
Sportliche Leistungsfähigkeit und zeitabhängige Frequenzanalysen von Oberflächen-Elektromyogrammen¹

Kerstin Witte, Jürgen Edelmann-Nusser & Mario Heller

Universität Magdeburg
Institut für Sportwissenschaft

1 Problem

Qualitative und quantitative Analysen der sportlichen Leistungsfähigkeit zählen in der Sportwissenschaft zu den wichtigsten und auch komplexesten Aufgaben. Ein verbreitetes Verfahren zur Untersuchung inter- und intramuskulärer Koordination ist die Oberflächen-Elektromyografie, bei der mittels Quantifizierung des gemessenen elektrophysiologischen Signals Aussagen über neuromuskuläre Ansteuerungsprozesse im Zusammenhang mit sportlicher Leistungsfähigkeit abgeschätzt werden (vgl. Gollhofer et al., 1996; De Luca, 1997). Herkömmliche Verfahren zur Frequenzanalyse oberflächen-elektromyografischer Signale sind aus methodischer Sicht nur eingeschränkt auf sportwissenschaftliche Fragestellungen anwendbar, da biologische Signale die Voraussetzung der Stationarität nicht erfüllen. Dagegen stellt die zeitvariante Spektralanalyse ein dynamisches Verfahren für die Auswertung nichtstationärer biologischer Signale dar (Schack et al., 1995a,b). Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, das Verfahren der Zeitvarianten Spektralanalyse auf verschiedene Problemstellungen zu Wirkungen des Trainingsprozesses im Techniktraining und im Krafttraining sowie auf Fragen der Ermüdung anzuwenden.

Hierzu wurden die folgenden drei Untersuchungskomplexe bearbeitet:

- Komplex 1: Einfluss des Trainingsprozesses im Techniktraining von Willkürbewegungen auf das zeitliche Frequenzverhalten der EMG-Signale bewegungsrelevanter Muskeln am Beispiel des Bogenschießens.
- Komplex 2: Auswirkungen von Training auf das zeitliche EMG-Spektrum relevanter Muskeln bei maximaler isometrischer Belastung.
- Komplex 3: Einfluss der Ermüdung bei isokinetischer schwimmspezifischer Belastung auf das zeitliche EMG-Spektrum ausgewählter Muskeln.

¹ VF 0407/05/10/2002-2003

2 Methode

Die oberflächen-elektromyografischen Signale der jeweils untersuchten Muskeln wurden bipolar mittels einer mobilen EMG-Anlage (Firma Biovision, Filterung: RC-Glied, Bandpass 10-500 Hz, 3 dB) mit einer Abtastfrequenz von 1000 Hz aufgezeichnet.

Komplex 1: Bogenschießen

In einem zweijährigen Längsschnitt wurden von zwölf leistungssportlich orientierten Schützen des OSP Berlin (3 B-Kader, 7 C-Kader und 2 D-Kader, die im Verlaufe des Untersuchungszeitraumes in den C-Kader übergangen) dreimal jeweils 36 Schüsse (6 Serien á 6 Schuss) auf 30 m Distanz und zweimal 30 Schüsse (10 Serien á 3 Schuss) auf 18 m Distanz aufgezeichnet. Die Datenaufnahme erfolgte mit Hilfe eines mobilen Messplatzes zum Bogenschießen (Heller et al., 2002). Dieser ist in der Lage, mittels eines modifizierten NOPTTEL®-Systems (Edelmann-Nusser et al., 2002) die Bewegungstrajektorie des Bogens synchron mit dem Oberflächen-Elektromyogramm des *m. trapezius pars transversa* zu erfassen. Untersucht wurde das zeitliche Frequenzverhalten des EMG-Signals im Zeitraum zwischen Klicker und Schuss sowie vor dem Klicker während des Zielvorganges.

Komplex 2: Explosivkraft

An der Untersuchung nahmen 19 Sportstudentinnen und Sportstudenten (6 weibliche und 13 männliche) teil. Vorausgesetzt wurde, dass keiner der Probanden im vorherigen Halbjahr neben der praktischen Sportausbildung Sportarten mit relevanten Maximal- oder Explosivkraftbelastungen trainierte. Das Trainingsprogramm zum dynamischen Bankdrücken war auf einen Gesamtzeitraum von sechs Wochen angelegt und entsprechend den Trainingszielen in verschiedene Phasen (Hypertrophie, intramuskuläre Koordination und Schnellkraft) unterteilt. Getestet wurde vor dem Training (Prätest), nach der dritten Trainingswoche (Intertest) und nach dem Training (Posttest 1) sowie zwei Wochen nach Beendigung des Trainings (Posttest 2). Testaufgabe war es, schnellstmöglich eine maximale, explosiv-isometrische Kraft zu entwickeln und ein möglichst hohes Kraftniveau über einen Zeitraum von ca. 2 Sekunden aufrecht zu erhalten. Bei diesen Tests wurden der Kraft-Zeit-Verlauf und die EMG-Signale des *m. triceps brachii caput laterale* und des *m. pectoralis major* synchron mit jeweils drei Messwiederholungen bei einminütiger Pause erfasst. Für die weitere statistische Auswertung wurde jeweils der beste Versuch benutzt.

Komplex 3: Schwimmen

Die Untersuchung des Kraftausdauerhaltens von neun leistungssportlich orientierten Schwimmerinnen des SC Magdeburg wurde im Zeitraum von November 2002 bis Juli 2003 einmal monatlich auf der isokinetischen Schwimmbank durchgeführt, wobei auf das Trainingsprogramm kein Einfluss genommen wurde. Die Testaufgabe bestand darin, jeweils eine größtmögliche mechanische Gesamtarbeit zu erbringen. Der Bewegungswiderstand wurde dabei so gewählt, dass eine Beanspruchung näherungsweise entsprechend der Armbewegung im Wasser entstand. Für die Bestimmung des ermüdungsabhängigen Einflusses bei Belastung wurde ein 2-Minuten-Test herangezogen. Untersucht wurden die erbrachte mechanische Leistung und das Aktivierungsverhalten des *m. triceps brachii (caput laterale et longum)* und des *m. latissimus dorsi* als Vertreter vortriebsrelevanter und somit leistungsrelevanter Muskeln abgeleitet.

Datenauswertung

Die Roh-EMG-Signale aus den drei Untersuchungskomplexen wurden mit der Zeitvarianten Spektralanalyse (Adspec-Software, 1997) ausgewertet. Die Methode der Zeitvarianten Spektralanalyse basiert auf der parametrischen Berechnung des Leistungsspektrums aus den Parametern eines kontinuierlich angepassten ARMA-Modells (autoregressive moving average model) und wurde bereits in mehreren Untersuchungen zu verschiedenen sportlichen Bewegungen von Jöllenbeck & Witte (1999), Witte & Blaser (2000), Witte et al. (2001) sowie Heller et al. (2003) eingesetzt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren zur Frequenzanalyse wie Fast-Fourier- bzw. Wavelet-Transformation ist die Zeitvariante Spektralanalyse für die Auswertung instationärer biologischer Signale geeignet. Nähere Einzelheiten zum Verfahren sind in Schack et al. (1995a,b) dargestellt.

3 Ergebnisse

Komplex 1: Bogenschießen

Die Abbildung 1 stellt die Mittelwerte der Medianfrequenzen des *M. trapezius pars transversa* an den einzelnen Untersuchungstagen für jeden Athleten dar.

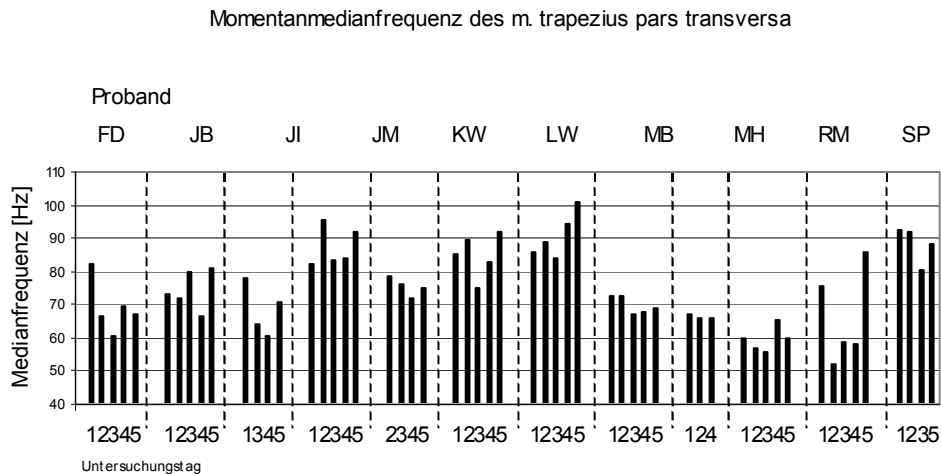


Abb. 1: Mittlere Medianfrequenzen des *M. trapezius pars transversa* aller Schützen an allen Untersuchungstagen.

Ein Teil der untersuchten Athleten lässt eine hohe Variabilität der Medianfrequenzwerte innerhalb des Untersuchungszeitraumes erkennen. Vier Schützen (KW, MH, RM, SP) zeigten ein annähernd konstantes Medianfrequenzverhalten an allen Untersuchungstagen.

Im Vergleich konnten keine Unterschiede der mittleren Medianfrequenzen zwischen den B-Kadern und C-Kadern und keine Zusammenhänge zwischen der Höhe der Trefferquote aller Schützen und den Medianfrequenzen festgestellt werden.

Komplex 2: Explosivkraft

Das dynamische Maximal- und Explosivkrafttraining führte erwartungsgemäß zu Verbesserungen der isometrischen Maximalkraft (3,8 %, $p < 0,005$; t-Test für abhängige Stichproben) und der Explosivkraft (23,9 %, $p < 0,001$; t-Test für abhängige Stichproben).

Die Ergebnisse der Zeit-Frequenzanalyse offenbaren bei nahezu allen Probanden zwei unterschiedliche Strategien. Der Vergleich der besten Versuche vor und nach dem Training ergibt für die Hälfte der Probanden eine Rechtsverschiebung der Anteile der hohen Frequenzbänder in der Phase der explosiven Kraftentwicklung. Ferner konnte bei einem weiteren Drittel der Probanden eine Tendenz zu größerer Strukturiertheit der Signale beobachtet werden (siehe Abbildung 2). Die restlichen Probanden zeigten keine nennenswerten Veränderungen im Zeit-Frequenz-Verhalten.

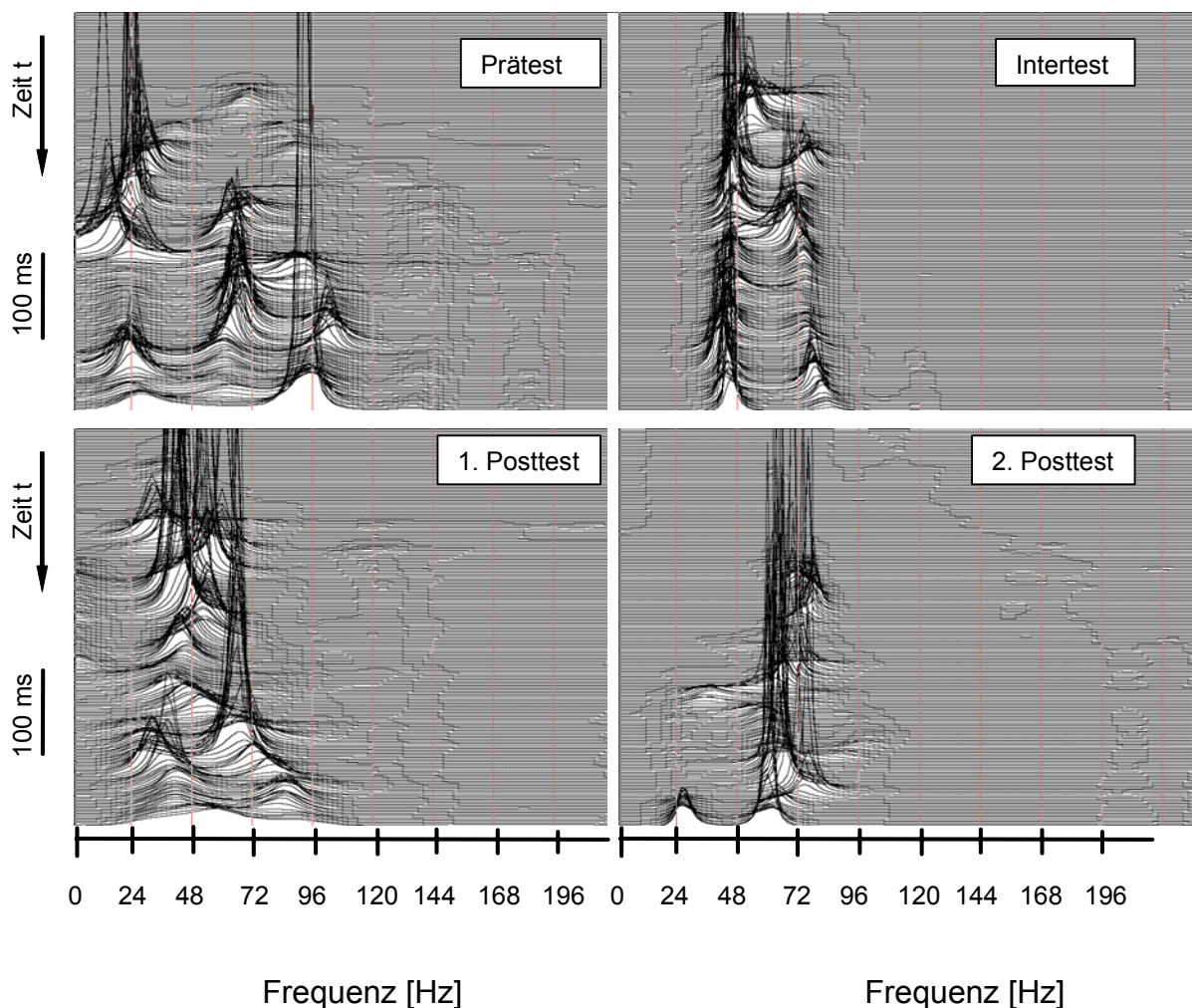


Abb. 2: Darstellung der Zeit-Frequenz-Spektren des EMG-Signals vom *m. pect. major* eines Probanden während der maximal explosiven Phase der Kraftentwicklung im Verlauf der vier Testtermine in diskreten Zeitabständen von 1ms. Deutlich ist eine größere Strukturiertheit zu erkennen.

Die Medianfrequenzen und Bandleistungen zeigten bei allen Probanden ähnliche Verlaufsformen. Bei den Versuchen mit hohen Explosivkraftwerten ließen die Kurven beider Spektralparameter unmittelbar vor dem Kraftanstieg einen steilen Anstieg erkennen und erreichten maximale Werte kurz vor dem höchsten Anstieg der Kraftkurve. Versuche mit geringeren Explosivkraftwerten ließen diese Tendenz nicht erkennen. Im Verlaufe des Trainings konnte dieses Aktivierungsmuster verstärkt beobachtet werden.

Komplex 3 Schwimmen

Es ist zu beobachten, dass die mechanische Leistung bei den meisten Schwimmerinnen zwischen den Untersuchungsterminen kaum variiert. Betrachtet man den Einfluss der Trainingsperiodisierung und der Tagesform, deuten die Ergebnisse auf ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit hin. Die A-Kader-Schwimmerin III zeichnete sich im Vergleich zu

den anderen Athletinnen neben der höchsten mechanischen Leistung durch die geringste Variation des Leistungsabfalls innerhalb der zweiminütigen Belastung über den gesamten Testzeitraum aus. Die Ergebnisse der Zeit-Frequenz-Analysen der elektro-myografischen Signale konnten im Verlauf der zweiminütigen schwimmspezifischen Belastung eine deutliche Reduktion der geschätzten Leistungen in den oberen Frequenzbändern nachweisen, wobei sich die Gesamtbandleistung generell erhöhte. So konnte für alle Schwimmerinnen an allen Untersuchungstagen eine Reduktion der Medianfrequenz festgestellt werden (siehe bspw. Abbildung 3)

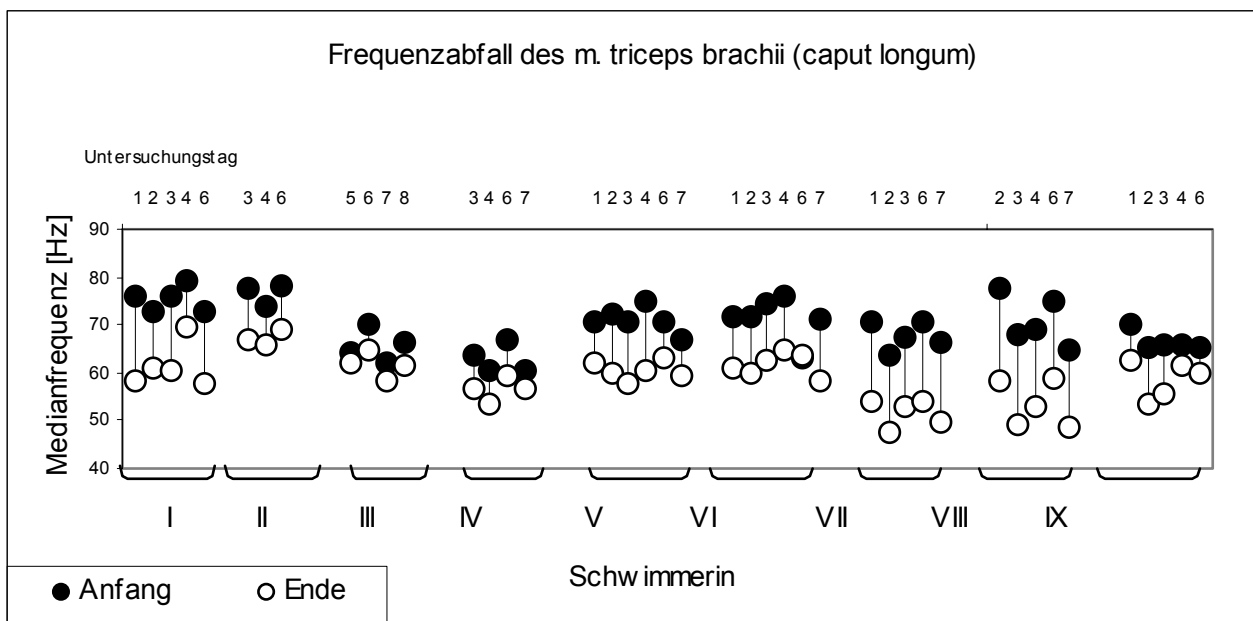


Abb. 3: Gemittelte Medianfrequenz am Anfang und am Ende eines jeden 2-Minuten-Belastungstests für jede Schwimmerin an jedem Untersuchungstag für den m. triceps brachii caput longum.

Mit Ausnahme des Absinkens der Medianfrequenz innerhalb der zwei Minuten gestaltete sich der zeitliche Verlauf der Momentanmedianfrequenz jedoch inter- und intraindividuell sehr unterschiedlich, so dass es nicht möglich war, hier generelle Aussagen zu treffen. Bei der isolierten Betrachtung von Einzelleistungen konnte durch die Aufteilung in vier 30-Sekunden-Intervalle der Zeitpunkt der Reduktion der Medianfrequenz innerhalb der zweiminütigen Belastung bestimmt werden.

Die untersuchten Muskeln zeigten unter isolierter Betrachtung keinen direkten Zusammenhang zwischen dem prozentualen Medianfrequenzabfall und der mittleren mechanischen Leistung. Die Prüfung des mittleren Medianfrequenzabfalls aller Muskeln ergab jedoch, dass in fast 70 % aller Fälle ein individueller Rangplatz (x) der mittleren mechanischen Leistung über zwei Minuten (ML) mit dem Rangplatz ($x \pm 1$) des mittleren Fre-

quenzabfalls übereinstimmt. Bei acht von neun Schwimmerinnen stimmte der Termin mit der besten ML mit dem größten bzw. zweitgrößten mittleren Frequenzabfall überein.

Die Variabilität der Medianfrequenzen aller drei Muskeln war bei nahezu allen Schwimmerinnen über die letzten 20 Armzüge der zweiminütigen Schwimmbelastung deutlich geringer als über die ersten 20 Armzüge. Am Beispiel einer A-Kader Schwimmerin III wird das Verhalten der mechanischen Leistung, das Medianfrequenzverhalten und die Bandleistung über die 30-Sekunden-Teilintervalle der zweiminütigen schwimmspezifischen Belastung für jeden Testtermin dargestellt. Alle drei Parameter zeigten typische Veränderungen im Verlauf der Trainingsperiodisierung. In der Studie wird weiterhin gezeigt, welche Möglichkeiten eine detaillierte Auswertung eines Belastungstests für die Analyse des Trainingszustandes der Athletin bietet.

4 Diskussion

Abschließend ist festzustellen, dass die Verwendung des Verfahrens der Zeitvarianten Spektralanalyse differenzierte Aussagen über das zeitliche Frequenzverhalten von Oberflächen-Elektromyogrammen bei Ausdauerbelastungen, Krafttraining und Techniktraining zulässt. Die vorliegenden Ergebnisse erweitern die Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens zur Quantifizierung der sportlichen Leistungsfähigkeit in der Bewegungs- und Trainingswissenschaft in Form der Analyse der Ermüdungswiderstandsfähigkeit bzw. der inter- und intramuskulären Koordination direkt über neuromuskuläre Aktivitäten. Die Ergebnisse liefern Aussagen zur geschätzten Leistung und zum Ermüdungsverhalten ausgewählter vortriebswirksamer Muskeln im Schwimmen im Verlauf der Belastung und stellen damit aus trainingspraktischer Sicht eine Bereicherung bei der individuellen Trainingssteuerung (Ist-Sollwert-Vergleich) dar.

Als Konsequenzen für die Trainingspraxis können folgende Aussagen zum Einsatz der zeitabhängigen Frequenzanalyse von Oberflächen-Elektromyogrammen gemacht werden:

- Die Momentanmedianfrequenz bewegungsrelevanter oberflächlicher Muskeln scheint in zyklischen Sportarten ein geeignetes Mittel zur individuellen Bestimmung von „kritischen Leistungsgrenzen“ zu sein. Denkbar ist der Einsatz des Frequenzabfalls als Indikator für neuromuskuläre Ermüdung, um die höchstmögliche Leistung in einem definierten Zeitraum aufrecht zu erhalten.
- Die Zeit-Frequenz-Analyse von EMG-Signalen eignet sich vor allem in azyklischen Sportarten mit hohem Schnellkraftanteil zur Identifikation hoher Frequenzanteile und deren Verhalten im Verlauf der Trainingsperiodisierung.
- In unterschiedlichen sportmotorischen Tests kann die Variation der Testaufgabe bezüglich Dauer, Umfang, Intensität und Tempo Aufschluss über das individuelle

Aktivierungs- und Ermüdungsverhalten sowie mögliche Defizite im konditionellen Bereich geben und Hinweise für die Trainingsgestaltung aufzeigen.

- Taktische Mängel bei der Einteilung von Ressourcen können aufgedeckt und quantifiziert werden.
- Längsschnittliche Untersuchungen dokumentieren den Prozess der Trainingsperiodisierung und liefern möglicherweise Aussagen über den konditionellen Trainingszustand, was u. a. Gegenstand weiterer Untersuchungen sein sollte.

5 Literatur

- Adspec-Software (1997) of the Institute of Medical Statistic and Computer Science (director: Prof. Dr. H. Witte) of the University of Jena, Germany.
- De Luca, C.J. (1997). The use of surface electromyography in biomechanics. *J. Appl. Biom.*, 13, 135-163.
- Edelmann-Nusser, J., Gruber, M. & Gollhofer A. (2002). Measurement of on-target-trajectories in Olympic Archery. In S. Ujihashi & S.J. Haake (eds.), *The engineering of Sport 4* (pp. 487-493). Oxford: Blackwell Science.
- Gollhofer, A., Edelmann-Nusser, J., Rapp, W. & Bachmann, V. (1996). Muskel- und neuropsychologische Erkenntnisse zur Qualifizierung des Techniktrainings. *Leistungssport*, 26, 3, 54-55, 57-58.
- Heller, M., Edelmann-Nusser, J., Gruber, M., Witte, K., Gollhofer, A. & Schack, B. (2002). *Mobiler Messplatz Bogenschießen: Bewegungstrajektorien und Elektromyogramme im Bogenschießen*. Vortrag beim 5. Gemeinsamen Symposium der dvs-Sektionen Biomechanik, Sportmotorik und Trainingswissenschaft, 19.-21. September 2002 in Leipzig.
- Heller, M., Edelmann-Nusser, J. & Witte, K. (2003). Time-variant spectral analysis of surface electromyogram in maximal and explosive voluntary isometric contraction. In E. Müller, H. Schwameder, G. Zallinger & V. Fastenbauer (eds), *European College of Sport Science*. Book of Abstracts. Universität Salzburg.
- Jöllnbeck, Th. & Witte, K. (1999). EMG-Analyse zur nichtinvasiven Identifizierung der Innervationsfolge der Skelettmuskulatur. In K. Roth, Th. Pauer & K. Reischle (Hrsg.), *Dimensionen und Visionen des Sports*. Hamburg: Czwalina.
- Schack, B., Bareshova, E., Griebach, G. & Witte, H. (1995a). Methods of Dynamic Spectral Analysis by self-exciting ARMA models and their application to analysing Biosignals. *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, 33, 492-498.
- Schack, B., Griebach, G., Bareshova, E., Anders, Ch., Schumann, N.-P. & Florian, G. (1995b). Parametric methods of dynamic spectral analysis of non-stationary biological signals. *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, 33, 605-610.
- Witte, K. & Blaser, P. (2000). Verification of time-dependent analysis methods for quantification of EMG signals. In J. Hong & D.P. Johns (eds), *Proceedings of XVIII International symposium on biomechanics in sports*. Hong Kong.

Witte, K., Edelmann-Nusser, J. & Schack, B. (2001). Auswertung von EMG-Daten mit Verfahren der Zeitvarianten Spektralanalyse – dargestellt am Beispiel des Bogenschießens. *Spectrum der Sportwissenschaften* 13, 2.

