Schwerkraftbewältigung und Raumorientierung bilden das gesetzmäßige neurophysiologische Ziel der frühkindlichen Entwicklung. Dieser Grundsatz beherrscht die Ausbildung und Differenzierung der Stütz- und Zielmotorik, der Körperkontrolle und des Handgeschicks.

Ungeachtet der String-Theorie der modernen Physik, die mit einer Vielzahl von Dimensionen arbeitet, gilt für die entwicklungsgeschichtlich erworbene neurophysiologische Ausstattung des Menschen, für sein Wahrnehmungssystem und seine motorischen Möglichkeiten unverändert die Gesetzmäßigkeit des dreidimensionalen, des »euklidischen« Raumes. Nach diesem Maßstab sind sowohl die normale frühkindliche Entwicklung zu beurteilen als auch Normabweichungen und Störungen dieses Entwicklungsprozesses und letztlich auch – unter Berücksichtigung der pathogenetischen Faktoren – die therapeutische Zielsetzung.

2.2 Neuropsychologische Aspekte der Bewegungsentwicklung

2.2.1 Sensomotorik

Der Begriff **Sensomotorik** bezeichnet den ununterbrochenen Prozess der Aufnahme und Verarbeitung biologischer Daten zur Durchführung motorischer Leistung. Er veranschaulicht in prägnanter Kürze das Rückkoppelungsprinzip von Sinneswahrnehmung und Muskelleistung für Haltung und Bewegung: Eine stütz- oder zielmotorische Aktion ist ohne vorausgegangene Sinneswahrnehmung nicht möglich, andererseits stellt jede gezielte Bewegung über die damit verbundene Rückmeldung eine kognitive Funktion an sich dar (Efferenzkopie nach v. Holst 1977). Auf diesem **Reafferenzprinzip** beruht die sensomotorische Steuerung, deren Differenzierung und Feinabstimmung wesentlicher Inhalt der frühkindlichen Entwicklung ist.

Es sind die ersten 12–15 Lebensmonate, in denen das Kind seine basalen sensomotorischen Programme entwickelt. Sie erlauben ihm, sich gegen die Schwerkraft zum zweibeinigen Stand aufzurichten und sich in dieser Körperhaltung fortzubewegen, den Kopf ohne Mitbewegung des Rumpfes im Raum einzustellen und die Hände zu immer differenzierteren feinmotorischen Leistungen einzusetzen; eng damit verknüpft ist die Entwicklung des sozialen und emotionalen Verhaltens. Diese Fähigkeiten bilden das Fundament der weiteren frühkindlichen Entwicklung bis zum Abschluss der Markreifung gegen Ende des 4. Lebensjahres.

➤ Wichtig

Alle diese Leistungen – Bewegung, Körperkontrolle, die erfolgreiche Auseinandersetzung mit der Umwelt und die Entfaltung höherer Erkenntnisfunktionen – sind das Ergebnis von Datenverarbeitung.

■ Information und Steuerung

Die Verwendung von Denkmodellen der **Informationstheorie** und der **Kybernetik** in der Medizin kann dazu



■ Abb. 2.3 Grundschemata der Informationsübertragung

beitragen, die äußerst komplexen und differenzierten zentralnervösen Zusammenhänge verständlich darzustellen und transparent zu machen. H.-D. Wolff (1996) betont in seinem lesenswerten Buch »Neurophysiologische Aspekte des Bewegungssystems«, dass die Anwendung dieser Denkkategorien für das Verständnis der Funktion des Nervensystems »von gar nicht abzusehendem Nutzen« sei und erläutert den Zusammenhang mit der Systemtheorie nach Wiener (s.u. »informationsverarbeitendes dynamisches System«).

Die **Informationstheorie** beschäftigt sich mit den Gesetzmäßigkeiten, nach denen eine Information **vollständig** und **unverfälscht** von der Quelle über einen »Kanal« zum Empfänger gelangt. Ein solcher Vorgang spielt sich stets nach dem in ■ Abb. 2.3 dargestellten Grundschemata ab, das auch auf die neurophysiologischen Regelvorgänge angewandt werden kann: Von der **Informationsquelle** gelangt die Information an einen **Sender**, wird dort in bestimmte, z.B. elektromagnetische Signale **verschlüsselt**, in dieser verschlüsselten Form über einen **Übertragungskanal** an den **Empfänger** weitergereicht, dort **entschlüsselt** und kann so vom **Informationsverbraucher** verstanden werden.

Beispiel

Wolff erläutert dieses Prinzip anschaulich am Beispiel des Festnetz-Telefonierens zweier Verliebter:

Der junge Mann ruft seine Liebste an. Er ist die Informationsquelle, das Mikrofon in seinem Telefonhörer der Sender,

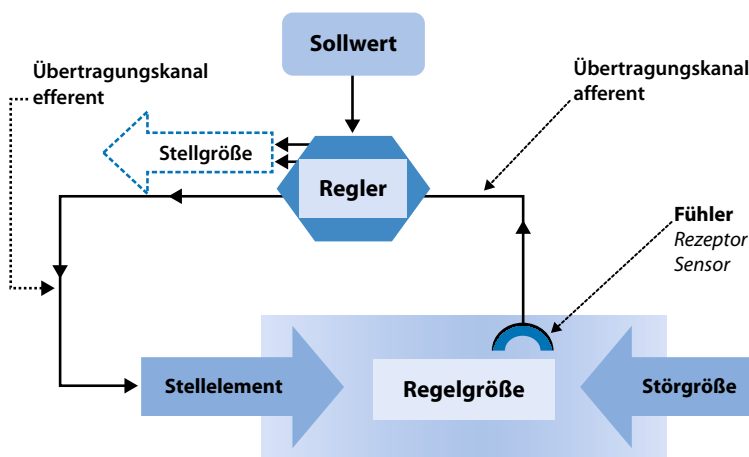
der die gesprochenen Worte in elektrische Impulse verschlüsselt; die Telefonleitung erfüllt die Aufgabe des Übertragungskanals dieser elektrische Impulse und endet im Lautsprecher des Telefonapparates der Angebeteten. In diesem Lautsprecher werden die elektrischen Signale entschlüsselt, in menschliche Sprache zurückverwandelt und von der jungen Dame als sog. Informationsverbraucherin verstanden. (Dieser informationstechnische Vorgang bleibt übrigens völlig unberührt vom Inhalt der gesprochenen Worte und ebenso von den autonomen Reaktionen der beiden Gesprächspartner: Herzklopfen, Erröten usw.)

➤ Wichtig

Der Transport von Information geschieht immer mithilfe von Verschlüsselung (Kodierung). Diese Regel gilt ebenso für die Reizleitung im Nervensystem, in dem elektrische Impulsfolgen (Aktionspotenziale) zur Nachrichtenübermittlung verwendet werden.

Kybernetik

Kybernetik (griech. κυβερνησις, Steuerung) ist die Lehre von den Steuerungs- und Regelvorgängen. Geistiger Vater dieser Lehre ist Norbert Wiener (1948), der auch die Systemtheorie formulierte. Bernhard Hassenstein (1977) entwickelte die Kybernetik weiter, indem er sie auf biologische Vorgänge übertrug. Die terminologischen Grundbegriffe der Kybernetik lassen sich – in Anlehnung an die Darstellungen Wolffs (1996) – am Beispiel des Regelkreis-Blockschemas erläutern (■ Abb. 2.4).



■ Abb. 2.4 Blockschaftbild eines Regelkreises. (Mod. nach Hassenstein 1977)

Von einem Regelkreis ist die Rede, wenn in einem System ein Wert bzw. eine bestimmte physikalische oder biologische Größe gegen Veränderungen durch innere oder äußere Einflüsse konstant gehalten werden soll. Für die **Steuerung** dieser Aufgabe sind verschiedene Elemente erforderlich, die in ► **nachfolgender Übersicht** aufgeführt sind.

Übersicht: Steuerungselemente eines Regelkreises

- **Regelgröße:** Die zu regelnde Größe (z.B. Temperatur)
- **Fühler:** Messvorrichtung, registriert den Istwert und gibt ihn kodiert weiter
- **Istwert:** Wert der Regelgröße, der vom Fühler aktuell gemessen wird
- **Sollwert:** Wert der Regelgröße, der konstant gehalten werden soll
- **Störgröße:** Bewirkt eine Abweichung der Regelgröße vom Sollwert
- **Regler:** Versteht die Information des Istwertes und vergleicht sie mit dem Sollwert
- **Stellgröße:** Steuerungsanweisung aus dem Regler an das Stellelement
- **Stellelement:** Stellt auf Befehl des Reglers den Sollwert wieder her

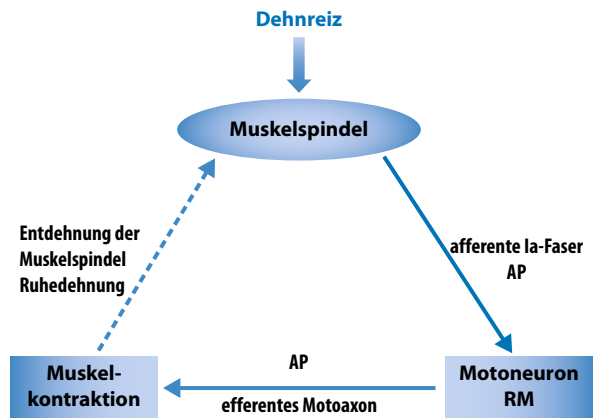
Beispiel

Zur Verdeutlichung führt Wolff (1996) ein alltägliches Beispiel an: Im Kühlschrank soll eine konstante Temperatur herrschen. Die Temperatur ist die Regelgröße, die vom Fühler gemessen wird. Dieser gemessene Istwert wird in elektrische Impulse verschlüsselt, gelangt über einen Übertragungskanal (elektrische Leitung) an den Regler, nämlich den Thermostat. Der vergleicht den eingegangenen Istwert mit dem Sollwert und aktiviert bei Abweichung über eine Steuerungsanweisung (Stellgröße) die Kühlmaschine, das Stellelement. Die Maschine arbeitet so lange, bis der Sollwert wieder erreicht ist.

Vergleichbares spielt sich beim **Muskeleigenreflex (MER)** ab. Es handelt sich hier um einen monosynaptischen Reflex, da die Informationsverarbeitung nur über **eine Synapse** geregelt wird, über die motorische Vorderhornzelle. Diese Synapse repräsentiert in diesem Steuerungs-kreis den Regler. Beim MER wird die Ruhespannung des Muskels wiederhergestellt, die durch Einwirkung von außen verändert wurde (■ Abb. 2.5).

Patellasehnenreflex

Der Schlag mit dem Reflexhammer auf die Patellasehne bewirkt einen Dehnreiz auf die Muskelspindeln des Quad-



■ Abb. 2.5 Monosynaptischer Muskeleigenreflex

ripzes. Die Information »Dehnreiz« wird vom Spindelrezeptor in Aktionspotenziale (AP) verschlüsselt und über rasch leitende afferente Ia-Fasern direkt auf die motorische Vorderhornzelle (Motoneuron) im Rückenmark transportiert. Treffen dort genügend Aktionspotenziale ein, kommt es zur Entladung des Motoneurons. Die AP gelangen über efferente Motoaxone an die motorischen Endplatten; dort wird über Freisetzen von Azetylcholin eine Muskelkontraktion erreicht, also eine »Entdehnung«: Die Ruhespannung des Muskels ist wiederhergestellt.

Regelgröße ist in diesem Modell die Länge des Muskels. Der Fühler (Rezeptor oder Sensor) wird von der Muskelspindel repräsentiert, die sowohl die aktuelle Länge als auch jede Längenänderung des Muskels misst, also den Istwert, während die Ruhedehnung des Muskels den Sollwert darstellt. Regler ist die motorische Vorderhornzelle (Motoneuron), die ihre Informationen (AP) über afferente Ia-Fasern erhält und über efferente Fasern (α - und γ -Motoaxone) weitergibt (Übertragungskanäle). Das Stellelement ist der Skelettmuskel selbst, der über diesen Regelkreis in seinem Spannungszustand reguliert wird.

➤ Wichtig

Das Prinzip eines Regelkreises beruht auf der Rückkopplung (»feedback control«). Alle biologischen Prozesse funktionieren nach diesem Prinzip, dessen Kenntnis für das Verständnis der manualmedizinischen Diagnostik und Therapie unentbehrlich ist.

Wie beim Kühlsystem im Eisschrank handelt es sich auch beim monosynaptischen Dehnreflex um einen **Halte-regler**, in dem ein bestimmter Wert konstant gehalten werden soll. Eigentlich scheint ein solcher Reflex für sich genommen nicht allzu viel zu taugen, sieht man von seiner Beliebtheit als Erklärungsmodell für das Rückkopplungsprinzip ab, denn er ist als Haltere-gler in keiner Weise anpassungsfähig: Eine komplexe, differenzierte ziel-motorische Leistung ist mit diesem starren Reflexschema nicht

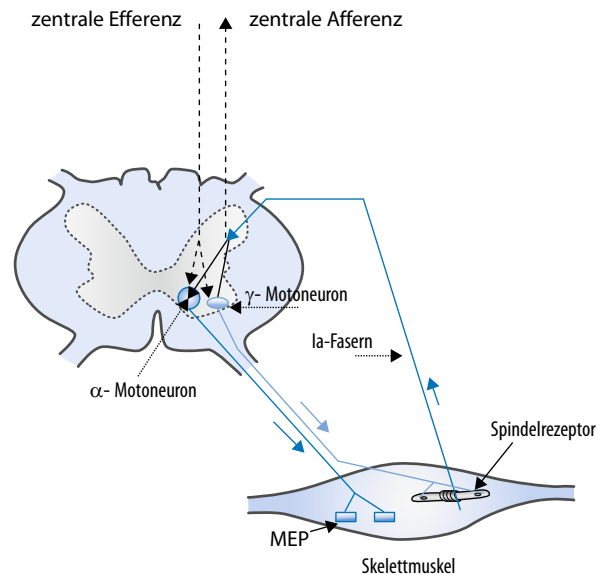
möglich. Allerdings spielt er eine nicht unbedeutende Rolle bei der Stützmotorik (s.u.). Das Nervensystem verfügt jedoch mit der **Gammaschleife** über eine einfach anmutende, jedoch äußerst komplex agierende Vorrichtung, die aus der **starken Halteregehung** eine **stufenlos verstellbare Folgeregelung** macht. Mit dieser Gammaschleife wird der »monosynaptische Dehnreflex trotz des einfachen Bauplans zu einem der wichtigsten Reflexe der Motorik« (Schmidt 1983).

■ ■ Gammaschleife

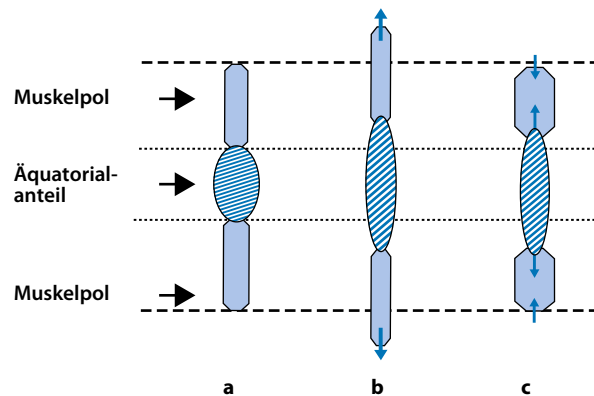
Die Gammaschleife ist gekoppelt an die Funktion der Muskelspindel: Die durch Dehnreiz auf die Muskelspindel aktivierten Potenziale gelangen – wie oben beschrieben – über afferente Fasern zu den motorischen Vorderhornzellen und verteilen sich dort auf α - und γ -Motoneurone. Von **α -Motoneuronen** ziehen efferente Fasern (α -Motoaxone) zu den motorischen Endplatten der Arbeitsmuskelfasern, von **γ -Motoneuronen** efferente Fasern (γ -Motoaxone) zu den Polen der Muskelspindeln (■ Abb. 2.6). Auf solche Weise kann über die Gammaschleife eine Kontraktion der Muskelspindel erfolgen: Dank des besonderen Aufbaus der Spindelfasern führt diese Kontraktion zu einem **Dehnreiz** auf den innerhalb der Muskelspindel gelegenen Rezeptor, auch wenn **keine passive Dehnung** von außen erfolgt. Diese spinal-segmental geschaltete Gammaschleife ist allerdings **nicht autonom**, sondern wird von zentralen Arealen gesteuert. Die Empfindlichkeit des Spindelrezeptors kann hierdurch beliebig verändert werden.

■ ■ Aufbau und Funktion der Muskelspindel

Muskelspindeln bestehen aus sehr dünnen, 4–7 mm langen spindelförmigen Muskelbündeln, die parallel zu den Fasern des Arbeitsmuskels angeordnet sind. Der Aufbau stellt sich in starker Vereinfachung so dar: Die Muskelspindel besteht aus zahlreichen Fasern, die an beiden Enden (Polen) einen muskulären Anteil und in der Mitte zwischen beiden Polen einen dehnbaren, spiraligen Anteil aufweisen, die sog. Äquatorialregion, auch anulospiraler Rezeptor genannt. Von diesem Äquatorialanteil ziehen afferente Fasern in Richtung Rückenmark, an den muskulären Polen landen die efferenten γ -Motoaxone. Durch eine zentral gesteuerte Erregung kann es zu einer Kontraktion der Muskelspindelpole kommen (intrafusale Kontraktion, ■ Abb. 2.7c), wodurch der Äquatorialanteil mit seinem spiraligen Rezeptor gedehnt wird, ohne dass sich die eigentliche Länge der Muskelspindel (wie z.B. beim passiven Dehnreiz) geändert hat. Beide Vorgänge, **Muskeldehnung** und **intrafusale Kontraktion**, können sich gegenseitig ergänzen oder abschwächen. Zwischen maximaler Aktivierung und völliger Inaktivierung kann durch entsprechend abgestimmte intrafusale Kontraktion eine stufenlose Einstellung der Rezeptorreizschwelle erreicht



■ Abb. 2.6 Gammaschleife



■ Abb. 2.7 Schematische Darstellung der Muskelspindel. a Ruhe-Dehnung. b Passive Langsdehnung der Muskelspindel und des anulospiralen Rezeptors (Äquatorialanteil). c Langsdehnung des anulospiralen Rezeptors durch intrafusale Kontraktion der Muskelpole. Spindel-länge bleibt unverändert

werden. Über die Koppelung mit der Alphamotorik sind auf diese Weise komplexe und differenzierte motorische Leistungen möglich (■ Abb. 2.7).

➤ Wichtig

Die Alpha-Gamma-Koppelung spielt in der Anwendung manualmedizinischer Behandlungstechniken eine äußerst wichtige Rolle.

In jedem Arbeitsmuskel finden sich zwei Formen von Muskelspindeln: Solche mit sackartiger Anhäufung von Zellkernen im anulospiralen Rezeptor, **Kernsackfasern** genannt, und solche, in denen die Kerne kettenartig hintereinander aufgereiht sind, die sog. **Kernkettenfasern**.

Kernsackfasern sind über schnelle leitende afferente Ia-Fasern mit großen α -Motoneuronen im Vorderhorn verbunden und induzieren **phasische** Muskelleistung. Von Kernkettenfasern ziehen langsam leitende II-Fasern zu kleineren α -Motoneuronen. Sie sind verantwortlich für **tonische** Muskelleistung.

Informationsverarbeitendes dynamisches System

Informationstheorie und Kybernetik fügen sich mit der **Systemtheorie** zu einem Gesamttenkmodell zusammen, mit dem biologische Vorgänge erfassbar gemacht und beschrieben werden können. Nach Wiener (1948) ist jedes agierende und reagierende System auf die Elementarkategorien – Materie, Energie, Steuerung und Zeit – zurückzuführen. Übertragen auf das **Bewegungssystem** ergibt sich folgendes Bild:

1. **Materie:** Knochen, Knorpel, Kapseln, Bänder, Synovialflüssigkeit usw.
2. **Energie:** Muskulatur mit Muskelfasern und -spindeln, Faszien, Sehnen, energieliefernde Mikrostrukturen.
3. **Steuerung:** Summe der neurophysiologischen Verbundsysteme einschließlich der darin transportierten und verrechneten Informationen und der sich daraus ergebenden Leistungen.
4. **Zeit:** Zeit vom Beginn der Funktionsfähigkeit bis zu deren Erlöschen: Erfahrungen der Vergangenheit werden für die Zukunft nutzbar gemacht.

Fazit

Für das Bewegungssystem ergibt sich daraus, dass **Funktion** nicht nur in Gelenkmechanik und Muskelaktivität besteht, sondern »die intakte, gemeinsame und zielorientierte Leistung aller Systemteile in der Zeit« umfasst (Wolff 1996). In diesem Sinne ist das Bewegungssystem als **informationsverarbeitendes dynamisches System** zu verstehen (Wolff 1996).

2.2.2 Das Sensorsystem

Die Erkennung und Behandlung von Funktionsstörungen des Bewegungssystems mit Mitteln der Manuellen Medizin geschieht unter Ausnutzung der informationstheoretischen und kybernetischen Gesetzmäßigkeiten des zentralen Nervensystems. Ziel ist die Beseitigung von Störfaktoren, die in den sensomotorischen Regelkreis eingreifen und zu einer Beeinträchtigung der Haltungs- und Bewegungsqualität mit allen sich daraus ergebenden Konsequenzen führen. Aus anatomischen Gründen kann auf unblutigem therapeutischem Wege nur über ein einziges

Steuerungselement des Regelkreises auf dieses System zugegriffen werden: über den **Fühler** bzw. **Sensor**. Alle anderen Elemente, die afferenten und efferenten Leitungsbahnen, spinale und supraspinale Neurone usw. sind nicht unmittelbar erreichbar.

Das Sensorsystem ist daher für den Manualmediziner von außerordentlicher Bedeutung: Über die Sensoren registriert das Nervensystem die Vorgänge im Organismus und in der Umwelt ► Abschn. 2.1.3, Zentrale Datenverarbeitung). Die Sensoren, auch Rezeptoren genannt, verarbeiten **Wahrnehmungsinformationen** über

- die weitere Umgebung (Auge, Ohr → **Telerezeptoren**),
- die nähere Umwelt (Körperoberfläche, Haut → **Extero- oder Kutanozeptoren**),
- die Stellung und Lage des Körpers im Raum (Labyrinth, Muskel-, Sehnen-, Gelenksensoren → **Propriozeptoren**),
- Vorgänge in den inneren Organen → **Viszero- oder Enterozeptoren**.
- Die Propriozeptoren dienen ferner dem Kraftsinn (Abschätzen von Gewichten) und der Wahrnehmung der Bewegung des Körpers und einzelner Körperteile (Kinästhesie).

Tip

Für den Manualmediziner **interessant** sind

- die Exterozeptoren,
- die Rezeptoren des Labyrinthorgans und
- die Propriozeptoren.

Eine besondere und sehr wichtige Rolle spielt eine Sonderform von Sensoren: die **Nozizeptoren**, die unter anderem für die Schmerzübertragung verantwortlich sind, aber auch die Funktion der Propriozeptoren behindern können.

■ ■ Muskelspindel

Auf die Muskelspindel als dem Rezeptor bzw. Regler des Skelettmuskels wurde bereits näher eingegangen. Es handelt sich um einen sehr schnell adaptierenden Rezeptor, der Länge und Längenänderung des Muskels misst und der Modulation durch die Gammaschleife unterliegt.

■ ■ Sehnenrezeptoren

Sehnenrezeptoren sind die Golgi-Sehnenorgane: Sie liegen am Übergang der Muskelfaser in die Sehne und zeichnen sich durch eine hohe Empfindlichkeit aus. Ein Sehnenorgan kann durch die Kontraktion einer einzelnen motorischen Einheit aktiviert werden (Illert 1995). Diese Rezeptoren messen die Spannung des Muskels und hemmen die Alpha-Motoneurone, wenn die Muskelspannung zu stark

ist. Sie wirken insofern antagonistisch zu den Muskelspindeln. Auf diese Weise werden – ebenfalls über ein Rückkopplungssystem – Gewebeläsionen vermieden.

■ ■ Gelenkrezeptoren

Gelenkrezeptoren, auch Mechanorezeptoren genannt, messen die Spannung der Gelenkkapsel, wirken hemmend auf Nozizeptoren, beeinflussen reflektorisch-tonisch die Motoneurone der Skelettmuskeln, der Augen und des Kauapparates. Es gibt verschiedene Typen von Mechanorezeptoren – auch im Fasziengewebe – mit unterschiedlicher Leitungsempfindlichkeit und unterschiedlicher Funktion, was bei bestimmten manualmedizinischen Techniken therapeutisch genutzt wird (► Abschn. 7.3, Myofasziale Lösetechniken).

■ ■ Nozizeptoren

Nozizeptoren nennt man solche Sensoren, die auf gewebschädigende (thermische, chemische, mechanische) Reize reagieren und Schmerzempfindung vermitteln. Diese Nozizeptoren üben ferner einen Einfluss auf die Motoneurone der Augen, des Kauapparates und der Wirbelsäulenmuskulatur aus; zudem beeinflussen sie reflektorisch-tonisierend das Gamma-System und andere ZNS-Funktionen. Die Empfindlichkeitsschwelle dieser Nozizeptoren ist nicht konstant und unterliegt unterschiedlichen Einflüssen; eine Erkenntnis, die von praktischer therapeutischer Bedeutung ist. Nozizeptoren kommen in fast allen Körpergeweben vor, ausgenommen im Hirngewebe und im Leberparenchym.

Sensomotorische Steuerung

Die sensorischen Leistungen des Vestibularapparates, der Propriozeptoren und auch der Exterozeptoren sind Voraussetzung für das Zustandekommen von Motorik. Nach Janda (1993) hat die Sensorik als programmierendes Element den Hauptanteil an Haltungs- und Bewegungsleistungen, während die motorischen Rindenzentren und auch die peripheren motorischen Einheiten den Effektor darstellen.

Definition

Als **Sensorik** bezeichnen wir die Integration und Verarbeitung aller Sinnesinformationen aus dem Rezeptorsystem, unter **Motorik** verstehen wir die integrierte Haltungs- und Bewegungsleistung des menschlichen Körpers, eingeteilt in **Stütz- und Zielmotorik**.

■ ■ Stützmotorik

Die Stützmotorik sichert die Haltung des Körpers in Auseinandersetzung mit der Schwerkraft. Kennzeichnend ist

die dauernde, vorwiegend isometrische Kontraktion der **Haltemuskulatur**, auch **posturale Muskulatur** genannt. Diese Haltemuskeln spielen in der neuromotorischen Reifung des Kindes eine besondere Rolle, denn sie entwickeln sich zeitlich vor den anderen Muskelarten und »stehen in der Differenzierung der Skelettmuskulatur an erster Stelle« (David 1982). Die Alpha-Gamma-Koppelung des Muskeleigenreflexes (monosynaptischer Dehnreflex) ist ein entscheidendes funktionelles Element der Stützmotorik, da der Körper mithilfe dieses Antischwerkraftreflexes aufrecht gehalten wird. Die Stützmotorik wiederum ist Basisfunktion der differenzierten, variantenreichen Zielmotorik.

■ ■ Zielmotorik

Die Zielmotorik, früher Willkürmotorik genannt, ist gekennzeichnet durch willkürlich ausgelöste Bewegungen unterschiedlicher Geschwindigkeit, meist vom »angulären Muster«, d.h. mit Beugebewegung der Gelenke. Sie dient der bewussten Ausführung von Bewegungen, im Gegensatz zur Stützmotorik, die unbewusst funktioniert, gewissermaßen »automatisiert«. Die in der Zielmotorik eingesetzten Muskeln, auch **phasische Muskeln** genannt, sind wegen des geringen Myoglobingehalts blasser als die posturalen Muskeln und entwickeln sich ontogenetisch auch später als diese. Während posturale Muskeln unter bestimmten Umständen zur Verkürzung neigen, atrophieren phasische Muskeln bei unzureichender oder fehlender Aktivierung.

■ ■ Halte- und Stellreaktionen

Die Differenzierung der stützmotorischen Programme bestimmt das Bild der frühkindlichen Entwicklung und findet ihren Ausdruck in den Halte- und Stellreaktionen. Die Prüfung dieser Reaktionen erlaubt eine klinische Beurteilung des Entwicklungsstandes und die Aufdeckung von Störungen.

■ Haltereaktionen

Haltereaktionen stabilisieren die einmal eingenommene Körperhaltung gegen den Einfluss der Schwerkraft und steuern die Tonusverteilung zwischen den verschiedenen Muskeln. Von besonderem Interesse aus manualmedizinischer Sicht sind die **tonischen Nackenreflexe**. Sie werden gelenkt aus den Propriozeptoren des Nackens und den Rezeptoren in den Bogengängen und dem Vestibulum des Labyrinths. Durch diese Reflexe wird die Körperhaltung entsprechend der Kopfstellung auf nachfolgende Körperbewegungen vorbereitet (Illert 1995).

Beispiel

Bei jungen Säuglingen lässt sich dies am **symmetrischen tonischen Nackenreflex (STNR)** beobachten: Die passive Extension des Kopfes führt zu einer Tonusminderung der Beine und Streckung der Arme, passive Flexion des Kopfes führt zum umgekehrten Effekt. Diese Reaktion ist normalerweise nur im frühen Säuglingsalter sichtbar. Unter pathologischen Bedingungen wie der infantilen Zerebralparese persistiert dieser tonische Reflex mit entsprechenden Nachteilen für das Haltungsmuster.

Treten an den rezeptortragenden Strukturen des Nackens funktionelle Störungen auf, sog. segmentale Dysfunktionen oder Blockierungen, so kann diese Tonusregulation beeinträchtigt werden mit störender Auswirkung auf die Körperkontrolle und die neuromotorische Entwicklung. Davon wird später noch die Rede sein.

■ Stellreaktionen

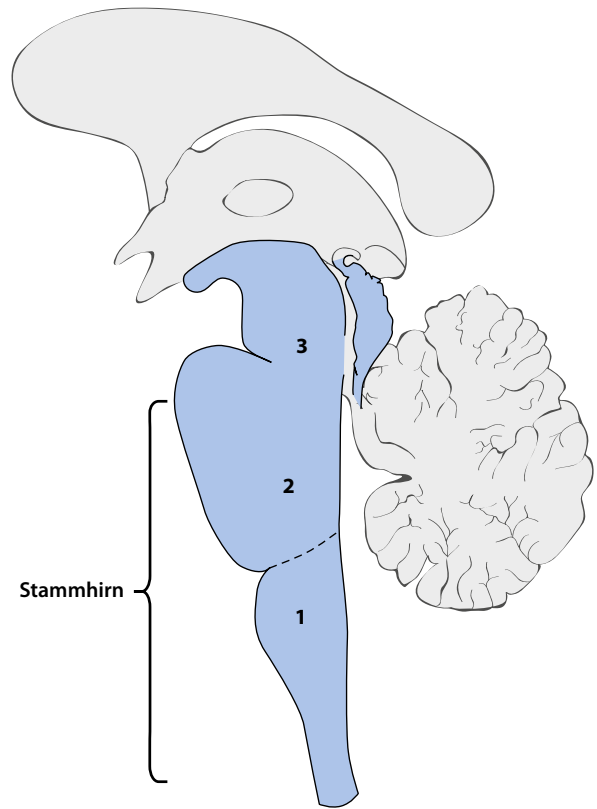
Stellreaktionen verteidigen die eingenommene Körperhaltung gegen Störgrößen und richten den Körper gegen die Schwerkraft auf. Die **Labyrinthstellreaktionen** besorgen die aufrechte Einstellung des Kopfes bei wechselnder Körperlage (Kippreaktion, schiefe Ebene, Vierfüßerstand). **Halsstellreaktionen** hingegen stellen den Körper nach einer vorgegebenen (Kopf-) Haltung ein, zu beobachten z.B., wenn sich der Säugling mit ca. 6 Monaten vom Rücken auf den Bauch dreht, wobei die Rumpfrotation der Kopfdrehung folgt.

■ Statokinetische Reaktionen

Diagnostisch interessant ist eine weitere Gruppe von Reflexen, die statokinetischen Reaktionen. Sie sind Antwort auf einen Beschleunigungsreiz und führen aus einer Bewegung zu einer Bewegung, steuern z.B. die Gleichgewichtskontrolle beim Springen, Laufen, Radfahren usw. Beliebt bei Neurophysiologen ist das Beispiel der Katze, die sich im freien Fall so dreht, dass sie immer auf den Füßen landet. Der Säugling zeigt in Abhängigkeit vom sensomotorischen Entwicklungsstand typische Bewegungsantworten beim Prüfen statokinetischer Reaktionen. Dazu zählen die Abhangversuche nach Collis und Peiper-Isbert sowie die Vojtareaktion.

■ ■ Wirkungsweise der posturalen Reaktionen

Die Wirkungsweise der posturalen Reaktionen lässt sich experimentell demonstrieren (Schmidt et al. 1983): Führt man bei einem Versuchstier eine **Dezerebration** durch, d.h., entfernt man das Gehirn an der Grenze **zwischen Brücke und Mittelhirn**, so entsteht sofort eine maximale Streckung aller vier Extremitäten, die sog. Dezerebrationsstarre (■ Abb. 2.8). Wird ein dezerebriertes Tier auf alle Viere hingestellt, so bleibt es stehen, da die Gelenke nicht



■ Abb. 2.8 Stammhirn. 1 Medulla. 2 Pons. 3 Mittelhirn (Mesenzephalon)

einknicken. Das heißt: Medulla und Pons enthalten motorische Zentren, die über die Steuerung des Muskeltonus bewirken, dass die Extremitäten das Körpergewicht tragen. Wird das dezerebrierte Tier nun umgestoßen, so kann es sich nicht wieder aufrichten.

Entfernt man dagegen das Gehirn **oberhalb des Mittelhirns**, so dass Mesenzephalon, Pons und Medulla erhalten bleiben, verbessern sich schlagartig die motorischen Fähigkeiten: Die Streckstarre fällt weg und das Mittelhirntier kann sich wieder selbstständig in die normale Körperhaltung aufstellen.

Fazit

Die motorische Leistung des dezerebrierten Tieres entspricht den **Haltereaktionen**, die motorische Leistung des Mittelhirntieres entspricht den **Stellreaktionen**.

Die motorischen Zentren des Hirnstamms sind also an der Steuerung der Stützmotorik entscheidend beteiligt. Über absteigende (efferente) Bahnen hat der Hirnstamm ohne »Umweg« über Zwischenneurone einen direkten, also monosynaptischen Zugriff auf die Motoneurone der pos-

turalen Rumpf- und Extremitätenmuskulatur. Ebenso projizieren propriozeptive Afferenzen aus den Nackenmuskeln direkt zum Vestibulariskerngebiet im Hirnstamm.

Haltereaktionen sind **tonische Reaktionen**, die nur im Säuglingsalter in bestimmten Entwicklungsphasen zu sichtbaren Bewegungen führen. Später werden sie differenzierten Bewegungsschablonen untergeordnet und sind unter physiologischen Bedingungen nicht mehr sichtbar. Sie lassen sich beim Erwachsenen nur noch im EMG als Änderung der Muskelspannung nachweisen.

Besser zu erkennen ist die Wirkung der Stellreaktionen auch bei **alltäglichen Bewegungen**, z.B. beim Aufrichten aus der liegenden in die aufrechte Körperhaltung. Diese Bewegung erfolgt immer in einer bestimmten Reihenfolge: Zuerst wird über die Meldung aus dem Labyrinth der Kopf in die Normalstellung gebracht (Labyrinthstellreflex). Die Aufrichtung des Kopfes z.B. aus der Rückenlage verändert die Stellung des Kopfes zum übrigen Körper, was durch die Rezeptoren der Nackenmuskeln angezeigt wird. Die Afferenzen aus den Nackenrezeptoren bewirken dann, dass der Rumpf dem Kopf in die Normalstellung folgt (Schmidt 1983).

➤ Wichtig

Die Einleitung der Aufrichtungsbewegung erfolgt von kranial nach kaudal. Diese Gesetzmäßigkeit ist auch in den einzelnen Phasen der posturalen Entwicklung des Säuglings zu beobachten.

Manuelle Medizin bei Säuglingen und Kindern
Entwicklungsneurologie - Klinik - Therapeutische
Konzepte

Coenen, W.

2016, XVII, 250 S., Hardcover

ISBN: 978-3-642-20733-4