GEORG WYDRA

Stretching – ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung

1 Einleitung

Die Muskeldehnung ist im letzten Jahrzehnt Gegenstand zahlreicher Publikationen gewesen. Anlaß dazu war die kritische Auseinandersetzung mit den traditionellen Dehntechniken im Sport. In einer Reihe von Veröffentlichungen wurden die im Sport bevorzugten dynamischen Dehntechniken hinsichtlich der Verletzungsgefahr kritisch unter die Lupe genommen. Auch unter dem Gesichtspunkt der optimalen physiologischen Durchführung wurden weiche Stretchingtechniken als Methode der Wahl erachtet (vgl. ANDERSON 1982; KNEBEL 1985). DIETRICH et al. (1985, 926) stellen hierzu fest, daß keine Untersuchungen vorlägen, die eindeutig die Überlegenheit einer Methode beweisen würden (vgl. HOSTER 1987). MURPHY (1991, 67) trägt zur Verwirrung bei, wenn er seinen Artikel mit dem Titel „A critical look at static stretching: Are we doing our patients harm?" überschreibt.
Eine intensive Durchleuchtung des Problemfeldes erscheint sowohl für den Theoretiker wie auch den Praktiker als gewinnbringend. Im folgenden sollen sowohl grundlagen-orientierte als auch anwendungs-orientierte Aspekte dargestellt werden.

2 Grundlagen-orientierte Arbeiten

2.1 Untersuchungen zu den morphologischen Veränderungen im Muskel

Die bei der Muskeldehnung ablaufenden Prozesse lassen sich am ehesten durch ein Muskelmodell erklären, bei dem plastische und visko-elastische Elemente parallel und hintereinander geschaltet sind (siehe Abb. 1).
Bei einer Muskeldehnung werden die Aktin- und Myosinfilamente auseinandergezogen. Die Lösung der Aktin-Myosin-Brückenbindungen stellt einen energieverbrauchenden Prozeß dar. Mit zunehmender Muskeldehnung werden neben den kontraktilen auch die retikulären Mikrofibrillen, die Intermediärfilamente und die Connectinfilamente gedehnt. Durch den zunehmenden Widerstand der elastischen Elemente erhöht sich der Gesamtdehnungswiderstand. Innerhalb der Sarkomere kommt hierbei dem Titin eine besondere Bedeutung zu. Das Titin stellt ein elastisches Band dar, das dafür sorgt, daß die Myosinfilamente zentriert werden und eine minimale physiologische Überlappung von Aktin und Myosin auch bei

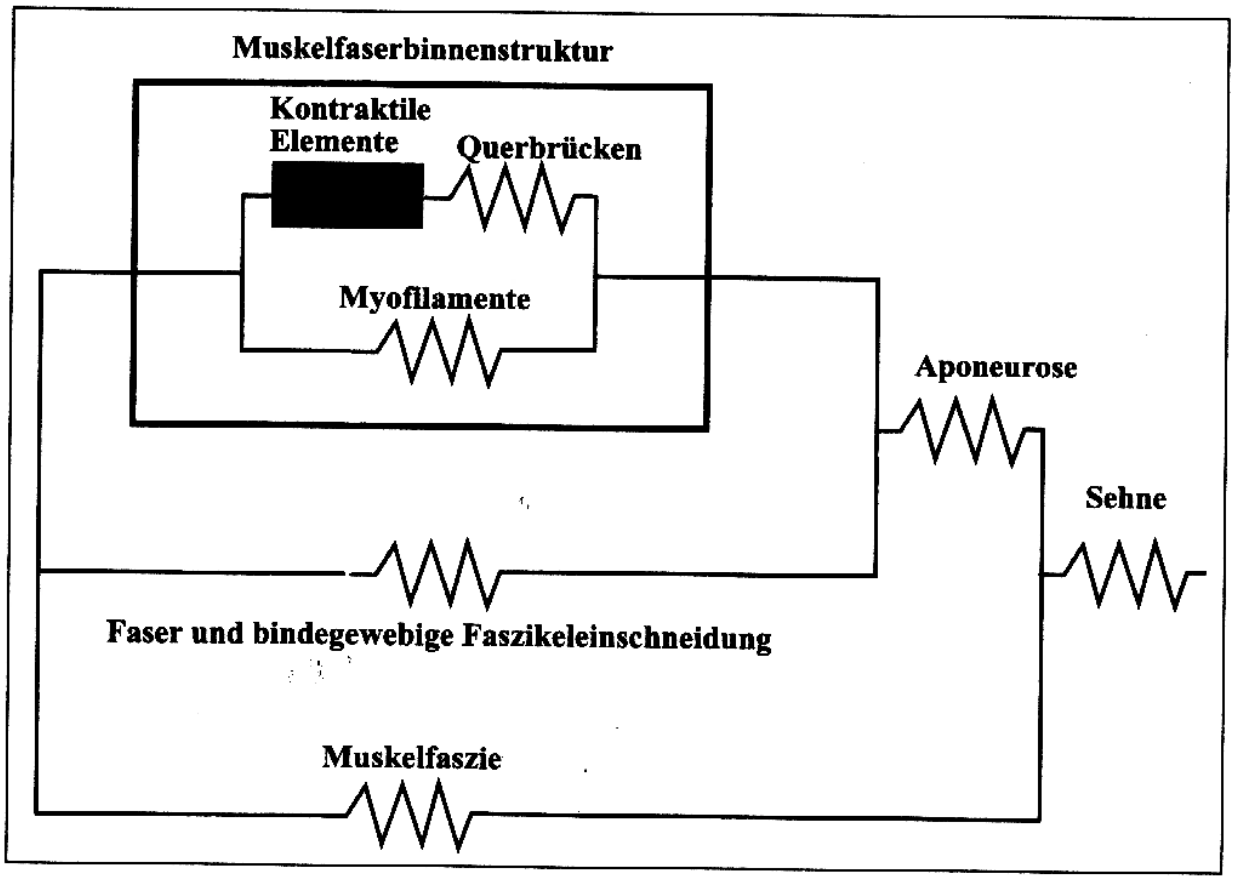

Abb. 1: Der Muskel als Modell von in Serie und/oder parallel geschalteten elastischen und plastischen Elementen (HUIJING 1994 a, 149)

starker Dehnung gewährleistet bleibt (BILLETER/HOPPELER 1994). Mit zunehmender Dehnung nimmt der Überlappungsgrad von Aktin und Myosin und damit die maximal mögliche Spannung der kontraktilen Elemente ab (vgl. STOBOY 1984). Gleichzeitig erhöht sich jedoch die EMG-Aktivität (vgl. KÜCHLER 1983; DIETZ et al. 1984), wodurch ebenfalls eine Limitierung der Bewegungsreichweite erfolgt. Der biologische Sinn dieser zunehmenden Stiffness liegt darin, eine unphysiologische Überdehnung, die bis zum Verlust der Filamentüberlappung führen könnte, zu vermeiden (WIEMANN 1994). ULLRICH/GOLLHOFER (1994, 337) gehen prinzipiell davon aus, daß die Widerstandskräfte im Bereich der maximalen Bewegungsreichweiten nicht auf die aktiven Querbrückenbindungen von Aktin und Myosin zurückzuführen seien, sondern den passiven Zugspannungen des bindegewebigen Materials zugeordnet werden müßten.

Das bindegewebige Material (Sarkolemm, Sehnen) verfügt über visko-elastische Eigenschaften, d. h., das Verhalten des Materials ist in hohem Maße von der Dehnungsgeschwindigkeit abhängig. Visko-elastische Eigenschaften werden nicht nur den kollagenen Fasern, sondern auch den Aktin-Myosion-Querbrücken zugeschrieben (HUIJING 1994 b). Bei einer langsamen oder kontinuierlichen Dehnung verhält sich das Bindegewebe anders als bei einer schnellen Spannungszunahme: Es ist das sog. Creeping-Phänomen zu beobachten. Die Kollagenfibrillen sind im ungedehnten Zustand nicht linear in der Zugrichtung der einwirkenden Kraft orientiert. Mit

zunehmender Spannung erfolgt eine Ausrichtung der Fasern, wodurch sich die Länge der Struktur erhöht (Creeping-Phänomen).
Kollagene Strukturen passen sich an eine Dauerdehnung an. Zum einen kann man eine längenkonstante Relaxation beobachten; d. h., es kommt zu einem Nachlassen der Spannung, wenn eine kollagene Struktur bis zu einer bestimmten Länge gedehnt wird (siehe Abb. 2). Zum anderen kann eine Längenzunahme bei konstanter Spannung beobachtet werden; d. h., bei der Dehnung mit der gleichen Spannung kommt es zu einer Verlängerung der gedehnten Struktur (siehe Abb. 3). Diese bildet sich nach der Dehnung erst sehr langsam zurück (vgl. ULLRICH/GOLLHOFER 1994). Bei Dehnungen isolierter Kollagenfasern können Längenzunahmen in der Größenordnung von 2 bis 5% der Ausgangslage beobachtet werden (ZERNICKE/LOITZ 1994. TAYLOR (1990) konnte die Relevanz der Längen- oder Spannungskonstanz des Muskel-Sehnen-Komplexes für die gebräuchlichen dynamischen und statischen Dehntechniken am Tiermodell aufzeigen.

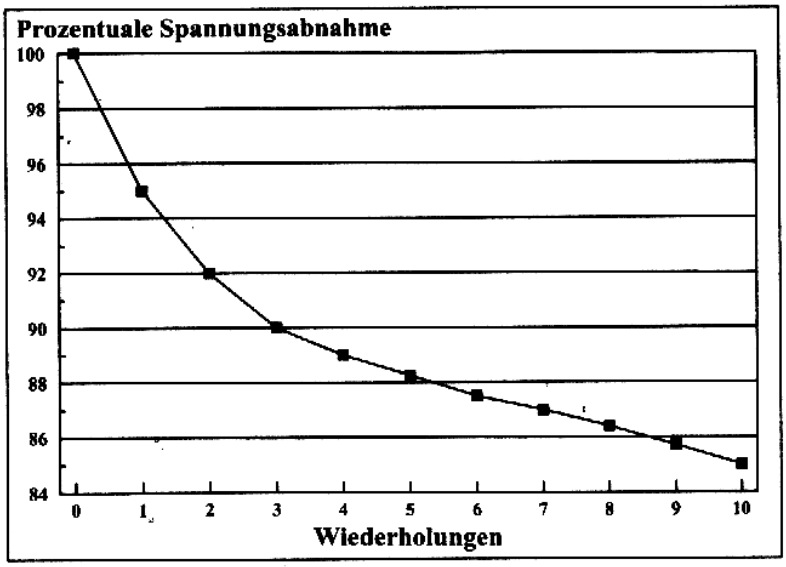

Abb. 2: Spannungsveränderung eines Muskel-Sehnen-Komplexes bei wiederholter Dehnung mit konstanter Bewegungsamplitude. Dieses Vorgehen entspricht dem beim dynamischen Dehnen. Abbildung modifiziert nach TAYLOR (1990, 303)

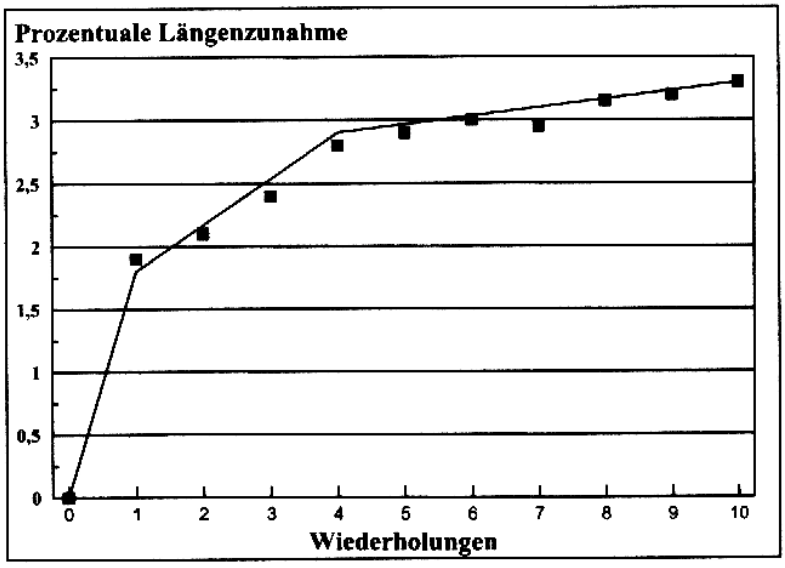

Abb. 3: Längenzunahme eines Muskel-Sehnen-Komplexes bei wiederholter Dehnung mit konstanter Kraft. Dieses Vorgehen entspricht dem bei einer wiederholten statischen Dehnung. Abbildung modifiziert nach TAYLOR (1990, 304)

Bei einer schnellen Dehnung sind Muskulatur und Sehne in der Lage, kinetische Energie zu speichern (vgl. HUIJING 1994 b; KOMI 1994; NOTH 1985). Die Leistungszunahme beim Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus kommt durch eine Potenzierung elastischer und neuronaler Mechanismen zustande. Bei kleinen und schnellen Dehnungen trägt die *short range elastic stiffness* erheblich zum verbesserten Kraftverhalten des Muskels bei. TAYLOR (1990) konnte die Veränderung der Hysteresekurven, d. h. die Veränderung der Längen- und Spannungsverhältnisse, in Abhängigkeit von der Dehnungsgeschwindigkeit aufzeigen. Höhere Dehnungsgeschwindigkeiten führen zu höheren Kräften im Muskel-Sehnen-Komplex. Hierbei spielen auch Wechselwirkungen zwischen Sehne und Muskulatur eine Rolle (vgl. HUIJING 1994 b; NOTH 1985). Bei Dehnungen des Muskels in der Größenordnung von 0,1 bis 0,2% der Ruhelänge kann elastische Energie in den Querbrücken gespeichert werden. Die Hysterese-Eigenschaften des Muskels hängen auch von der Länge der Sehne ab. Eine längere Sehne verbessert den Wirkungsgrad der Muskulatur.
NOTH (1985, 247) zitiert eine Arbeit von NICHOLS/HOUK (1976), „wonach nicht die Kraft oder die Länge des Muskels diejenige Größe ist, die vom Organismus bestimmt und kontrolliert wird, sondern daß die Muskelelastizität der zu regulierenden Parameter ist."
Während die kurzfristigen morphologischen Veränderungen nicht eindeutig interpretierbar sind, ergaben die tierexperimentellen Untersuchungen zu den mittelfristigen morphologischen Veränderungen ein recht einheitliches Bild. Im Tierexperiment konnte bereits nach einwöchiger Dauerdehnung eine Vergrößerung der Sarkomerzahl in Längsrichtung des Muskels beobachtet werden, während das Dickenwachstum erst danach einsetzte (vgl. HOLLY et al. 1980; ASHMORE/SUMMERS 1981). TABARY et al. (1972) konnten eine reversible Zunahme der Sarkomerzahl in Abhängigkeit vom Grad der Dehnung feststellen.
Nach WILLIAMS/GOLDSPINK (1978) versucht der Muskel stets eine optimale Überlappung von Aktin und Myosin aufrechtzuerhalten, wodurch eine optimale Spannung des Muskels gewährleistet ist. Die Länge der einzelnen Sarkomere bleibt dabei konstant und beträgt bei allen Warmblütermuskeln ca. 2,2 µm (vgl. PENZLIN 1977).
Ob es beim Menschen zu einer Zunahme der Sarkomerzahl kommt, wird nach wie vor kontrovers diskutiert (vgl. TAYLOR et al. 1990; GAJDOSIK 1991; ULLRICH/GOLLHOFER 1994; WIEMANN 1994). Im Gegensatz zum Tiermodell sind beim Menschen Experimente mit anschließender Auszählung der Sarkomere nicht möglich, so daß hier von den Veränderungen auf der Außenebene auf die zugrundeliegenden morphologischen Veränderungen geschlossen werden muß.
WIEMANN (1994) geht bei seinen Analysen davon aus, daß die Maximalkraft eines Muskels vom optimalen Überlappungsgrad von Aktin und Myosin abhängig sei. Die Größe der Kraft und der Winkel, in dem die maximale Kraft entfaltet werden kann, können gemessen werden. Käme es durch ein Stretchingprogramm zu einer Längenzunahme des Muskels, so würde sich dadurch der Überlappungsgrad von Aktin und Myosin ungünstig verändern. „Nach dieser Annahme müßte im Kraft-Längendiagramm der Muskel nach der Dehnungsbehandlung die Maximalkraft in einem größeren Gelenkwinkel, d. h. bei einer größeren Momentanlänge, erreichen als vorher" (WIEMANN 1994, 49). In seinem zehnwöchigen Trainingsprogramm konnte WIEMANN entsprechende Veränderungen im Kraft-Längendiagramm nicht beobachten, so daß er davon ausgeht, daß die verbesserte Beweglichkeit nicht

durch morphologische Veränderungen im Sinne einer Muskellängenzunahme zu erklären sei.
EDMAN (1994, 108) weist darauf hin, daß es schwierig sei, aus dem Verhalten des Gesamtmuskels auf das Längen-Spannungs-Verhältnis des einzelnen Sarkomers zu schließen, da sich die Sarkomere selbst innerhalb ein und derselben Muskelfaser sehr unterschiedlich verhalten könnten (vgl. ROY/EDGERTON 1994). EDMAN spricht von einer intrafibrillären Heterogenität, die dazu führen könne, daß die Unterschiede der Maximalkraft der Sarkomere innerhalb einer Faser genauso groß sein könnten wie die zwischen verschiedenen Fasern. Hinzu kommt, daß die optimale Länge der einzelnen Muskelfaser nicht notwendigerweise mit der optimalen Länge des Gesamtmuskels übereinstimmen muß (HUIJING 1994 a).
Zu den Arbeiten von WIEMANN ist zusätzlich festzuhalten, daß es sich bei seinen Probanden um junge Menschen handelte, die keine funktionellen Einschränkungen aufwiesen und zwischen den Trainingseinheiten ihren normalen Alltagsgeschäften nachgingen. Möglicherweise haben sich diese gegen die Einflüsse des Dehnens durchgesetzt.
„Man darf wohl annehmen, daß das Optimum der Sarkomerenzahl so geregelt wird, daß das Optimum der Sarkomerenzahl für diejenige Muskellänge garantiert wird, bei der unter normalen Alltagsbedingungen die größtmögliche aktive und passive Spannung entwickelt wird" (GOLDSPINK 1994, 220). GOLDSPINK 1994 geht davon aus, daß die Sarkomerzahl auch beim Erwachsenen nicht fixiert sei, sondern im Bedarfsfall innerhalb von wenigen Tagen zu- oder abnehmen könne.
Einen anderen Zugang zu dem Problem hat GAJDOSIK (1991) gewählt. Er hat in seiner Studie nicht nur die maximale Bewegungsreichweite als Kriterium herangezogen, sondern auch die durch das Auftreten von EMG-Veränderungen limitierte Bewegungsreichweite. Er interpretiert die beobachteten Verbesserungen der maximalen Beweglichkeit und der maximal tolerierten Zugspannung, ohne daß es zu EMG-Veränderungen kam, als Ausdruck einer Längenveränderung des Muskels analog den Veränderungen, die im Tiermodell zu beobachten sind. ULLRICH/GOLLHOFER (1994, 337) sind sich sicher, daß die langfristigen Effekte eines Dehnprogrammes primär struktureller Art seien und daß es viel plausibler zu sein scheine, eine Vergrößerung des Bewegungsausschlags über veränderte Plastizitätseigenschaften des Bindegewebes zu erkären als durch neuronale Mechanismen (a. a. O. 344).

2.2 Untersuchungen zu den neurophysiologischen Auswirkungen auf die Motoneuronen-Pool-Erregbarkeit

Die aktuelle Stretchingdiskussion setzt sich oftmals mit den vermeintlich günstigeren elektrophysiologischen Bedingungen beim Stretching auseinander, was durch ein Zitat von GUISSARD/DUCHATEAU/HAINAUT (1988, 47) deutlich wiedergegeben wird: „It appears today that static stretching is a better approach, as compared to repetitive dynamic lengthening, because it avoids the reflex activity of the stretched muscle."
Die Beschäftigung mit Dehnungsreflexen geht auf Arbeiten von SHERRINGTON (1904; vgl. HAASE 1976) zu Beginn des Jahrhunderts zurück. Die elektrophysiologisch orientierten Arbeiten beschäftigen sich hauptsächlich mit der EMG-Aktivität während des Dehnens. Jede psychische oder physische Beanspruchung führt zu

einer Erhöhung der Motoneuronen-Pool-Erregbarkeit auch nicht unmittelbar beteiligter Muskeln (vgl. MARK/COQUERY/PAILLARD 1967). Das Hauptinteresse gilt dabei der veränderten elektrischen Auslösbarkeit des HOFFMANN- oder H-Reflexes (HOFFMANN 1922; vgl. JUNG 1976) bei unterschiedlicher Muskelaktivierung vor oder während des Dehnens. Der H-Reflex testet die Erregbarkeit der motorischen Alphafasern durch eine elektrische Stimulation der afferenten Ia-Fasern, die die Muskelspindeln versorgen (HUTTON 1994, 45). Es wird hierbei nicht direkt das Auftreten eines Dehnungsreflexes beobachtet, sondern ein Dehnungsreflex durch die elektrische Reizung afferenter Fasern simuliert.

HUTTON/SMITH/ELDRED (1973) sowie SMITH/HUTTON/ELDRED (1974) zeigten im Tierexperiment an anästhesierten und denervierten Katzen, daß die Reflexbereitschaft nach einer vorausgegangenen Muskelkontraktion verringert, d. h., daß eine post-isometrische Hemmung nachweisbar ist. Gleichzeitig konnten sie belegen, daß sich die Reflexbereitschaft durch die Dehnung wiederum erhöht. ILES (1986) fand, daß es während der Kontraktion der Antagonisten zu einer starken reziproken Hemmung der zu dehnenden Muskulatur kommt. Er hält jedoch fest: „Nevertheless, the nature of the inhibitory process and its control are still not entirely clear" (ILES 1986, 213).

Vergleichsuntersuchungen zu den Auswirkungen verschiedener Dehntechniken auf die EMG-Aktivität beim Menschen ergaben kein einheitliches Bild. Insbesondere sind immer wieder Unterschiede zwischen der EMG-Aktivität und dem erreichten Bewegungsausmaß beobachtet worden. MOORE/HUTTON (1980) untersuchten sowohl die Auswirkungen verschiedener Dehntechniken auf die Verbesserung der Hüftflexion als auch auf die Veränderung des EMG. Verglichen wurden die Auswirkungen des statischen Dehnens (SS), des Dehnens nach Muskelkontraktion (CR) sowie einer Kombination aus post-isometrischer und reziproker Hemmung (CR-AC-Dehnung). Die größten Auswirkungen auf die Hüftflexion konnten durch die Kombination aus post-isometrischer und reziproker Hemmung (CR-AC-Dehnung) erzielt werden. Bei der untersuchten Stichprobe handelte es sich um Gymnastinnen mit einer sehr gut entwickelten Beweglichkeit; die Unterschiede zwischen den Gruppen waren von keiner sportpraktischen Relevanz. Hinsichtlich der EMG-Aktivität wurden inter-individuell unterschiedliche Beobachtungen gemacht. Interessant ist auch der Zusammenhang zwischen EMG, Schmerzempfinden und Effektivität der Dehntechnik. Der beim Dehnen auftretende Schmerz und die subjektiv empfundene Effektivität der Dehntechnik korrelieren sowohl miteinander als auch mit der EMG-Aktivität. Es bestehen aber keine korrelativen Zusammenhänge zwischen der objektiven Verbesserung der Beweglichkeit und diesen Größen.

ETNYRE/ABRAHAM (1986) untersuchten die elektrische Auslösbarkeit des H-Reflexes beim statischen Dehnen und bei PNF-Techniken. Sie gehen davon aus, daß es aufgrund mehrerer Einflußfaktoren zu einer additiven Wirkung auf die Motoneuronen-Pool-Erregbarkeit komme, und präferieren deshalb die Kombination beider Techniken (CR-AC-Dehnung), um die Vorteile der post-isometrischen und reziproken Hemmung auszunutzen.

CONDON/HUTTON (1987) untersuchten die Veränderung der Beweglichkeit und der EMG-Aktivität des M. soleus beim statischen Dehnen oder bei der Anspannung der Antagonisten vor (HR), während (AC) sowie vor und während (HR-AC) der Dehnung. Sie fanden keine Unterschiede hinsichtlich der Verbesserung der Beweglich-

keit. Während sie höhere EMG-Aktivitäten bei der AC- und HR-AC-Dehnung als bei den beiden anderen Dehntechniken fanden, konnten sie hinsichtlich der H-Reflex-Amplituden die genau entgegengesetzte Beobachtung machen. Diese Beobachtung spricht für die Wirksamkeit der reziproken Hemmung. Die erhöhten EMG-Aktivitäten können nach Ansicht der Autoren durch den Einstrom anderer neuronaler Reize auf die Alpha-Motoneuronen zustande kommen, die dann zu einer Unterdrückung der Inhibition geführt haben. Des weiteren fanden die Autoren keine Zusammenhänge zwischen Muskelentspannung und Verbesserung der Beweglichkeit. Aufgrund ihrer Ergebnisse kommen CONDON/HUTTON (1987) zu dem Schluß, daß bei gesunden Erwachsenen Muskelanspannungstechniken nicht notwendig seien, da der aktive Widerstand beim Dehnen gering sei und die erzeugte Muskelentspannung keinen oder nur einen geringen Effekt auf die Verbesserung der Beweglichkeit habe.

OSTERNIG et al. (1987) untersuchten die EMG-Aktivität beim statischen und post-isometrischen Dehnen sowie beim Dehnen mit Antagonisten-Kontraktion. Während die EMG-Aktivität bei den beiden Anspannungstechniken um bis zu 155% gesteigert wurde, kam es beim statischen Dehnen zu einer Reduktion. Hinsichtlich der Verbesserung der Beweglichkeit machten sie die genau entgegengesetzte Beobachtung. Trotz der größeren Verbesserung der Bewegungsreichweite durch die Anspannungstechniken plädieren sie jedoch trotzdem für die Anwendung des statischen Dehnens, weil dieses aufgrund der reduzierten EMG-Aktivität als die sicherere Technik anzusehen sei.

GUISSARD/DUCHATEAU/HAINAUT (1988) untersuchten ebenfalls die elektrische Auslösbarkeit des H-Reflexes bei den SS-, CR- und CR-AC-Dehnmethoden. Sie fanden, daß die Auslösbarkeit des H-Reflexes in den ersten fünf Sekunden bei der CR- und der CR-AC-Technik fast vollständig unterdrückt wird, während dies beim statischen Dehnen nicht der Fall ist. Der Effekt einer maximalen willkürlichen Muskelanspannung, die der Dehnung vorausgeht, ist zeitlich sehr eng begrenzt und klingt bereits nach fünf Sekunden vollständig ab, so daß die verringerte Reflexbereitschaft bei längerem Dehnen nicht mehr unterdrückt wird. Der Effekt der H-Reflex-Unterdrückung ist bereits bei maximalen Muskelkontraktionen von nur einer Sekunde Dauer maximal. Längere Kontraktionszeiten haben keinen darüber hinausgehenden Effekt.

In der vorliegenden Literatur wurde bisher lediglich die elektrische Auslösbarkeit des Dehnungsreflexes unter bestimmten Bedingungen analysiert. In welchem Maße der Dehnungsreflex durch bestimmte Dehntechniken in der Praxis tatsächlich ausgelöst wird, ist bisher nur ansatzweise überprüft worden (vgl. WIEMANN 1991). JUNG (1984, 28) hält hierzu fest, daß Reflexe keine isolierten Vorgänge, sondern Hilfsfunktionen der Motorik seien, die korrigierend und regelnd in die Willkürbewegung eingreifen.

Die vorliegenden neurophysiologischen Arbeiten zeichnen sich durch eine hohe interne Validität aus. Als kritisch ist die externe Validität und damit die Übertragung der Ergebnisse auf die sportliche Praxis zu betrachten. So stellt HAASE (1976, 125) in einem Beitrag zur Beziehung zwischen monosynaptischen Reflexentladungen und präsynaptischen Nervenaktionspotentialen fest, „... daß Reiz- und Ableitungstechnik artifiziell sind und so gut wie keine physiologische Bedeutung haben."

3 Ergebnisse von Trainingsexperimenten

Neben den mehr grundlagen-orientierten Arbeiten, die sich mit den morphologischen oder elektrophysiologischen Veränderungen beschäftigen, wurden auch eine Reihe von Trainingsexperimenten durchgeführt, die sich mehr mit technologischen Fragestellungen und der Effektivität verschiedener Dehntechniken beschäftigen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die hierbei eingesetzten Treatments, die Art der herangezogenen Beurteilungskriterien und die beobachteten Ergebnisse. Die tabellarische Übersicht verdeutlicht, wie schwierig es ist, eine Technik als Technik der Wahl zu erachten und gegenüber anderen Techniken zu präferieren.

Von besonderer Bedeutung sind Arbeiten, die sich nicht nur an einem Kriterium orientieren, sondern versuchen, mehrere Kriterien gleichzeitig in den Blick zu nehmen. Die derzeit wohl umfassendste Analyse legt WIEMANN (1991) vor, der die Effekte eines zehnwöchigen Dehnprogramms auf die Verbesserung der Beweglichkeit sowie die Dehnungs- und Ruhespannung des Muskels, die Kontraktions- und Explosivkraft, die Reflexbereitschaft, das EMG während einer Muskelkontraktion und die Muskelfaserlänge erfaßt. Hervorzuheben sind des weiteren die Arbeiten von OSTERNIG et al. (1987), CONDON/HUTTON (1987), SCHOBER et al. (1990) sowie SCHÖNTHALER/OTT (1994).

Eine Übertragung der gefundenen Ergebnisse auf andere Populationen ist nur schwer möglich, da alle Untersuchungen an selektiven Personenstichproben durchgeführt wurden. In der Regel werden die Experimente mit Schülern oder Studenten des zweiten bis dritten Dezenniums durchgeführt. Unterschiedliche Geschlechter werden nur bei ETNYRE/LEE (1988, vgl. ETNYRE/LEE 1987), WYDRA/BÖS/KARISCH (1991), SULLIVAN (1992) und SCHÖNTHALER/OTT (1994) in die Untersuchung einbezogen. OSTERNIG et al. (1990) machen explizit auf die Notwendigkeit der Unterscheidung der Bezugsgruppen aufmerksam und warnen vor der Übertragung der Ergebnisse auf andere Populationen. Die verschiedenen Dehntechniken lassen sich nicht ohne weiteres miteinander vergleichen, da trotz gleicher Bezeichnung oftmals eine Variation hinsichtlich Ausführung und Zeitdauer der Dehnung festzustellen ist (vgl. WYDRA 1993). In einer Arbeit von WALLIN et al. (1985) werden signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Techniken provoziert, indem nicht nur die Techniken variiert wurden, sondern gleichzeitig auch die Methoden: Während beim ballistischen Dehnen der Hüftextensoren eine unfunktionelle Ausgangsstellung eingenommen wurde (Rumpfvorbeuge), wurde die post-isometrische Dehnung funktionell durchgeführt (Flexion einer Hüfte bei Streckung der Gegenseite). Auch fehlen in einigen Untersuchungen die für die Interpretation der Treatment-Effekte notwendigen Kontrollgruppen.

Die Untersuchungen können nach der Zeitspanne differenziert werden, über die sich die Experimente erstreckten. Zum einen werden die kurzfristigen Effekte einzelner Dehnbehandlungen analysiert. Hierunter sind die Effekte einer einzelnen Dehnung oder Dehnbehandlung zu verstehen. Die Analyse der mittelfristigen Effekte basiert auf Untersuchungszeiträumen zwischen ein und zwölf Wochen. Aussagen zu längerfristigen Effekten finden sich nicht. Ebenso macht nur TANIGAWA (1972) Aussagen über die Rückbildung der Dehnfähigkeit nach dem Absetzen der Dehnbehandlung.

Für die kurzfristige Verbesserung der Beweglichkeit spielen neben elektrophysiologischen Effekten vor allem Temperatur-Effekte eine Rolle. Daß ein Stretchingprogramm kein spezifisches Aufwärmprogramm ersetzen kann, wird vor allem an den Untersuchungen von HENNIG/PODZIELNY (1994) deutlich (vgl. MURPHY 1991).

Als Kriterien der Effektivität werden in fast allen Untersuchungen Beweglichkeitsmaße angewandt. In der Regel wird die aktive Beweglichkeit erfaßt. Eine Besonderheit stellen auch die Arbeiten von HARDY/JONES (1986) dar, die die dynamische Beweglichkeit aus der Bewegung heraus mittels Fotozellen oder Stroboskopaufnahmen erfaßt haben. GAJDOSIK (1991) hat in seiner Studie neben der maximalen Bewegungsreichweite die durch das Auftreten von EMG-Veränderungen limitierte Bewegungsreichweite registriert.

Mehrere Arbeiten haben sich mit der Veränderung des Spannungsverhaltens der Muskulatur beschäftigt. MADDING et al. (1987) konnten bei ihren Untersuchungen, bei denen die Zeitdauer der statischen Dehnung in den Versuchsgruppen 15, 45 bzw. 120 sec betrug, eine hochsignifikante Verbesserung der Beweglichkeit und Abnahme des Dehnungswiderstandes feststellen. Zwischen den Versuchsgruppen konnten keine Unterschiede festgestellt werden. WIEMANN (1991) ermittelte bei seinem Langzeitexperiment, bei dem lediglich das statische Dehnen durchgeführt wurde, eine signifikante Erhöhung der Ruhespannung der ischiocruralen Muskelgruppe bei Frauen. Des weiteren konnte er eine signifikante Erhöhung der tolerierten Dehnungsspannung bei der Erzeugung der maximalen Beweglichkeit für beide Geschlechter nachweisen.

HORTOBAGYI et al. (1985) beschäftigten sich mit der Frage des Einflusses des langsamen Dehnens auf Kraftentfaltung und Erholung des Muskels nach Kraftarbeit. Sie konnten positive korrelative Beziehungen zwischen der Verbesserung der Erholungsfähigkeit des Muskels und der Beweglichkeit herstellen. Die vom Ansatz her gute Arbeit leidet aber am Mangel einer Vergleichsgruppe, so daß die beobachteten Veränderungen nicht ohne weiteres auf das durchgeführte Stretchingprogramm zurückgeführt werden können.

Einen methodisch ähnlichen Ansatz verfolgten SCHOBER et al. (1990). Sie untersuchten den Einfluß des Dehnens auf die muskuläre Entspannungsfähigkeit (vgl. KRAFT et al. 1990). Trotz inter-individueller Unterschiede konnten sie Nachteile einer zweiminütigen Dauerdehnung gegenüber der intermittierenden und post-isometrischen Dehnung aufzeigen. „Als eine Ursache für die unzureichende Beeinflussung der Wiederherstellung durch Dauerdehnung könnte eine Verstellung der Ansprechschwelle der Propriozeptoren in Frage kommen, die zu einer Dysregulation des propriozeptiven Einstroms und damit zu einer persistierenden muskulären Tonuserhöhung führt" (WITTEKOPF/SCHOBER/KRAFT 1991, 143).

Der negative Einfluß eines Stretchingprogramms auf die Vertikalsprungkraft, wie ihn HENNIG/PODZIELNY (1994) beschrieben, könnte ebenfalls als eine Verstellung neuromuskulärer Regelgrößen interpretiert werden. Auch ist es möglich, daß das Creeping-Phänomen (vgl. ULLRICH/GOLLHOFER 1994) das elastische Potential der Muskulatur, d. h. die Fähigkeit, kinetische Energie zu speichern, negativ beeinflußte (vgl. NOTH 1985, KOMI 1994, HUIJING 1994 b).

Tab. 1: Zusammenstellung wichtiger experimenteller Arbeiten zur Effektivität verschiedener Dehntechniken

Autoren	Stichprobe	Treatments	Treatmentdauer	Kriterien	Ergebnisse
DE VRIES 1962	57 Studenten	SS (Hata-Yoga, DS) Jeweils 30–60 sec Dehnen. Keine Kontrollgruppe.	7mal 30 Minuten 2 Behandlungen pro Woche.	Verbesserung von aktiver Rumpfflexion und -extension, Schulterelevation während der Behandlungsdauer.	Signifikante Verbesserung in den Gruppen. Keine Unterschiede zwischen den Gruppen.
HOLT/TRAVIS/ OKITA 1970	24 Studenten	Kombinierte Behandlungen bestehend aus: DS, SS, CR-AC. Die Dehnübungen wurden in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt. Jeweils 20 sec Dehnen und 10 sec Pause. Die CR-AC-Methode wurde in dieser Zeit 3mal wiederholt. Keine Kontrollgruppe.	3 Behandlungen pro Woche in drei aufeinanderfolgenden Wochen. Dauer der Einzelbehandlung 3mal 2 Minuten.	Verbesserung der aktiven Rumpfflexion (sit and reach) durch jede Einzelbehandlung.	Unterschiede zwischen den Gruppen indizieren statistische Überlegenheit der CR-AC-Methode.
TANIGAWA 1972	30 junge Männer	Passive Dehnung, CR-Dehnung, Kontrollgruppe.	2maliges Dehnen pro Woche über einen Zeitraum von 3 Wochen.	Kurz- und mittelfristige Verbesserung der passiven Hüftflexion. Mittelfristige Rückbildung der verbesserten Beweglichkeit. Indirekte Bestimmung des Winkels.	Überlegenheit der CR-Dehnung gegenüber der statischen Dehnung. Signifikante Rückbildung der Dehnfähigkeit nach einer Woche ohne Dehnbehandlung.
CORNELIUS/ HINSON 1980	30 Studenten	CR- und CR-AC-Dehnung mit unterschiedlich langer Dauer der Muskelkontraktion (0 bis 6 sec). DS, Keine Kontrollgruppe.	Einzelbehandlung.	Kurzfristige Verbesserung der passiven Hüftflexion (Winkelmessung).	Überlegenheit der PNF-Techniken gegenüber der gehaltenen Dehnung. Keine Unterschiede zwischen den PNF-Gruppen.
MOORE/ HUTTON 1980	21 Gymnastinnen	SS, CR, CR-AC. Bei der CR- bzw. CR-AC-Methode wurde die Kontraktion 5 sec lang durchgeführt. Keine Kontrollgruppe.	Einzelbehandlung.	Kurzfristige Verbesserung der Hüftbeweglichkeit durch eine Einzelbehandlung; EMG-Aktivität.	Größter Beweglichkeitszuwachs durch CR-AC-Technik; individuelle Unterschiede im EMG-Verhalten.
HARTLEY- O'BRIEN 1980	119 Studentinnen	SS-AC, CR (aktiv und passiv), DS, SS, SS mit Entspannung. 1 Minute Drehung, 1 Minute Pause, 5 Wdh. Kontrollgruppe.	10minütige Dehnungen an jeweils 3 Tagen über 3 Wochen.	Kurz- und mittelfristige Verbesserung der aktiven Hüftflexion (Winkelmessung).	Hochsignifikante Verbesserung in allen Gruppen während der gesamten Treatmentdauer; keine Gruppenunterschiede; geringgradige tägliche Verbesserungen der Beweglichkeit.

Tab. 1: Zusammenstellung wichtiger experimenteller Arbeiten zur Effektivität verschiedener Dehntechniken (Fortsetzung)

SADY/ WORTMAN/ BLANKE 1981	43 Studenten	DS (20 Wdh.), SS (6 sec halten – 3 Wdh.), CR (Dehnung bis zur Endposition, 6sekündige Kontraktion – erneute Dehnung – 3 Wdh.). Kontrollgruppe.	3mal pro Woche über 6 Wochen.	Verbesserung der aktiven Beweglichkeit von Schulter, Rumpf und Hüfte.	Überlegenheit der PNF-Technik. Größere Verbesserung der Beweglichkeit der Hüftbeuger als in den anderen Bereichen.
LUCAS/KOSLOW 1984	63 Studentinnen	DS, SS (jeweils 20-sec.-Dehnung – 5 Wdh.) CR-AC (5-sec-Agonistenkontraktion – 10-sec-Antagonistenkontraktion). Keine Kontrollgruppe.	5minütige Dehnungen, 3mal pro Woche, über 7 Wochen.	Verbesserung der aktiven Beweglichkeit der Hüftstrecker (sit and reach).	Verbesserung in allen Gruppen; keine Gruppenunterschiede.
HORTOBAGYI et al. 1985	12 sportl. 15jährige Schüler	Statische Dehnübungen für den Hüftbereich. Keine Kontroll- oder Vergleichsgruppe.	3mal pro Woche über 7 Wochen.	Beweglichkeitsmaße, isometrisches Schnellkraft-verhalten, Muskelentspannung Schrittfrequenz.	Signifikante Verbesserung aller Meßwerte. Signifikante Korrelationen zwischen den Meßwerten.
HARDY 1985	42 Studentinnen	Aktives und passives CR-AC mit 0,3 und 6 sec Kontraktionsdauer und 10-sec-Dehnung – 3 Wdh. Bei der SS 30-sec-Dauerdehnung. 3 Serien mit jeweils 30 sec Pause. Kontrollgruppe.	Dehnung an 6 aufeinander-folgenden Tagen	Kurz- und mittelfristige Verbesserung der aktiven Hüftflexion (Winkelmessung).	Hochsignifikante Verbesserung in den Versuchsgruppen; positiver Zusammenhang zwischen Kontraktions-dauer und verbesserter Beweglichkeit bei aktivem AC-Dehnen.
HARDY/JONES 1986	24 Studentinnen	CR-AC (6 sec Anspannung, 10 sec Dehnung, 3 Wdh.). DS mit Betonung der Geschwindigkeit. DS mit Betonung des Bewegungsausmaßes. Alle Gruppen führten 3 Serien mit jeweils 30 sec Pause durch. Kontrollgruppe.	Dehnung an 6 aufeinander-folgenden Tagen.	Verbesserung der dynamischen Hüftbeweglichkeit. (Stroboskopaufnahmen).	Größere Verbesserung in den Versuchsgruppen (CR-AC; DS mit Betonung des Bewegungsausmaßes) als in der Kontrollgruppe; keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen.
HARDY/JONES 1986	18 Studenten	CR-AC. DS mit Betonung des Bewegungsausmaßes. Übungsdurchführung wie oben. Kontrollgruppe.	Dehnung an 6 aufeinander-folgenden Tagen.	Verbesserung der dynamischen Schulterbeweglichkeit (Fotozellen).	Größere Verbesserung in den Versuchsgruppen (CR-AC; DS mit Betonung des Bewegungsausmaßes) als in der Kontrollgruppe; keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen.
MADDING et al. 1987	72 Männer zwischen 22 und 40 Jahren	SS über 15, 45 und 120 sec; Kontrollgruppe.	Einmalige Dehnung.	Kurzfristige Verbesserung der Hüftabduktion und Verringerung des Dehnungswiderstandes.	Hochsignifikante Verbesserung der Beweglichkeit und Abnahme des Dehnungswiderstandes in den Versuchsgruppen; keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen.

Tab. 1: Zusammenstellung wichtiger experimenteller Arbeiten zur Effektivität verschiedener Dehntechniken (Fortsetzung)

OSTERNIG et al. 1987	4 Frauen und 6 Männer des 3. und 4. Dezenniums.	Stretch Relax (SR), Contract Relax (CR), Agonist Contract Relax (AC).	Einmalige Dehnung.	Beweglichkeit, EMG-Aktivität.	Größere Beweglichkeitsverbesserung aber auch höhere EMG-Aktivität bei AC-Dehnung.
CONDON/ HUTTON 1987	6 Frauen und 6 Männer des 3. und 4. Dezenniums.	SS, Hold Relax (HR), Agonist Contract (AC), HR-AC.	Einmalige Dehnung.	Beweglichkeit, EMG-Aktivität, elektrische Auslösbarkeit des H-Reflexes.	Keine Unterschiede hinsichtlich der Verbesserung der Beweglichkeit. Höhere EMG-Aktivität bei AC- und HR-AC-Dehnung, aber niedrigere H-Reflex-Amplituden. Keine Zusammenhänge zwischen Muskelentspannung und Verbesserung der Beweglichkeit.
ETNYRE/LEE 1988	49 Studenten und 25 Studentinnen	SS (9 sec), CR, CR-AC (jeweils 6 sec Kontraktion mit folgender 3-sec-Dehnung). Dehnübungen wurden mit Partnerunterstützung durchgeführt. Kontrollgruppe.	2maliges Dehnen pro Woche über 12 Wochen.	Kurz- und langfristige Verbesserung der Schulter- und Hüftbeweglichkeit (Goniometer).	Hochsignifikante Verbesserung in den Treatmentgruppen; keine Unterschiede in der Trainierbarkeit zwischen Männern und Frauen; PNF-Techniken effektiver als statisches Dehnen; größere Wirkung der CR-AC-Technik bei den Männern.
GODGES et al. 1989	7 gesunde Männer (18–22 Jahre)	Statisches Dehnen vs. Weichteilmobilisation mit PNF-Techniken.	Einmalige Behandlungen.	Hüftbeweglichkeit und Sauerstoffverbrauch beim Gehen.	Verbesserung der Beweglichkeit in beiden Gruppen; differentielle Unterschiede hinsichtlich der Gangökonomie.
SCHOBER et al. 1990	60 Sportstudenten	SS, CR (Isometrische Kontraktion und 10-sec-Dehnung im Wechsel), Intermittierende Dehnung (10maliger Wechsel von Dehnung und Entspannung). Passive Dehnung durch Helfer über jeweils 2 Minuten. Kontrollgruppe.	Einmalige Dehnbehandlung nach vorausgegangener Belastung.	Muskuläre Entspannungsfähigkeit der ventralen Oberschenkelmuskulatur nach vorausgegangener Belastung.	Positive Auswirkungen der intermittierenden Dehnung; unterschiedliche Effekte der CR-Dehnung; negative Effekte der Dauerdehnung.
GAJDOSIK 1991	24 Männer mit Muskelverkürzungen	Passive Dehnung vs. Kontrollgruppe.	3 Wochen.	Maximale passive Dehnfähigkeit, maximale Kniestreckung ohne EMG-Aktivität, Widerstand (Nm)	Signifikante Verbesserung der Beweglichkeitsmaße und der tolerierten Zuspannung.

Tab. 1: Zusammenstellung wichtiger experimenteller Arbeiten zur Effektivität verschiedener Dehntechniken (Fortsetzung)

WIEMANN 1991	12 weibliche und 13 männliche Sportstudenten	Statisches Stretching.	3mal pro Woche jeweils 15 Minuten über 10 Wochen.	Beweglichkeit, Dehnungs- und Ruhespannung, Kontraktions- und Explosivkraft, Reflexbereitschaft, EMG während einer Muskelkontraktion, Muskelfaserlänge.	Tendenzielle Verbesserung der Beweglichkeit, sig. Erhöhung der Dehnungsspannung des Muskels, keine Veränderung der Kontraktionskraft bei großer und sig. Veränderung bei keiner Muskelmomentanlänge, Erhöhung der Explosivkraft, geringere Reflexbereitschaft, keine Zunahme der Muskelfaserlänge.
WYDRA/BÖS/ KARISCH 1991	40 Frauen und 40 Männer des 4. bis 6. Dezenniums	Statische, post-isometrische, dynamische Dehnung, Kontrollgruppe.	11 jeweils 10minütige Dehnbehandlungen in einem Zeitraum von 2 Wochen	Kurz- und mittelfristige Veränderung der aktiven und passiven Hüftflexion.	Signifikante Überlegenheit des post-isometrischen Dehnens hinsichtlich der kurzfristigen Effekte. Hochsignifikante Überlegenheit des dynamischen Dehnens hinsichtlich der mittelfristigen Effekte.
SULLIVAN et al. 1992	10 Frauen und 10 Männer des 3. Dezenniums	Statisches Stretching (SS), Contract-Relax Agonist-Contract Dehnung (CR-AC) aus 2 unterschiedlichen Ausgangspositionen.	Acht 5minütige Dehnungen.	Maximale aktive Beweglichkeit	Kein signifikanter Unterschied zwischen den Techniken, aber signifikanter Einfluß der Ausgangsposition auf die Verbesserung der Beweglichkeit.
HENNIG/ PODZIELNY 1994	46 Sportstudenten und Leichtathleten des 3. Dezenniums.	Statisches Dehnen vs. Aufwärmen durch Laufen bzw. Stretching nach Aufwärmen und Aufwärmen nach Stretching.	Jeweils 20 Sekunden vs. 10minütiges Laufprogramm.	Vertikale Sprungkraft.	Signifikante Verschlechterung der vertikalen Sprungleistung durch Stretching nach Aufwärmen.
SCHÖNTHALER/ OTT 1994	23 Studentinnen und 13 Studenten	Statisches, dynamisches, post-isometrisches Dehnen, Kontrollgruppe.	16 Behandlungen in 4 Wochen.	Maximale Beweglichkeit, Dehnungsspannung.	Signifikante Verbesserung der Beweglichkeit in den Trainingsgruppen; keine signifikante Reduzierung der Dehnungsspannung.

4 Diskussion

Die Ergebnisse indizieren eine allgemeine Trainierbarkeit der Beweglichkeit, die vom Geschlecht unabhängig, aber von der Dauer der Behandlung abhängig ist. Statische Dehntechniken sind im allgemeinen den anderen Dehntechniken unterlegen (siehe unten). Die Effekte von PNF-Techniken und dynamischen Dehntechniken sind differenziert zu betrachten. Dehntechniken, die das Bewegungsausmaß betonen, erwiesen sich als effektiver denn Dehntechniken, die die Bewegungsgeschwindigkeit betonen. Auch scheint es nicht notwendig, Dehnübungen in dem Umfang durchzuführen, wie es bisher in der Literatur empfohlen wurde (vgl. LENHART/SEIBERT 1992). Die Untersuchungen von GUISSARD/DUCHATEAU/HAINUT (1988) belegen, daß beim post-isometrischen Dehnen sehr kurze Anspannungszeiten günstiger sind als längere. TAYLOR (1990) konnte zeigen, daß bereits wenige Wiederholungen ausreichen, einen optimalen Dehneffekt auszulösen.

Während zur Beantwortung der technologischen Fragestellung relativ eindeutige Ergebnisse vorliegen, ist die nomologische Fragestellung viel schwieriger zu beantworten. So ist es unklar, ob die beobachteten Verbesserungen der Beweglichkeit auf strukturelle Veränderungen im Muskel oder auf eine erhöhte Resistenz der Muskulatur gegenüber Dehnbelastungen zurückzuführen sind (vgl. MADDING et al. 1987; WIEMANN 1991; GAJDOSIK 1991).

Als ein Argument für die Durchführung statischer Dehnübungen werden die günstigeren elektrophysiologischen Bedingungen angesehen, die auch mit einer geringeren Verletzungsgefahr in Zusammenhang gebracht werden. So plädieren OSTERNIG et al. (1987) für das statische Dehnen, obwohl die Verbesserung der Bewegungsreichweite durch ein statisches Stretchingprogramm geringer ausfiel als durch ein post-isometrisches Dehnen oder ein Dehnen mit Antagonistenkontraktion. Als Grund wird die geringere EMG-Aktivität genannt. Diese Technik stelle deshalb die sicherere Dehntechnik dar.

TAYLOR et al. (1990) sehen die größere Verletzungsgefahr beim ballistischen Dehnen in den visko-elastischen Eigenschaften der Muskulatur begründet (vgl. ULLRICH/GOLLHOFER 1994). Beim schnellen Dehnen werde bei einer gegebenen Muskellänge mehr Energie absorbiert als beim statischen Dehnen, da die elastischen Eigenschaften der bindegewebigen Strukturen (Creeping-Phänomen) nicht zum Tragen kommen könnten. Deshalb sei die Gefahr von Muskelschädigungen bei dynamischen Dehnungen größer, insbesondere wenn diese nicht mit dem Ziel einer großen Bewegungsamplitude, sondern unter dem Gesichtspunkt einer hohen Bewegungsgeschwindigkeit (Zerrgymnastik) durchgeführt würden.

Auch durch statische Dehnübungen können Überdehnungen ausgelöst werden (vgl. REBSAMEN 1994). Das bei Dauerdehnung zu beobachtende Creeping-Phänomen kann zu einer Veränderung der räumlichen Anordnung der Kollagenfasern führen, was wiederum unter Umständen bei einem anschließenden Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus dazu führen kann, daß der Muskel weniger kinetische Energie speichern kann. Dies könnte dann zu einer vollkommenen Desorganisation der inneren Struktur der kontraktilen Elemente führen. Somit könnte eine statische Dehnübung, die einer reaktiven Schnellkraftbelastung vorausgeht, theoretisch die

gleiche Schädigung auslösen wie eine mit hoher Geschwindigkeit durchgeführte dynamische Dehnübung.
Daß unser Wissensstand über Wesen und Ätiologie belastungsbedingter Muskelbeschwerden bisher noch recht dürftig ist, zeigen ROY/EDGERTON (1994). Bisher liegen keine Daten vor, wann Beschwerden durch Überdehnungen auftreten. Zwar zeigt sich, daß insbesondere atrophierte Muskeln für Dehnungsschäden empfindlich sind. Andererseits können Überlastungssyndrome auch bei Belastungen eher mäßiger Intensität auftreten, wenn sie nur sehr lange durchgeführt werden. Langsam durchgeführte dynamische Dehnübungen bergen aus unserer Sicht kein größeres Verletzungsrisiko in sich als statische Dehnübungen.
In einigen Publikationen wird die Bedeutung von Dehnungen für die Reduktion von Verletzungen hervorgehoben (vgl. BEAULIEU 1981; SHELLOCK/PRENTICE 1985). Bei der Argumentationsführung wird meist sehr eindrucksvoll auf Einzelbeispiele verwiesen, ohne daß dabei auf umfangreicheres Zahlenmaterial oder gar kontrollierte Beobachtungen zurückgegriffen werden könnte. HIGH/HOWLEY (1989) konnten in einem Experiment mit 62 Vpn. zeigen, daß weder ein statisches Dehnprogramm noch ein Aufwärmprogramm einen Effekt auf die Entstehung von Muskelkater nach konzentrischer Muskelarbeit haben (vgl. MURPHY 1991).
Wie die bisherigen Ausführungen gezeigt haben, kann die Frage, welche Dehntechnik am effektivsten ist, nicht eindeutig beantwortet werden. In der Sportpraxis sollten die verschiedenen Techniken je nach den individuellen Bedürfnissen der Sportler Anwendung finden. Hier können sowohl PNF-Techniken als auch dynamische Dehntechniken Berücksichtigung finden: „If inferences from static data could be applied to dynamic stretching, it would seem plausible to suggest that PNF based treatments might prove superior for general dynamic flexibility training purposes, while flexidynamic exercises might be superior for preperformance warm ups" (HARDY/JONES 1986, 153).

Literatur

ANDERSON, B.: Stretching. Waldeck-Dehringhausen 1982.
ASHMORE, C. R./SUMMERS, P. J.: Stretch-induced growth of chicken muscles, myofibrillar proliferation. In: American Journal of Physiology 241 (1981), C93-C97.
BEAULIEU, J. E.: Developing a stretching program. In: The Physician and Sportsmedicine 9 (1981), 59-65.
BILLETER, R./HOPPELER, H.: Biologische Grundlagen der Muskelkontraktion. In: KOMI, P. V.: Kraft und Schnellkraft im Sport. Deutscher Ärzte-Verlag, Köln 1994, 51-73.
BÖS, K./WYDRA, G./KARISCH, G.: Gesundheitsförderung durch Bewegung, Spiel und Sport. Erlangen 1992.
CONDON, S. M./HUTTON, R. S.: Soleus muscle electromyographic activity and ankle dorsiflexion range of motion during four stretching procedures. In: Physical Therapy 67 (1987), 24-30.
CORNELIUS, W. L./HINSON, M. M.: The relationship between isometric contraction of the hip extensors and subsequent flexibility in males. In: Journal of Sports Medicine 20 (1980), 75-80.
DE VRIES, H. A.: Evaluation of static stretching procedures for improvement of flexibility. In: Research Quarterly 33 (1962), 222-228.

DIETRICH, L./BERTHOLD, F./BRENKE, F.: Muskeldehnung - eine wichtige trainingsmethodische Maßnahme. In: Theorie und Praxis der Körperkultur 34 (1985), 922-930.

DIETZ, V.: Elektrophysiologie komplexer Bewegungsabläufe: Gang-, Lauf-, Balance- und Fallbewegungen. In: BERGER, W./DIETZ, V./HUFSCHMIDT, A./JUNG, R./MAURITZ, K.-H./SCHMIDTBLEICHER, D.: Haltung und Bewegung beim Menschen. Berlin 1984, 87-118.

EDMAN, K.; Die kontraktile Funktion der Skelettmuskelfaser. In: KOMI, P. V.: Kraft und Schnellkraft im Sport. Köln 1994, 104-120.

ETNYRE, B. R./ABRAHAM, L. D.: H-reflexes changes during static stretching and two variations of proprioceptive neuromuscular facilitation techniques. In: Electroencephalography and Clinical Neurophysiology 63 (1986), 174-179.

ETNYRE, B. R./LEE, E. J.: Chronic and acute flexibility of men and women using three different stretching techniques. In: Research Quarterly for Exercise and Sport 59 (1988), 222-228.

ETNYRE, B. R./LEE, E. J.: Dialogue: Comments on proprioceptive neuromuscular facilitation stretching techniques. In: Research Quarterly for Exercise and Sport 58 (1987), 184-188.

GAJDOSIK, R. L.: Effects of static stretching on the maximal length and resistance to passive stretch of short harmstring muscles. In: Journal of Orthopaedic Sports and Physical Therapy 14 (1991), 250-255.

GODGES, J. J./MACRAE, H./LONGDON, C./TINBERG, C./MACRAE, P.: The effects of two stretching procedures on hip range of motion and gait economy. In: Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy 1989, 350-357.

GOLDSPINK, G.: Zelluläre und molekulare Aspekte der Trainingsadaptation des Skelettmuskels. In: KOMI, P. V.: Kraft und Schnellkraft im Sport. Köln 1994, 215-231.

GUISSARD, N./DUCHATEAU, J./HAINAUT, K: Muscle stretching and motoneuron excitability. In: European Journal of Applied Physiology 58 (1988), 47-52.

HAASE, J.: Haltung und Bewegung und ihre spinale Koordination. In: HAASE, J./HENATSCH, H.-D./JUNG, R./STRATA, P./THODEN, U.: Sensomotorik. München 1976, 99-192.

HARDY, L./JONES, D.: Dynamic flexibility and proprioceptive neuromuscular facilitation. In: Research Quarterly for Exercise and Sport 57 (1986), 150-153.

HARDY, L.: Improving active rang of hip flexion. In: Research Quarterly for Exercise and Sport 56 (1985), 111-114.

HARTLEY-O'BRIEN, S. J.: Six mobilisation exercises for active range of hip flexion. In: Research Quarterly for Exercise and Sport 51 (1980), 625-635.

HENNIG, E./PODZIELNY, S.: Die Auswirkungen von Dehn- und Aufwärmübungen auf die Vertikalsprungleistung. In: Sportmedizin 45 (1994), 253-260.

HIGH, D. M./HOWLEY, E. T.: The effects of static stretching and warm-up on prevention of delayed-onset muscle soreness. In: Research Quarterly for Exercise and Sport 60 (1989), 357-361.

HOFFMANN, P.: Die Eigenreflexe (Sehnenreflexe) menschlicher Muskeln. Berlin 1922.

HOLLMANN, W./HETTINGER, TH.: Sportmedizin - Arbeits- und Trainingsgrundlagen. Stuttgart 1990.

HOLLY, R. G./BARNETT, J. G./ASHMORE, C. R./TAYLOR, R. G./MOLÉ, P. A.: Stretch-induced growth in chicken wing muscles: a new model of stretch hypertrophy. In: American Journal of Physiology 238 (1980), C62-C71.

HOLT, L. E./TRAVIS, T. M./OKITA, T.: Comparative study of three stretching techniques. In: Perceptual and Motor Skills 31 (1970), 611-616.

HORTOBAGYI, T./FALUDI, J./TIHANYI, J./MERKELY, B.: Effects of intense „stretching"-flexibility training on the mechanical profile of the knee extensors and on the range of motion of the hip joint. In: International Journal of Sports Medicine 6 (1985), 317-321.

HOSTER, M.: Stretching - zwischen Ritual und therapeutischer Notwendigkeit. In: HOSTER, M./NEPPER, H.-U. (Hrsg.): Dehnen und Mobilisieren. Waldenburg 1994, 102-109.

HOSTER, M.: Zur Bedeutung verschiedener Dehntechniken in der Sportpraxis. In: Die Lehre der Leichtathletik 26 (1987) 31, 1523-1526.

HUIJING, P. A.: Mechanische Muskelmodelle. In: KOMI, P. V.: Kraft und Schnellkraft im Sport. Köln 1994 a, 135-154.

HUIJING, P. A.: Das elastische Potential des Muskels. In: KOMI, P. V.: Kraft und Schnellkraft im Sport. Köln 1994 b, 155-172.

HUTTON, R. S./SMITH, J. L./ELDRED, E.: Postcontraction sensory discharge from muscle and its scource. In: Journal of Neurophysiology 36 (1973), 1090-1103.

HUTTON, R. S.: Neuromuskuläre Grundlagen des Stretching. In: KOMI, P. V.: Kraft und Schnellkraft im Sport. Köln 1994, 41-50.

ILES, J.: Reciprocal inhibition during agonist and antagonist contraction. In: Experimental Brain Research 62 (1986), 212-214.

JUNG, R.: Einführung in die Bewegungsphysiologie. In: HAASE, J./HENATSCH, H.-D./JUNG, R./STRATA, P./THODEN, U.: Sensomotorik. München 1976, 1-98.

JUNG, R.: Zur Bewegungsphysiologie beim Menschen: Fortbewegung, Zielsteuerung und Sportleistungen. In: BERGEN, W./DIETZ, V./HUFSCHMIDT, A./JUNG, R./MAURITZ, K.-H./SCHMIDTBLEICHER, D.: Haltung und Bewegung beim Menschen. Berlin 1984, 7-63.

KLEE, A.: Haltung, muskuläre Balance und Training. Beiträge zur Sportwissenschaft. Bd. 20. Frankfurt 1994.

KNEBEL, K. P.: Funktionsgymnastik. Reinbek 1985.

KOMI, P. V.: Der Dehnungs-Verkürzungszyklus. In: KOMI, P. V.: Kraft und Schnellkraft im Sport. Köln 1994, 173-182.

KRAEFF, T.: Muskuläre Dysbalance bei Menschen im fortgeschrittenen Alter. In: Manuelle Medizin 21 (1983), 71-73.

KRAFT, W./SCHOBER, H./SCHMIDT, H./WITTEKOPF, G.: Stretching und muskuläres Entspannungsverhalten am M. quadriceps femoris. In: Zeitschrift für Physiotherapie 42 (1990), 237-243.

KÜCHLER, G.: Motorik. Stuttgart 1983.

LENHART, P./SEIBERT, W.: Funktionelles Bewegungstraining. Oberhaching 1992.

LUCAS, R. C./KOSLOW, R.: Comparative study of static, dynamic, and proprioceptive neuromuscular facilitation stretching techniques of flexibility. In: Perceptual and Motor Skills 58 (1984), 615-618.

MADDING, S. W./WONG, J. G./HALLUM, A./MEDEIROS, J. M.: Effect of duration of passive stretch on hip duration range of motion. In: Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy 8 (1987), 409-416.

MARK, R. F./COQUERY, J.-M./PAILLARD, J.: Autogenetic reflex effects of slow or steady stretch of the calf muscles in man. In: Experimental Brain Research 6 (1968), 130-145.

MOORE, M./HUTTON, R.: Electromyographic investigation of muscle stretching techniques. In: Medicine and Science in Sports and Exercise 12 (1980), 322-329.

MURPHY, D. R.: A critical look at static stretching: Are we doing our patients harm? In: Chiropractic Sports Medicine 5 (1991), 67-70.

NICHOLS, T. R./HOUK, J. C.: Improvement in linearity and regulation of stiffness that results from actions of stretch reflex. In: Journal of Neurophysiology 39 (1976), 119-142.

NOTH, J.: Neurophysiologische Aspekte der Muskelelastizität. In: BÜHRLE, M. (Hrsg.): Grundlagen des Maximal- und Schnellkrafttrainings. Schorndorf 1985, 238-253.
OSTERNIG, L. R., et al.: Muscle activation during proprioceptive neuromuscular fascilitation (PNF) stretching techniques. In: American Journal of Physical Medicine 66 (1987), 298-306.
OSTERNIG, L. R./ROBERTSON, R. N./TROXEL, R. K./HANSEN, P.: Differential response to proprioceptive neuromuscular facilitation (PNF) stretch techniques. In: Medicine and Science in Sports and Exercise 22 (1990), 106-111.
PENZLIN, H.: Lehrbuch der Tierphysiologie. Stuttgart 1977.
PRENTICE, W.: A comparison of static stretching and PNF stretching for improving hip joint flexibility. In: Athletic Training 18 (1983), 56-59.
REBSAMEN, R.: Das Syndrom des Over-Stretching. HOSTER, M./NEPPER, H.-U. (Hrsg.): Dehnen und Mobilisieren. Waldenburg 1994, 110-117.
ROY, R. R./EDGERTON, V. R.: Bau und Funktion der Skelettmuskelfaser. In: KOMI, P. V.: Kraft und Schnellkraft im Sport. Köln 1994, 121-134.
SADY, S. P./WORTMAN, M./BLANKE, D.: Flexibility training: Ballistic, static or proprioceptive neuromuscular facilitation. In: Archives of Physical Medicine and Rehabilitation 63 (1982), 261-263.
SCHOBER, H./KRAFT, W./WITTEKOPF, G./SCHMIDT, H.: Beitrag zum Einfluß verschiedener Dehnungsformen auf das muskuläre Entspannungsverhalten des M. quadrizeps femoris. Medizin und Sport 30 (1990), 88-91.
SCHÖNTHALER, S./OTT, H.: Auswirkungen verschiedener Dehnmethoden auf die maximale Bewegungsreichweite und die Dehnungsspannung. Diplomarbeit, Sportwissenschaftliches Institut der Universität des Saarlandes, Saarbrücken 1994 (unveröffentlicht).
SHELLOCK, F. G./PRENTICE, W. E.: Warming-up and stretching for improved physical performance and prevention of sportsrelated injuries. In: Sports Medicine 2 (1985), 267-278.
SHERRINGTON, C. S.: Correlation of reflexes and the principle of the common path. Brit. Ass. Rep. 1904, 728-741.
SMITH, J. L./HUTTON, R. S./ELDRED, E.: Postcontraction changes in sensitivity of muscle afferents to static and dynamic stretch. In: Brain Research 78 (1974), 193-202.
STOBOY, H.: Das Krafttraining und seine Beziehung zu verschiedenen Sportarten. In: Sportwissenschaft 14 (1984), 9-31.
SULLIVAN, M. K., et al.: Effect of pelvic position and stretching method on hamstring muscle flexibility. In: Medicine and Science in Sport and Exercise 24 (1992), 1383-1389.
TABARY, J. C./TABARY, C./TARDIEU, C./TARDIEU, G./GOLDSPINK, G.: Physiological and structural changes in the cat's soleus muscle due to immobilization at different length by plaster casts. In: Journal of Physiology (London) 224 (1972), 231-244.
TANIGAWA, M. C.: Comparison of the hold-relax procedure and passive mobilization on increasing muscle length. In: Physical Therapy 52 (1972), 725-735.
TAYLOR, D. C., et al.: Viscoelastic properties of muscle-tendon units. The biochemical effects of stretching. In. American Journal of Sports Medicine 18 (1990), 300-309.
ULLRICH, K./GOLLHOFER, A.: Physiologische Aspekte und Effektivität unterschiedlicher Dehnmethoden. In: Sportmedizin 45 (1994), 336-345.
WALLIN, D./EKBLOM, B./GRAHN, R./NORDENBORG, T.: Improvement of muscle flexibility: A comparison between two techniques. In: American Journal of Sports Medicine 13 (1985), 263-268.
WIEMANN, K.: Beeinflussung muskulärer Parameter durch ein zehnwöchiges Dehnungstraining. In: Sportwissenschaft 21 (1991) 3, 295-305.

WIEMANN, K.; Beeinflussung muskulärer Parameter durch unterschiedliche Dehnverfahren. In: HOSTER, M./NEPPER, H.-U. (Hrsg.): Dehnen und Mobilisieren. Waldenburg 1994, 40–71.

WIEMANN, K.: Stretching – Grundlagen, Möglichkeiten, Grenzen. In: sportunterricht 42 (1993), 91–106.

WILLIAMS, P. E./GOLDSPINK, G.: Changes in sarcomere length and physiological properties in immobilized muscle. In: Journal of Anatomy 127 (1978), 459–468.

WITTEKOPF, G./SCHOBER, H./KRAFT, W.: Zur Diagnostik und Wiederherstellung des neuromuskulären Systems am Beispiel des M. quadriceps femoris. In: Medizin und Sport 31 (1991), 141–144.

WYDRA, G./BÖS, K./KARISCH, G.: Zur Effektivität verschiedener Dehntechniken. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 42 (1991), 386–400.

WYDRA, G.: Muskeldehnung – aktueller Stand der Forschung. In: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 44 (1993), 104–111.

ZERNICKE, R. F./LOITZ, B. J.: Die kontraktile Funktion der Skelettmuskulatur. In: KOMI, P. V.: Kraft und Schnellkraft im Sport. Köln 1994, 86–103.