

# Das sensomotorische System, die Bewegungsprogrammierung und die sensomotorische Koordination beim Gesunden und Verletzten

W. Laube

Institut für Physikalische Medizin und Rehabilitation (Vorstand: Prim Univ.Do. Dr. T. Bochsansky)  
Landeskrankenhaus Feldkirch/Rankweil Akademisches Lehrkrankenhaus, A-6800 Feldkirch

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung in den Industrieländern führt dazu, dass der Mensch kaum noch wirksam physisch gefordert wird. Die Vielfältigkeit und Qualität der Bewegungen und die Fähigkeiten Ausdauer und Kraft gehen systematisch zurück.

Das Sensomotorische System (SMS) wird durch die kreisförmige Verknüpfung der Strukturen Sensoren – aufsteigende Leitungsbahnen – zentrale neuronale Netzwerke – absteigende Leitungsbahnen – Muskulatur gebildet. Der Muskel-Sehnenkomplex und die zugehörigen bindegewebigen Gelenkstrukturen sind der anatomische Standort der Sensoren. Ihre Afferenzen liefern vor Bewegungsbeginn Informationen zum Ausgangszustand und während der Bewegung Rückinformationen über den Bewegungsverlauf, ohne die das ZNS handlungsfähig wäre. Die Bewegung ist unmittelbare Quelle externer und interner Reize. Dadurch wird der Funktionskreis des SMS geschlossen und die Bewegungsregulation ermöglicht. Die gleichen Strukturen realisieren alle Leistungen des SMS. Jede Bewegung ist primär eine koordinative Leistung, indem Muskeln zum korrekten Zeitpunkt aktiv werden und über den erforderlichen Zeitraum die angepasste Kraft entwickeln. Die Fähigkeiten Ausdauer und Kraft entscheiden dann wie lange die Leistung aufrechterhalten werden kann bzw. welche Widerstände überwunden werden können.

Verletzungen oder degenerative Erkrankungen des Muskels und der bindegewebigen Strukturen verändern das SMS. Die Folge sind funktionelle Veränderungen in 2 Schweregraden. Beide heilen als „funktionelle Narbe“ aus führen zu einer veränderten und verminderten Trainierbarkeit des Systems.

## ABSTRACT

The development in the industrial countries is the reason, that the remaining physical activity is to low to secure the characteristics of physical fitness sensorimotoric coordination, endurance and strength.

The sensorimotoric system results from the circular combination of the following structures: sensors – afferent pathways – the central neural structures – efferent pathways – musculature. The muscle-tendon complexes and the joint connective tissues are the locations of the sensors. Before the movement they provide information about the posture and joint positions and during the movement they characterize the course. Without this information the nervous system is not capable of acting. The movements are the origin of feed back information. Thereby the circuit of the SMS is closed and the movement regulation is made possible. Notice, that the same structures create all performances. Each movement is primarily a coordinative performance, by the fact that muscles get active at the correct time and develop the adapted strength. Then the endurance and strength decide how long the performance can be maintained or which resistances can be overcome.

Injuries and degenerative diseases of the connective tissues change the SMS and it results a disturbed function with 2 heaviness degrees. Both heal with a “functional scar” and the functional possibilities of the SMS to adapt is changed and diminished.

## Einleitung

In der modernen Welt wird der Mensch im täglichen Leben immer weniger oder sehr einseitig physisch gefordert. Er „verlernt“ es immer mehr „richtig“ (Koordination), für die Erhaltung der Struktur „ausreichend intensiv“ (Kraftausdauer, Maximalkraft) und für die Sicherung einer ausreichenden biologisch verwertbaren Energieproduktion auf aerober Grundlage „lange genug“ (insbesondere Langzeitausdauer I und

II; Belastungsdauer 10 – 35 Minuten bzw. 35 bis 90 Minuten) mit seinem sensomotorischen System (SMS) umzugehen. So ist die systematische chronische Inaktivität in Kombination mit inadäquat hoher Energiezufuhr eine Ursache, in dessen Folge sich vielfältige Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems (Arteriosklerose; Hypertonie in Kombination mit genetischen Faktoren), des Stoffwechsels (Diabetes mellitus Typ II;

Fettstoffwechselstörungen) sowie des Stütz- und Bewegungsapparates (degenerative Gelenkerkrankungen) entwickeln. Diese Korrelation gilt bereits auch schon für das Kindes- und Jugendalter (1). Die Muskulatur aber auch die übrigen Gewebe unterliegen den Folgen der inaktivitätsbedingten Atrophie und sind vermindert leistungs-, kompensations- und erholungsfähig. So sind in den USA ein Drittel aller Diabetiker bis zum 19 Lebensjahr Diabetiker vom Typ II, also an Altersdiabetes erkrankt (2). Das sensomotorische System (Definition vgl. unten) ist unökonomisch tätig und die Muskulatur besitzt einfach zu wenig Kraft und Ausdauer, damit die Gelenke diese Belastungen dauerhaft schadlos überstehen.

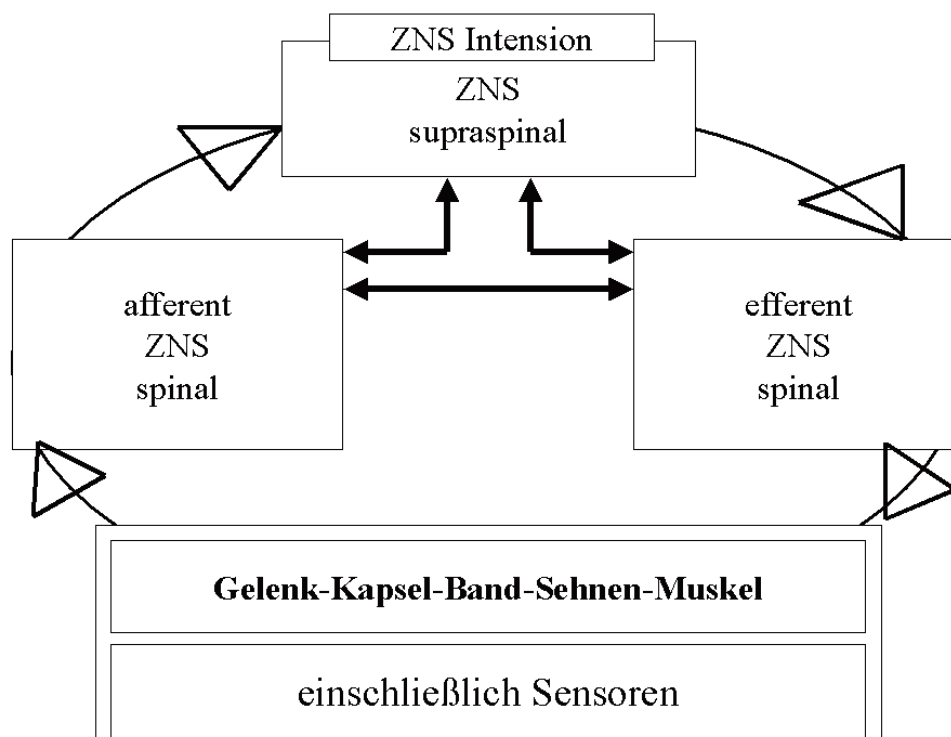
Der Organismus braucht zwingend die Belastungen durch immer wiederkehrende systematische Bewegungen, denn die daraus resultierenden Beanspruchungen sind die Voraussetzung die Gewebe und Organe strukturell und funktionell zu entwickeln und zu erhalten, dessen ökonomisches Zusammenspiel zu sichern und darüber letztendlich als Ganzes gesund und leistungsfähig zu sein und zu bleiben. Die trophisch – plastischen Adaptationen als Folge der Beanspruchungen sichern die Anpassungen der Struktur an die Funktion dar.

Das SMS besteht aus der „kreisförmigen“ Verknüpfung der folgenden anatomischen Strukturelemente (Abbildung 1) mit den nachfolgend genannten grundsätzlichen Funktionen:

- 1.die Rezeptoren: „Übersetzung“ der externen und internen Reize in die körpereigene Sprache.
- 2.die afferenten Bahnsysteme: „Transport“ der transformierten Informationen zu den neuronalen Netzwerken (aufsteigende Bahnsysteme) und Verarbeitungsprozesse an den Schaltstellen des Wegesystems.
- 3.die spinalen und supraspinalen neuronalen Netzwerke: Verarbeitung der Informationen zu einer gerichteten Antwort.
- 4.die efferenten Bahnsysteme: „Transport“ der Antwortimpulsmuster der neuronalen Netzwerke mit Verarbeitungsprozessen an den Schaltstellen des Wegesystems (insbesondere extrapyramidales System) zu den Effektoren.
- 5.die Effektoren: Beantwortung mit der spezifischen Muskelfunktion.

Abbildung 1:

Grundschemata des Sensomotorischen Systems. Es besteht grob aus der kreisförmigen Verschaltung von Rezeptoren, den afferent leitenden und verarbeitenden neuralen Strukturen (Bahnsysteme), dem zentralen Nervensystem (spinal und supraspinal) und den efferent leitenden und verarbeitenden neuralen Strukturen (Bahnsysteme) und der Muskulatur. Die Muskulatur, die Gelenkkapseln, Sehnen, Bändern und die Haut sind der anatomischen Standort der Rezeptoren und somit wird der Regelkreis geschlossen.



Die Ausführung der Bewegung ist zugleich die Quelle erneuter sich dynamisch ändernde externer und interner Reize, wodurch der „Funktionskreis des SMS“ geschlossen wird. Die sogenannten passiven Anteile des Stütz- und Bewegungsapparates wie Bänder, Sehnen, Kapseln und auch Faszien sind die anatomischen Standorte vieler Sensoren. Somit stellen Verletzungen oder Degenerationen dieser Strukturen zugleich eine Veränderung des SMS dar.

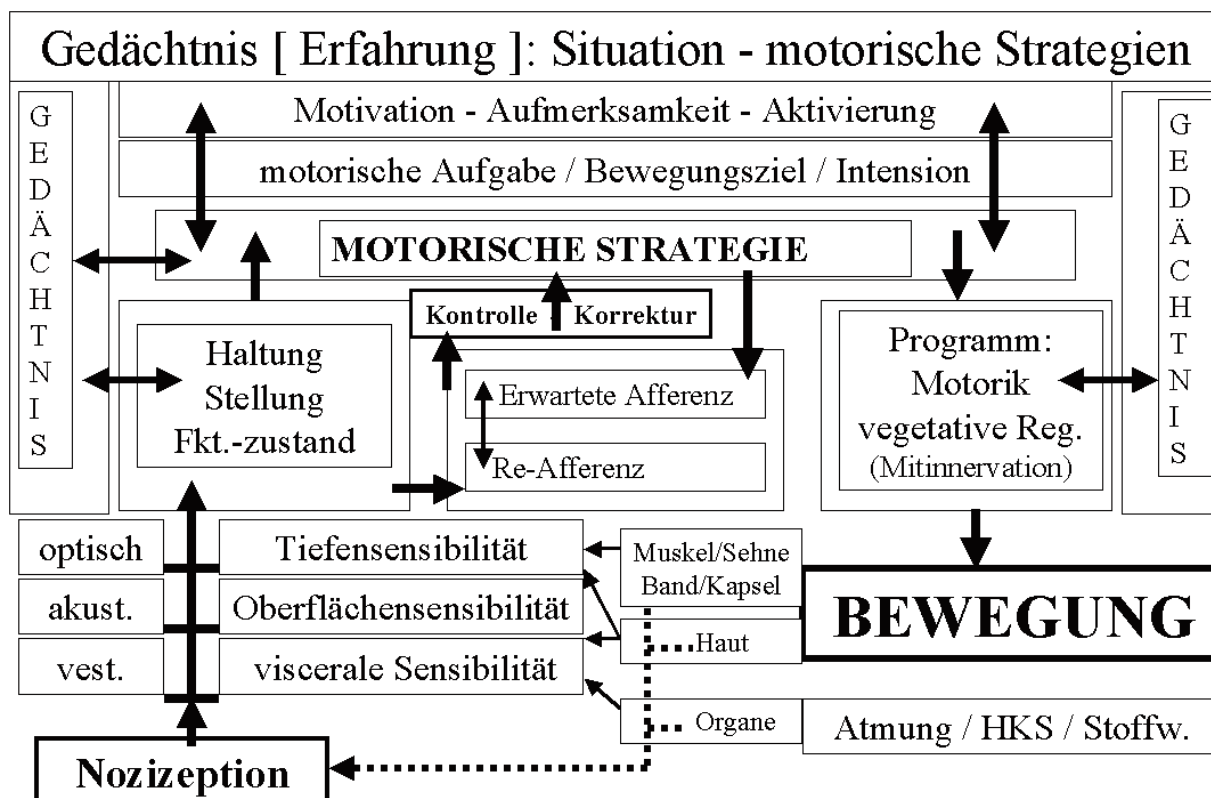
Der Prozess der Bewegungsprogrammierung und Bewegungsregulation läuft immer nach einem einheitlichen Grundprinzip ab. Bevor eine Bewegung sichtbar beginnt, haben bereits sehr viele und komplexe Prozesse stattgefunden. Ohne sie wäre ein Bewegungsstart und die nachfolgende Regulation unmöglich. In Abbildung 2 werden die grundsätzlichen Prozesse dargestellt. Eine Motivation zur Bewegungsausführung und die notwendige Aufmerksamkeit werden als gegeben vorausgesetzt. Der Gesamtprozess hat die Komponenten (1) Charakterisierung des aktuellen Zustandes, (2) Auswahl der sensomotorischen Bewegungsstrategie, (3) Erarbeitung des Bewegungsprogramms und Ausführung und (4) Rückinformation zur Anpassung der Bewegung an das bisherige Ergebnis (Regulation).

Charakterisierung des aktuellen Zustandes:

Die absolute Voraussetzung für jeden koordinierten Bewegungsstart ist es zu wissen, aus welcher Körperhaltung und Körperstellung beginnt die Bewegung. Ohne eine umfassende und detaillierte vorherige Charakterisierung der Ausgangslage kann eine sichere, zielgerichtete und fließende Bewegung unmöglich beginnen.

Nach der „zentralnervösen Definition der Aufgabenstellung“ stehen somit die Sensoren mit ihrem „Set an Informationen“ an der ersten Stelle des Funktionskreises. Auf Grund ihrer Informationen müssen vor Bewegungsbeginn die räumliche Orientierung des Organismus und die Ausgangspositionen der Gelenke als auch ihre Positionen zueinander definiert werden. Es besteht ein Unterschied, ob die Aufgabe zum Ortswechsel aus der sitzenden oder der stehenden Position aus starten soll. Ebenso ist ein umgehend korrekter, der Situation und der Aufgabe angepasster fein abgestimmter Einsatz der Muskeln nicht denkbar, wenn die aktuellen Längen- und Spannungsverhältnisse und der funktionelle Zustand der Muskeln nicht weitestgehend bekannt wären. Der Zustand der Muskulatur spielt gemeinsam mit der Aufgabe eine große Rolle, um die Logistikfunktionen Atmung, Herz-Kreislauf und Stoff-

Abbildung 2  
Das Schema fasst die Vorgänge der Bewegungsprogrammierung und Bewegungsregulation zusammen (vgl. Text)



wechsel mit Bewegungsstart bereits sehr nahe entsprechend dem voraussichtlichen Bedarf in Funktion zu versetzen. Bei den Patienten ist zusätzlich die Nozizeption eine sehr wichtige Informationsquelle. Die Nozizeption hat eine ausgeprägt modifizierende Auswirkung auf die Bewegungsprogrammierung und die Regulation. Die Afferente Informationen nehmen eine Schlüsselstellung für jeden Bewegungsbeginn und die Bewegungsregulation ein.

Damit wird auch umgehend der Einfluss von Funktionsstörungen im Gelenkspiel, Verletzungen oder degenerativen Erkrankungen von Strukturen des Stütz- und Bewegungsapparates, die Sitz der Sensoren sind, deutlich. Das SMS ist dann auf seiner sensorischen Seite strukturell und damit funktionell betroffen. Jede Funktionsabweichung und Strukturzerstörung, wie z. B. eine Band- bzw. Sehnenruptur oder die degenerative Zerstörung der „äußerlich scheinbar passiven Gelenkstrukturen“ ist auch gleichzeitig eine Strukturveränderung des SMS. Je nach Standort und Umfang des pathologischen Geschehens ist eine unterschiedliche Anzahl von Sensoren einbezogen, dessen Übersetzungsleistungen fehlen. Es stehen Informationsquellen zur feinjustierenden Charakterisierung der Ausgangs- und der bewegungsbedingten Folgepositionen sowie des örtlichen Zustandes nicht mehr wie vorher zur Verfügung. Dieses „fehlende Wissen“ kann das SMS trotz seiner ausgeprägten Plastizität nicht mehr 100 %-ig kompensieren. Alle Vorgänge und Prozesse, die auf diesen Informationen beruhen sind unweigerlich verändert. Der Umfang und die Auswirkungen der Veränderungen im Bewegungsvollzug sind sehr variabel und stehen mit

1. dem Ort und dem Umfang der Sensorausfälle,
2. der Wertigkeit der jeweiligen Sensorinformationen,
3. der situativ wechselnden Bedeutung ihrer Informationen,
4. dem vorherigen Trainingszustand,
5. dem physischen Anspruchsniveau der Person und
6. der schnellen und intensiven Aufnahme oder Wiederaufnahme eines Trainings im Zusammenhang.

Das ZNS als „entwerfender, regelnder und kontrollierender Zentralcomputer“ ist ohne die afferenten Informationen handlungsunfähig oder mehr oder weniger in seiner Handlungsfähigkeit beeinträchtigt.

Die neuronalen Strukturen des ZNS verarbeiten die vielfältigen afferenten Informationen und „erkennen“ so Haltung, Stellung und Funktionszustand. Diese

ZNS-Leistung wird in Zusammenarbeit mit dem sensomotorischen Gedächtnis erbracht. Ein großer Teil ist nicht bewusstseinspflichtig.

Selbst die extrem hohe Kapazität der Informationsverarbeitung im ZNS reicht aber nicht aus, um die AP-Sequenzen aller Sensoren verarbeiten zu können. So hilft das durch Lernprozesse geprägte sensomotorische Gedächtnis, die für die momentane Aufgabe besonders wichtigen afferenten Informationen über eine angepasste Hemmung und Bahnung auszuwählen. Dieser gedächtnisgestützte Auswahlprozess entscheidet darüber, ob die qualitativ und quantitativ „richtigen“ und den Bewegungsprozess prägenden afferenten Informationen herangezogen werden. Er prägt die Qualität der Charakterisierung der Ausgangsposition und damit den eventuellen späteren Korrekturbedarf. Die adäquate und situationsgerechte Auswahl der Informationen durch Hemmung und Bahnung ist gleichfalls ein wichtiges Ergebnis des sensomotorischen Lernprozesses.

#### Auswahl der sensomotorischen Bewegungsstrategie

Nachdem die Ausgangsbedingungen erkannt und zur Aufgabe in Beziehung gestellt worden sind, gilt es die sensomotorische Bewegungsstrategie auszuwählen.

Die Auswahl der sensomotorischen Strategie hat zwei wichtige Funktionen.

1. Es wird anhand des Zieles und des Standes des sensomotorischen Lernstandes eine entsprechende Bewegungshandlung vorgestellt und festgelegt.
2. Es werden die Voraussetzungen für die Bewegungsregulation geschaffen, auf dessen Grundlage die ständige Kontrolle und bei Bedarf die Bewegungskorrektur stattfindet.

Bei der sensomotorischen Strategie geht es primär nicht um den Einsatz von Muskeln, sondern um die komplexe Planung der am Ziel ausgerichteten Bewegungshandlung. Kriterium und Merkmal der Strategie ist die Vorstellung vom Bewegungserfolg, denn mit dem Bewegungsziel verknüpfen sich quantitativ und qualitativ angestrebte Ergebnisse. Die Aufgabe mit effektivem, zielführenden Verhalten zu lösen steht im Vordergrund. Dies lässt sich besonders gut anhand von Situationen in Spielen sichtbar machen. In einer Ballsportart kommt es darauf an, mit der Bewegungshandlung den Ball im gegnerischen Tor unter zu bringen. Die Auswahl der Bewegungsstrategie (sportliche Technik) wird situativ und in erster Linie in Abhängigkeit vom Stand des sensomotorischen Lernpro-

zesses des Spielers abhängig sein. Da sich in Spielen konkrete Situationen im Detail nie 100 %-ig wiederholen, sind sie auch zugleich das beste Instrument für einen vielfältigen und variablen Lernprozess.

Eine Bewegungsregulation ist ausschließlich möglich, wenn ein „Referenzwert“ vorhanden ist, mit dem ein reales Ergebnis verglichen werden kann. Der „Referenzwert“ steht mit der Vorwegnahme, der Antizipation, des Ergebnisses aber auch der Bewegungshandlung zur Verfügung. Es werden somit mit der Festlegung der sensomotorischen Strategie die erwarteten Reafferenzen vorausberechnet und als „Sollwert“ abgelegt. Nur auf dieser Basis ist eine Regulation der Bewegung überhaupt möglich.

Die Antizipation schließt beide Signalsysteme des Menschen ein. Mit dem sogenannten „ersten Signalsystem“, den AP-Sequenzen, werden alle Informationsverarbeitungsprozesse organisiert und durchgeführt. Nur ein geringer Teil wird in das „zweite Signalsystem überführt“ und damit auch wahrgenommen. Wahrnehmung bedeutet immer auch einen sprachlichen Ausdruck formulieren zu können. Dies geschieht dann nahtlos mit dem sogenannten „zweiten Signalsystem“, der Sprache. Die Bewegungshandlung und der gewünschte Bewegungserfolg werden sprachlich ausgedrückt und damit vorgestellt. Die Fähigkeit zur vorherigen sprachlichen Bestimmung der Bewegungshandlung spielt für die Qualität der Ausführung eine wichtige Rolle, denn sie ist Ausdruck der Bewegungsvorstellung. Wer den „Lösungsweg einer sensomotorischen Aufgabe“ gut beschreiben kann, wird wahrscheinlich eine geringere Fehlerquote aufweisen. Alle Vorgänge zur Strategie und Antizipation werden in Wechselwirkung mit dem sensomotorischen Gedächtnis durchgeführt. Deshalb hat der Trainierte auch große Vorteile beim Neu- oder Wiedererlernen von Bewegungen. Gute koordinative Voraussetzungen werden eben dadurch auch zur Grundlage des weiteren Lernens.

#### Erarbeitung des Bewegungsprogramms und Ausführung

Zeitlich überlappend mit den Prozessen zur Auswahl der sensomotorischen Strategie und der Antizipation laufen die Vorgänge zum Erstellen des Bewegungsprogramms ab. Das sensomotorische Gedächtnis hat auch in diesem Prozessschritt eine prägende Funktion. Es werden unter intensiver Nutzung der sensomotorischen Grundbausteine der spinalen und supraspinalen Ebene die komplexen Innervationsmuster bereitgestellt. Ein wesentliches Merkmal des Bewegungsprogramms ist die Ansteuerung der Logistikfunktionen

Atmung, Herz-Kreislauf und Stoffwechsel. Im Sinn der Mitinnervation werden bei Bewegungsbeginn ihre Leistungen auf das wahrscheinlich notwendige Tätigkeitsniveau eingestellt. Das „fine tuning“ erfolgt dann aus der tätigen Muskulatur heraus (3).

Als Ergebnis aller bisherigen Teilprozesse findet nun die Bewegung statt. Sie ist das nach außen erkennbare Resultat aller nur grundsätzlich und kurz beschriebenen internen Abläufe. Die Qualität und damit die Ökonomie des Bewegungsablaufes sind der Ausdruck der „inneren Funktionen“. Anhand der äußeren Repräsentation kann der aktuelle Leistungsstand oder auch der Lernfortschritt des SMS hinsichtlich der Bewegungskoordination und dem Repertoire der Bewegungsvielfalt beurteilt werden. Die zeitliche und räumliche Charakterisierung des Bewegungsablaufes selbst und das Endergebnis bestimmen den Stand der koordinativen Fähigkeit.

#### Die Bewegung als Quelle der afferenten Rückinformation – Basis der Regulation

Die ablaufende Bewegung ist die direkte Ursache für Veränderungen der Längen- und Spannungsverhältnisse der Skelettmuskeln, der mechanischen Beanspruchung der Gelenkkapseln und Bänder sowie der Haut, von biochemischen und physikalischen Veränderungen im Muskel und den Tätigkeitsbedingungen der Logistiksysteme. Damit ist die Bewegung nun selbst der „adäquate Reiz“ für die verschiedenen Sensoren und die Auslösung des bewegungsbedingten afferenten Informationsstroms (Reafferenz). Bei vielen Patienten tritt je nach Pathologie die Nozizeption hinzu. Die nozizeptorische Information ist eine ausgeprägte Quelle für Störung oder Veränderung der Bewegungsabläufe. Alle Informationen werden wieder über die entsprechenden Leitungswege zum ZNS geleitet und sie führen dazu, dass für jeden Bewegungsabschnitt die Veränderungen der Haltung und Stellung neu „erkannt“ werden. Ein Sportler ist selbst bei hoch komplizierten Bewegungen in jeder Phase orientiert. Die „realen“ Re-Afferenzen und die Ergebnisse der Bewegungsabschnitte werden nun mit den vorausberechneten „erwarteten“ Afferenzen verglichen. Es findet ein Soll – Ist – Abgleich statt. Besteht weitestgehende Übereinstimmung, dann besteht Kontrolle über den Bewegungsteilabschnitt und mit den aktuellen Daten erfolgt ein „fine tuning“ der bisherigen Prozesse. Die Bewegung wird entsprechend geregelt. Werden Unterschiede zwischen der Erwartung und der Realität festgestellt, dann wird unmittelbar eine Bewegungskorrektur durchgeführt. Der Bewegungsvollzug wird einer veränderten äußeren oder inneren Situation angepasst oder auch abgebrochen. Im Be-

reich des Sports lassen sich solche Korrekturen nachweisen, wenn z.B. ein Eiskunstläufer statt der zum Programm gehörenden dreifachen Längsdrehung nur eine doppelte oder einfache ausführt. Ursache der Korrektur ist ein vom SMS „erkannter Fehler“ auf dem Weg zum Absprung. Der Sportler verringert zur Sicherung einer noch möglichen qualitativ guten Bewegungsausführung den koordinativen Schwierigkeitsgrad. Das bedeutet die rückmeldenden Reafferenzen sind die Grundlage einer Folgeregulation der Bewegung. Die Korrektur während einer laufenden Bewegung ist nicht bei ballistischen Bewegungen, wie z. B. beim Werfen, möglich. Hier bezieht sich die Korrekturmöglichkeit auf die nachfolgende Wiederholung.

Das SMS als die aktive Komponente des Stütz- und Bewegungssystems hat während jeder Bewegung gleichzeitig zwei sehr komplexe miteinander untrennbar verknüpfte Leistungen zu erbringen.

**1.Zielsensomotorik:** Sie beinhaltet alle sensomotorischen Komponenten, die der Aufgabe bzw. der Zielstellung der Bewegungshandlung dienen.

**2.Stützensensomotorik:** Sie fasst alle sensomotorischen Komponenten zusammen, mit denen Haltung, Stellung und das Gleichgewicht gewährleistet werden.

Die **Zielsensomotorik** läuft als rückgekoppelter und geregelter Prozess ab und beinhaltet:

-das dynamische Erkennen (Wahrnehmen) der aktuellen Haltung, Stellung und des Funktionszustandes der Muskulatur, der Sehnen-, Band-, und Kapselstrukturen

-die Auswahl und Anpassung der sensomotorischen Handlungsstrategie an die Aufgabenstellung und die Situation

-das Vorwegnehmen (antizipieren) des Bewegungsergebnisses als Basis der Bewegungsregulation und für die Möglichkeit einer potentiellen Bewegungskorrektur und

-das „Programmieren“ und Ausführen der gewünschten Bewegung in einem rückgekoppelten und damit regelten Prozess.

Dem entsprechend werden Muskeln und Muskelgruppen zum „richtigen“ Zeitpunkt und über das „richtige“ Zeitintervall (timing) eingesetzt und die der Aufgabe und Situation angepasste Kraft und Kontraktionsgeschwindigkeit (Parameterkontrolle der Bewegung: u. a. skelettmotorische Schleife der Basalganglien) entwickelt. Die zum Bewegungsprogramm ge-

hörende Regulation der Logistiksysteme und die energetische Ausstattung der Muskelfasern entscheiden dann mit welcher Dauer die Bewegung mit der realisierten Intensität ausgeführt werden kann.

In Abhängigkeit von der Art der sensomotorischen Handlung sind auch die passiv mechanischen Eigenschaften der Muskel-Sehnen-Komplexe erheblich an der Leistung des Gesamtsystems beteiligt (4,5).

Die **Stützensensomotorik** ist zugleich das Produkt eines Regulationsprozesses und zeichnet verantwortlich für die aktive statische und/oder dynamische Sicherung und Stabilisierung von Haltung, Stellung und Gleichgewicht mit Hilfe der spinalen und supraspinalen sensomotorischen Grundbausteine (Reflexe und Automatismen) .

Es ist keine Körperhaltung und Bewegung denkbar ohne das die dem Ziel dienenden Muskelaktivitäten nicht gleichzeitig mit jenen zur Aufrechterhaltung von Haltung, Stellung und Gleichgewicht zwingend verbunden wären.

Die dem Bewegungsziel dienende sensomotorische Aktivität ist die direkt „sichtbare“ Komponente der Funktion des SMS. Die gleichzeitig, als integraler Bestandteil ablaufende Stützensensomotorik ist z. B. an der Bewegungssicherheit also an den Merkmalen der Bewegungsqualität zu erkennen (Koordination, Bewegungslehre, 6).

Die Bewegungsqualität hat aus der Sicht des SMS zwei Dimensionen:

1. Sie charakterisiert das Erreichen des Zieles. Für einen Musiker bedeuten dies, den richtigen Ton zum richtigen Zeitpunkt „zu treffen“ und für den Sportler entweder den Ball im Netz unterzubringen, mit einem Wurfgerät (Kugel, Speer) eine hohe Weite zu erreichen oder der Turner realisiert den Bewegungsablauf seiner Übungen als „scheinbar“ automatisch sicher“ ablaufend ohne Wackler, Abbrüche und in den sicheren Stand.

2.Die Bewegungsqualität ist mit der Regulation von Haltung, Stellung und des Gleichgewichts verbunden. Z. B. hat das Gehen zwar zum gewünschten Ortswechsel und damit zum Bewegungsziel geführt aber es bestand ständig eine hohe Unsicherheit und permanente 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 Pro-

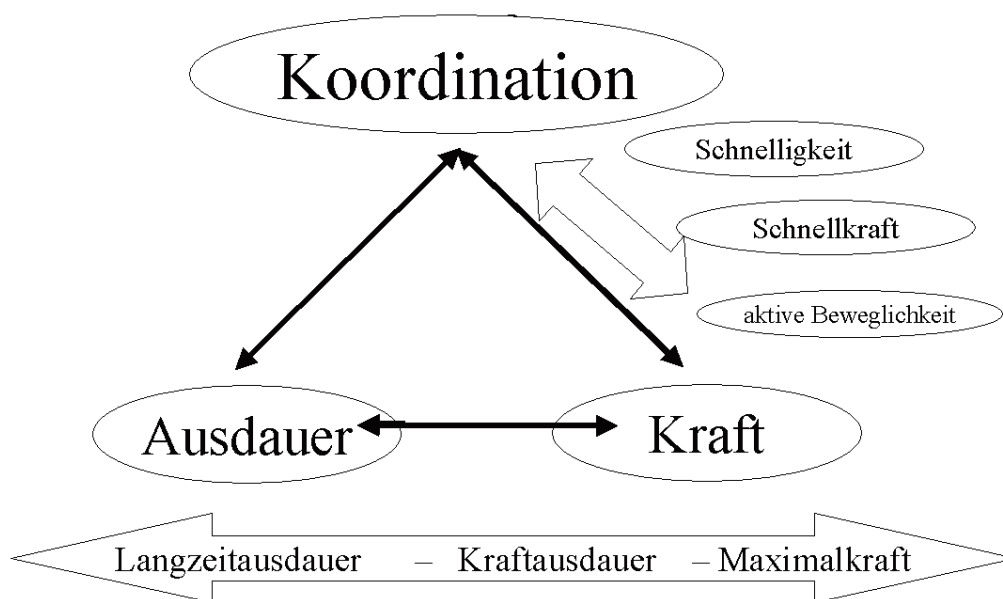
zess der sensomotorischen Entwicklung „mühevoll“ durch Wiederholungen erlernt worden sind. Werden Bewegungen (z. B. Gerätturnen, Eiskunstlaufen; Spielen eines Instruments; Singen) in einem Trainingsprozess sehr häufig wiederholt (und bestehen zusätzlich günstige genetische Voraussetzungen), so können 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. Aber auch sehr gut beherrschte Bewegungen bleiben immer Willkürbewegungen, denn ihre Ausführung kann „jederzeit“ abgebrochen oder modifiziert werden. Die Fähigkeit sehr gute Bewegungsleistungen neu zu kombinieren und zu modifizieren und so den Schwierigkeitsgrad steigen zu lassen ist die Grundlage dafür, dass das Training der koordinative Fähigkeit „Training der sensomotorischen Trainierbarkeit“ ist. Die hohe Qualität kann aber nur durch weiteres Training erhalten und abgesichert werden, denn das Erlernen hoher koordinativer Bewegungsfertigkeiten basiert auf Strukturanpassungen im ZNS die nach dem Ausbleiben der spezifischen Reize rückgängig gemacht werden und das Verlernen ist die Folge. Natürlich werden zugleich die konditionellen Voraussetzungen für die Bewegungsleistung wie die Kraftfähigkeit vermindert (vgl. unten).

Bei einem Patient nach einem Schlaganfall ist (je nach Schädigungsort und –umfang) nichts mehr von der Mühelosigkeit der Ausführung der sensomotorischen Belastungen des täglichen Lebens wie Sitzen, Stehen oder Gehen 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 mögliche Lernerfolg ist sowohl von der Schädigung als auch sehr wesentlich vom frühestmöglichen Beginn und dem Umfang des systematisch und gezielt durchzuführenden Trainingsprozesses abhängig. Der adäquate Reiz für die Anregung und Ausnutzung der Plastizität des Gehirns und die Auslösung der Reorganisationsprozesse benötigt ausschließlich die Bewegung als Realisationsfaktor.

Auch ein Patient nach einer Verletzung des vorderen Kreuzbandes weist noch nach vielen Jahren Veränderungen in der Funktion des M. quadr. fem. auf. Der Muskel ist nach wie vor mehr oder weniger atrophiert (Kraft) und das „fine tuning“ (Koordination) im Bewegungsvollzug ist gegenüber der unverletzten Situation vermindert. Grundsätzlich muss eine bleibend geänderte Struktur des SMS auch immer eine bleibend geänderte Funktion nach sich ziehen. Das Ausmaß der Veränderungen ist wieder wesentlich vom Trainingsprozess abhängig.

Abbildung 3

Die sensomotorischen Beanspruchungsformen. Als Basis muss die Koordination angesehen werden, weil jede Bewegung primär eine Bewegungsqualität hat. Die Ausdauer ist die Grundlage sehr vieler oder langdauernder zyklischer Bewegungen und die Kraft lässt wenige oder zumindest eine Bewegung zu. Der Übergang zwischen Ausdauer und Kraft ist die Kraftausdauer. Die Schnelligkeit und die Schnellkraft sind vorrangig durch die neurophysiologischen Mechanismen der Koordination geprägt und die Bewegungs- bzw. Geschwindigkeit mit der eine Last überwunden wird ist von der Kraft abhängig.



Das SMS erbringt die folgenden sensomotorischen Leistungen (Beanspruchungsformen, vgl. Abbildung 3):

#### Die Koordination

Die sensomotorische Koordination (Bewegungslehre: Ganzkörperkoordination - Gewandtheit; Teilkörperkoordination - Geschicklichkeit; Trainingwissenschaft: sportliche Technik) ist das gezielte und geregelte Zusammenwirken aller Strukturkomponenten einschließlich der Logistiksysteme (Atmung, Herz-Kreislauf, Stoffwechsel) während Haltung und Bewegung. Ausdruck einer guten Koordination ist ein zum Ziel führender, sicherer, fließender, müheloser und präziser Bewegungsablauf. Jede Bewegung ist primär eine koordinative Leistung des SMS. Eine gute Koordination aus der Sicht der Bewegungsmerkmale (6) kann zugleich gut mit einer hohen Bewegungsökonomie in Übereinstimmung gebracht werden.

Jede azyklische und zyklische Bewegungsausführung benötigt zugleich bestimmte energetische Voraussetzungen des Effektors, die auch auf einer strukturellen Grundlage stehen. Zur Absicherung jeder koordinativen Bewegungsleistung sowie des sensomotorischen Lernens mit vielen Wiederholungen muss der aerobe Energiestoffwechsel mit seiner strukturellen Basis, den Mitochondrien, ausreichend biologisch verwertbare Energie zur Verfügung stellen können. Auch wenn der aerobe Stoffwechsel nicht immer direkt für das Erbringen der Leistung verantwortlich ist, so ist er doch für die nachfolgenden Erholungsprozesse erforderlich, welche die Fähigkeit zur Wiederholung ermöglichen. Nur dann können eine größere Anzahl von Lernwiederholungen ausgeführt werden oder gezielt eine Masse, wie z. B. die Eigenschwere der Körperteile oder auch Zusatzgewichte wiederholt bewältigt werden. Das bedeutet, dass der Organismus während der koordinativen Bewegungsleistungen konditionelle Ressourcen „verbraucht“. Die Koordination kann somit nicht losgelöst von den Fähigkeiten Ausdauer und Kraft betrachtet werden.

#### Die Ausdauer

Die sensomotorische Beanspruchungsform Ausdauer (konditionelle Fähigkeit) bedeutet eine langdauernde Beanspruchung auf der Grundlage einer ökonomischen Bewegungskoordination, einer angepassten Rekrutierung der motorischen Einheiten der spezifisch beteiligten Muskulatur, einer adäquaten Ventilation und Ver- und Entsorgungsleistung durch das Herz-Kreislauf-System, einer bedarfsgerechten Thermo-regulation zur Wärmabgabe und eines aeroben Energiestoffwechsels mit ausgeglichener Bilanz zwischen der Laktatproduktion und Laktatelimination bei ausrei-

chend gefüllten Glykogenspeichern. Ausdauer ist kurz Wiederstandsfähigkeit gegenüber Ermüdung (7).

#### Die Kraft

Die sensomotorische Beanspruchungsform Kraft basiert auf einer entsprechenden Bewegungsausführung (Koordination), den physiologischen Mechanismen der Kraftabstufung (intramuskuläre Koordination), den strukturellen kraftgenerierenden Voraussetzungen des Muskels und der energetischen Absicherung der Kontraktionen durch die Strukturen des anaeroben Stoffwechsels. Der aerobe Energiestoffwechsel und somit ein Mindestmass an Ausdauerleistungsfähigkeit (s. o.) ist für eine ausreichend schnelle Erholung erforderlich.

Die Kraft gibt es nicht und der Begriff Kraft beinhaltet unterschiedliche sensomotorische Beanspruchungsformen. Diese sind die Maximalkraft, die Schnellkraft und die Kraftausdauer.

Die Maximalkraft entspricht einer kurzfristigen angepassten und vollständigen Ausnutzung der Kraftabstufungsmechanismen und dem Ausmaß der kraftgenerierenden Kapazität der Muskelfasern mit entsprechender anaerob alaktazider und laktazider Energieabsicherung. Entsprechend der Hill'schen Beziehung, welche die Abhängigkeit zwischen der Bewegungs-(Kontraktions-) geschwindigkeit und der Kraft beschreibt, gibt es die Maximalkraft nicht. Der maximal erreichbare Kraftwert ist geschwindigkeitsabhängig und so hat aus physiologischen Gründen auch jede Bewegungsgeschwindigkeit ihren maximalen Kraftwert (vgl. Muskel). Die Maximalkraft wird praxisüblich mit dem Wert des maximalen isometrischen Kraftwertes gleich gesetzt.

Die Schnellkraft setzt eine möglichst vollständige Nutzung der Kraftabstufungsmechanismen in kürzester Zeit voraus, wobei es entsprechend der Geschwindigkeits-Kraft-Beziehung bevorzugt auf die Schnelligkeit der Muskelverkürzung ankommt. Die Schnellkraft ist auch von den Krafteigenschaften des Muskels abhängig. Die Kraftausdauer ist hinsichtlich ihrer physiologischen Basis der Ausdauer verwandt.

#### Die Schnelligkeit

Die Schnelligkeit ist wesentlich durch die Prozesse der sensomotorischen Koordination geprägt und nutzt die physiologischen Grundlagen der Maximal- und Schnellkraft.

#### Die Beweglichkeit

Die Beweglichkeit als sensomotorische Beanspruchungsform ergibt sich aus der willkürlichen Nutzung des



anatomischen Bewegungsbereiches eines Gelenkes oder einer Gelenkkette. Die Beweglichkeit ist demnach nur eine sensomotorische Beanspruchungsform, wenn damit das aktive Bewegungsausmaß charakterisiert wird. Die aktive Nutzung des anatomisch vorgegebenen Bewegungsbereiches ist wesentlich von der sensomotorischen Koordination und Voraussetzungen des Muskels für die Kraftgeneration abhängig.

Es ist wichtig festzustellen, dass während der Ausführung aller Bewegungsleistungen das SMS immer mit all seinen Strukturen, also als Gesamtsystem aktiv ist. Es ist in seiner physiologischen Funktion ein unteilbares System.

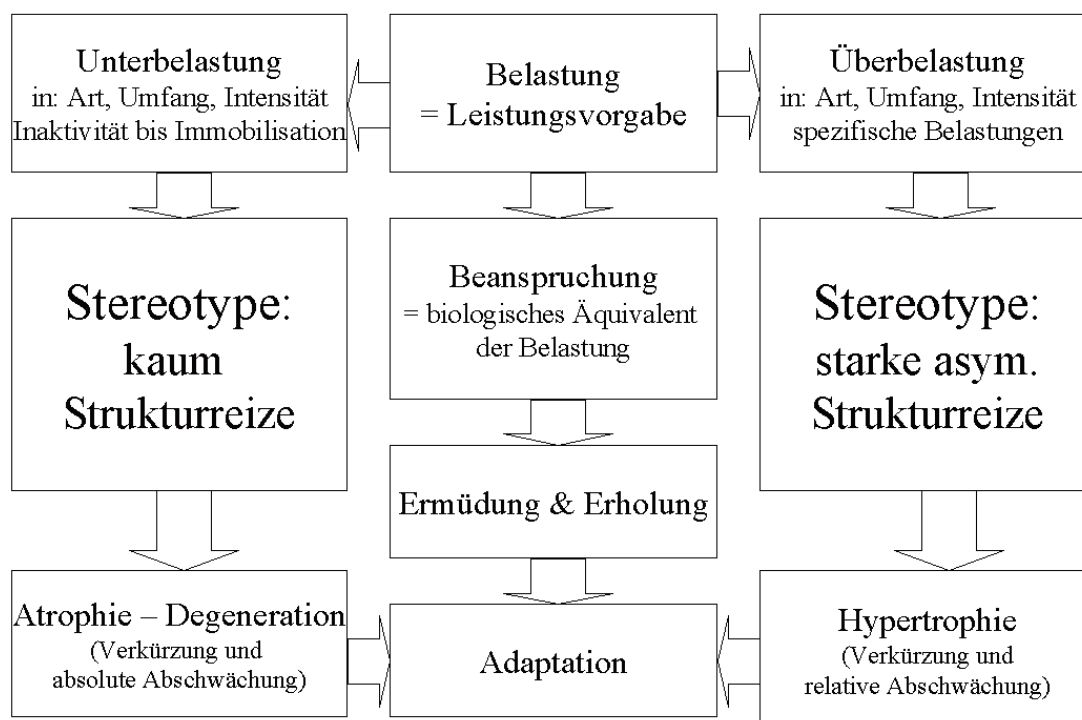
Daraus leitet sich ab, dass durch Training, egal welcher Zielstellung, immer die gleiche Gesamtstruktur angesprochen und in Funktion versetzt wird. Die unterschiedlichen Wirkungen des Trainings im SMS sind Ausdruck der Merkmale seiner Funktion, der belastungsbedingten Beanspruchungen in Art, Intensität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

**Es gibt kein propriozeptives Training.** Mit einer Ausnahme sind Rezeptoren nicht trainierbar und auch bei Ausweitung des Begriffs auf die afferente Leitung

und Verarbeitung der sensiblen und sensorischen Informationen bleibt der efferente Anteil unbeeinflusst. Trainierbar sind grundsätzlich die Muskelspindel, denn deren Empfindlichkeit wird entsprechend der Innervation der  $\gamma$ -Motoneurone durch die Kontraktion der intrafusalen Muskelfasern eingestellt. Diese Effektoren sind trainierbar bzw. sie unterliegen den atrophischen Veränderungen infolge Inaktivität. Die Atrophie in den Muskelspindeln, ihre veränderte anatomische Anordnung mit den Muskelfaszien und metabolische Ursachen (8) haben sehr komplexe Auswirkungen. Betrachtet man das „propriozeptive Training“, dann findet eindeutig Koordinations- bzw. sensomotorisches Lerntraining statt. Die Belastungen z.B. auf instabilen Unterlagen beanspruchen sehr wohl als modellbezogene Belastungen immer das Gesamtsystem. Zur Erfüllung der Bewegungsaufgabe müssen ständig die aktuellen Positionen erkannt und zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts, der Körperhaltung und Körperstellung die erforderlichen muskulären Aktivierungen stattfinden. Das Ergebnis wird zurückgemeldet und das System muss erneut die angepasste efferente Antwort erarbeiten und auslösen usw. (vgl. Bewegungsprogrammierung und -regulation, Abbildung 3).

Abbildung 4

Das Schema beschreibt in der Mitte den Zyklus Belastung-Beanspruchung-Adaptation. Die chronische Unterbelastung (Inaktivität, Immobilisation) stellt kaum bis keine Strukturreize dar und das Ergebnis ist eine De- bzw. Maladaptation. Auf der anderen Seite führt eine chronische Überbelastung (Fehlbelastungen im Training, Nichteinhalten der Merkmale des Trainings, Überschreiten der individuellen Belastbarkeit) zu starken monotonen, „asymmetrischen“ Strukturreizen, welche die Adaptabilität des Organismus überschreiten und dadurch zur Krankheitsursache werden können.



Die physische Aktivität, gegeben durch die Energiedurchsätze und die mechanischen Belastungen, ist der biologische Stimulus für die adaptiven aber auch maladaptiven Veränderungen (Abbildung 4). Die vermittelnden Schnittstellen bzw. die Wirkungsketten zwischen den globalen Merkmalen der Aktivität und den Mechanismen der Strukturanpassung sind bisher nicht geklärt. Sicher ist, dass z. B. die Muskelfasern eine ausgeprägte Plastizität in beide Richtungen besitzen, um die Muster und Intensitäten der Kontraktionen zu beantworten. Es scheint sogar, dass die mechanische Belastung der Muskelfasern wichtiger für deren Anpassung ist als die Konzentration männlicher Sexualhormone, denn weder das Fehlen noch der Überschuss an Testosteron beeinflussen die Immobilisationsfolgen (9). Die mechanische Belastung kann auch als Modulator für die Länge der Myofibrillen angesehen werden.

Das markantesten Merkmal der Immobilisation bzw. einer chronischen Inaktivität ist die Muskelatrophie. Der Proteinkatabolismus reagiert sehr schnell auf Ruhigstellung. Nach 5 Tagen Bettruhe beginnt die erhöhte Stickstoffausscheidung im Urin und in der zweiten Woche kann sie schon 20 – 43 % höher sein (10). Neuerdings (11) wurde der Atrophiebeginn innerhalb von 4 – 6 Stunden gefunden. Eine chronische Inaktivität und Immobilisation haben nicht nur Auswirkungen nur auf den Muskel, sondern komplexe Folgen für das gesamte SMS sowie die Logistik- und

Regulationssysteme. Je nach Ausmaß der Verminderung des Aktivitätslevels führen die Atrophieprozesse zur Reduzierung der Leistungs- und Kompensationsfähigkeit des SMS. Die Beziehung Belastung- Beanspruchung „wirkt nun negativ“ und die reduzierten Beanspruchungen beeinflussen:

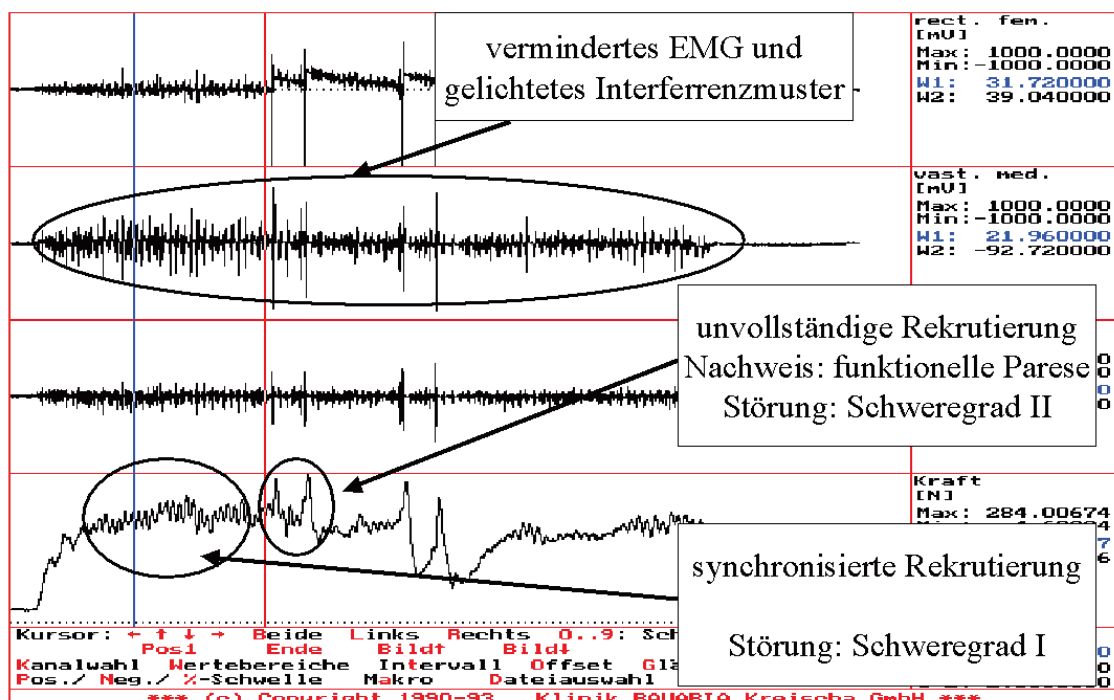
- direkt die quantitativen und qualitativen Voraussetzungen der Koordination,
- über die aeroben Durchsatzraten im Energiestoffwechsel die Ausdauer und
- über die fehlenden Spannungsentwicklungen die Erhaltung der kontraktile Strukturen und die Festigkeit der Sehnen, Kapseln, Bänder und Knochen.

Gleichermaßen werden die neuro-vegetativen und hormonellen Regulationssysteme kaum gefordert und es finden in deren Strukturen Involutionsprozesse statt.

Es gilt generalisiert das Prinzip „Was nicht benutzt wird, wird abgebaut“. Inaktivität und Immobilisation sind destruktive Reize“ und die Komplikationen der Immobilisation sind wesentlich einfacher und ökonomischer präventiv zu beeinflussen, als später zu behandeln.

Es entsteht eine generalisierte Atrophie mit Funktionsinsuffizienz, verminderter Belastbarkeit und Kompensationsfähigkeit sowie schnellerer Ermüdungsentwicklung. Eine unveränderte oder sogar erhöhte Ermüdungsresistenz wird vorgetäuscht.

Abbildung 5  
Die Abbildung fasst die Merkmale der Funktionsstörung des Grades I und II im SMS nach Gelenkverletzungen zusammen.



Nach akuten Gelenkverletzungen (Kapsel- Band- Verletzungen, Frakturen) ist eine sensomotorische Funktionsstörung in 2 Schweregraden (Abbildung 5, 12, 13, 14) ein immanenter Bestandteil des klinischen Bildes.

**Schweregrad 1:**

qualitative Veränderungen der willkürlichen Aktivierungsfähigkeit der motorischen Einheiten des Muskels und der intramuskulären Koordination

Die qualitative Veränderung besteht in einer Reduzierung der Entladungsraten der motorischen Einheiten und nicht obligat in einer verstärkten Synchronisation der Entladungen (Veränderung der intramuskulären Koordination). Letzteres kann zu Oszillationen der Muskelkontraktion führen.

Dieser Schweregrad ist diagnostisch charakterisiert durch einen wesentlichen Kraftverlust, einer noch vollständigen willkürlichen Aktivierungsfähigkeit aller motorischen Einheiten und dem zum Teil oszillierenden

Kraft-Zeit-Verlauf als Beweis für die gestörte intramuskuläre Koordination. Die Amplitude des Oberflächen-EMG ist vermindert oder kann infolge der pathophysiologisch bedingten Synchronisationen der Motoneuronentladungen sogar gegenüber der Gegenseite erhöht sein (gilt für den "späten" Zeitabschnitt z. B. nach VKB-Verletzung; jenseits des 5. - 6. Postoperativen Monats und nach intensiven Trainingsprogrammen).

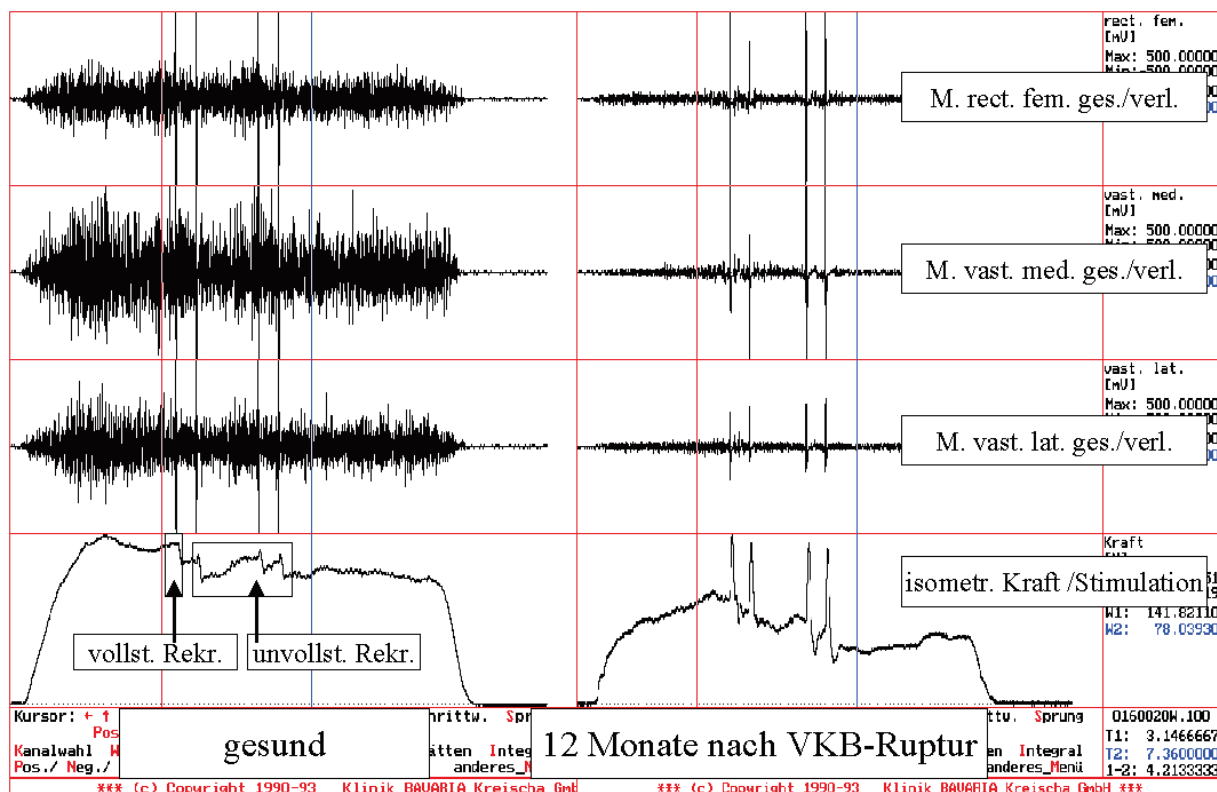
**Schweregrad 2:**

quantitative Verminderung der willkürlichen Aktivierungsfähigkeit von motorischen Einheiten (Rekrutierungsinsuffizienz; funktionelle Teilparese) häufig kombiniert mit den qualitativen Merkmalen des Schweregrades 1.

Eine Funktionsstörung dieses Schweregrades ist ausschließlich durch eine Kombination von Willkürkontraktion und Elektromyostimulation objektiv nachweisbar. Bei ausgeprägten Funktionsstörungen kann

Abbildung 6:

Originalbefund bei einem 23-jährigen Patienten mit Zustand nach Ruptur des vorderen Kreuzbandes vor 12 Monaten. Die ersten 3 Kanäle zeigen das Roh-EMG des M. rectus femoris, des M. vastus medialis und lateralis. Im untersten Kanal ist die Kraftkurve der 10-sekündigen maximalen Willkürkontraktion dargestellt. Die Striche, die zwischen den Markern aus dem EMG ragen, sind die EMG-Antworten auf die supramaximale Stimulation während der Willkürkontraktion. Auf der gesunden Seite reagiert der Muskel auf die erste Stimulation nicht mit einem Kraftanstieg. Es lag eine volle Rekrutierung vor. Dann fällt der Kraftwert ab und die übrigen 3 Stimulationen rufen als Merkmal der nun unvollständigen Rekrutierung einen zusätzlichen Kraftanstieg hervor. Auf der verletzten Seite ist das EMG sehr stark reduziert und die ausgeprägten Stimulationseffekte zeigen eine ausgeprägte funktionelle Teilparese an. Die Amplitude der Stimulationseffekte entspricht auf der gesunden Seite dem Einstellen des Willkürkraftniveaus zwischen 30 % und 40 %.



der stimulationsbedingte Kraftanstieg während einer maximalen isometrischen Kontraktion des M. quadr. fem. so groß werden, wie er unter gesunden Funktionsbedingungen bei der Einstellung eines Kraftwertes von ca. 30 % - 40 % des Maximums gefunden wird (Abbildung 6). Eine Differenzierung der beiden Schweregrade allein aus dem Oberflächen-IEMG ist nicht möglich. Man kann aber davon ausgehen, dass bei Seitendifferenzen im IEMG von mehr als 50 % ein Teil des Muskels der willkürlichen Aktivierungsfähigkeit nicht zugänglich ist.

Die Änderung (Schweregrad 1) bzw. Verminderung (Schweregrad 2) der willkürlichen Beanspruchbarkeit des sensomotorischen Systems und die daraus resultierende relative Inaktivität und Immobilisation führen zur sehr schnellen Atrophie. Aus der funktionellen Insuffizienz der Muskelaktivierung wie den Strukturveränderungen des Muskels resultieren eine bleibend erworbene erheblich reduzierte Trainierbarkeit. Der Ausheilungszustand stellt eine „funktionelle Narbe“ dar. Diese ist primär (Verletzung) und sekundär (immobilisationsbedingte Veränderungen) strukturell verursacht.

Die Prävention und Therapie einer sensomotorischen Koordinationstörung ist aus ihren Ursachen heraus als sehr komplex anzusehen. Für einen erfolgreichen und insbesondere stabilen Therapieerfolg sind letztendlich ausschließlich die aktiven Therapieformen verantwortlich, die systematisch alle sensomotorischen Beanspruchungsformen einbeziehen. Die aus der Sicht der willkürlichen Mitarbeit des Patienten als „passiv“ einzusetzenden Therapieformen (Massagen, Packungen, manuelle Therapieformen, Akupunktur, u.a.) sind wichtige Maßnahmen, um bei Bedarf die aktiven Therapieinhalte vorzubereiten und zu begleiten. Sie müssen die Schmerzen lindern und über die verbesserte Durchblutung die Belastbarkeit sichern. Allein sind diese Therapieformen nur begrenzt und nicht dauerhaft wirksam. Insbesondere die manuellen Therapieformen können für den Patienten „nahezu unmittelbar“ erlebbare sehr positive Wirkungen hervorrufen, die aber nur durch ein sensomotorisches Trainingsprogramm stabilisiert werden können. Ohne die aktive Komponente des Therapieprogramms ist die Funktionsstörung „schnell wieder da“, denn das ursächliche sensomotorische Verhalten und die Kompensationsfähigkeit der Muskulatur (Ausdauer, Kraft) bleiben insuffizient und als ätiologischer Faktor erhalten.

Das bedeutet, dass eine erfolgreiche und stabile Prävention oder traumatologische oder orthopädische Rehabilitation letztendlich nicht ohne gezielte, sys-

tematische und langfristige physische Anstrengung erreichbar ist und demzufolge als ein Trainingsprozess verstanden werden muss. Als Grundlage und wichtigste Komponente des Trainingsprozesses ist grundsätzlich die sensomotorische Beanspruchungsform Koordination anzusehen.

Die folgenden aktiven Inhalte sollten die Präventionsmaßnahmen bei Gesunden und das Therapieprogramm von Patienten prägen. Hierbei werden die bei Bedarf einzusetzenden „passiven“ Anwendungen zur Beeinflussung von Schmerzen, der Beweglichkeit, der Durchblutungsförderung, usw. vorausgesetzt. Gleichfalls der systematische Anstieg der Belastung bei Patienten in Abhängigkeit vom Zustand der Heilungsprozesse.

1. primäre und sekundäre Prävention des gesunden Untrainierten (primär) bzw. bei Personen mit Risikofaktoren. Hierbei ist hinsichtlich des SMS festzustellen ist, dass eindeutige Risikofaktoren für eine Fehlfunktion noch nicht gültig festgelegt sind.

A. vielfältige, jeweils gleichartig wiederkehrende koordinative Anforderungen

Lösung konkreter Gleichgewichtsaufgaben unter Nutzung definierter Trainingsmittel (z. B. auf dem Therapiekreis, instabile Unterlagen, usw.);

Nutzung der modellbezogenen Koordinationstaktik des sensomotorischen Systems, die eine hohe Konstanz der Bewegungsparameter entsprechend des vorausgenommenen Programms anstrebt und dennoch externe Störungen zu kompensieren vermag (6).

B. vielfältige, mit einem hohen Grad an zufälligen sensomotorischen Situationen verknüpfte koordinative Anforderungen

Lösung von sensomotorischen Zielstellungen im Rahmen von Spielen;

Die Eigenheit von Spielen besteht darin, dass bei konstanter Zielstellung Situationen wohl ähnlich aber nie identisch vorkommen und somit über diese zufällige Variabilität der Situationen die sensomotorische Vielfalt unvorhergesehen trainiert werden kann.

Nutzung der zielbezogenen Koordinationstaktik des sensomotorischen Systems, die sich durch Veränderungen des Bewegungsablaufes gegenüber dem primär vorausgenommenen Programm auszeichnet, um „ungeachtet“ von externen Störungen und situativen Veränderungen das Handlungsziel dennoch erreichen zu können (6).

C .Training der allgemeinen aeroben dynamischen Ausdauerleistungsfähigkeit insbesondere der Langzeitausdauer mit Belastungsdauern von 30 – 45 (60) Minuten (entspricht der Langzeitausdauer I und II).

Die Ausdauerleistungsfähigkeit ist die einzige aktive sensomotorische Beanspruchungsform, die zur aktiven Verbesserung der Mikrozirkulation des Muskels führen kann und die aerobe Kapazität der Muskelfasern erhöht.

Das Training der Koordination und der Ausdauer sind die grundlegenden Therapieinhalte bei Beginn des Programms. Beide sensomotorischen Beanspruchungsformen werden parallel eingesetzt. Die später genutzten Bewegungsformen des Krafttrainings werden als koordinative Anforderungen vorbereitet. Diese koordinative Vorbereitung basiert auf der Vorstellung, dass jede „falsche“, ungenügend koordinierte Bewegungsausführung als Fehlbelastung wirkt. Das Ausdauertraining schafft die strukturellen und funktionellen Voraussetzungen für eine ausreichende Belastungsverträglichkeit und Erholungsfähigkeit. Koordination und Ausdauer stehen somit hinsichtlich ihrer Wertigkeit für den Therapiefortschritt auf der gleichen Stufe.

D .Training der Kraft(ausdauer)fähigkeit auf der Grundlage einer korrekten Koordination

2.tertiäre Prävention des Patienten ( Z. n. Verletzung, Operation und Immobilisation ):

A.Training der sensomotorischen Koordination und der Ausdauer für die gesunde, belastbare Körperregion

B.Versuch der Wiederherstellung der vollständigen willkürlichen Aktivierungsfähigkeit der betroffenen Muskeln der Gelenkregion (intramuskuläre Koordination).

C.Versuch der zeitlichen Wiedereingliederung der Muskulatur in das sensomotorische Ansteuerungsmuster bei (letztendlich) vielfältigen, jeweils stabil wiederkehrenden koordinative Anforderungen ( intermuskuläre Koordination )

und

Korrektur des verletzungs- oder erkrankungsbedingt geänderten sensomotorischen Verhaltens (Ausweich-, Kompensationsbewegungen) bei Alltagsbelastungen (z. B. dem Gehen, Treppe steigen, usw.)

Bei entsprechender Belastbarkeit und Vorbereitung durch wiederkehrende koordinative Anforderungen Einsatz von Spielen.

Für die Zielstellungen B. und C. müssen die aktiven Therapieformen der Krankengymnastik, die ausschließlich auf die koordinative Funktion ausgerichtet sind Sorge tragen und systematisch diejenigen der medizinischen Trainingstherapie eingesetzt werden. Auch wenn es durch die strukturellen Veränderungen infolge von Verletzung, Operation oder degenerativer Zerstörungen unmöglich ist, den vorherigen funktionellen Zustand wieder herzustellen (13,14), so muss dennoch das Ziel angestrebt werden, dass die Muskulatur wieder zeit- und intensitätsgerecht an den Bewegungen teilnehmen kann. Der Patient sollte aber darüber aufgeklärt werden, dass die eingetretenen strukturellen Veränderungen gegenüber dem vorherigen, gesunden Zustand zwangsläufig auch zu bleibenden funktionellen Veränderungen führen. Gerade der schnellere und ausgeprägtere morphologische und funktionelle Verlust nach Verletzung und bei Erkrankung erfordert notwendigerweise eine systematische aktive Therapie, um die koordinativen Fähigkeiten und konditionellen Fähigkeiten Ausdauer und Kraft zu erhalten und zu verbessern, aber auch eine veränderte Einstellung des Patienten zu seiner wieder erreichbaren Leistungsfähigkeit. Warum der eine Patient bei gleicher Diagnose, Therapie und hoher Motivation schnellere Fortschritte macht und bessere Endergebnisse erreicht als der andere Patient hat sehr komplexe Ursachen, die nicht im Detail geklärt sind.

D.So früh wie möglich (beachte: Belastbarkeit) Beginn des Trainings der Ausdauerleistungsfähigkeit mit der Zielstellung, die mit der Immobilisation direkt verbundenen strukturellen Veränderungen zu stoppen und damit auch die Durchblutungssituation des Muskels zu stabilisieren und zu verbessern.

Diese Zielstellung ist direkt mit der Wirksamkeit von kraft und kraftausdauerorientierten Therapieinhalten verbunden, da die Sauerstoffversorgung die anabolen Stoffwechselprozesse und damit die erreichbare Hypertrophie begrenzt.

Systemisch betrachtet ist das Ausdauertraining wesentlich für die logistische Ver- und Entsorgungsfunktion des Herz-Kreislauf-Systems.

E.Training der Kraft(ausdauer)fähigkeit auf der Grundlage einer korrekten Koordination

Als diagnostisches Hilfsmittel der Wahl für die Beurteilung der sensomotorischen koordinativen Beanspruchung oberflächlich gelegener Muskeln kann die kinesiologische Elektromyographie essentielle Informationen liefern. Spiegelt doch das EMG objektiv wieder, ob, wann, wie lange und wie intensiv ein Mus-

kel an Körperhaltungen und Bewegungen beteiligt ist. Ein therapeutischer Effekt durch eine aktive Anwendung ist eben nur erreichbar, wenn der anzusprechende Muskel auch mit einer Mindestintensität in Funktion versetzt wird.

Es kann festgestellt werden, dass die koordinativen Defizite in der Bewegungsprogrammierung bereits bei Gesunden nachweisbar sind, wobei zur Zeit damit noch nicht eine Prognose zur Entstehung einer Erkrankung des Stütz- und Bewegungssystems verbunden werden kann. Patienten mit Rückenschmerzen sind Veränderungen der Koordination ein wesentliches Merkmal des kinesiologischen Befundes. Hodges (15) zeigte eine abweichende posturale Reaktion des M. transversus abdominis (fine wire electrodes) zwischen gesunden Personen und low back pain Patienten bei Bewegungen steigender Komplexität. Bei den Gesunden blieb die Reaktionszeit dieses Muskel unabhängig von der Aufgabe konstant kurz, wogegen sie bei den Patienten gemeinsam mit denen der schrägen Bauchmuskeln anstieg.

Bei Gesunden werden die Rumpfmuskeln immer vor der Bewegung der oberen Extremität aktiviert und damit die Wirbelsäule vorwegnehmend stabilisiert (16) und von den Bauchmuskeln ist immer der M. transversus abdominis der zuerst aktive Muskel (16). Bei chronischen Schmerzpatienten ist diese stabilisierende Muskelfunktion nicht mehr ein Bestandteil des sensomotorischen Programms. Es liegt demnach eine Veränderung der Programmierung und Organisation der Stützensensomotorik vor.

Bewegungen der oberen Extremität mit moderater und hoher Geschwindigkeit sind auch bei klinisch schmerzfreen, ehemaligen Rückenschmerzpatienten noch mit einer veränderten Strategie der Rekrutierung der Rumpfmuskeln verbunden (18).

Akute Verletzungen (12, 13, 19) und auch chronisch-degenerative Erkrankungen (19,20,21,22) führen funktionell zu vergleichbaren Resultaten der sensomotorischen Koordination. In beiden Fällen ist die Propriozeption als Ausgangspunkt einer qualitativ guten und adäquaten koordinativen Leistungsfähigkeit des sensomotorischen Systems beeinträchtigt. Offensichtlich sind die Arbeitsbedingungen der Propriozeptoren mit dem Adaptations- oder Deadaptationszustand der Gewebe verbunden: für den Muskel wären dies die Kraft auf der Basis der kontraktiven Kapazität und die aerobe ATP-Resynthese auf der Basis der aeroben Kapazitäten. Daraus resultiert eine qualitative Veränderung der Propriozeption (reversibles Stadium) und über den chronischen Degenerationsprozess des

Muskelgewebes wie der Bindegewebsstrukturen der Gelenke ein quantitativer Verlust (irreversibles Stadium) propriozeptiver Informationen mit den entsprechenden negativen Auswirkungen auf Haltung und Bewegung einschließlich der Kontroll- und Korrekturmechanismen des sensomotorischen Systems. Somit hätten die koordinativen Probleme der Gelenkverletzten wie der z. B. low back pain Patienten strukturell die gleichen Ursachen. Das sensomotorische System ist auf seiner sensorischen Seite strukturell akut oder chronisch geschädigt. Training der motorischen Beanspruchungsformen Ausdauer und Kraft sind zugleich wichtige Therapiemittel zur Gesunderhaltung des sensorischen Teils des sensomotorischen Systems und nicht „nur“ auf die Leistungsfähigkeit des Muskels selbst gerichtet.

#### Literatur:

1. Kavey R E, Daniels S R, Lauer R M, Atkins D L, Hayman L L, Taubert K.: American Heart Association guidelines for primary prevention of atherosclerotic cardiovascular disease beginning in childhood. *Circulation* 107 (2003) 1562 – 1566; *J Pediatrics* 142, 2003; 368 – 372
2. Künstlinger U.: Bewegungsmangel bei Kindern – Fakt oder Fiktion? 3. Konferenz des Club of Cologne, 4.12.03 in Köln. *Dt. Z. Sportmedizin*; 2004; 55:29 – 30
3. Laube W.: Zur Rückführung des vegetativ-chronotropen Tonus, der Erholung im neuromuskulären System und den Wechselbeziehungen zwischen beiden Funktionssystemen nach Auslösung einer identischen anaeroben Stoffwechselsituation durch verschiedene Belastungsarten. Dissertation B (Dr. med. sc.), Humboldt-Universität zu Berlin, Bereich Medizin Charité, Physiologisches Institut 1990
4. Laube, W., Müller, K. Der Muskeltonus aus physiologischer und pathophysiologischer Sicht. Tagungsband zum 5. Mitteldeutschen Symposium „Physikalische und Rehabilitative Medizin“, Halle/S 2001
5. Laube, W., Müller, K. Muskeltonus als biophysikalische und neurophysiologische Zustandsgröße – passiver Muskeltonus. *Manuelle Therapie* 2002; 6: 21- 30
6. Meinel, K. Schnabel, G.: Bewegungslehre Sportmethodik – Abriss einer Theorie der sportlichen Motorik unter pädagogischem Aspekt. Sport Verlag, Berlin, 1998
7. Harre, D: Trainingslehre – Einführung in die Theorie und Methodik des sportlichen Trainings. Sportverlag Berlin, 1986
8. Appell, H-J: Muscular atrophy following immobilisation. *Sports Medicine* 1990; 10: 42 – 58
9. Harjola, V, Jänkälä, H, Härkönen, M : Myosin heavy chain mRNA and protein distribution in immobilized rat skeletal muscle are not affected by testosterone status. *Acta physiol Scand* 2000; 169: 277 – 282
10. Deitrick J E, Whedon G D, Shorr E: Effects of immobilization upon various metabolic and physiologic functions of normal men. *Am J Med* 1948; 4 : 3 – 36
11. Kasper, C E, Talbot, L A, Gaines, J M : Skeletal muscle damage and recovery. *AACN ; clinical issues* 2002; 13: 237 – 247
12. Laube, W., Schultheiß A., Baron, R., Bachl, N.: Zur Diagnostik der funktionellen Teilparese des M. quadr. fem. nach Verletzungen des Kniegelenkes durch Erfassung von Rekrutierung

- tierungsfähigkeit und Entladungsverhalten, in: Scholle, H.Ch., Struppler, A., Freund, H.-J., Hefter, H., Schumann, N.P., Motodiagnostik – Mototherapie, Universitätsverlag Druckhaus Mayer GmbH Jena, 277 - 284, 1994
13. Laube, W.: Neurophysiologische Funktionsstörungen des M. quadr. fem. nach Kreuzbandverletzungen und Aspekte zur indikationsgerechten Therapie, Orthopädie-Technik 1997; 48: 1018 – 1033
14. Laube W., Hildebrand, H.-D. Auswirkungen einer defizitären Propriozeption auf die Bewegungsprogrammierung – koordinative Aspekte nach Kniegelenkverletzungen und bei Rückenpatienten, Orthopädie-Technik 2000; 53: 514 – 550
15. Hodges PW: Changes in motor planning of feedforward postural response of the trunk muscles in low back pain. Exp Brain Res 2001; 141:261 – 266
16. Hodges PW, Richardson CA: Feedforward contraction of transversus abdominis is not influenced by the direction of arm movement. Exp Brain Res 1997; 114: 362 – 370
18. Hodges PW, Richardson CA: Altered trunk muscle recruitment in people with low back pain with upper limb movement at different speeds. Arch Phys Med Rehabil 1999; 80: 1005 – 1012
19. Laube, W., Weber, J., Thue, L., Schleicher, W.: Persistierende Kraftdefizite nach Hüft-TEP und Kreuzband-OP infolge gestörter Muskelaktivierung, Kinesiologische Elektromyographie II, Manuelle Therapie 1998; 2:120 – 129
20. Laube, W., Schleicher, W., Thue, L.: Die Reproduzierbarkeit des elektromyographisch-kinesiologischen Musters des Gehens bei Patienten mit Hüft-TEP und die therapeutischen Konsequenzen, 6. Interdisziplinärer Wirbelsäulenkongress, Salzburg, 04. - 06. Oktober, 1996
21. Gill, K.P., Callaghan, M.J.: The measurement of lumbar proprioception in individuals with and without low back pain, Spine 1998; 23: 371 – 377
22. Luoto, S., Aalto, H., Taimela, S., Hurri, H., Pyykko, I., Alaranta, H.: One-footed and externally disturbed two footed postural control in patients with chronic low back pain and healthy control subjects. A controlled study with follow-up, Spine 1999; 23: 2081 – 2090

Korrespondenzadresse des Autors

OA Dr. sc. med Wolfgang Laube

Landeskrankenhaus Feldkirch/Rankweil

Akademisches Lehrkrankenhaus,

Institut für Physikalische Medizin und Rehabilitation

Carinagasse 47, A – 6800 Feldkirch

e-mail: wolfgang.laube@lkh.a