

M. Quante, E. Hille

Propriozeption: Eine kritische Analyse zum Stellenwert in der Sportmedizin

Proprioception: A review of its role in sports medicine

Orthopädische Abteilung (Chefarzt: Professor Dr. med. E.Hille),
Allgemeines Krankenhaus Barmbek, Hamburg

Zusammenfassung

Propriozeption ist die bewußte und unbewußte Verarbeitung afferenter Information über Gelenkstellung, -bewegung und -kraft durch das Zentralnervensystem. Der Einfluß propriozeptiver Information auf die motorische Aktivität geschieht auf mehreren Ebenen des Zentralnervensystems. Es wird angenommen, daß diese Beeinflussung der Motorik wesentlich zum aktiven Schutz des Bewegungsapparates in Belastungssituationen beiträgt. Eine typische Belastungssituation ist sportliche Aktivität, angefangen bei Freizeitsportlern bis hin zum Leistungssport. Die zugrundeliegende Neurophysiologie beinhaltet die Funktion unterschiedlicher Rezeptortypen, und zentralnervöser Kernzentren in Hirnstamm, Kleinhirn, Mittelhirn und Kortex. Sie ist daher sehr komplex und in vielen Punkten noch unverständlich. Das dynamische Verhalten beteiligter muskulärer und neuronaler Strukturen macht die Messung der propriozeptiver Leistung als Ganzes unmöglich. In diesem Artikel wird versucht, aus zahlreichen bisher durchgeführten Untersuchungen gezielt die Information über Neurophysiologie und Testmethodik darzustellen, die sportmedizinische Relevanz erlangen kann. Es ergeben sich, abgestuft nach ihrer Wichtigkeit, zwei wesentliche Konsequenzen:

1. Die Wirksamkeit eines propriozeptiven Trainings zur Prävention und Rehabilitation von Sportverletzungen kann nur

in epidemiologischen Untersuchungen gesichert werden.

2. Mechanismen propriozeptiver Funktion unter Belastungsbedingungen sollten mit geeigneten Methoden untersucht werden, um die Bedeutung der an der Signalverarbeitung beteiligten Ebenen besser verstehen zu können.

Schlüsselwörter: Propriozeption, Testverfahren, Sportmedizin, Propriozeptives Training, Übersicht

Summary

Proprioception is the conscious or unconscious processing by the central nervous system (cns) of afferent information about the position, motion and the forces of joints. Proprioceptive information affects the motor activity at various levels of the cns. It is assumed that this influence on motor activity is one of the main mechanisms in protection of the musculoskeletal system under stress. Sports activities create a typical stress situation, from leisure activities to competitive sports. The underlying neurophysiology comprises the function of different kinds of receptors and nuclei of the brainstem, cerebellum, mesencephalon and cortex of the central neural system. Therefore it is very complex, and many of its aspects are not yet understood. The dynamic behaviour of the muscular and neuronal structures involved makes measuring of the system performance as a whole

impossible. This article tries to focus on and to provide information about neurophysiology and testing methodology gathered from numerous examinations performed up to now which are relevant as far as aspects of sports medicine are concerned. Graded in relation to their importance, two major consequences are revealed:

1. The effectiveness of a proprioceptive training for the prevention and rehabilitation of sports injuries must be proven by appropriate epidemiological studies.
2. Mechanisms of proprioceptive functions under stress should be examined by suitable methods to ensure a better understanding of the significance of the levels involved in signal processing.

Key words: proprioception, test methods, sports medicine, proprioceptive training, review

Einleitung

Eine endgültige Definition der Propriozeption existiert nach wie vor nicht. Die Annäherung an eine Definition kann lauten: Propriozeption ist ein Sinnessystem, das die bewußte und unbewußte Verarbeitung afferenter Information über Gelenkstellung, -bewegung und -kraft durch das Zentralnervensystem darstellt. Im weiteren Sinne kommt die afferente Information aus Gleichgewichtsorgan und Auge hinzu. Die integrative Verarbeitung propriozeptiver Information durch das Zentralnervensystem beeinflusst die Funktion und Koordination der Motorik wesentlich (28). Im Sport werden neuromuskuläre Dysbalancen und typische Verletzungen sowie deren Folgen häufig auch auf eine mangelhafte bzw. geschädigte propriozeptive Leistungsfähigkeit zurückgeführt (34). Jede Art von Training und Beanspruchung des Bewegungsapparates setzt einerseits die Funktion der Propriozeption grundlegend voraus, hat jedoch andererseits auch die Potenz, die Propriozeption im Sinne von Trainingseffekten zu beeinflussen (use dependant plasticity). Falsches oder zu geringes Training im Sport wird daher für eine Dysfunktion der Propriozeption mitverantwortlich gemacht, Folgen sind funktionelle Störungen ebenso wie Verletzungen (11). Muskel- und Bandverletzungen wiederum beein-

flussen die Propriozeption durch einen Ausfall von Rezeptorgewebe, der die Störung propriozeptiver Funktion ausweitet. Die neuroanatomischen Grundlagen der Propriozeption sind am Menschen gut untersucht. Unverstanden sind jedoch funktionelle Abläufe der verschiedenen Ebenen der Propriozeption.

Ganz unterschiedliche Strukturen (Rezeptoren in Gelenken und Muskeln, Rückenmark und höhere Ebenen des ZNS) und Einflußgrößen (z.B. körperliche Belastung) tragen zur Funktion der Propriozeption bei, und die Beeinflussung der Motorik ist ebenso komplex (21,28,31). Ein Großteil afferenter Signale aus Muskeln, Sehnen und Gelenken führt nicht zu einer bewußten Sinneswahrnehmung. Beides - die Komplexität der Propriozeption und die überwiegend außerhalb der bewußten Wahrnehmung stattfindende Signalverarbeitung - begründen die Schwierigkeit, geeignete Testverfahren für die Propriozeption zu finden. Für den Bereich Sport ergeben sich folgende Konsequenzen:

1. Es sollten Methoden zur Untersuchung propriozeptiver Leistung eingesetzt werden, die zum Verständnis einzelner propriozeptiver Mechanismen und deren Bedeutung beitragen können.
2. Die gewonnenen Erkenntnisse müssen in entsprechenden Anwendungsgebieten des Sports (Prävention, Rehabilitation von Verletzungen, Förderung koordinativer Fähigkeiten) konsequent umgesetzt werden („propriozeptives Training“).
3. Der Wirksamkeitsnachweis propriozeptiven Trainings muß unter Einbeziehung epidemiologischer Daten, möglichst aus prospektiven Studien, (Verletzungshäufigkeit, funktionelle Dysfunktion etc.) erbracht werden.

Neurophysiologie

Ähnlich wie bei der Biomechanik oder der Molekularbiologie sind auch bei der Propriozeption Grundlagenkenntnisse Voraussetzung für die Umsetzung diagnostischer und therapeutischer Prinzipien. Das propriozeptive System beeinflusst mehrere Ebenen motorischer Funktion, die Propriozeption selbst wiederum unterliegt auf mehreren Ebenen einer Regulation kortikaler und subkor-

tikaler Zentren (Abb. 1). Zunehmend existieren jedoch Meßverfahren von ausreichender Empfindlichkeit, die entsprechende Untersuchungen muskulärer und zentralnervöser Funktion bzw. Aktivität erlauben.

Nomenklatorisch ist wichtig, daß Propriozeption ein rein afferentes System ist. Wird die Motorik bei der funktionellen Betrachtung mit einbezogen, spricht man bereits von sensomotorischen Regulationsmechanismen, bei denen auch ein weiteres wichtiges afferentes System Bedeutung hat, das hier nur kurz erwähnt wird: die Nozizeption.

Die folgende Darstellung der Neurophysiologie dient als Übersicht, kann im Rahmen dieses Artikels jedoch nicht vollständig sein. An dieser Stelle muß auf entsprechende Arbeiten verwiesen werden (5,19,21,28,31).

Die Mechanorezeptoren erlauben eine Umwandlung mechanischer Kräfte in affe-

zieren auf weitere Neuronengruppen (21).

1. Interneurone, die die segmentale und intersegmentale Informationsverarbeitung durch hemmenden und erregenden Einfluß mitbestimmen. Hier sind polysynaptische Reflexe oder Hemm- und Aktivierungsmechanismen zwischen Agonisten und Antagonisten einzuordnen.
2. Projektionsneurone, die die Information an supraspinale Zentren weiterleiten (Thalamus, Cortex, Cerebellum).
3. Alpha-Motoneurone, die direkte Signale aus Muskelspindelafferenzen erhalten (Monosynaptische Reflexe).

Neben den genannten Neuronengruppen, die die Mechanoafferenzen verarbeiten, existieren multirezeptive Neurone (wide-dynamic-range-Neurone, WDR-Neurone) im Rückenmark, die sowohl mechanorezeptive als auch schmerzhaft Afferenzen integrieren. Bereits auf dieser Ebene bestehen neuronale Netzwerke, die hem-

Tabelle 1: Charakterisierung der Mechanorezeptoren anhand ihrer Lokalisation, neurophysiologischen Eigenschaften und ihrer Funktion.

Rezeptortyp	Lokalisation	Reizleit. - Adaptation	Funktion
Ruffini	Kapsel-BGW dorsale Bänder	25-70 m/s - langsam niedrige Schwelle	Reizantwort korreliert zu intraartikulärem Druck
Pacini	wie Ruffini, aber geringe Anzahl	25-70 m/s - schnell niedrige Schwelle	Beschleunigungs- und Vibrationsdetektor
Golgi-Mazzoni Golgi-Sehnenorgan	äußere Kapsel Sehne (Insertionsnah)	25-70 m/s - unklar 30-70 m/s - unklar	Reaktion auf lokalen Druck Dehnungsrezeptor
Muskelspindel	parallel zu extrafusalen Muskelfasern	afferent 25-70 m/s Besonderheit: Längen- anpassung efferente Innervation	Längenmesser und Bewegungsdetektor der Muskulatur, Vorspannung der Muskulatur durch efferente Innervation

rente elektrische Signale. Verschiedene Rezeptortypen sind nach ihrer Reizspezifität, ihrem Adaptationsverhalten, ihrer Verteilung in Strukturen des Bewegungsapparates und nach ihrer Morphologie unterscheidbar (s. Tab. 1) (5,8,15,16,18,23). Die Signale aus den Rezeptoren ziehen über afferente Fasern in das Rückenmark. Auf Ebene des Rückenmarkes beginnt dann eine erste integrative Verarbeitung dieser Information. Fortsätze der Rezeptorneurone ziehen zu supraspinalen Zentren, Verzweigungen der Fortsätze proje-

mende und erregende Konvergenzschaltungen aus mehreren Rezeptorfeldern erlauben. Absteigende Bahnen aus dem somatosensorischen Kortex beeinflussen durch Modulation spinaler Neurone Feldgröße und Empfindlichkeit peripherer Innervationsareale. Dies erlaubt einerseits die Fokussierung bestimmter Informationen, andererseits die Ausblendung überflüssiger Information (Neuroplastizität; Beispiel: die Ausblendung propriozeptiver Information bei rhythmisch/automatisch ablaufenden Bewegungen, akute und

chronische Adaptationsprozesse) (20, 29). Dieser Einfluß aus höheren Zentren entsteht im ZNS topologisch dort, wo propriozeptive Information in die Regulation der Sensomotorik einfließt.

Propriozeptive Afferenzen erreichen das Zentralnervensystem, wo neben anderen Kerngebieten als Projektionsareale insbesondere der Thalamus (30), die Großhirnrinde (Area 3a für die Muskelspindeln, Area 2 für Gelenkrezeptoren)

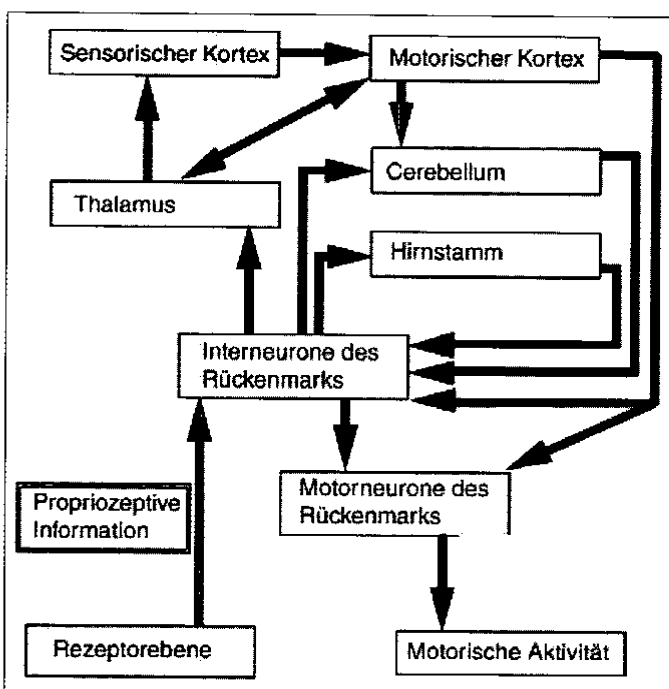


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kernzentren des Zentralnervensystems, die an der Weiterverarbeitung propriozeptiver Information beteiligt sind. Die Pfeile deuten an, wie die Zentren einer wechselseitigen Beeinflussung unterliegen. Die Qualität der Beeinflussung kann dabei hemmend oder erregend sein, eine detaillierte Darstellung dieser Wirkungen erfolgte aus Gründen der Übersichtlichkeit an dieser Stelle nicht. Besonders beachtet werden sollte die multidirektionale Beeinflussung der Interneurone des Rückenmarks, die direkt die motorische Endstrecke über die Motoneurone steuern.

und das Kleinhirn zu nennen sind (19, 31). Das Kleinhirn integriert neben der propriozeptiven Information auch Afferenzen aus anderen afferenten Systemen (z.B. Vestibularissystem). Diese Information erlaubt zusammen mit einer ebenfalls das Kleinhirn erreichenden Efferenzkopie den Abgleich zwischen "Soll" und "Ist" von Bewegungen (Koordination).

Auch kortiko-kortikale Verbindungen zwischen sensorischem und motorischem Kortex beeinflussen Reaktionen der Körperperipherie. Beispielsweise ist hier der Ausgangspunkt für die absteigenden hemmenden Bahnen, die wiederum die Motorik und Sensorik auf Rückenmarkebene verändern.

Messung der propriozeptiven Leistung

Die kurzgefaßte Darstellung der Neurophysiologie soll verdeutlichen, daß die propriozeptiven Afferenzen auf mehreren Ebenen verarbeitet werden und auf mehreren Ebenen Einfluß auf die Motorik nehmen. Hinzu kommen modulierende Einflüsse auf Prozesse der Reizweiterleitung

und -verarbeitung durch deszendierende Bahnsysteme. Ein Großteil der Interaktion zwischen Motorik und Sensorik geschieht außerhalb der bewußten Wahrnehmung. Schließlich hängt schon auf Rezeptorebene die Reaktion des afferenten Systems stark vom Ausgangswinkel der Gelenkbildenden Weichteil- und Bandstrukturen ab (15,16).

Psychophysische Tests (Messung der Bewegungsschwelle, Fähigkeit zur Reproduktion voreingestellter Winkel (aktiv oder passiv) und "Tracking") sind die Testverfahren, die häufig zur Beurteilung der Propriozeption von Menschen

herangezogen werden. Die Übertragung der Ergebnisse und deren Einschätzung für den Sportbereich ist nur begrenzt möglich:

1. Wie einzelne Mechanismen der Propriozeption den Testausgang beeinflussen, ist weitgehend unverstanden. Kausale Rückschlüsse aus den Ergebnissen sind daher nur eingeschränkt möglich. Beispiel: Die Verbesserung eines Testergebnisses bedeutet nicht zwangsläufig, daß eine nützliche Verbesserung propriozeptiver Funktion eines Individuums eingetreten ist.
2. Die Testung erfolgt unter Ruhebedingungen. Mögliche propriozeptive Funktion, die eher in Grenzbereichen der Be-

lastung (Sport) wirksam wird, ist somit nicht erfaßbar (Abb. 2).

3. Inwieweit die Testung Abläufe außerhalb der bewußten Wahrnehmung erfaßt ist unklar.
4. Das Testergebnis des Winkelreproduktionstest ist intraindividuell inkonstant (24)
5. Die Effekte von Training sind teilweise paradox, d.h. sie führen zu einer Verschlechterung des Testergebnisses (z.B. Winkelreproduktionsvermögen bei Balletttänzern; (2)) oder beeinflussen die Testergebnisse unterschiedlicher psychophysischer Testverfahren in entgegengesetzte Richtung (4). Die Ergebnisse der psychophysischen Testverfahren für Propriozeption sind also sicher durch Training beeinflussbar. Welche Auswirkungen jedoch für die Gesamtleistung des propriozeptiven Systems resultieren, kann anhand der Testergebnisse nicht festgestellt werden. Für die Anwendung in der Betreuung von Sportlern bedeutet dies, daß die gezielte Verbesserung eines psychophysischen Testergebnisses durch Training nicht gleichzusetzen ist mit einer erfolgreichen Verbesserung der propriozeptiven Gesamtleistung eines Sportlers.

Gezielte Analysen der Muskelfunktion als Endstrecke regulierender propriozeptiver Funktion erlaubt die Elektromyographie (EMG). Sie stellt eine Möglichkeit dar, durch Betrachtung der muskulären Endstrecke im Rahmen sensomotorischer Funktion Rückschlüsse auf mögliche Einflüsse der Propriozeption zu ziehen. Sie mißt nicht primär eine unmittelbare propriozeptive Funktion. Sie bietet für den Sportbereich besondere Vorteile:

1. Es können Untersuchungen unter Belastungsbedingungen durchgeführt werden (14,33).
2. Trainingseffekte (35) und die Anwendung externer Stabilisationshilfen (beispielsweise Tape; 1,27) können anhand ihrer Wirkung auf die Muskelaktivierung und das Regulationsverhalten (intermuskuläre Koordination) gezielt untersucht werden.
3. Pathologische Aktivierungsparameter muskulärer Aktivität können definiert und gezielt erkannt werden (38).

Elektroenzephalographie (EEG) und Magnetenzephalographie (MEG) (17) ermöglichen zusammen mit moderner Loka-

lisationssoftware die Analyse kortikaler und subkortikaler Aktivitätszentren in primären und sekundären Projektionsarealen der Propriozeption. Die experimentelle Veränderung von propriozeptiven Afferenzen der Körperperipherie und deren Auswirkungen auf kortikale Verarbeitungszentren (9,10) stellen eine erste Grundlage für die Untersuchung des propriozeptiven Systems mit diesen Methoden dar. Untersuchungen an Patienten mit vorderer Kreuzbandruptur dokumentieren im EEG zentralnervöse Veränderungen des primär somatosensorischen Kortex (40), und eine kortikale Repräsentation afferenter Information aus dem vorderen Kreuzband ist nachgewiesen (32). Auch der Einfluß funktioneller Zustandsänderungen (Beinbewegung) der Körperperipherie auf die reizverarbeitenden kortikalen Areale wurde untersucht (36, 37).

Ob die Methoden zur Untersuchung propriozeptiver Signalverarbeitung umfangreich nutzbar sind, kann erst abschließend beurteilt werden, wenn entsprechende Standarddaten vorliegen.

Bisherige Ergebnisse aller genannten Untersuchungsverfahren zeigen eine Beeinträchtigung der Propriozeption großer Gelenke im Zusammenhang mit typischen Verletzungen und Dysfunktionen des Bewegungsapparates (22). Schwierig ist die Rolle der Propriozeption bei der Entstehung von Verletzungen zu bewerten, da selten (3,11,12,13) Daten vom Zustand der Propriozeption vor Verletzung erhoben werden können. Als Evidenz für die Bedeutung der Propriozeption im Sport können epidemiologische Daten und die Ergebnisse aus Voruntersuchungen herangezogen werden:

1. Übereinstimmend kann aus Befunden psychophysischer, elektromyographischer und elektroenzephalographischer Untersuchungen geschlossen werden, daß Verletzungen eine Veränderung somatosensorischer und spezieller propriozeptiver Leistungscharakteristika bedingen (22,25).
2. Vor größeren Verletzungen ohne Fremdeinwirkung bestehen häufig Vorverletzungen, die einen Schädigungsmechanismus propriozeptiver Strukturen darstellen und so das afferente propriozeptive System schädigen (11,13).
3. Gezieltes propriozeptives Training verringert in den bisher durchgeführten

Studien die Verletzungshäufigkeit wesentlich (7,11,13).

Umsetzung des aktuellen Wissens für den Sport

Die Konsequenzen aus der knappen Zusammenfassung über die Propriozeption ergeben sich für den Sport auf mehreren Ebenen.

Anwendungen liegen in der Prävention und Rehabilitation von Sportverletzungen (25,26). Ziel des Trainings ist die Aktivierung propriozeptiver Mechanismen und die Schulung motorischer Abläufe. Dies ist der Fall bei allen Übungen, für deren Gelingen die ständige Regulation motorischer Aktivität durch afferente Signale nötig ist. Anwendung finden spezielle Übungen auf instabilen Unterlagen ("wob-

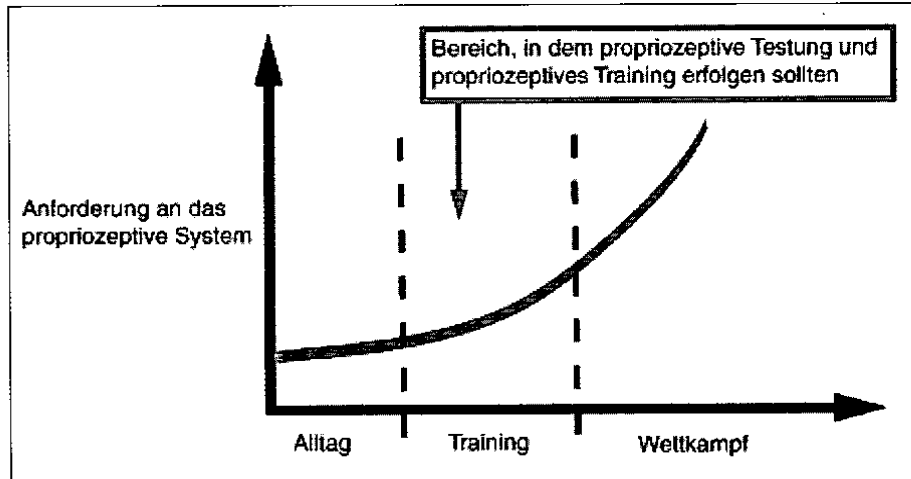


Abbildung 2: Veranschaulichung des Zusammenhangs von der Belastung des Bewegungsapparates und Anforderung an das propriozeptive System. Es soll deutlich werden, daß bei geringer Aktivität die Anforderung und damit Bedeutung des propriozeptiven Systems vergleichsweise gering ist. Erst bei verstärkter Belastung in Training und Wettkampf steigt die Beeinflussung sensomotorischer Steuerung durch propriozeptive Information an. Ob dieses Verhältnis exponentiell oder annähernd linear ist, ist unklar.

1. Für den Sportler ergeben sich oft typische Belastungsmuster für einzelne Strukturen des Bewegungsapparates. Es wird angenommen, daß der Schutz dieser Strukturen auch über propriozeptive Funktion vermittelt wird. Es sind Untersuchungen nötig, die zum besseren Verständnis der Rolle der Propriozeption bei Sportlern (und deren spezieller körperlicher Belastungssituation) beitragen. Die alleinige Dokumentation sensomotorischer Dysfunktion in psychophysischen Testverfahren reicht dazu nicht aus. Die Analyse neuromuskulärer Funktion (motorische Endstrecke, kortikale und subkortikale Aktivitätszentren unter körperlicher Belastung) mit geeigneten Methoden ist Grundlage zur Verbesserung des Kenntnisstandes. Auch die Auswirkung von sogenannten Bagatellverletzungen für den Sportler kann erst verstanden werden, wenn die Bedeutung propriozeptiver Rezeptororgane (Bänder, Sehnen, Muskeln) unter Belastungsbedingungen bekannt ist.
2. Möglichkeiten für propriozeptives Training sind bereits beschrieben, mögliche

ble board“) sowohl der oberen als auch der unteren Extremität in der geschlossenen Kette. Es kann jedoch auch ein "normales" Training abgeändert werden. Beispielsweise sind Trainingseinheiten auf unebenem Grund (Stoppfeld o.ä.) geeignet, körperliche Beanspruchung mit einer propriozeptiven Trainingskomponente zu kombinieren.

3. Ein Test zur Erfolgskontrolle propriozeptiven Trainings existiert nicht. Der Erfolg propriozeptiven Trainings kann bisher nur unter kontrollierten Bedingungen objektiviert werden, indem die Erfolgsbewertung eines solchen Trainings an der erreichten Reduktion von typischen Verletzungen erfolgt. Typische Verletzungen sind unter dem Aspekt der propriozeptiven Fehlfunktion alle Verletzungen ohne Fremdeinwirkung. Der Wirksamkeitsnachweis eines konsequenten propriozeptiven Trainings auf diese Weise ist bisher die Ausnahme (3,11,13). Derartige Untersuchungen sind im Themenkomplex "Sport und Propriozeption" (12) jedoch entscheidend. Neben dieser gesundheits-

ökonomisch sehr relevanten Frage kann auch geklärt werden, ob sportlich-koordinative Leistung durch diese Trainingsform verbessert werden kann. Ganz ausdrücklich sind diese Aspekte für Leistungs- und Breitensport gleichwohl bedeutsam. Dies untermauert einmal mehr die Gesamtbedeutung der Propriozeption für den Sport.

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß die Bedeutung der Propriozeption für die Sportmedizin nur durch aufwendige experimentelle und epidemiologische Studien weitergehend verstanden werden kann. Wissen und Erfahrung vieler Fachrichtungen sind bei derartigen Fragestellungen nötig, so daß die "interdisziplinäre Zusammenarbeit" nicht nur ein Schlagwort, sondern absolute Voraussetzung für das Gelingen dieser Herausforderung ist.

Literatur

- Alt W, Lohrer H, Gollhofer A.: Functional properties of adhesive ankle taping: neuromuskular and mechanical effects before and after exercise. *Foot and ankle international* (1999), 238-245
- Barrack R.L., Skinner H.B., Cook S.D.: Proprioception of the knee joint. Paradoxical effect of training. *Am. J. Phys. Med.* 63 (1984), 4, 175-181 (1984)
- Baumhauer J.F., Alosa D.M., Renstrom A.F., Trevino S., Beynon B.: A prospective study of ankle injury risk factors. *Am. J. Sports Med.* 23 (1995), 5, 564-570
- Bernier J.N., Perrin D.H.: Effect of coordination training on proprioception of the functionally unstable ankle. *J. Orthop. Sports. Phys. Ther.* 27 (1998) 4, 264-275
- Burgess R.C., Clark F.J.: Characteristics of knee joint receptors in the cat. *J. Physiol. (London)* 203 (1969) 317
- Burgess R.C., Wei J.Y.: Signaling of kinesthetic information by peripheral sensory receptors. *Ann. Rev. Neurosci.* 5 (1982) 171-187
- Caraffa A., Cerulli G., Progetti M., Aisa G., Rizzo A.: Prevention of anterior cruciate ligament injuries in soccer. A prospective controlled study of proprioceptive training. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 4 (1996), 1, 19-21
- Clark F.J., Burgess R.C.: Slowly adapting receptors in cat knee joint: can they signal joint angle? *J. Neurophysiol.* 38 (1975) 1448
- Cohen L.G., Starr A., Pratt H.: Cerebral somatosensory potentials evoked by muscle stretch, cutaneous taps and electrical stimulation of peripheral nerves in the lower limbs in man. *Brain* 108 (1985), 103-121
- Cohen L.G., Starr A.: Vibration and muscle contraction affect somatosensory evoked potentials. *Neurology* 35 (1985) 691-698
- Ekstrand J., Gillquist J.: Soccer injuries and their mechanisms: a prospective study. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 15 (1983) 3, 267-270
- Ekstrand J., Lundmark A.: Can sports injuries be prevented? Troubling shortage of controlled trials on the effects of prevention. *Lakartidningen* 95 (1998), 39, 4244-4248
- Ekstrand J., Gillquist J., Liljedahl S.O.: Prevention of soccer injuries. Supervision by doctor and physiotherapist. *Am. J. Sports Med.* 11 (1983) 3, 116-120
- Gollhofer A., Kyrolainen H.: Neuromuscular control of the human leg extensor muscles in jump exercises under various stretch-load conditions. *Int. J. Sports. Med.* 12 (1991) 1, 34-40
- Grigg P.: Mechanical factors influencing response of joint afferent neurons from cat knee. *J. Neurophysiol.* 40 (1975) 1473-1484
- Grigg P., Hoffman A.H., Fogarty K.E.: Properties of Golgi-Mazzoni afferents in cat knee joint capsule, as revealed by mechanical studies of isolated joint capsule. *J. Neurophysiology* 47 (1982) 31-40
- Hämäläinen M., Hari R., Ilmoniemi L.J., Knutila, Louvasmaa O.V.: Magnetoencephalography - theory, instrumentation applications to noninvasive studies of the working human brain. *Rev. Mod. Phys.* 65 (1993) 413-497
- Haus J., Halata Z., Refior H.J.: Proprioception in the anterior cruciate ligament of the human knee joint - morphological bases. A light, scanning and transmission electron microscopy study. *Z.Orthop. Ihre Grenzgeb.* 130 (1992) 6, 484-494
- Heimer M.: The human brain and spinal cord. Springer, New York, (1983)
- Hutton R.S., Atwater S.W.: Acute and chronic adaptations of muscle proprioceptors in response to increased use. *Sports medicine* 14 (1992) 6, 406-421
- Jankowska E.: Interneuronal relay in spinal pathways from proprioceptors. *Prog. Neurobiol.* 38 (1992) 4, 335-378
- Jerosch J., Prymka M.: Proprioception and joint stability. *Knee. Surg. Sports. Traumatol. Arthrosc.* 4 (1996) 3, 171-179
- Khalsa P.S., Hoffman A.H., Grigg P.: Mechanical states encoded by stretch-sensitive neurons in feline joint capsule. *J. Neurophysiol.* 76 (1996) 1, 175-187
- Kramer J., Handfield T., Kiefer G., Forwell L., Birmingham T.: Comparisons of weight-bearing and non-weight-bearing tests of knee proprioception performed by patients with patello-femoral pain syndrome and asymptomatic individuals. *Clin. J. Sport. Med.* 7 (1997) 2, 113-118
- Lephart S.M., Pincivero D.M., Giraldo J.L., Fu F.H.: The role of proprioception in the management and rehabilitation of athletic injuries. *Am. J. Sports Med.* 25 (1997) 1, 130-137
- Lephart S.M., Henry: The physiological basis for open and closed kinetic chain rehabilitation for the upper extremity. *J Sport Rehab.* 5 (1996) 71-87
- Lohrer H., Alt W., Gollhofer A.: Neuromuscular properties and functional aspects of taped ankles. *Am. J. Sports. Med.* 27 (1999) 1, 69-75
- McCloskey D.I.: Kinesthetic Sensibility. *Physiol. review* 58 (1978) 763-820
- Merzenich M.M., Kaas J.H., Wall J., Nelson R.J., Sur M., Felleman D.: Topographic reorganization of somatosensory cortical areas 3b and 1 in adult monkeys following restricted deafferentation. *Neuroscience* 8 (1983) 33-55
- Mountcastle V.B., Poggio G.F., Werner G.: The relation of thalamic cell response to peripheral stimuli varied over an intensive continuum. *J. Neurophysiol.* 26 (1963) 807-834
- Nieuwenhuys, Voogd, van Huijzen: The human central nervous system. 3rd edn. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1988
- Pitman M.I., Nainzadeh N., Menche D., Gasalberti R., Song E.K.: The intraoperative evaluation of the neurosensory function of the anterior cruciate ligament in humans using somatosensory evoked potentials. *Arthroscopy* 8 (1992) 4, 442-447
- Scheuffelen C., Rapp W., Gollhofer A., Lohrer H.: Orthotic devices in functional treatment of ankle sprain. Stabilizing effects during real movements. *Int. J. Sports. Med.* 14 (1993) 3, 140-149
- Schutte M.J., Happel L.T.: Joint innervation in joint injury. *Clin. Sports. Med.* 9 (1990) 2, 511-517
- Sheth P., Yu B., Laskowski E.R., An K.N.: Ankle disk training influences reaction times of selected muscles in a simulated ankle sprain. *Am. J. Sports. Med.* 25 (1997) 4, 538-543
- Staines W.R., Brooke J.D., Cheng J., Misiaszek J.E., MacKay W.A.: Movement-induced gain modulation of somatosensory potentials and soleus H-reflexes evoked from the leg. I. Kinesthetic task demands. *Exp. Brain Res.* 115 (1997) 1, 147-155
- Staines W.R., Brooke J.D., Cheng J., Misiaszek J.E., MacKay W.A.: Movement-induced gain modulation of somatosensory potentials and soleus H-reflexes evoked from the leg. II. Correlation with rate of stretch of extensor muscles of the leg. *Exp. Brain Res.* 115 (1997) 1, 156-164
- Thoumie P., Do M.C.: Changes in motor activity and biomechanics during balance recovery following cutaneous and muscular deafferentation. *Exp. Brain Res.* 110 (1996) 2, 289-297
- Tropp H., Askling C., Gillquist J.: Prevention of ankle sprains. *Am. J. Sports Med.* 13 (1985) 4, 259-262
- Valeriani M., Restuccia D., DiLazzaro V., Franceschi F., Fabbriani C., Tonali P.: Central nervous system modifications in patients with lesion of the anterior cruciate ligament of the knee. *Brain.* 119 (1996) 1751-1762

Anschrift für die Autoren:
Dr. med. M. Quante
Allgemeines Krankenhaus Barmbek
Abteilung für Orthopädie
Rübenkamp 148
22291 Hamburg
Tel.: 040/6385-3308
Fax: 040/6385-2153