

Vorwort

Physiotherapie ist theoriegeleitete Praxis. Schüler und Studenten müssen deshalb außer sehr spezialisierten berufspraktischen Fertigkeiten und deren theoretischer Grundierung auch Basiswissen in einer ganzen Reihe von Begleit- und Grundlagenwissenschaften erwerben. Die physioLehrbücher Basis bieten diese berufsrelevanten theoretischen Ausbildungsinhalte in kompakter Form.

Dieser Band beinhaltet Grundlagen der Biomechanik, die Biomechanik der verschiedenen Körperstrukturen sowie die physiologische, pathophysiologische und leistungsphysiologische Basisinformation. Die Art der Darstellung soll Biomechanik und Physiologie „begreifbar“ machen und Verbindungen herstellen zwischen theoretischem Grundlagenwissen und der täglichen physiotherapeutischen Arbeit mit Patienten.

Physiotherapeuten müssen menschliche Bewegung analysieren und die Belastungen der Strukturen einschätzen können, nur dann ist dosierte Beanspruchung möglich. Biomechanisches Grundlagenwissen ist daher erforderlich, um pathomechanische Aspekte zu erkennen und Konsequenzen für Untersuchung und Behandlung abzuleiten. Die Be-

trachtung der menschlichen Bewegung unter mechanischen Gesichtspunkten ist allerdings nur ein Aspekt dieses komplexen Geschehens, wenn auch ein wichtiger Aspekt. So wird beispielsweise der Stoffwechsel ebenso von biochemischen Abläufen bestimmt, wie er vom Nerven- und Hormonsystems und dem histologischen Aufbau der Gewebe beeinflusst wird.

Schüler und Studenten erhalten Antworten auf Fragen wie z.B. beispielsweise „Wie wirken mechanische Kräfte auf Körperstrukturen? Was ist eigentlich Muskeltonus? Wie reagiert der Körper auf Trainingsreize? Wie werden Kraft, Ausdauer und Koordination messbar?“ Wer Physiotherapie als theoriegeleitete Praxis versteht, kann sein tägliches Tun und Handeln jederzeit begründen. Dieser Band liefert dazu fundiertes Basiswissen.

Dem Thieme Verlag und hier in erster Linie Rosi Haarer-Becker gilt unser Dank für sachkundige, zielstrebige und kollegiale Zusammenarbeit bei Planung und Herstellung auch dieses Lehrbuchs.

Antje Hüter-Becker, Mechthild Dölken

Inhaltsverzeichnis

1 Biomechanik und Bewegungslehre. 3

1.1 Biomechanik früher und heute	3	1.5 Mechanisches Gleichgewicht	43
<i>Britta Voelker</i>		1.5.1 Schwerpunkt, Schwerelinie und Unter-	
1.1.1 Entwicklung der Biomechanik	3	stützungsfläche	43
1.1.2 Überblick über Anwendungsbereiche		1.5.2 Gleichgewichtsarten	45
der Biomechanik	5	1.6 Kinematik der Gelenke des	
1.2 Physikalische, mechanische und		menschlichen Körpers	46
mathematische Grundlagen	7	1.6.1 Freiheitsgrade/Bewegungsumfang	46
<i>Dieter Klein</i>		1.6.2 Gelenk ist nicht gleich Drehachse	47
1.2.1 Kinematik – Kinetik – Statik –		1.7 Statische und dynamische	
Dynamik	7	Bestimmung der Gelenkkraft	49
1.2.2 Größen und Einheiten	8	1.7.1 Kriterien zur Bestimmung von Gelenk-	
1.2.3 Messen – Darstellen – Berechnen	9	kräften	49
1.3 Mechanik fester Körper	14	1.7.2 Messung der Muskelaktivität	50
1.3.1 Kinematik, die Lehre von den		1.7.3 Kriterien zur Bestimmung der Muskel-	
Bewegungen	14	kraft	51
1.3.2 Dynamik, die Lehre von den wirkenden		1.8 Biomechanische Betrachtung	
Kräften	18	exemplarisch ausgewählter Gelenke	51
1.4 Mechanik der Flüssigkeiten und		1.8.1 Hüftgelenk	52
Gase	35	1.8.2 Kniegelenk	55
1.4.1 Eigenschaften ruhender Flüssigkeiten		1.9 Biomechanische Untersuchungs-	
(Hydrostatik)	35	methoden	56
1.4.2 Eigenschaften ruhender Gase		1.9.1 Winkelmessung an Gelenken	56
(Aerostatik)	38	1.9.2 Kraftmessung	56
1.4.3 Eigenschaften sich bewegender		1.9.3 Messung der Fuß-Boden-Reaktions-	
Flüssigkeiten und Gase (Hydrodynamik,		kräfte	57
Aerodynamik)	39	1.9.4 Positionsbestimmung von markierten	
		Körperpunkten in Bewegung	58

2 Biomechanik der Körperstrukturen 67

Jochen Schomacher

2.1 Gewebe und Kräfte, die auf sie		2.3.2 Reaktionen des Knochens auf Belastung	
einwirken	67	bzw. Beanspruchung	82
2.2 Biomechanik des Bindegewebes	69	2.3.3 Reaktionen des Knochens auf Über-	
2.2.1 Aufbau	70	belastung: Fraktur und Frakturheilung	83
2.2.2 Reaktion des Bindegewebes bei lang		2.3.4 Reaktionen des Knochens auf Unter-	
dauernder Überbelastung	74	belastung	85
2.2.3 Reaktion des Bindegewebes bei schnell		2.3.5 Der Knochen als Hebel	85
verlaufender Überbelastung		2.4 Biomechanik der Bandscheibe	85
(Wundheilung)	75	2.4.1 Aufbau	85
2.2.4 Reaktion des Bindegewebes bei		2.4.2 Reaktionen der Bandscheibe	
Unterbelastung	78	auf Überbelastung	87
2.2.5 Dehnung von Bindegewebe	79	2.4.3 Reaktionen der Bandscheibe bei Unter-	
2.3 Biomechanik des Knochens	81	belastung	89
2.3.1 Aufbau	81	2.4.4 Belastung an der Wirbelsäule	89

2.4.5	Die Gleitkräfte der Bandscheibe beim Stehen und Sitzen	92	2.6 Biomechanik des Muskelgewebes	103	
2.5	Biomechanik des Knorpels	94	2.6.1	Aufbau des quer gestreiften Skelettmuskels	103
2.5.1	Aufbau	94	2.6.2	Reaktionen des Muskels auf Überbelastung – Heilung von Muskel-läsionen	105
2.5.2	Mechanische Eigenschaften des hyalinen Gelenkknorpels	95	2.6.3	Reaktionen des Muskels auf Unterbelastung	106
2.5.3	Reaktion des hyalinen Gelenkknorpels auf Überbelastung	96	2.6.4	Muskeldehnung.....	107
2.5.4	Reaktion des hyalinen Gelenkknorpels auf Unterbelastung	97	2.6.5	Wirkung der Muskelkraft auf die passiven Strukturen des Bewegungssystems	110
2.5.5	Arthrose-Entstehung am Beispiel der Koxarthrose	98	2.7 Biomechanik des Nervensystems	112	
2.5.6	Entlastungsmechanismen des Patienten mit Koxarthrose	99	2.7.1	Aufbau	112
2.5.7	Beispiele zu Gelenkkraften im Hüftgelenk	101	2.7.2	Reaktionen des Nervensystems auf mechanische Überbelastung	114
2.5.8	Einfluss des Antetorsionswinkels auf die Überdachung des Caput femoris	102	2.7.3	Reaktion des Nervensystems auf mechanische Unterbelastung	118
			2.8 Biomechanik des kardiopulmonalen Systems	119	

3 Physiologie, Leistungsphysiologie, Pathophysiologie 129

Wolfgang Laube

3.1 Biologische Grundlagen – Reaktions- und Aktionsfähigkeit lebender Organismen	129	3.2.10	Muskeltonus – biophysikalische und neurophysiologische Zustandsgröße	201	
3.1.1	Ruhemembranpotenzial (RMP)	131	3.3 Logistiksysteme des sensomotorischen Systems: die funktionelle Kette der Sauerstoffaufnahme	210	
3.1.2	Aktionspotenzial (AP)	133	3.3.1	Biologische Grundlagen der Sauerstoffaufnahme	210
3.1.3	Leitung der Aktionspotenziale	135	3.3.2	Sauerstoffaufnahme der Lunge	210
3.1.4	Die chemische Synapse	137	3.3.3	Herz-Kreislauf-System und Atemgastransport	217
3.1.5	Bahnung und Hemmung	141	3.3.4	Sauerstoffaufnahme des Blutes.....	228
3.2 Sensomotorisches System (SMS) – Schnittstelle zwischen Mensch und Umwelt	144	3.3.5	Energiestoffwechsel	231	
3.2.1	Grundelemente und Funktionsweisen	144	3.3.6	Säure-Basen-Haushalt	236
3.2.2	Was ist das sensomotorische System? ..	145	3.3.7	Wasser- und Elektrolythaushalt.....	238
3.2.3	Sensoren	145	3.3.8	Temperaturregulation	239
3.2.4	Aufsteigende sensorische Leitungsbahnen	153	3.3.9	Neurovegetatives und hormonelles Regulationssystem	242
3.2.5	Leistungen der verschiedenen Ebenen des sensomotorischen Systems	157	3.4 Leistungsphysiologie	247	
3.2.6	Absteigende motorische Leitungsbahnen	167	3.4.1	Leistungsfähigkeit und Adaptationen des sensomotorischen Systems und der Logistiksysteme	247
3.2.7	Motorische Vorderhornzellen (α - und γ -Motoneurone), motorische Einheiten (ME) und Kraftabstufung (Rekrutierungsordnung)	169	3.4.2	Zyklus Belastung–Beanspruchung–Ermüdung–Erholung–Adaptation	249
3.2.8	Skelettmuskel	187	3.4.2	Koordination	259
3.2.9	Grundprinzip der Bewegungsprogrammierung und Bewegungsregulation	196	3.4.3	Ausdauer	267
			3.4.4	Kraft	281

2.3.4 Reaktionen des Knochens auf Unterbelastung

Wie jedes Gewebe des Organismus atrophiert auch das Knochengewebe bei verminderter Belastung. Die Tätigkeit der Osteoklasten überwiegt dann die der Osteoblasten. Dabei wird organische und anorganische Knochenmasse abgebaut. Der Knochen verliert an Belastbarkeit (Klümper 1982). Am deutlichsten ist dies bei Astronauten beobachtet worden, die längere Zeit im schwerelosen Raum zugebracht und an Knochenmasse verloren haben. Doch auch bei Patienten, die eine längere Bettruhe einhalten müssen, oder bei älteren Menschen, die sich weniger bewegen, vermindert sich die Knochenmasse und es bildet sich die „physiologische“ Inaktivitäts-Osteoporose. Physiologisch ist sie als folgerichtige Reaktion auf Nichtgebrauch. Durch Druckbelastung können die Osteoblasten zu vermehrter Aktivität angeregt werden, Knochenmasse aufzubauen. Daraus resultiert der kausale physiotherapeutische Ansatz der Behandlung der Osteoporose durch Druckbelastung in Form von dynamischer Muskelarbeit (Bewegung).

Beispiel Osteoporose: Die Knochendichte der LWS und des Femurschenkelhalses kann schon allein durch regelmäßiges Training auf dem Fahrradergometer erhöht werden (z.B. 3× wöchentlich 30 min bei 60–80% der maximalen Herzfrequenz) (Bloomfield et al. 1993).

2.4 Biomechanik der Bandscheibe

2.4.1 Aufbau

Die Wirbelsäule ist ein komplexes Organsystem des Bewegungsapparates, dessen übereinander liegende Wirbelkörper im beweglichen Bereich vom 2. Halswirbel bis zum Sakrum durch 23 Bandscheiben miteinander verbunden sind. Diese bilden eine spezielle Form der faserknorpeligen Symphyse: kalzifizierter hyaliner Knorpel liegt auf den knöchernen Wirbelkörpern und geht in fibrösen Knorpel über. Der Anulus fibrosus enthält als Faserknorpel viele Kollagenfasern, die parallel verlaufend in Lamellen angeordnet sind. Die Ausrichtung der Fasern einer Lamelle ist jeweils entgegengesetzt zu der Ausrichtung der Fasern der benachbarten Lamellen. Ihr Verlauf bildet mit der Horizontalen einen Winkel von ca. 30° (Abb. 2.16). Sie umschließen einen faserärmeren Teil, den Nu-

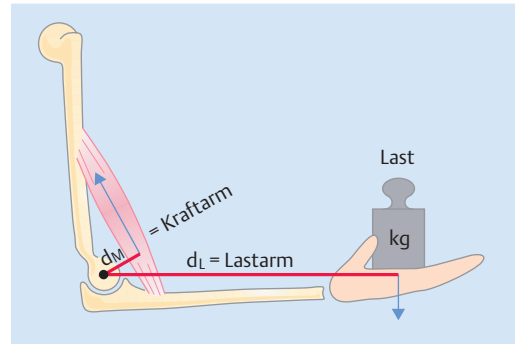


Abb. 2.15 Der Knochen als Hebel.

2.3.5 Der Knochen als Hebel

Der Knochen stellt einen Hebel dar, auf den die Kraft der Muskeln einwirkt (Abb. 2.15). Die mechanische Analyse dieses Systems erlaubt dem Physiotherapeuten, das Verhältnis von (Körper-)Last und (Muskel-)Kraft am Knochenhebel und den Druck im Gelenk bzw. in dazwischenliegenden Strukturen wie den Bandscheiben der Wirbelsäule zu berechnen. Dabei beinhaltet die graphische Darstellung den Nachteil der zweidimensionalen Betrachtungsweise eines dreidimensionalen Geschehens. So herausgefundene Werte gelten daher nur als Annäherungswerte, die jedoch bei der Dosierung der Physiotherapie hilfreich sind.

cleus pulposus, der sich von der Chorda dorsalis ableitet und wie der Anulus ein hohes Wasserbindungsvermögen aufweist. Durch die Abnahme der Wasserbindungskapazität und die zusätzlich eintretende Fibrosierung der Bandscheibe (Palastagna et al. 1994) entsteht der Elastizitätsverlust im Alter (Junqueira u. Carneiro 1992).

Der hohe Wassergehalt (>70%) von Anulus fibrosus und Nucleus pulposus ist für die Elastizität und Widerstandsfähigkeit der Bandscheibe wichtig. Sie ist in den peripheren Bezirken nur gering durchblutet, was für den die Nährstoffe transportierenden Flüssigkeitsaustausch unzureichend ist. Der Wirbelkörper selbst ist gut durchblutet. Von ihm aus diffundieren die Nährstoffe durch die knorpelige Schicht zwischen Wirbelkörper und Discus intervertebralis (Dhenin 1990). Dieser Stoffaustausch kann durch den Wechsel zwischen Druck



Abb. 2.16 Verlauf der kollagenen Fasern im Anulus fibrosus.

und Entlastung beschleunigt werden. Rhythmische Bewegung ist daher ein wichtiger Faktor für die Verbesserung der Ernährung der Bandscheiben. Bei unserer bewegungsarmen sitzenden und stehenden Lebensweise überwiegt der Druck zeitlich gesehen oft die Entlastung. Da die Flüssigkeitsaufnahme bei Druckentlastung exponential ansteigt, d. h., dass sie anfangs hoch ist und dann langsam geringer wird (Kapandji 1985), empfiehlt es sich, mehrere kurzzeitige Liegepausen während des Tages einzulegen. Dieses Verhalten haben die Menschen während verschiedener Epochen ausgeübt, wie z. B. die antiken Griechen und Römer, die im Liegen aßen, Besuch empfangen usw.

Das wasseranziehende Verhalten der Bandscheibe wird sichtbar, wenn man morgens und abends die Körpergröße misst. Durch den ständigen Kompressionsdruck während der aufrechten Haltung am Tag verliert die Bandscheibe Flüssigkeit. Deshalb ist die Wirbelsäulenhöhe und damit die Körpergröße abends ca. 1–2 cm geringer als morgens (Leutert u. Schmidt 1997). Während der horizontalen Lage in der Nacht kann die Flüssigkeit bei entspanntem Muskeltonus wieder angesaugt und die ursprüngliche Höhe wiedergewonnen werden. Der Auftrieb und die wärmebedingte Muskelentspannung im

warmen Bewegungsbad beschleunigen die Flüssigkeitsaufnahme ebenfalls.

Die Randbezirke der Bandscheibe sind sensibel innerviert, besonders die dorsolateralen, und somit schmerzempfindlich (Bogduk 1994). Die Regeneration verletzten Bandscheibengewebes verläuft in den durchbluteten Randbereichen narbig, in den avaskulären Bereichen hingegen bleiben die Risse bestehen.

Die Aufgaben der Bandscheibe sind:

- Übertragung der Druck- und Zugkräfte von einem Wirbel zum benachbarten
- Abstandhaltung zwischen den Wirbelkörpern, um Bewegungen um Achsen im Segment zu erlauben.
- Abbremsen von Scher- und Gleitkräften (Stabilität des Wirbelsegments)
- Abpuffern von Stoßbelastungen nur gering und vorwiegend bei weichen Stoßbelastungen; die Hauptpufferung geschieht durch die Verbiegung der Wirbelsäule in der Sagittal- und Frontalebene (Müller-Gerbl u. Putz 1997).

Die Bandscheibe wird auf Druck und Zug beansprucht. Zugbeanspruchung kommt bei alltäglichen Bewegungen fast immer im Zusammenhang mit Druckbelastung vor.

Bei reiner Druckbelastung wird die gesamte Bandscheibe komprimiert. Ihre Ränder wölben sich seitlich leicht vor. Sie funktioniert dabei ähnlich wie ein Wasserkissen, das mehrere untereinander in Verbindung stehende Kammern enthält. Diese sind im Zentrum groß (Bereich des Nucleus pulposus) und in den Randbereichen klein (Bereich des Anulus fibrosus). Als Wasserkissen erlaubt die Bandscheibe eine gleichmäßige Kraftübertragung von einem Wirbel zum benachbarten in unterschiedlichen Stellungen des Wirbelsäulensegmentes.

Aufgaben der Bandscheibe: Kraftübertragung zwischen zwei Wirbeln, Bewegung ermöglichen durch Abstandhalten zwischen zwei Wirbeln, Segment stabilisieren, gering nur Abpuffern von Stößen. Bei axialer Belastung der Wirbelsäule erfolgt eine Verteilung der Druckbeanspruchung des Nucleus pulposus auf den gesamten Anulus fibrosus, dessen Fasern eine Zugbeanspruchung erfahren. Bei nicht axialer Belastung erfolgt die Weiterleitung der Beanspruchung betont auf einige Teile des Anulus fibrosus, deren Zugbeanspruchung dadurch um ein Vielfaches ansteigt. Der Wechsel zwischen Druck und Entlastung beim Bewegen fördert die Trophik der Bandscheibe.

2.4.2 Reaktionen der Bandscheibe auf Überbelastung

Steigt der Druck in der Bandscheiben, kommen die Fasern im Anulus fibrosus unter vermehrte Zugspannung und können „einreißen“. Das Material der Bandscheibe drängt dann durch die gerissenen Lamellen nach außen und kann als Protrusion (Bandscheibenvorwölbung) hervorragen. Reißen auch die äußeren Teile der Bandscheibe ein, so „fällt“ Bandscheibenmaterial als Prolaps (Bandscheibenvorfall) heraus (**Abb. 2.17a–b**). Die Richtung dieses Vorfalls kann sowohl horizontal sein wie z.B. nach dorsal oder dorso-lateral als auch vertikal in die Grund- oder Deckplatte des benachbarten Wirbelkörpers (Schmorl-Knötchen).

Bei axialer Kompression kommt es jedoch kaum zu Bandscheibenvorfällen. In südlichen Ländern sieht man häufig Menschen, die große Lasten auf dem Kopf tragen. Dabei nehmen sie eine aufrechte Haltung ein und haben keine Beschwerden. Eine axiale Kompression des Wirbelsäulensegmentes über die Belastungsgrenze hinaus führt zur Endplattenfraktur (White u. Panjabi 1990). Diese Endplattenfraktur setzt möglicherweise chemische Stoffe frei, die eine Degeneration der Bandscheibe initiieren.

Auch muskuläre Anspannung führt zur Erhöhung des intradiskalen Drucks (Wilke et al. 1999; Drevet et al. 1990), der bei eingerissenem Anulus die Läsionsstelle vermehrt beanspruchen kann. Patienten mit akutem Bandscheibenvorfall vermeiden daher größere muskuläre Arbeit. Sind sie während ihrer Genesung dennoch dazu genötigt, nehmen sie automatisch eine „gerade“ Haltung ein, weil bei axialer Kompression die Beanspruchung der Bandscheibe geringer ist als bei nicht axialer.

Eine axiale Zugbelastung der Wirbelsäule tritt bei physiologischen Alltags- und sportlichen Aktivitäten kaum auf. Selbst wenn der Mensch sich mit den Händen an eine Stange hängt oder von einem Gurt um den Thorax in der Luft gehalten wird, bleibt die Anspannung der Rumpfmuskeln hoch (Turbelin u. Peyranne 1993).

Die Zugspannung in Teilen der Bandscheibe steigt jedoch an, wenn die Wirbelsäule nicht axial belastet wird (White u. Panjabi 1990). Dabei wird die Flüssigkeit in der Bandscheibe in die Bereiche verschoben, die von der Druckeinwirkung entfernt sind. Dort steigt dadurch die Spannung der kollagenen Fasern des Anulus fibrosus. Diese Spannungszunahme bewirkt eine Begrenzung der Bewegung und stellt einen physiologischen Mechanismus dar. Die kollagenen Fasern des Anulus fibrosus sind hierfür gebaut.

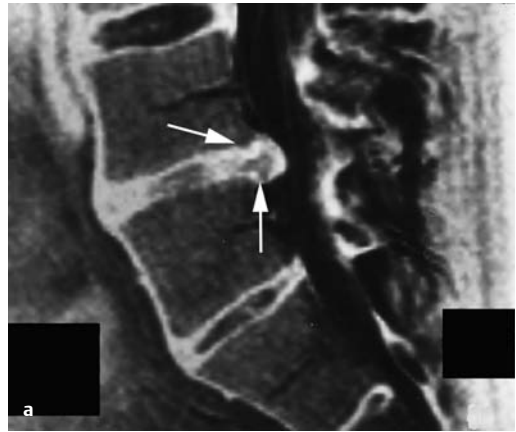


Abb. 2.17a–b Bandscheibenvorfälle sichtbar in der Kernspintomografie. **a** Im Bereich der LWS. **b** Im Bereich der HWS (aus: Niethard 2003).

Erst wenn in dieser nicht lotgerechten Stellung der Wirbelsäule die Belastung zu lange anhält und/oder die Belastung zu groß ist bzw. die Belastbarkeit zu klein, wirkt sie sich negativ aus. Belastungen dieser Art kommen für die dorsalen Strukturen z.B. beim lang dauernden „krummen“ Sitzen (globaler Rundrücken) und beim Heben großer Gewichte mit gekrümmtem Rücken vor. Die ventralen Strukturen der Lendenwirbelsäule erfahren beim Stehen mit Hyperlordose primär die Zugbeanspruchung.

Die Zugspannung im Anulus fibrosus führt bei endgradiger Einwirkung über längere Zeit zur Dehnung und bei Belastungen, die oberhalb der Belast-

barkeitsgrenze liegen, zur Ruptur der kollagenen Fasern. Da die peripheren Randbezirke des Diskus innerviert sind, empfindet der Patient Schmerz bei hohen Beanspruchungen bzw. Läsionen in der äußeren Bandscheibe (Bogduk 1994) und nimmt eine typische Schonhaltung ein (**Abb. 2.18**).

Beispiele Bandscheibenvorfall:

- Das auslösende Ereignis für Bandscheibenvorfälle in den Wirbelkörper (Schmorl-Knötchen) ist unbekannt. Vorstellbar sind zu hohe Druckbelastungen der Wirbelsäule bei Sprüngen, ein „Tritt ins Leere“ beim Verfehlen der Bordsteinkante u.ä. Axiale Belastungen führen wahrscheinlich zu zentral gelegenen Schmorl-Knötchen. Druckbelastungen in Flexion verlagern die Belastungslinie nach ventral und erzeugen eher dort die Schmorl-Knötchen. Diese Mechanismen spielen sich auch beim Morbus Scheuermann ab.
- Das Heben eines ungewohnt schweren Gegenstandes mit krummen Rücken führt zur Zugbelastung in den dorsalen Bandscheibenanteilen durch die Flexion der Wirbelsäule. Diese Zug-



Abb. 2.18 Typische Schonhaltung bei Schmerzen bei Bandscheibenschädigung (aus: Niethard 2003).

belastung wird durch den Druck verstärkt, der durch das Heben (langer Lasthebel) und die Muskelkraft erzeugt wird. Wie hoch die Belastung und wie sehr eine verminderte Belastbarkeit vorhanden sein muss, damit die Bandscheibe zerreißt, ist unklar (s.a. 2.4.3). Entstehen kann ein Riss im Bandscheibengewebe, ohne oder mit Protrusion oder gar Prolaps.

Die entscheidenden Faktoren Dauer und Höhe der einwirkenden Belastung sind zwar experimentell messbar, jedoch hängt ihre Auswirkung von der individuellen Belastbarkeit des Patienten ab. Daher können keine festen Grenzwerte genannt werden. Nach Verletzungen (z.B. Bandscheibenvorfall) oder längerer Schonung muss mit einer Minderung der Belastbarkeit gerechnet werden. Die Belastung sollte in solchen Fällen anfangs gering sein, um durch progressive Steigerung ein funktionelles Maß an Belastbarkeit zu erreichen.

Mittlere funktionelle Reize sollten auf die gesunde Bandscheibe ausgeübt werden (s. auch Kapitel 2.1). Mit dem Begriff funktionell ist die Belastung gemeint, die dem Bewegungsapparat des Individuums in seinem Alltag bei beruflichen, sportlichen und freizeithlichen Tätigkeiten zugemutet wird. Für einen gesunden Rücken sind endgradige Bewegungen in allen Richtungen und Belastungen wie das Heben von Gewichten funktionell. Bandscheiben, die bei körperlich arbeitenden Menschen viel bewegt und belastet werden, benötigen als so genannten Ausgleich eher eine Entlastung als vorwiegend sitzende tätige Menschen, denen für die Verbesserung der Ernährung ihrer Bandscheiben mit Bewegung besser gedient ist.

Dieses Prinzip eines physiologischen Bewegungsverhaltens, das der Belastbarkeit der einzelnen Strukturen angepasst und entsprechend den Anpassungsvorgängen und -möglichkeiten des Organismus gestaltet wird, bildet den (mechanischen) Kern der so genannten „Rückenschule“: aufrechte und schonende Haltung der Wirbelsäule bei geringer Belastbarkeit und zunehmende dynamische Belastung der Wirbelsäule durch das gesamte Bewegungsausmaß im Laufe der Genesung mit dem Ziel der Erhöhung der Belastbarkeit (Schomacher 2001). Durch das so genannte Belastungstraining bei chronischen Rückenpatienten, ergänzt durch psychosoziale Aspekte, wurde eine signifikante Wiederaufnahme der Arbeit festgestellt (Voisin et al. 1994; Lindström et al. 1992).

Zu einer Überlastung der Bandscheibe kommt es, wenn zu lang belastet wird und/oder die Belastung zu hoch ist (Faktoren Belastungsdauer und Belastungshöhe). Die therapeutische Schwierigkeit besteht in der Bestimmung der individuellen Belastbarkeitsgrenze des Patienten. Funktionelle Rückenschule ist eine Form der Vermittlung, bei der die Belastung des Patienten seiner Belastbarkeit angepasst und entsprechend dem Anpassungsvermögen des Organismus bis zu den funktionellen Bedürfnissen und physiologischen Möglichkeiten des Patienten durch Training gesteigert wird. Ergänzt wird sie durch Schmerzbewältigungsstrategien u. ä.

2.4.3 Reaktionen der Bandscheibe bei Unterbelastung

Unterbelastung einer Struktur bedeutet, sie der Reize zu berauben, für die sie gebaut ist. Wird die Bandscheibe zu wenig auf Druck und Zug beansprucht, führt das zu einer Atrophie und einer verminderten Belastbarkeit ihrer Strukturen. Ein Schonen ist daher nur auf verletzte bzw. vermindert belastbare Bandscheiben und entsprechend der Regenerationsmöglichkeiten zeitbegrenzt anzuwenden.

Patienten mit akutem Bandscheibenvorfall verbleiben anfangs in der entlastenden und raumgebenden Schonhaltung, die durch reflektorische Muskelverspannungen gehalten wird, und vermeiden unnötige Belastungen. Mit Rückbildung des akuten Stadiums nimmt die muskuläre Abwehrspannung ab, und viele Patienten ignorieren mehr und mehr die Hinweise zum „geraden Sitzen, geraden Heben“ etc. Die Läsion heilt und das Narbengewebe der Bandscheibe passt sich den zunehmenden Belastungen an.

Erst wenn die Belastbarkeitsgrenze mit den oben genannten Faktoren der Dauer und der Höhe der Belastung überschritten wird, kommt es zu erneuten Verletzungen. Je weniger die Bandscheibe „trainiert“ wurde, desto niedriger ist ihre Belastbarkeitsgrenze und desto leichter treten erneute Läsionen auf. Das Überschreiten der Belastbarkeitsgrenze findet sich in der Patientengeschichte einer Bandscheibenläsion immer wieder, wenn z. B. bei ungewohnten Tätigkeiten wie Wohnungsumzug, Koffertragen in den Ferien u. ä. ein plötzlich einschließender Rückenschmerz auftritt (der „Hexenschuss“, wie er 1487 im in Straßburg herausgegebenen Hexenhammer erstmals benannt wurde).

Die Schwierigkeit der Therapie liegt neben der Symptomlinderung im Abschätzen der individuellen Belastbarkeitsgrenze für Trainingszwecke.

Fallbeispiel „Hexenschuss“: Der 43-jährige Patient berichtet, vor 2 Tagen ungewohnt lange am Computer im Sitzen gearbeitet zu haben. Als er aufstand, „schoss es ihm plötzlich ins Kreuz“ und ein heftiger Schmerz trat im unteren Rücken auf, der ihn auf den Boden zwang. Dort lag er mit gekrümmtem Rücken und konnte sich nur mühsam auf allen Vieren ins Bett schleppen. Der gerufene Hausarzt gab ihm eine Spritze gegen den Schmerz. Am nächsten Tag war ein Aufstehen mit Schmerz und Schonhaltung in Flexion kurzzeitig möglich. Ärztliche Diagnose: Bandscheibenvorfall L5-S1.

Möglicher Pathomechanismus: Ruptur der dorsalen Bandscheibe nach ungewohnt langem Sitzen (lange Dauer) in Flexion (hohe Zugspannung auf die dorsalen Bandscheibenteile) beim plötzlichen Aufstehen (Belastungserhöhung) auf dem Boden einer wahrscheinlich verminderten Belastbarkeit. Es ist schwer zu sagen, ob beim jeweiligen Ereignis die Belastung zu hoch, die Belastbarkeit zu gering war oder beides zutraf (s. a. 2.4.2).

Eine Belastung, die unterhalb der individuellen Belastbarkeitsgrenze liegt, führt zur Atrophie und zur Minderung der Belastbarkeit der Bandscheibe. Eine verminderte Belastbarkeit wird bei ungewohnt hohen Belastungen zum Risiko (eine mögliche Rezidivursache bei Rückenpatienten). Eine Belastung ist dann physiologisch, wenn sie ab und zu an die individuelle Belastbarkeitsgrenze heran reicht, um sowohl Atrophie als auch Überbelastung zu vermeiden.

Um die Belastung der Bandscheibe besser einschätzen zu können, sei im Folgenden erklärt, wie das Wirbelsäulensegment als Hebelsystem und als schiefe Ebene betrachtet werden kann. Die Beurteilung der Hebellängen und der Neigung der schiefen Ebene findet eine praktische Anwendung in der Veränderung verschiedener Alltagsaktivitäten wie Heben und Sitzen.

2.4.4 Belastung an der Wirbelsäule

Die Bewegungsachse des Wirbelsegments bildet den Drehpunkt eines zweiarmigen Hebels (**Abb. 2.19**). Dieser setzt sich aus dem ventral gelegenen Lastarm der Last und dem dorsal gelegenen Kraftarm der gegenhaltenden autochthonen Rückenmuskeln zusammen. Der Krafthebel der autochthonen Rückenmuskeln ist lumbal umso größer, je ausgeprägter die LWS-Lordose ist. Um in diese Lordosestellung zu gelangen, müssen sich die Rückenmuskeln jedoch

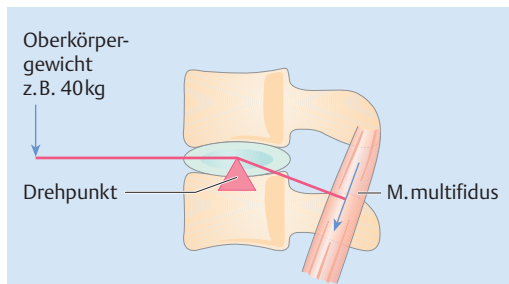


Abb. 2.19 Hebelsystem des Wirbelsegmentes.

kontrahieren. Dadurch wird der Druck auf die Drehachse des zweiarmigen Hebels verstärkt. Die Belastung der LWS z. B. beim Tragen ist daher in leichter Lordose am geringsten. Dann ist der Kraftarm für die autochthone Rückenmuskulatur groß und die Muskelkontraktion zur Betonung der Lordose noch gering (Daggfeldt 1996).

Der Hebel der Ligamente ist kleiner als derjenige der Muskeln, weil die Ligamente gelenknaher und damit auch näher an der Drehachse des Hebelsystems liegen. Lässt der Mensch sich in seinen Bändern der Wirbelsäule „hängen“, müssen diese dem Lastarm des Körpergewichts „entgegenhalten“. Da ihr Kraftarm aber kleiner ist als der der Muskulatur, müssen sie mehr (passive) „Kraft aufwenden“. Hinzu kommt der verlängerte Hebelarm der Last in der „schlaffen“

Wirbelsäulenhaltung und die Dehnung der dorsalen Strukturen. Mehrere Argumente sprechen also gegen eine lang dauernde schlafe Haltung.

Am einfachsten lässt sich die Belastung der Wirbelsäule durch Verkleinerung des Lastarms reduzieren, indem man bei aufrechter Körperhaltung das Gewicht möglichst nahe am Rumpf hält (Abb. 2.20).

Übergewicht vergrößert die ventrale Rumpflast und damit sowohl das Gewicht der Last, als auch den Lastarm, sodass die aufzubringende Kraft der Rückenmuskeln ansteigen muss – und damit die Kompression des Diskus intervertebralis zunimmt (Abb. 2.21).

Ebenso wird der Lastarm des Körpergewichts durch eine krumme Sitzhaltung verlängert (Abb. 2.22). Diese wird durch die übliche Höhe der Tischmöbel begünstigt. Die vom Comité Européen de Normalisation (CEN 1982) empfohlene Tischhöhe von 65 cm ist um ca. 6,6 cm zu niedrig (Mandal 1990). Denn die durchschnittliche Körpergröße ist im 20. Jahrhundert um ca. 10 cm gestiegen. Höhere Tische und eine nach vorne abwärts geneigte Sitzfläche erleichtern die Aufrichtung der Wirbelsäule und verringern somit die Länge des Lastarms des Oberkörperschwerpunktes signifikant (Mandal 1990). Diese Hilfsmittel erleichtern das gerade Sitzen, können die schlafe Sitzhaltung jedoch nicht verhindern.

Das Hebelsystem im Wirbelsegment ist ein Argument für die Empfehlung der axialen Belastung

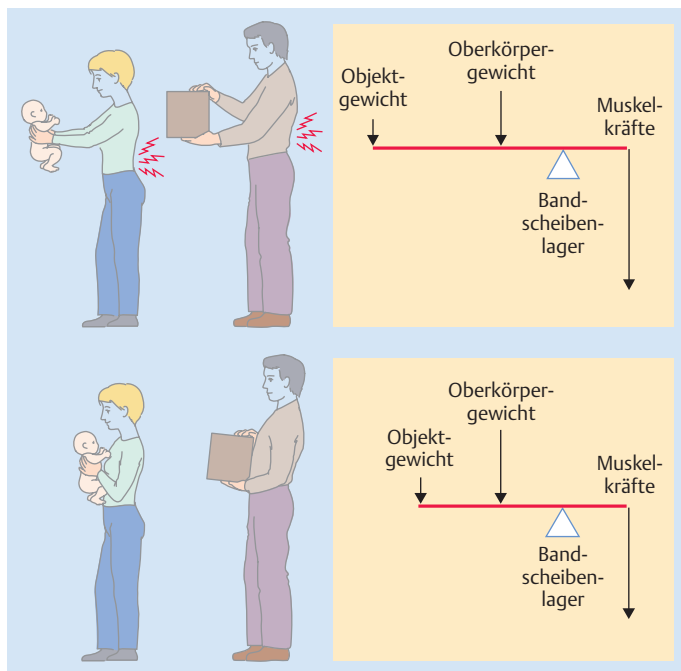


Abb. 2.20 Eine Verkürzung des Lastarms verringert die notwendige Kraft der Rückenmuskeln und damit den Kompressionsdruck auf die Bandscheibe.

3.2 Sensomotorisches System (SMS) – Schnittstelle zwischen Mensch und Umwelt

3.2.1 Grundelemente und Funktionsweisen

Dieses Kapitel zeigt, dass das SMS die aktive Komponente des Stütz- und Bewegungssystems ist. Es hat während jeder Bewegung gleichzeitig 2 sehr komplexe, miteinander untrennbar verknüpfte Leistungen zu erbringen:

- **Zielsensomotorik:** Sie beinhaltet alle sensomotorischen Komponenten, die der Aufgabe bzw. der Zielstellung der Bewegungshandlung dienen.
- **Stützensensomotorik:** Diese umfasst alle sensomotorischen Komponenten, mit denen Haltung, Stellung und Gleichgewicht gewährleistet werden.

Zielsensomotorik. Sie beinhaltet:

- dynamisches Erkennen der aktuellen Haltung, Stellung und des Funktionszustands der Muskulatur, der Sehnen-, Band-, und Kapselstrukturen,
- Auswahl und Anpassung der sensomotorischen Handlungsstrategie an die Aufgabenstellung und die Situation,
- Vorwegnehmen (Antizipieren) des Bewegungsergebnisses, als Basis der Bewegungskontrolle und einer potenziellen Bewegungskorrektur,
- Programmieren und Ausführen der gewünschten Bewegung in einem rückgekoppelten und damit geregelten Prozess.

Dementsprechend werden Muskeln und Muskelgruppen zum richtigen Zeitpunkt und über das richtige Zeitintervall (timing) eingesetzt. Die der Aufgabe und Situation angepasste Kraft und Kontraktionsgeschwindigkeit werden entwickelt. Dann entscheiden die zum Bewegungsprogramm gehörende Regulation der Logistiksysteme und die energetische Ausstattung der Muskelfasern, mit welcher Dauer und welcher Intensität die Bewegung ausgeführt werden kann.

Stützensensomotorik. Sie ist verantwortlich für:

- die aktive statische und/oder dynamische Sicherung und Stabilisierung von Haltung, Stellung und Gleichgewicht mit Hilfe der spinalen und supraspinalen sensomotorischen Grundbausteine.

Bei jeder Körperhaltung oder Bewegung sind die zielgerichteten Muskelaktivitäten zwingend mit jenen zur Aufrechterhaltung von Haltung, Stellung und Gleichgewicht verbunden.

Die sensomotorische Aktivität ist die direkt sichtbare Komponente der Funktion des SMS. Die gleichzeitig ablaufende Stützensensomotorik ist z.B. an der Bewegungssicherheit, also an den Merkmalen der Bewegungsqualität, zu erkennen.

Die Bewegungsqualität hat aus der Sicht des SMS zwei Dimensionen:

- Sie charakterisiert das Erreichen des Zieles. Für einen Musiker bedeutet dies, den richtigen Ton zum richtigen Zeitpunkt zu treffen, und für den Sportler, entweder den Ball im Netz unterzubringen oder auch mit einem Wurfgerät (Kugel, Speer) eine hohe Weite zu erreichen.
- Die Bewegungsqualität ist mit der Regulation von Haltung, Stellung und Gleichgewicht verbunden, z.B. hat das Gehen zwar zum Bewegungsziel geführt, aber es bestand eine hohe Unsicherheit und Sturzgefahr.

Beide Dimensionen der Bewegungsqualität kommen nie für sich allein vor. Beim gesunden Menschen laufen die Bewegungen des täglichen Lebens scheinbar ohne Anstrengung ab. Sie sind mühelos und fließend, nachdem sie im Prozess der sensomotorischen Entwicklung mühevoll durch Wiederholung erlernt wurden. Werden Bewegungen (z.B. Geräteturnen, Eiskunstaufen; Spielen eines Instruments; Singen) in einem Trainingsprozess sehr häufig wiederholt (und bestehen zusätzlich günstige genetische Voraussetzungen), so können komplizierte sensomotorische Handlungen mit sehr oder auch extrem hohem Schwierigkeitsgrad und hoher Bewegungsqualität ausgeführt werden. Das bedeutet, diese Bewegungen laufen nach tausenden Trainingswiederholungen dann ebenfalls scheinbar mühelos und automatisch ab. Es bleiben aber immer Willkürbewegungen, denn ihre Ausführung kann jederzeit abgebrochen werden. Die hohe Qualität kann jedoch nur durch weiteres Training erhalten und abgesichert werden.

Bei einem Patient nach einem Schlaganfall ist (je nach Schädigungsort und -umfang) nichts mehr von der Mühelosigkeit des Sitzens, Stehens oder auch Gehens zu verspüren. Jede Bewegung wird zur großen Anstrengung und die alltäglichen Handlungen müssen in einem sehr langen Rehabilitationsprozess durch ständiges Training mühevoll neu erlernt werden. Der Lernerfolg ist sowohl von der Schädigung als auch sehr wesentlich vom frühestmöglichen Beginn und dem Umfang des systematisch

und gezielt durchzuführenden Trainingsprozesses abhängig.

Auch ein Patient nach einer Verletzung des vorderen Kreuzbandes weist noch nach vielen Jahren Veränderungen in der Funktion des M. quadriceps femoris auf. Der Muskel ist nach wie vor mehr oder weniger atrophiert und das Fine-tuning im Bewegungsvollzug ist, gegenüber der unverletzten Situation, vermindert. Dies basiert auf den verletzungsbedingten strukturellen Veränderungen im SMS, die das Zusammenspiel der Teilkomponenten beeinflusst.

Grundsätzlich muss eine bleibend geänderte Struktur des SMS auch immer eine bleibend geänderte Funktion nach sich ziehen.

Zusammenfassung

- Das SMS erbringt 2 sehr komplexe Leistungen: die Zielsensomotorik und die Stützensensomotorik.
- Ziel- und Stützensensomotorik sind untrennbar miteinander verknüpft: Zielgerichtete Bewegung einerseits und Bewegungssicherheit (Haltung, Stellung, Gleichgewicht) andererseits kommen nur gemeinsam vor.
- Geänderte Struktur des SMS = geänderte Funktion des SMS.

3.2.2 Was ist das sensomotorische System?

Das SMS besteht aus komplex kreisförmig zusammengesetzten Strukturen, die gemeinsam alle Bewegungsleistungen geregelt ausführen.

Das SMS besteht aus den folgenden kreisförmig miteinander verknüpften anatomischen Strukturelementen:

- Rezeptoren: Übersetzung der externen und internen Reize,
- afferente Bahnsysteme: Transport der transformierten Informationen zu den neuronalen Netzwerken (aufsteigende Bahnsysteme),
- spinale und supraspinale neuronale Netzwerke: Verarbeitung der Informationen zu einer gerichteten Antwort,
- efferente Bahnsysteme: Transport der erarbeiteten Antwort der neuronalen Netzwerke als Impulsmuster zu den Effektoren,
- Effektoren: Beantwortung mit der spezifischen Muskelfunktion.

Die Ausführung der Bewegung ist zugleich die Quelle erneuter sich dynamisch ändernder externer und interner Reize, wodurch der Funktionskreis des SMS geschlossen wird (**Abb. 3.10**).

Das SMS ist immer als Gesamtsystem aktiv, welche Bewegungsleistungen auch erbracht werden. Es ist in seiner physiologischen Funktion ein unteilbares System.

Daraus leitet sich ab, dass durch Training, egal welcher Zielstellung, immer die gleiche Gesamtstruktur angesprochen und in Funktion gesetzt wird. Die unterschiedlichen Wirkungen des Trainings im SMS sind Ausdruck der Merkmale seiner Funktion, der belastungsbedingten Beanspruchungen in Art, Intensität und Umfang.

3.2.3 Sensoren

In diesem Kapitel lernen Sie, welche Sensoren im Zusammenhang mit der Bewegung relevant sind und erkennen ihre spezifische Funktionsweise.

Rezeptoren übersetzen die adäquaten Reize in die körpereigene Sprache.

Die Sensoren oder *Rezeptoren* sind die spezifischen Strukturelemente des SMS für die Übersetzung der externen und internen Reize in die körpereigene Sprache. Die Sensoren sind auf Reizqualitäten spezialisiert und reagieren auf den adäquaten Reiz extrem empfindlich. Es können *primäre* oder *sekundäre Sensoren* unterschieden werden.

Primäre Sensoren. Die primären Sensoren (sensorische Neurone) sind pseudounipolare Nervenzellen. Das Besondere ist, dass sich die beiden Fortsätze der Zelle an ihrem Ursprung zunächst aneinander legen und verschmelzen. Nach einem kurzen gemeinsamen Verlauf teilen sie sich T-förmig in einen peripheren und zentralen Neurit. Der periphere Neurit bildet am Ende die rezeptorische Nervenendigung aus und der zentrale Neurit die Synapsen zu den anderen Nervenzellen im Rückenmark oder in den supraspinalen Neuronenstrukturen. Diese unipolaren, sensiblen Neurone bilden das *Ganglion spinale*, und liegen in den Hirnnervenganglien des Hirnstamms und den Trigemuskernen des Mittelhirns. Die primären Rezeptorzellen (Hören, Gleichgewicht, Sehen, Schmecken) besitzen den rezeptorischen Fortsatz mit der rezeptiven Zone. Der Transduktionsprozess führt zur Ausbildung eines Aktionspotenzials auf der

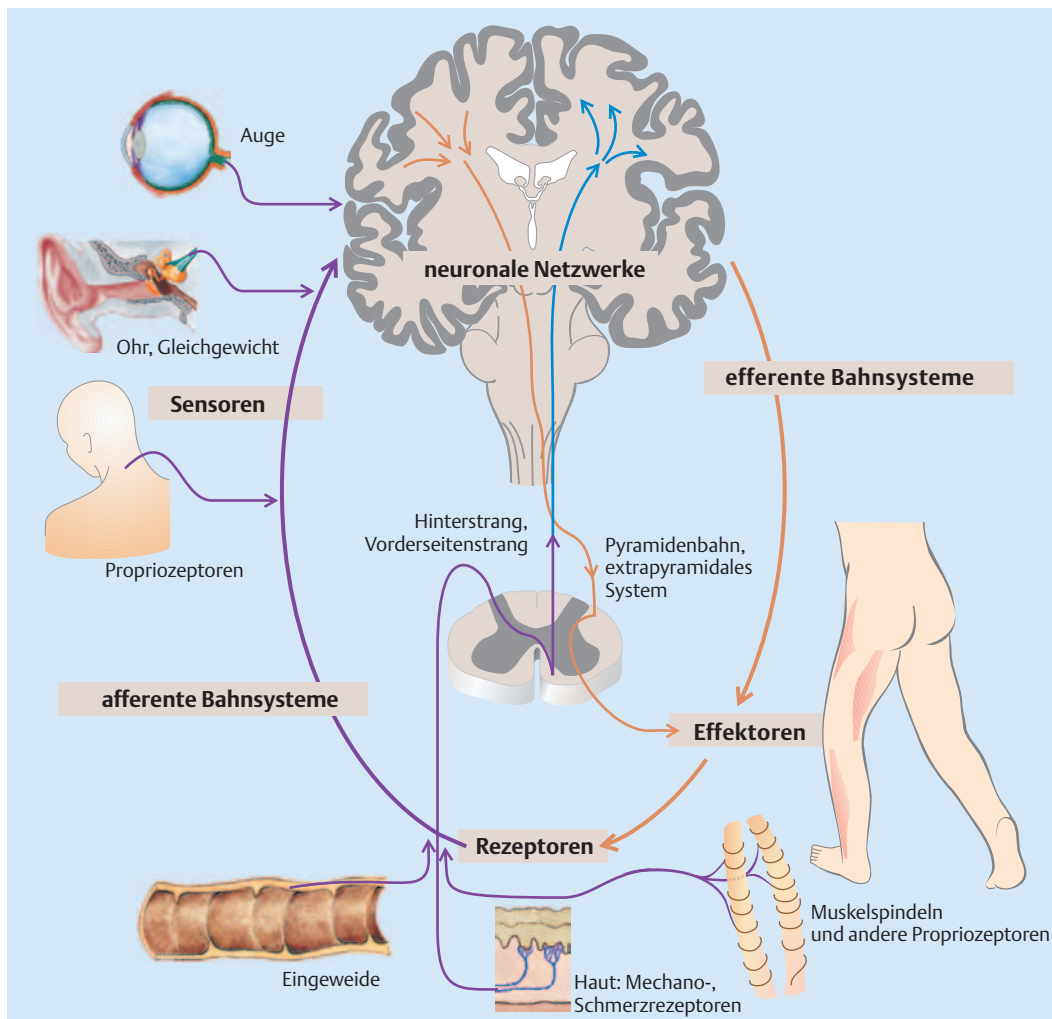


Abb. 3.10 Es sind die kreisförmig miteinander verknüpften anatomischen Strukturelemente des sensomotorischen Systems dargestellt: die Sensoren (Auge, Innenohr, die Halswirbelsäule als Standort der Propriozeptoren, die Haut, Muskeln, die inneren Organe und die auch dort prä-

senten Nozizeptoren) – die aufsteigenden Leitungsbahnen – die Strukturen des ZNS – die absteigenden Leitungsbahnen – die Muskeln / Bänder / Gelenkkapseln / Sehnen, die wieder Sitz der Sensoren sind.

sekundären Sinneszelle nach dem Prinzip der chemischen Synapse (s. S. 137).

Sekundäre Sensoren. Es sind sekundäre Sinneszellen, die von bipolaren Nervenzellen gebildet werden. Der eine Ausläufer ist für den Signalempfang von den primären Rezeptorzellen verantwortlich. Der andere Ausläufer leitet und überträgt die Aktionspotenziale auf die nachgeschalteten Nervenzellen. Diese Nervenzellen liegen in der Netzhaut des Auges und den Ganglien des Hör- und Gleichgewichtsnervs.

Ordnungsprinzipien der Sensoren

Die 3 möglichen Ordnungsprinzipien für Sensoren sind:

- Herkunft des übersetzten Reizes,
- Perzeptionsqualität,
- Reizempfindlichkeit.

Herkunft des übersetzten Reizes. Die Sensoren, welche die Reize aus der Umwelt übersetzen, sind *Exterorezeptoren*. Die *Enterorezeptoren* reagieren auf Reize im Inneren.

4 Trainingslehre

Wolfgang Laube

Biologische Strukturen verändern sich durch gezielte und systematische Beanspruchung und werden leistungsfähiger. Dies ist der biologisch-physiologische Ansatz jeder aktiven Therapieform bzw. des Trainings.

Ziel und Aufgabe der Trainingslehre ist es, zu beschreiben, was Training ist, wie es organisiert, aufgebaut und durchgeführt werden muss, um die Zielstellun-

gen effektiv zu erreichen. Die der Leistungsverbesserung zugrunde liegenden Trainingsprinzipien und Gesetzmäßigkeiten werden aufgezeigt. Sie sind das empirische Ergebnis aus den Erfahrungen der Leistungssportentwicklung und werden von der Trainingswissenschaft systematisiert und mit der Sportmedizin und anderen Wissensgebieten, wie z. B. der Biomechanik, untersucht und weiterentwickelt.

4.1 Training als Behandlungskonzept

Das Training organisiert den Zyklus Belastung-Beanspruchung-Adaptation, in dem die komplexen Veränderungen des Organismus entstehen, die eine gesteigerte Leistungsfähigkeit ausmachen. Dies gilt identisch für den Gesunden und den Patienten. Es gilt eine gesetzmäßige Wechselbeziehung zwischen Belastung, Adaptation und Leistung. Das Training ist die einzige Methode, um diese Komponenten gezielt miteinander zu verknüpfen.

Das Training hat für die Physiotherapie eine große Relevanz, denn mit dem Therapieergebnis soll der Patient wieder in der Lage sein, die physischen Aktivitäten des täglichen Lebens, des Berufs und der Freizeitgestaltung auszuführen. Das bedeutet, er muss:

- möglichst ökonomisch und sicher vielfältige Bewegungen ausführen können (sensomotorische Koordination),
- über den Tag eine große Anzahl von Bewegungswiederholungen durchführen können (Ausdauer, Kraftausdauer),
- Massen bzw. Lasten überwinden oder abbremsen können (Kraft).

Des Weiteren ist die Dekonditionierung am Ursachenkomplex internistischer Erkrankungen beteiligt oder auch eine Erkrankungsfolge. Diese präventiven und therapeutischen Zielstellungen gründen

sich auf den Basisfähigkeiten des sensomotorischen Systems: Koordination, Ausdauer und Kraft. Diese können ausschließlich durch Training auf das erforderliche Leistungsniveau gebracht werden.

Will der Patient eine Leistung wieder erreichen, so muss er, vorbereitet und begleitet durch Maßnahmen der physikalischen und/oder manuellen Therapie, Bewegungen mittels Koordinationstraining neu lernen bzw. umlernen oder verbessern und durch Ausdauer- und Krafttraining die konditionelle Grundlage dafür schaffen.

Sowohl beim Gesunden als auch beim Patienten liegen einer angestrebten Verbesserung der physischen Leistungsfähigkeit immer die gleichen biologischen Zielstellungen und der Einsatz der Mittel und Methoden eines Trainings zugrunde.

- Beim Patienten ist jedoch Folgendes zu beachten:
- medizinische Gegebenheiten, die die Belastbarkeit einschränken und die Nutzung optimaler Trainingsinhalte begrenzen,
- krankheits- oder verletzungsbedingte Veränderungen, die die Trainierbarkeit beeinflussen.

Das Training des Gesunden und des Patienten unterscheidet sich dadurch, dass beim Kranken die krankheits- oder verletzungsbedingten Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen.

4.2 Sensomotorische Hauptbeanspruchungsformen

Die Koordination ist die Basis aller Leistungen des sensomotorischen Systems (**Abb. 4.1**), weil jede Bewegung primär eine bestimmte Qualität und direkt verbunden eine Ökonomie hat. Jede Bewegung ist zunächst eine koordinative Leistung, die aber ohne

die konditionellen Fähigkeiten Kraft und Ausdauer nicht möglich wäre.

Kraft und Ausdauer müssen als Logistikfunktionen der Koordination angesehen werden. Die Kraft entscheidet, mit welcher Quantität die Bewegungs-

überwinden (vgl. **Abb. 3.24a–b**). Die Widerstände sind das Eigengewicht der Körperteile und Zusatzlasten. Sie entstehen durch eine Kombination aus Koordination und Maximalkraft, wobei sich lastabhängig die Anteile verändern. Die *Kraftausdauer* ist die Ermüdungswiderstandsfähigkeit gegenüber lang dauernden Kraftleistungen im Kraftniveau zwischen ca. 35% und 60% der Maximalkraft. Sie ist die Schnittstelle zur Ausdauer.

Es wird zwischen einer allgemeinen und speziellen Kraft unterschieden. Die allgemeine Kraft steht tätigkeits- oder sportartunabhängig zur Verfügung. Die spezielle Kraft ist an sportartspezifische Bewegungsabläufe gebunden.

„Die **Ausdauer gibt es nicht**. Die Ausdauer ist die Widerstandsfähigkeit gegen Ermüdung. Sie sorgt für die Möglichkeit, Leistungen über bestimmte Zeiträume ausführen zu können. Oder die Belastung wird bis zur physischen Erschöpfung einschließlich der psychologischen Beanspruchungsgrenze ausgeführt.

Es können mehrere Kriterien zur Einteilung dienen. Erstens der Umfang der Beanspruchung, indem eine maximale Leistung erreicht werden kann. Daraus ergeben sich die *Kurz-, Mittel- und Langzeitausdauer*. Zweitens die Anteiligkeit des aeroben Energiestoffwechsels an der Leistung (**Abb. 4.2**). Weitere Kriterien sind:

- Umfang der tätigen Muskulatur (lokale – allgemeine Ausdauer),
- Kontraktionscharakteristik (statische – dynamische Ausdauer),
- aerobe oder anaerobe Basis der Leistung (aerobe – anaerobe Ausdauer),

- Sportartspezifik (Grundlagenausdauer – allgemeine Ausdauer – spezielle Ausdauer),
- Bezug zur Kraft und Schnelligkeit bzw. Sportartspezifik (Kraft- bzw. Schnelligkeitsausdauer, Ausdauer in Spiel- und Kampfsportarten).

Schnelligkeit. Die Schnelligkeit wird aus der Sicht der Physiologie durch die Geschwindigkeit der neurophysiologischen Prozesse der Bewegungsprogrammierung und Regulation geprägt. Die Prozesse der Bewegungsregulation sind auf eine programmierte Rekrutierung der motorischen Einheiten in kürzester Zeit und sehr schnelle und präzise Abstimmungen zwischen Agonisten und Antagonisten sowie innerhalb der Muskelketten gerichtet. Das kontraktile Potenzial und die passiv-mechanischen Eigenschaften der Muskeln werden impulsartig genutzt. Die energetische Absicherung erfolgt bevorzugt alaktazid und auch laktazid.

Die Schnelligkeit bezieht sich auf Einzelbewegungen, Bewegungsfrequenzen und/oder Reaktions- oder Fortbewegungsgeschwindigkeiten. Sie ist eine spezifische Kombination aus den willkürlichen zentralnervösen Antriebsleistungen, der sensomotorischen Koordination und der kontraktilen Kapazität.

Aktive Beweglichkeit. Die aktive Beweglichkeit ist der durch Willkürbewegung erreichbare Ausnutzungsgrad des passiven Bewegungsspielraumes eines Gelenkes oder einer Gelenkkette (WS). Sie steht auf der Grundlage des anatomischen Gelenkspielraums, der intra- und intermuskulären Koordination sowie der kontraktilen Fähigkeit der Synergisten. Einschränkungen haben eine negative Auswirkung

Die Ausdauer gibt es nicht:						
	Kurzzeit- ausdauer	Mittelzeit- ausdauer	Langzeit- ausdauer I	Langzeit- ausdauer II	Langzeit- ausdauer III	Langzeit- ausdauer IV
	0,5–2 min	2–10 min	10–35 min	35–90 min	90–360 min	>360 min
VO ₂ max	100%	100–95%	95–90%	95–80%	90–60%	60–50%
% aerob	20%	60%	70%	80%	95%	99%
Energie ges. kJ	ca. 400–500	ca. 500–1700	ca. 1700–3200	ca. 3200–10000	ca. 10000–28000	ca. >28000

Abb. 4.2 Die Unterteilung der Ausdauer in Kurzzeit- (KZA), Mittelzeit- (MZA) und Langzeitausdauer (LZA), die Belastungsdauern, die Inanspruchnahme der maximalen

Sauerstoffaufnahme, des aeroben Energiestoffwechsels und der Energieverbrauch.