



Springer

Dear Author:

Please find attached the final pdf file of your contribution, which can be viewed using the Acrobat Reader, version 3.0 or higher. We would kindly like to draw your attention to the fact that copyright law is also valid for electronic products. This means especially that:

- You may not alter the pdf file, as changes to the published contribution are prohibited by copyright law.
- You may print the file and distribute it amongst your colleagues in the scientific community for scientific and/or personal use.
- You may make an article published by Springer-Verlag available on your personal home page provided the source of the published article is cited and Springer-Verlag is mentioned as copyright holder. You are requested to create a link to the published article in LINK, Springer's internet service. The link must be accompanied by the following text: The original publication is available on LINK **<http://link.springer.de>**. Please use the appropriate URL and/or DOI for the article in LINK. Articles disseminated via LINK are indexed, abstracted and referenced by many abstracting and information services, bibliographic networks, subscription agencies, library networks and consortia.
- You are not allowed to make the pdf file accessible to the general public, e.g. your institute/your company is not allowed to place this file on its homepage.
- Please address any queries to the production editor of the journal in question, giving your name, the journal title, volume and first page number.

Yours sincerely,

Springer-Verlag Berlin Heidelberg

„Repetitive strain injuries“

Unterarm-/Handbeschwerden aufgrund repetitiver Belastungsreaktionen des Gewebes

Zusammenfassung

Nach Angaben des „US National Research Councils“ haben schmerzhafte Störungen in Unterarmen und Händen vielfältige Ursachen. „repetitive strain injury“ (RSI) ist eine von ihnen. Unterarmschmerzen, Kraftverlust und Missempfindungen werden einer andauernden Toleranzüberschreitung des Gewebes durch tausendfache, hochfrequente Bewegungswiederholungen zugeschrieben (NRC, 2001). Andererseits führen repetitive Schmerzsignale auch zu neuroplastischen Änderungen in spinalen und supraspinalen Systemen. Auf diese Weise verbinden sich Schmerz- und Bewegungsimpulse in motorischen Programmen, die für Repetitivbewegungen und Gewebeläsionen verantwortlich sind. Somit können RSI-Schmerzen auch dann noch tätigkeitsbedingt auftreten, nachdem alle Läsionen vollständig abgeheilt sind. Schlussfolgerungen für die RSI-Behandlung und Prävention werden erläutert.

Schlüsselwörter

Repetitive strain injuries · Tendopathien · Chronischer Schmerz · Tätigkeitsbedingt · Neuroplastizität

Ein klinisches Wörterbuch beschreibt „repetitive strain injury“ (RSI) als „eine Bezeichnung für überlastungsbedingte schmerzhafte Bewegungseinschränkungen der oberen Extremitäten infolge jahrelanger Tätigkeit an Tastenschreibgeräten“ [1]. Präziser ausgedrückt, bezeichnet der Begriff RSI einen pathophysiologischen Mechanismus für tätigkeitsbedingte muskuloskeletale Störungen, die sich v. a. im Unterarm-/Handbereich als chronifizierende Schmerzen, Kraftverlust und Missempfindungen äußern. Der RSI-Mechanismus bezieht sich auf Schädigungen extrem häufig bewegten Gewebes, die durch ungünstige Kraft- und Haltungsanforderungen verstärkt werden [2]. Wie bei vielen chronischen Schmerzsyndromen ergibt sich aus Art und Stärke RSI-typischer Beschwerden kein sicherer Hinweis auf eine einheitliche Verursachung; neben anderen Entstehungsmechanismen sind gesellschaftliche und psychische Einflüsse zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden epidemiologische und experimentelle Befunde dargestellt, die den RSI-Mechanismus begründen. Der 2. Abschnitt ist diagnostischen und therapeutischen Maßnahmen gewidmet, die sich aus ätiopathogenetischen Modellvorstellungen ableiten und z. T. bereits erfolgreich angewendet werden.

Epidemiologische Befunde

In offiziellen amerikanischen Arbeitsstatistiken werden über 60% der gemeldeten tätigkeitsbedingten Krankheiten

auf „repeated trauma“ zurückgeführt, mit deutlichem Anstieg zwischen 1980 und 1996 [3]. Auch aus Europa werden hohe Fallzahlen berichtet, die ebenso wie die amerikanischen aufgrund sehr weitgefaster und uneinheitlicher Diagnosekriterien lediglich auf die gesellschaftliche Bedeutung des Problems und seiner Prävention an modernen Arbeitsplätzen hinweisen können [4]. Die Erhebung genauer Fallzahlen bedarf standardisierter Kennwerte für mechanische Belastungen und muskuloskeletale Störungen [5].

Repetitive Bewegungen treten vor allem an Arbeitsplätzen auf, dem daher bevorzugten Erhebungsgebiet epidemiologischer RSI-Untersuchungen. Dies hat zu einer voreiligen Verbindung zwischen Verursachungs- und Entschädigungsfragen geführt, die sich in kontroversen Begriffsdiskussionen niedergeschlagen und eine einheitliche Epidemiologie verhindert hat. Auch die Ausweitung des epidemiologischen Untersuchungsgegenstands auf alle „work-related musculoskeletal disorders“ (WRMSD) ist wegen der Komplexität von „arbeitsbezogen“ und „muskuloskeletale Störung“ wenig geeignet, epidemiologische Befunde in beweisbare pathogenetische Hypothesen zu überführen.

© Springer-Verlag 2002

Prof. Dr. Hardo Sorgatz
Fachbereich Humanwissenschaften,
Technische Universität, Steubenplatz 12,
64293 Darmstadt,
E-Mail: sorgatz@psychologie.tu-darmstadt.de

H. Sorgatz

Repetitive strain injuries. Forearm pain caused by tissue responses to repetitive strain

Abstract

According to the National Research Council, painful work-related upper limb disorders are caused by different pathophysiological mechanisms, one of which is repetitive strain injury (RSI). Forearm pain, tenderness, and paresthesias are thought to result from a continual risk of exceeding limits of "cumulative trauma load tolerance" (CTLT, cf. NRC 2001) in soft tissue by thousands of high-frequency, repetitive movements. On the other hand, repetitive painful stimulations also produce neuroplastic changes in the spinal and supraspinal nociceptive systems. Thus, repetitive motor and nociceptive impulses become part of the same motor programs, which are also responsible for high-frequency movements and tissue damage. In this way RSI pain may be felt as a task-related response, even after all injuries are completely healed. Consequences of this neuroplastic CTLT model for RSI prevention and therapy are discussed.

Keywords

Repetitive strain injuries · Forearm pain · Chronic pain · Work-related · Neuroplasticity

Besser wäre eine Begrenzung des RSI-Begriffs auf Unterarm/Hand-Beschwerden und fast kraftlose, sehr häufig wiederholte Bewegungen, weil dann aus dem Vergleich der Grundprävalenz dieser Beschwerden mit ihrem tätigkeitsspezifischen Auftreten wissenschaftlich prüfbar ableitbar sind.

Die Befragungen zum Bundesgesundheitsurvey ergaben bei 3,4–17% der 18- bis 50-Jährigen Schmerzen in Armen und Händen [6]. Nach einer für die USA repräsentativen Untersuchung ist die ärztlich festgestellte Grundprävalenz von Unterarm-/Handbeschwerden dagegen nur bei 4% anzusetzen [7]. Dieser Wert wird in einer prospektiven schottischen Studie bestätigt, nach der Arm-/Handbeschwerden nur bei 3,6% (52 von 1450) der Bevölkerung diagnostiziert wurden. Innerhalb von 2 Jahren traten jedoch bei 8,3% Neuerkrankungen auf, die z. T. auf repetitive tätigkeitsbedingte Bewegungen zurückgeführt werden konnten.

Die Autoren konstatieren, obwohl sie der im RSI-Begriff unterstellten biomechanischen Verursachung von Beschwerden skeptisch gegenüberstehen: „Our study ... confirms a long suspected relation between work related repetitive movements and onset of forearm pain ...“ [8]. Mehrere Untersuchungen anderer Forschergruppen zu Berufen mit hohem Anteil an repetitiven Bewegungen ergaben Prävalenzwerte von 20–40% und damit weitere Hinweise auf einen Kausalzusammenhang zwischen repetitiver Belastung und Unterarm-/Handbeschwerden.

Insgesamt sind epidemiologisch begründete Faktoren aus betrieblichen Untersuchungen fragwürdig, wenn sie sich lediglich auf einen Vergleich von Arbeitskräften mit Personen aus der Normalbevölkerung beziehen, über deren berufliche Belastung keine Angaben erhoben wurden. In mehreren Studien wurden daher Personen derselben Betriebe mit unterschiedlicher Belastung durch repetitive Tätigkeiten ärztlich untersucht. Das Risiko von Missempfindungen, Kraftverlust und Bewegungsschmerzen im distalen Armbereich ist an Arbeitsplätzen mit hohem Repetitionsanteil (Dateneingabe und zyklische Industriearbeit) mindestens doppelt so hoch wie bei Berufstätigkeiten mit geringer repetitiver Belastung [9]. In einer

aktuellen wissenschaftlichen Bestandsaufnahme des „US National Research Councils“ wird aus den epidemiologischen Befunden geschlossen: „that repetition, force and vibration are particularly important work-related factors associated with the occurrence of symptoms and disorders in the upper extremities“ [10], S. 103.

Mechanobiologische Befunde

Die ersten RSI-Studien an Tiermodellen wurden wahrscheinlich von Oblenskaja u. Goljanitzki 1927 [11] an Kaninchen durchgeführt. Anlass waren gehäufte Arm-/Handbeschwerden bei Moskauer Teepackerinnen. Experimentell erzeugte, tausendfache Zwangsbewegungen an Kaninchenpfoten führten zu Gewebereaktionen, die von den Autoren als „seröse Tendovaginitis“ bezeichnet wurden. Die Befunde konnten in einer neueren Arbeit an Ratten (Zwangsläufen) bestätigt und einer „Dosis-Wirkungs-Beziehung“ zugeordnet werden [12]. Experimente mit „freiwilligen“ kraftarmen repetitiven Bewegungen führten bei Primaten zu Arm-/Handbeschwerden (u. a. Epikondylitis), die auch noch Wochen später die Nahrungssuche der Versuchstiere behinderten [13].

Andere, in Begleitung der „RSI-Epidemien“ entstandene, experimentelle Untersuchungen an Tieren und Menschen zeigen übereinstimmend, dass häufige Bewegungswiederholungen zu Läsionen in aktiv und passiv bewegtem Gewebe führen. Aufgrund der umfangreichen Datenlage schloss die „National Academy of Sciences“ 1998 in einem Konsensbericht auf einen Kausalzusammenhang zwischen tätigkeitsbedingten Bewegungswiederholungen und vielfältigen Gewebsverletzungen: „Even at levels of force clearly below the failure level ... there is scientific evidence ... that tissue response to deformation can produce inflammation, failure at microscopic levels, and muscle fatigue. Injuries to muscle from single-event and repetitive contractions have been documented in humans and in animal models“ [14], S. 9.

Somit kann der RSI-Mechanismus als epidemiologisch und mechanobiologisch belegt gelten. Mikroläsionen aufgrund repetitiver Bewegungen stehen daher im Verdacht, tätigkeitsbedingte muskuloskeletale Beschwerden zu verursachen. Für verschiedene Belastungs-

formen und organische Strukturen sind spezielle RSI-Modelle entwickelt worden, deren gemeinsame Merkmale in einem somatischen RSI-Modell darstellbar sind.

Ein somatisches RSI-Modell

Das „cumulative trauma load-tolerance model“ (CTLT) beschreibt einen Zusammenhang zwischen wiederholter Belastung, Reparaturprozessen und chronischen Gewebeschäden. Da Reparaturprozesse Tage bis Wochen in Anspruch nehmen, Arbeitsunterbrechungen jedoch nur wenige Stunden anhalten, können unvollständige Reparaturergebnisse kumulieren. Dies führt letztlich zu irreparablen größeren Schäden, die sich in Schmerzen und Missempfindungen ausdrücken oder – als Schutzmechanismus – zu Kraftverlust führen [10].

Entsprechend der umfangreichen experimentellen Befunde ist das CTLT-Modell grundsätzlich auf Nerven, Sehnen, Muskeln, Gelenke und Bindegewebe anwendbar. Für jedes Gewebe sind auch spezifische RSI-Modelle beschrieben worden [4, 10, 15, 16, 17]. Je nach Bewegungsanforderung am Arbeitsplatz und individueller Veranlagung werden unterschiedliche Strukturen geschädigt. Daraus können sich manifeste Tendopathien, Myalgien, Nervenkompressions-syndrom und Gelenkschmerzen entwickeln, aber auch Folgeschäden in mehreren Strukturen, die aber bei bis zu 90% der Betroffenen kein einheitliches diagnostisches Bild ergeben [4, 5].

Das CTLT-Modell ist zwar wissenschaftlich evident [10], S. 286, hat in dieser Form aber eine begrenzte klinische Bedeutung. Nur in sehr wenigen Arbeiten wurde bei RSI-Patienten ein kumulierter Defekt durch Biopsien nachgewiesen. Weiter mag die im Modell verborgene Gleichung „je größer die Läsion, umso stärker der Schmerz“ für einige akute Schmerzzustände zutreffen, für chronische Schmerzkrankheiten ist sie dagegen nicht zu belegen.

Vor allem erklärt das CTLT-Modell nicht, dass RSI-Patienten häufig während eines längeren Urlaubs völlige Beschwerdefreiheit, jedoch schon wenige Stunden nach Wiederaufnahme der Berufstätigkeit das komplette Symptommuster aufweisen. Diese „RSI-Reminiscenz“ lässt die Beteiligung anderer als somatischer Prozesse vermuten. Dar-

über hinaus werden im CTLT-Modell soziopsychische Faktoren nur in ihrer hormonellen Wirkung auf Gewebeläsionen beschrieben, nicht aber in Zusammenhang mit Chronifizierungsprozessen oder Veränderungen der subjektiven Schmerzwahrnehmung betrachtet. Außerhalb des Erklärungsrahmens liegt damit die Entwicklung von einem akuten RSI-Syndrom zu einer chronischen Schmerzkrankheit: „the entire pathway to chronic pain remains uncertain“ [10], S. 215.

Ein neuroplastisches RSI-Modell

Eine Verbindung zwischen dem CTLT und chronischem RSI-Schmerz ist durch neuroplastische Schmerzmodelle herstellbar, die Langzeiteffekte repetitiver Schmerzreize beschreiben [18, 19, 20]. Beide Modelltypen haben in der Repetition von motorischer bzw. nozizeptiver Erregung dasselbe Ausgangskonzept. Auf die Wirkung wiederholter schmerzhafter Bewegungen sind sie daher gemeinsam anwendbar. Im Folgenden werden dafür wichtige Aspekte des Schmerz- und Bewegungslernens aufgeführt.

Schmerz-Lernen

Schmerzhafte Empfindungen lassen sich im Unterschied zu anderen Gefühlen (z. B. Angst) weder willentlich aus dem Gedächtnis reproduzieren noch nach Pawlows Schema auf äußere Reize konditionieren. Schmerz erleben scheint primär auf interozeptive Reize angewiesen zu sein. Andererseits ergaben Untersuchungen zum Schmerzgedächtnis eine begrenzte Lernfähigkeit des Organismus für Schmerzempfindungen [21, 22]. Eine bewusste Schmerzempfindung kann vom Schmerzgedächtnis ausgelöst werden [23], wenn ein dem Akutschmerz erlebnis ähnlicher Organismuszustand (z. B. dasselbe Bewegungsmuster) vorliegt.

Bushnell et al. [24] zeigten, dass nozizeptive Trigemini-neurone auf gelernte Verhaltensketten konditionierbar sind, nicht aber auf verhaltensirrelevante bzw. bewegungsunabhängige Einzelreize. Wird demnach eine häufig von Schmerzreizen begleitete, gut gelernte Bewegung erneut ausgeführt, reagieren die beteiligten Schmerzneurone auch dann mit „task-related responses“, wenn

der Schmerzreiz ausbleibt. Anscheinend steigern repetitive Bewegungen die Erregbarkeit nozisisensibler Neuronen, wenn sie in der Vergangenheit wiederholt mit Schmerzimpulsen gekoppelt waren.

Bewegungslernen

In einer anderen neurophysiologischen Studie an Primaten führten repetitive Bewegungen (minimales Öffnen der Hand) zu einem akuten RSI-Syndrom und einer umfangreichen Neukartierung des sensorischen Kortex, die einen Strukturverlust der „Homunkulus-Hand“ aufwies [12]. Diese Anpassungsleistung kann u. a. als gezielte Sensibilitätssteigerung für monotone, bewegungsrelevante Signale verstanden werden, aber auch Störungen in der motorischen Koordination bewirken [25].

Repetitive, d. h. hochgradig automatisierte, manuelle Bewegungen erfordern ein kompliziertes motorisches Programm, dessen geordneter Ablauf bidirektional, von intero- und exterozeptiven Signalen gesteuert wird. „Die Hand spricht mit dem Gehirn so sicher, wie das Gehirn mit der Hand spricht“ [26]. Die Lernphase ist durch Rekrutierung zerebraler Neuronen gekennzeichnet, die eine zunehmende Unabhängigkeit der Bewegung von externen Steuersignalen bewirkt. Da die Bewegung eines Fingers die Aktivierung einer größeren Anzahl von Neuronen erfordert als ein Faustschluss, ist die zerebrale Beteiligung beim leichtgängigen Tastendrücken vermutlich höher als beim kraftraubenden Hammerschlagen [26].

Gute Klavierspieler spüren schon vor der akustischen Rückmeldung, ob ihre Finger bei einer bestimmten Tonfolge auf die richtigen Tasten schlagen werden, und Schnellschreiber erkennen bereits einen Fehlgriff, bevor ihr Finger die Taste erreicht. Beim Maschineschreiben werden die Finger in anderer Reihenfolge aktiviert als sie letztlich anschlagen [27]. Die biomechanischen Latenzen der einzelnen Finger für bestimmte Buchstaben werden demnach beim Schreiberwerb als ursprünglich somatosensorische Signale zerebral kodiert und dann zur Steuerung des motorischen Programmablaufs verwendet. Schon geringe Änderungen an Tastatur und Bewegungsapparat erfordern eine Neuaufnahme der veränderten somato-



Abb. 1 ▲ Neuroplastische Mitverursachung von RSI-Beschwerden. Repetitive Bewegung bewirkt kumulierende Mikroverletzungen in aktiv und passiv bewegtem Gewebe und eine Speicherung von Schmerzsignalen in den Ablauf des Bewegungsprogramms (bewegungsspezifisches Schmerzimage). Virtuelle Schmerzreize führen bei jeder neuen Auslösung des Programms zu bewussten Schmerzempfindungen, auch wenn das Gewebe vollständig repariert ist

sensorischen Signale in das jeweilige „Fingerprogramm“, bevor der vorherige Leistungsstand erreicht wird. Das Erlernen und Ausführen repetitiver Fingerbewegungen ist somit nicht nur ein komplizierter Erregungsprozess, sondern auch ein kontinuierlicher somatosensorischer Speichervorgang.

Im Vergleich zu den phylogenetisch etablierten Geh- und Laufbewegungen verlangt die somatosensorische Speicherung von Fingerbewegungen eine parallele Informationsverarbeitung aus hochfrequenten Bewegungsabläufen mehrerer Gliedmaßen und benötigt damit eine deutliche höhere Verarbeitungskapazität. Treten zusätzliche kognitive Anforderungen (Text- und Notenvorlagen) auf, kann die Auswahl bewegungsrelevanter Informationen fehlerhaft verlaufen und nozizeptive Impulse werden in das zentrale Bewegungsprogramm integriert.

Motonozizeptives Lernen

Nozizeptive Lernprozesse bedürfen keiner bewussten Schmerzempfindung, da sie auch an anaesthetisierten Tieren nachgewiesen wurden. Mikroläsionen aufgrund kraftarmer hochfrequenter Bewegungen führen selten zum bewussten Schmerzerleben, weil die Betroffenen durch ihre Berufstätigkeit stark abgelenkt sind und sich dadurch ihre

Schmerzschwelle erhöht. Die Nichtwahrnehmung dieser anfänglich minimalen Schmerzen ist wahrscheinlich eine Voraussetzung für den nozizeptiven Lernprozess, der bei größeren Verletzungen umgehend durch Schutzreflexe und Schonverhalten unterbrochen würde.

An gemeinsamen Lernvorgängen von Bewegung und Schmerz sind zunächst spinale Neuronen beteiligt. Wahrscheinlich erfolgen dann zerebrale Prozesse, über deren Art – trotz intensiver Forschung – nur von subjektiven Beschreibungen ausgehend spekuliert werden kann. Klavierspieler oder Schnellschreiber haben vor dem Tastenschlag nicht nur den richtigen Ton bzw. Buchstaben „im Kopf“, sondern auch das „gewohnte“ somatosensorische Signal, das auch nozizeptiven Ursprungs sein kann. Wurden die Anschlagsbewegungen zigtausend Mal von unter-schwelligem Schmerzsignalen begleitet, kann das Bewegungsmuster als RSI-Reminiszenz bzw. „task related responses“ Schmerzempfindungen erzeugen, obwohl der Bewegungsapparat nicht mehr geschädigt ist (Abb. 1).

Das neuroplastische RSI-Modell zusammenfassend, bewirken hochfrequente Repetitivbewegungen zunehmend Mikroläsionen, die in betroffenen muskuloskeletalen Strukturen kumulieren und zu bewegungstypischen Schmerzen führen. Gleichzeitig entstehen neuroplasti-

sche Kopplungen zwischen unterschwelligen Schmerzimpulsen und zugehörigen Bewegungsprogrammen, die auch nach vollständiger Ausheilung eine bewegungsspezifische Schmerzempfindung aufrechterhalten. RSI-Patienten können danach unter nozizeptiven bzw. (bei Nervenschäden) neuropathischen Schmerzen leiden, aber auch unter neuroplastisch erzeugten, sog. „virtuellen Schmerzreizen“ [28].

Letztere unterliegen vermutlich einem stärkeren soziopsychischen Einfluss als „reale“, nozizeptiv ausgelöste Schmerzempfindungen. Aversiv getönte soziopsychische Umstände könnten die deszendierende Schmerzhemmung beeinträchtigen und damit, als Chronifizierungsfaktoren, zur Konsolidierung neuroplastischer Schmerzprozesse beitragen. Zusätzlich bewirken sie, wie bei anderen chronischen Schmerzsyndromen auch, eine verringerte Schmerzschwelle bzw. einen gesteigerten Schmerzausdruck.

Mit diesem erweiterten CTLT-Modell lassen sich klinische Beobachtungen, wie die „RSI-Reminiszenz“ nach mehrwöchiger Tätigkeitspause, die häufig geringe Bedeutung aktuell bestehender Gewebeläsionen und der Einfluss nichtmechanischer Faktoren auf das Beschwerdebild beschreiben. Darüber hinaus lässt sich ein dreiphasiger Verlauf von RSI-Beschwerden pathophysiologisch ableiten, der ursprünglich durch klinische Beobachtungen begründet wurde [29]:

- ▶ Phase I: Zunahme von Mikroverletzungen in akuten Überlastungssituationen,
- ▶ Phase II: Kumulation unreparierten Gewebes,
- ▶ Phase III: motorisch programmierte Schmerzempfindung.

Im Unterschied zu anderen chronischen Schmerzkrankheiten (z. B. primäre Kopfschmerzen, funktionale Rückenschmerzen) ist die initiale somatische Ursache von RSI-Beschwerden weitgehend durch epidemiologische und tierexperimentelle Befunde belegt. Gemeinsames Merkmal ist das Fehlen ursachenspezifischer Krankheitszeichen. Die Konsequenzen dieses Mangels, eine häufig wenig aussagekräftige Symptomatik, können – für Diagnose, Patientenführung und Behandlung – durch Rückgriff

Tabelle 1
Spezifische RSI-Folgen

Bursitis	„Schleimbeutelentzündung“
Epicondylitis lateralis et ulnaris	„Tennisellenbogen“
Ganglionzyste	Überbein
Karpaltunnelsyndrom	Medianuskompression
Raynaud-Syndrom	Hand-Arm-Vibrationssyndrom
Styloiditis ulnaris et radialis	Entzündung des Griffelfortsatzes
Tendovaginitis	Tendovaginitis stenosans – Tenosynovitis – Quervain-Krankheit

auf obige Modellannahmen gemildert werden.

Symptomatik

Bei einigen RSI-Patienten stimmt das Beschwerdebild mit der Symptomatik bekannter orthopädischer bzw. neurologischer Krankheiten (u. a. Epikondylitis, Tendovaginitis, Tendinitis, Karpaltunnelsyndrom) überein. Für diese Krankheiten gibt es Belege, dass sie auch durch einen RSI-Mechanismus verursacht werden können (Tabelle 1).

Bei den anderen RSI-Patienten beschränkt sich die Symptomatik auf diffuse Schmerzen, Kraftverlust und Missempfindungen zwischen Ellenbogen und Fingerspitzen des beruflich besonders belasteten Arms. In Ruhe und bei passiven Bewegungen werden meist keine Beschwerden berichtet. Eine erhöhte Druckschmerzempfindlichkeit besteht selten (Tabelle 2).

Alltagsübliche, variable Handbewegungen (z. B. beim Entkleiden) bereiten nur im fortgeschrittenem Stadium Schwierigkeiten. Nach minutenlangem Ausüben repetitiver berufsähnlicher Bewegungsfolgen treten dagegen Missempfindungen, Schmerzen und Kraftverlust auf, die über mehrere Stunden anhalten können.

Verlauf. Im Anfangsstadium treten die Beschwerden erst nach der indizierten Berufstätigkeit auf und verschwinden über Nacht. Auch die darauf folgenden Arbeitstage verlaufen zunächst beschwerdefrei mit anschließender „Feierabendsymptomatik“.

Nach weiteren Monaten bis Jahren setzen die Beschwerden bereits nach wenigen Stunden Berufstätigkeit ein und halten bis zum Arbeitsschluss an; vermindern sich aber bis zum nächsten Morgen. Eine tätigkeitsspezifische Aus-

lösung wird erkannt. Klassische tendomyalgische und neuropathische Krankheitsbilder können entstehen. Nach mehrwöchigen Arbeitsunterbrechungen verschwinden die Beschwerden und treten erst wieder nach beruflichen Belastungssituationen auf.

Meistens erst nach weiteren Berufsjahren findet eine Generalisierung der Beschwerden auch auf niederfrequente Arm-/Handbewegungen statt (Lenken und Schalten im Auto, Hartgeld zählen, Bügeln, Suppe rühren u. a.). Einmalbewegungen bleiben jedoch unproblematisch. Nach Verschwinden aller Beschwerden in mehrwöchigen Arbeitsunterbrechungen rezidivieren die RSI-Symptome innerhalb weniger Minuten bis Stunden nach Wiederaufnahme der repetitiven Tätigkeit [29].

Komorbiditäten. Rücken- oder Nackenschmerzen sind bei mehr als der Hälfte aller Büroarbeitskräfte vorhanden und treten daher (statistisch) häufig bei RSI-Patienten auf. Auch ein kausaler Zusammenhang zwischen diesen muskuloskeletalen Beschwerden ist wahrscheinlich, da statische Belastungen die Wirkungen dynamischer Belastungen verstärken. Nur in seltenen Einzelfällen können die Beschwerden, als projizierte Schmerzen, auf Nervenkompressionen an der Halswirbelsäule (HWS) zurückgeführt werden [30].

Diagnostische Abgrenzung

Praktisch alle tendomyalgischen Erkrankungen und Symptome zwischen Ellenbogen und Fingern stehen im Verdacht, auch durch tätigkeitsbedingte repetitive Bewegungen entstehen zu können. Dies schließt jedoch andere Ursachen (z. B. akute Überlastung durch ungewohnte kraftraubende Bewegungen in

Sport und Freizeit, projizierter Schmerz durch ein HWS-Syndrom) nicht grundsätzlich aus.

Nach der primären orthopädischen Diagnoseerhebung sollte bei Verdacht auf einen RSI-Prozess eine Belastungsanamnese zu folgenden Themen durchgeführt werden:

- ▶ Gesamtdauer der repetitiven Tätigkeit in Jahren, Art der (Vor-) Tätigkeiten,
- ▶ Bewegungszyklen pro Stunde,
- ▶ durchschnittliche ununterbrochene Tätigkeitsdauer und Pausengestaltung,
- ▶ tägliche Gesamttätigkeitsdauer,
- ▶ Haltungs- und Bewegungsauffälligkeiten (z. B. ulnare Abduktion),
- ▶ Anordnung der Arbeitsgeräte,
- ▶ statische Belastungen, psychosoziale Arbeitsstressfaktoren.

Als kritische langjährige (>5 Jahre) Bewegungsfrequenz wird 10/min für den Ellenbogen und Unterarm, insgesamt 200/min für alle Finger angenommen [3].

Falls möglich, soll der Patient typische Arbeitshaltungen und -bewegungen weitgehend realitätsgetreu für wenige Minuten vorführen. Bei Bildschirmarbeitskräften kann eine dem Belastungs-EKG vergleichbare Untersuchung am PC durchgeführt werden. Dabei ist die aktuelle Symptomentwicklung zu erfragen und die Bewegungsergonomie zu beurteilen. Griffstärke, Beweglichkeit usw. sind vor- und nachher zu prüfen.

Eine RSI-Diagnose wird durch anderweitige Bewegungsschmerzen (z. B. Gehbeschwerden), multilokale Schmerzen (Fibromyalgie?) oder systemische Erkrankungen fraglich. Spasmen indizieren eher distale Dystonie als RSI. Ein Verrentungsanliegen ist ebenso sorgfältig zu hinterfragen wie das Freizeitverhalten. Apparative und Labordiagnostik bleiben meistens befundlos. Nichtreak-

Tabelle 2
Unspezifische RSI-Folgen

Bewegungsschmerzen
Kraftverlust
Missempfindungen
Sensibilitätsverluste
Schwellungen
Beweglichkeitseinschränkungen

Tabelle 3

Verhaltens- und geräteergonomische RSI-Faktoren

Bewegungsmuster	Unergonomische Unterarm-, Finger- und Nackenbewegungen Hohe Bewegungsfrequenz (subjektiver Akkord) Einseitige Verteilung der Bewegungslast (z. B. 2-Finger-Schreiben)
Körperhaltung	Starre Körperhaltung Nichtbenutzung von Unterarm- und Handballenauflagen Abknicken der Handgelenke Länger anhaltende Extrempositionen der HWS
Computerbenutzung	Unergonomische Geräte- und Vorlagenanordnung Unergonomische Möbel und Geräte Höhendifferenz zwischen Tastatur und Ellenbogen Falsche Monitorhöhe Bildschirmreflektionen
Arbeitsorganisation	Unergonomische Pausengestaltung Hoher Anteil an Routinearbeiten Häufige Überstunden Permanenter Zeitdruck und hohes Arbeitstempo Geringer Einfluss auf die tägliche Arbeitsorganisation Fehlen entlastender Mischarbeit
Psychische Einstellungen	Hoher subjektiver Leistungsanspruch Soziale Isolation Geringe Stresstoleranz Dysfunktionale Überzeugungen und Affektivität

tive, indirekte Beobachtungen sind zu bevorzugen.

Patientenführung und -information

Vor der Behandlung wird der Patient über die Entstehung seiner Beschwerden und mögliche Konsequenzen unterrichtet:

- ▶ Es bestehen sehr wahrscheinlich keine akuten Verletzungen oder organischen Schäden, jedoch echte, „unwillentliche“ Schmerzempfindungen neuroplastischer Genese.
- ▶ Unverändertes Weiterarbeiten gefährdet die berufliche und nichtberufliche Funktionstüchtigkeit der Hände.
- ▶ Die langwierige Behandlung erfordert tägliches Training vorgeschriebener Bewegungsmuster.
- ▶ Ergonomisch verbesserte Arbeitsgeräte können die Beschwerden lindern.
- ▶ Die Chancen einer Anerkennung als Berufskrankheit sind <1% bei einer maximal erreichbaren MdE von 20–40% mit geringen Rentenaufkommen.

Behandlungshinweise

Neben den bei bekannten tendomyalgischen Störungen primär anzuwendenden orthopädischen Maßnahmen werden berufstätigkeitsbezogene Übungen empfohlen. Eine wissenschaftlich begründete, klinische Evidenz besteht für diese zusätzlichen Maßnahmen ebenso wenig wie für innerbetriebliche „biopsychosoziale“ Rehabilitationsprogramme; klinische Erfahrungen sind jedoch ermutigend [3, 29, 31, 32].

Ziel der RSI-Behandlung ist der schmerzhemmende Erwerb eines langfristig leistungsfähigen, geänderten Tätigkeitsmusters [25]. Alle verhaltensändernden Maßnahmen erfolgen partitioniert über einen Zeitraum von mehreren Monaten. Eine chirurgische oder medikamentöse Behandlung erzielt häufig nur eine vorübergehende Symptomreduktion, wenn die Berufstätigkeit später unverändert fortgeführt wird. Sie kann notwendig sein, um einen schmerzfreien Neuerwerb alternativer Bewegungsmuster zu erreichen.

Ergonomische Umgestaltung

Von der Ruhigstellung betroffener Gliedmaßen (Gipsverband!) wird ebenso abgeraten wie von einer vollständigen Unterbrechung der Berufstätigkeit. Falls die Beschwerden es zulassen oder medikamentös gut kontrolliert werden können, sollte der gewohnte Arbeitsplatz als „Lernfeld für neue Bewegungsmuster“ genutzt werden. Dies setzt eine mit dem Betrieb abgestimmte, zunächst zeitlich begrenzte Umgestaltung der Arbeitsbedingungen voraus (Tabelle 3).

Grundsätzlich ist eine ergonomische Umgestaltung des Arbeitsplatzes notwendig. Damit wird nicht nur die muskuloskeletale Gesamtbelastung reduziert, sondern auch ein veränderter Bewegungsablauf gewährleistet, der den antinozizeptiven motorischen Lernprozess fördert. Die kurative Wirkung ergonomischer Arbeitsgeräte ist bei bereits bestehenden RSI-Beschwerden gering. Entsprechendes gilt für ergonomische Hilfsmittel zur Reduktion der statischen Belastung (z. B. Armauflagen), dynamisches Sitzen und für zusätzliche Arbeitsunterbrechungen (Kurzpausen).

Zuerst sollten einige Arbeitsgeräte (Telefon, Drucker, Handbücher) aus dem „bequemen“ Greifraum entfernt werden, um natürliche Bewegungspausen zu garantieren. Weiter sind Mischaufgaben einzufügen, die den Arm-/Handbereich schonen (z. B. Lesen von Handbüchern und Betriebsmemos, Dienstgänge, Teilnahme an innerbetrieblichen Fortbildungen usw., nicht: Aktenablage oder Kopiertätigkeiten).

Aufgrund einer fachlichen Beurteilung des repetitiven Bewegungsablaufs (Orthopäde, Betriebsarzt, Ergonomieberater) werden ungünstige Bewegungshaltungen und -abläufe reduziert. Für die gewohnte, repetitive Haupttätigkeit erstellt der Patient zusammen mit seinem Betrieb einen Änderungsplan, der über mehrere Wochen sukzessiv einzuüben ist. Dieser kann bei Maschinenschreibkräften in dem Wechsel des Leertastenanschlags und in der Umstellung auf eine andere Tastenbelegung oder Tastaturform bestehen. Die Mausbenutzung sollte soweit wie möglich durch sog. „short cuts“ ersetzt werden. Ungünstige Gelenkstellungen können durch geteilte Tastaturen, Änderung der Geräteanordnungen sowie häufige Kor-



Abb. 2 ▲ **RSI und ergonomischer Bildschirmarbeitsplatz. Unterarmstützen entlasten die Nacken- und Schultermuskulatur. Eine geteilte Tastatur und die vertikale PC-Maus gestatten einen biomechanisch günstigen, aber auch schnelleren Bewegungsablauf. Eine RSI-Genese durch hochfrequente Bewegungswiederholung wird durch ergonomische Geräte nicht automatisch verhindert**

rektur von Sitz- und Tischhöhen verbessert werden (Abb. 2).

Ein anfänglich massiver Leistungsverlust ist bei der Umsetzung einzukalkulieren. Das Leistungsziel sollte deutlich niedriger als das prämorbidem Leistungsaufkommen gesetzt werden. Das Führen von Leistungskurven und Skalen, die den persönlichen ergonomischen Fortschritt erfassen, ist auch aus motivationalen Gründen zu empfehlen.

Alle größeren Computerhersteller liefern geeignete ergonomische Informationen bzw. RSI-spezifische Warnhinweise. Bildschirmarbeitskräften stehen Fachdienste (z. B. www.ergo-online.de; www.rsi-online.de) und Programme zur Verfügung (z. B. *workpace*, *fitatwork*), die leicht über das Internet für eine kostenfreie Probezeit bezogen werden können.

Sensorisches Training

Bei RSI-Patienten ist die Körperwahrnehmung häufig verändert [33]. Auch wenn keine Taubheitsgefühle berichtet werden, kann die Somatosensorik in der betroffenen Körperpartie beeinträchtigt sein bzw. von Schmerzempfindungen überlagert werden. Einfache Berührungsübungen mit Hand und Fingern, unter Rotlicht und anderen physikalischen Reizen, sowie Tastübungen mit allen Fingern an verschiedenen Hautpartien sollten regelmäßig über mehrere Wochen durchgeführt werden. Bei der repetitiven Berufstätigkeit kann sich die gesteigerte Tastwahrnehmung später als Ersatzsignal für Missempfindungen und Schmerzen etablieren. Auch auf die Funktion „sensorischer

Tricks“ zur Unterbrechung von Missempfindungen oder Schmerzen kann hingewiesen werden. Wenn motorische Übungen nicht toleriert werden, sollte mit sensorischen Übungen begonnen werden; vorzugsweise erfolgen motorische und sensorische Übungen abwechselnd.

Motorisches Training

Das Umlernen eines jahrelang ausgeübten beruflichen Bewegungsmusters sollte unter fachlicher Aufsicht von Physiotherapeuten und bei fortgeschrittenen Beschwerden von speziellen Handtherapeuten durchgeführt werden. Die verhaltenstherapeutischen Prinzipien der Neuverketzung von Verhaltenseinheiten (*shaping*, *chaining*) sind zu beachten, um Rückfälle in dysfunktionale Bewegungsabläufe zu vermeiden.

Bei allen Übungen steht eher ein sehr langsamer Lerneffekt im Vordergrund als die unmittelbare Wiederherstellung einer beeinträchtigten Funktion bzw. die Regeneration einer geschädigten organischen Struktur. Alle indizierten Bewegungsmuster müssen im „repetitiven Trockenkurs“ beschwerdefrei hundertfach wiederholt werden können, bevor sie am Arbeitsplatz einzusetzen sind.

Nach anekdotischen Berichten hat sich in Einzelfällen ein leichtes Krafttraining als hilfreich erwiesen. Eine Patientin hob morgendlich mehrere hundert Male sehr leichte Hanteln und konnte danach zumindest halbtags PC-Arbeit leisten. Auch muskuläres Entspannungstraining, Feldenkrais- und Alexander-Technik können erfolgreiche Maßnah-

men darstellen. Da RSI-Patienten häufig hoch leistungsmotiviert sind, ist gegebenenfalls eine psychotherapeutisch geleitete Reflexion von Leistungsanspruch und Selbstwertgefühl zu empfehlen. Bei großer Änderungsresistenz bezüglich der Umsetzung von Trainingsergebnissen sollte eine verhaltenstherapeutische Expertise eingeholt werden.

Prävention und Rückfallprophylaxe

Auch bei Einhaltung verschiedener von Gesetzgebern und Organisationen erlassener ergonomischer Richtlinien bleibt das Grundproblem moderner Arbeitsplätze, die repetitive Bewegung, bestehen. Wie beim sportiven Langlauf, bei dem „*lower limb soft tissue injuries*“ nicht durch vor- und nachbereitende Übungen oder Art des Schuhwerks wesentlich verhindert werden, sondern durch Reduktion von Distanz, Schrittfrequenz und Dauer, haben in der Arbeitswelt Änderungen von Arbeitsverhalten und -situation präventiven Vorrang vor umfangreichen Änderungen ergonomischer Bedingungen.

Obwohl einige innerbetriebliche Präventionsprogramme nachweislich zur Abnahme der RSI-Rate geführt haben, halten sie bisher weder einer wissenschaftlichen Qualitätsprüfung noch einer allgemeinen Kosten-Nutzen-Analyse stand: „The evidence suggests that the most effective strategies involve a combined approach that takes into account the complex interplay between physical stressors and the policies and procedures of industries ... Interventions are best tailored to the individual situation“ [10], S. 328.

Auf den Einzelnen zugeschnittene Präventionsmaßnahmen werden häufig trotz Einsicht nicht übernommen. Auch die Einführung sinnvoller ergonomischer Ergänzungen wie geteilter Tastaturen oder Handgelenkstützen scheitert nach wenigen Wochen, wenn sie nicht von der Betriebsleitung deutlich unterstützt wird. Noch schwieriger ist die Automatisierung einfacher Verhaltensregeln, wie z. B. das richtige Einstellen von Bürostuhl und Tastatur oder eines veränderten Bewegungsmusters.

Detaillierte rückfallprophylaktische Maßnahmen sind auch Patienten zu empfehlen, die sich schon nach kurzer Zeit in Folge konservativer orthopädischer Maßnahmen als voll arbeitsfähig

einstufen. Eine Änderung der Arbeits- und Bewegungsbedingungen ist unumgänglich, sobald einmal RSI-typische Störungen aufgetreten sind [34].

Berufskrankheit

Da tätigkeitsbedingte repetitive Bewegungen zu Erkrankungen der Sehnen-scheiden oder des Sehnengleitgewebes sowie der Sehnen- oder Muskelansätze führen können (vgl. BK2101), sollten Arzt und Patient die Tätigkeitsbedingungen, die Symptome und den Krankheitsverlauf schon bei Erstauftreten RSI-typischer Beschwerden möglichst objektiv und detailliert dokumentieren. Bei einer später evtl. erforderlichen Anzeige als Berufskrankheit erspart dies allen Beteiligten Zeit, Kosten und Enttäuschungen. Bei Arm-/Handbeschwerden, die keinem etablierten Krankheitsbild zuzuordnen sind, sollten Alternativursachen sehr sorgfältig und objektivierend geprüft werden.

Diskussion

Die Entstehung muskuloskeletaler Störungen am Arbeitsplatz wird 3 mechanobiologischen Ursachen zugeschrieben: „physikalische Last“, „suboptimale Gelenkpositionen“ und „Repetition“. Während auf übermäßige Last und extrem ungünstige Gelenkstellungen zu meist mit kurzer Latenz das Warnsignal Schmerz folgt, versagt das nozizeptive System bei repetitiven Bewegungen. Anders als bei der ebenfalls repetitiven Lokomotion, bei der das Körpergewicht Bewegungsfrequenz und -dauer energetisch begrenzt, bedarf der elektronische Arbeitsplatz keiner Kraftanstrengung, die das Anheben der Finger übersteigt. Die Repetitionsfrequenz wird zudem nicht durch Trägheit technischer Mechanik, sondern allein durch das Nerven- und Muskelsystem begrenzt.

Skelettmuskeln setzen sich aus verschiedenen Fasern zusammen, einige kontrahieren sich kraftvoll, andere dagegen schnell. Das genetisch festgelegte Verhältnis von Typ-I- und Typ-II-Fasern wird nach heutiger Kenntnis durch Übung nur in Richtung „kraftvoll“ verändert, zu Ungunsten von „schnell“. Die organische Anpassung an höhere Repetitionsfrequenzen kann daher nicht muskulär, sondern nur neuronal geschehen. Ausgefeilte motorische Programme, die für jeden Tasten-

anschlag erneut das günstigste Sortiment von Muskelfasern zusammenstellen, erreichen so Schreibfrequenzen bis zu 20 Hz. Diese motorischen Programmkaskaden bilden daher die Basis der repetitiven Überlastung eines Bewegungsorgans, das in phylogenetischer Vergangenheit nur handelnden Fort- und kräftigen Greifbewegungen diene.

Organische Fasern verbrauchen sich durch stetige Benutzung und werden in Ruhezeiten innerhalb von Stunden bis Wochen repariert oder ersetzt. Werden in einer größeren Zeiteinheit durch hohe Repetitionsfrequenz mehr Fasern „verbraucht“ als vollständig repariert, kumulieren unvollständig reparierte Fasern. Während einer mehrwöchigen Pause regenerieren sich jedoch auch diese optimal, es sei denn der Reparaturvorgang ist gestört. Funktionstüchtigkeit und Zeitbedarf von Reparatur- und Regenerationsprozessen sind somit weitere Entstehungsparameter für RSI und deren Kumulation.

Verletztes Gewebe produziert nozizeptive Information; vermutlich um so häufiger, je mehr es bewegt wird. Die repetitive Schmerzreizung eines Nerven führt zu überdauernden Bahnungen und Aussprossungen mit zunehmender Sensibilisierung, wahrscheinlich aber auch zu einer Steigerung der deszendierenden Schmerzhemmung. Auch an der Schnittstelle dieser Afferenz-/Efferenzwandlung wird entschieden, ob sich aus kumulierten Mikrotraumen ein chronisches Schmerzsyndrom entwickelt.

Auch das motorische System ist neuroplastisch und hat Schnittstellen in denen afferente Impulse zu efferenten gewandelt werden, die sog. motorischen Programme. Nozizeptive Impulse werden dort ebenso in die Bewegungssteuerung eingearbeitet wie kinetische Information aus aktiv und passiv bewegten Strukturen. Die Schmerzhaftigkeit einer Einzelbewegung wird durch wenige Erfahrungen programmiert. Schon bei ihrer kinetischen Vorstellung wird bewusst, dass Schmerzen entstehen werden; die mentale Vorstellung selbst wird aber noch nicht als schmerzhaft empfunden. Werden in solche Programme jedoch jahrelang zigtausend nozizeptive Impulse aus Mikrotraumen eingespeichert, kann die Summe dieser Erfahrung als Schmerz empfunden werden, sobald Mikrotraumen mental zu erwarten sind.

Aus nahe liegenden Gründen müssen sich Studien zur Induktion experimenteller Schmerzen an Mensch und Tier auf wenige tausend Reizwiederholungen beschränken, sodass ein direkter Beleg für die klinische Relevanz der neuroplastischen Kopplung von Bewegung und Schmerzimpulsen nicht erhältlich ist. Zwar umfangreiche, aber wenig systematisierte Erfahrungen in der Behandlung von RSI-Patienten lassen jedoch vermuten, dass die Kombination klassischer medizinischer Therapien mit sensomotorischen und ergonomischen Trainingsprogrammen ein erfolgreiches Behandlungsangebot darstellt.

Seit Ferguson's Artikel „Repetition injuries in process workers“ [35] ist über das RSI-Konzept gestritten worden, weil es u.a. mit Krankheit gleichgesetzt wurde, aber auch wegen der damit verbundenen Verletzungsvermutung. Erst nach der „Australischen RSI-Epidemie“ wurde der pathophysiologische RSI-Mechanismus an Tiermodellen mit ziemlich eindeutigem Ergebnis intensiv erforscht. Mikroverletzungen und ihre Kumulation sind wohl stets nach wiederholter Belastung zu erwarten. Ob sie sich zu einem muskuloskeletalen Schmerzsyndrom mit Krankheitswert entwickeln, bestimmen viele Parameter. In der weitverzweigten Kausalkette und bei der Prävention bestimmter muskuloskeletaler Beschwerden stehen die „Injuries“ jedoch an vorderster Stelle.

Fazit für die Praxis

Der mittlerweile als wissenschaftlich evident anzusehende Kausalzusammenhang zwischen chronisch schmerzhaften Beschwerden im Unterarm-/Handbereich und bestimmten beruflichen Belastungen erweitert das orthopädische Behandlungsspektrum. Neben den tradierten konservativen und operativen Methoden sind in der Diagnostik bewegungsanalytische und in der Therapie bewegungsändernde Verfahren einzusetzen. Für beide sind genaue Informationen über den beruflichen Tätigkeitsablauf einzuholen, wie sie bisher nur bei Begutachtungsfragen erforderlich waren.

Literatur

1. Psychrembel W (1998) *Klinisches Wörterbuch*, 258. Aufl. de Gruyter, Berlin
2. Sorgatz H (1994) Psychomotorischer Schmerz nach Tastaturarbeit: Ursachen und Vermeidung. In: Sorgatz H, Weißenstein C, Engel M (Hrsg) *Prävention von Bewegungsschmerzen bei der Bildschirmarbeit*. Tagungsbericht Technische Hochschule Darmstadt, S 49–80, ISBN-3-89277-176-6
3. Piligian G, Herbert R, Hearn M, Dropkin J, Landsbergis P, Chermiack M (2000) Evaluation and management of chronic work-related musculoskeletal disorders of the distal upper extremity. *Am J Ind Med* 37: 75–93
4. Buckle P, Devereux J (1999) Work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders. European Agency for Safety and Health at Work, Bilbao/Spain
5. Sluiter JK, Rest KM, Frings-Dresen MHW (2000) Criteria document for evaluation of the work-relatedness of upper extremity musculoskeletal disorders. Coronel Institute for Occupational and Environmental Health, Academic Medical Center, University of Amsterdam/Netherlands
6. Bellach BM, Ellert U, Radoschewski M (2000) Epidemiologie des Schmerzes – Ergebnisse 1998. *Bundesgesundheitsbl Gesundheitsforsch Gesundheitsschutz* 43: 424–431
7. Rempel DM, Harrison RJ, Barnhart S (1992) Work-related cumulative trauma disorders of the upper extremity. *JAMA* 267: 838–842
8. Macfarlane GJ, Hunt IM, Silman AJ (2000) Role of mechanical and psychosocial factors in the onset of forearm pain: prospective population based study. *Br Med J* 321: 676–679
9. Latko WA, Armstrong TJ, Franzblau A, Ulin SS, Werner RA, Albers JW (1999) Cross-sectional study of the relationship between repetitive work and the prevalence of upper limb musculoskeletal disorders. *Am J Ind Med* 36: 248–259
10. National Research Council (2001) *Musculoskeletal disorders and the workplace: Low back and upper extremities*. National Research Council and Institute of Medicine. National Academy Press, Washington DC
11. Obolenskaja A, Goljanitzki J (1927). Die seröse Tendinitis in der Klinik und im Experiment. *Dtsch Z Chir* 1927: 388–399
12. Soslowsky LJ, Thomopoulos S, Tun S, Flanagan CL, Keefer CC, Mastaw J, Carpenter JE (2000) Neer award 1999. Overuse activity injures the supraspinatus tendon in an animal model: a histologic and biomechanical study. *J Shoulder Elbow Surg* 9: 79–84
13. Byl NN, Merzenich MM, Jenkins WM (1996) A primate genesis model of focal dystonia and repetitive strain injury: I. Learning-induced dedifferentiation of the representation of the hand in the primary somatosensory cortex in adult monkeys. *Neurology* 47: 508–520
14. National Academy of Sciences (1998) *Work-related musculoskeletal disorders: A review of the evidence*. National Academy Press, Washington DC
15. Arksey H (1998) RSI and the experts – the construction of medical knowledge. UCL Press, London
16. Zilske F (1999) Repetitive strain injury (RSI) bei Bildschirmarbeitskräften. Kovac, Hamburg
17. Sorgatz H (1999) RSI durch Tastatur und Maus. *Thema Forschung TUD* 2:126–132
18. Woolf CJ, Salter MW (2000) Neuronal plasticity: increasing the gain in pain. *Science* 288: 1765–1769
19. Tölle TR (1997) Chronischer Schmerz. In: Herdegen T, Tölle TR, Bähr M (Hrsg) *Klinische Neurobiologie*. Spektrum, Heidelberg, S 307–336
20. Pascual-Leone A (2001) The brain that plays music and is changed by it. *Ann NY Acad Sci* 930: 315–329
21. Schnitzler A, Ploner M (2000) Neurophysiology and functional neuroanatomy of pain perception. *J Clin Neurophysiol* 17: 592–603
22. Loeser JD, Melzack R (1999) Pain: an overview. *Lancet* 353: 1607–1609
23. Schott GD (2001) Delayed onset and resolution of pain: some observations and implications. *Brain* 124: 1067–1076
24. Bushnell MC, Duncan GH, Dubner R, He LF (1984) Activity of trigeminothalamic neurons in medullary dorsal horn of awake monkeys trained in a thermal discrimination task. *J Neurophysiol* 52: 170–187
25. Byl NN, Melnick M (1997) The neural consequences of repetition: clinical implications of a learning hypothesis. *J Hand Ther* 10: 160–174
26. Wilson FR (1998) *Die Hand – Geniestreich der Evolution*. Cotta, Stuttgart
27. Gentner DR (1983) The acquisition of type-writing skill. *Acta Psychol* 54: 233–248
28. Wall PD (1994) Introduction to the edition after this one. In: Wall PD, Melzack R (eds) *Textbook of pain*. Livingstone, Edinburgh
29. Browne CD, Nolan BM, Faithfull DK (1984) Occupational repetition strain injuries. *Med J Aust* 140: 329–332
30. Mumenthaler M, Schliack H, Stöhr M (1998) *Läsionen peripherer Nerven und radikuläre Symptome*. Thieme, Stuttgart
31. Karjalainen K, Malmivaara A, van Tulder M, Roine R, Jauhiainen M, Hurri H, Koes B (2000) Biopsychosocial rehabilitation for upper limb repetitive strain injuries in working age adults. *Cochrane Database Syst Rev* 3: CD002269
32. Pascarelli E, Quilter D (1994) Repetitive strain injury. Wiley & Sons, New York
33. Byl NN, McKenzie A (2000) Treatment effectiveness for patients with a history of repetitive hand use and focal hand dystonia: a planned, prospective follow-up study. *J Hand Ther* 13: 289–301
34. Sorgatz H (1994) RSI-Prävention an Bildschirmarbeitsplätzen. In: Sorgatz H, Weißenstein C, Engel M (Hrsg) *Prävention von Bewegungsschmerzen bei der Bildschirmarbeit*. Tagungsbericht Technische Hochschule Darmstadt, S 137–160, ISBN-3-89277-176-6
35. Ferguson D (1971) Repetition injuries in process workers. *Med J Aust* 2: 408–412