

Elektromyostimulation im Sport.

Zur Optimierung des sportartspezifischen Krafttrainings am Beispiel Rudern.

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrads
der Philosophie

angenommen an der
Kulturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Bayreuth am 3. November 2010

vorgelegt von Ulrich Fehr

1. Gutachter: Prof. Dr. Andreas Hohmann
2. Gutachter: Prof. Dr. Walter Schmidt

Berichte aus der Sportwissenschaft

Ulrich Fehr

Elektromyostimulation im Sport

Zur Optimierung des sportartspezifischen Krafttrainings
am Beispiel Rudern

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2010

Titelfoto: Helmut Schwenke

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0192-1

ISSN 1430-5224

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Vorwort und Danksagung	9
Abkürzungsverzeichnis	11
Abbildungsverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis	21
1 Einleitung	23
2 Grundlagen zur Elektrostimulation	25
2.1 Geschichtlicher Überblick	25
2.2 Anwendungen der Elektrostimulation außerhalb des Sports	28
2.2.1 Herzschrittmacher, Defibrillatoren	28
2.2.2 Cochleaimplantate	29
2.2.3 Harninkontinenz	30
2.2.4 Schmerzbehandlung	30
2.2.5 Wundheilung	32
2.2.6 FES – Funktionelle Elektrostimulation denervierter Muskulatur	32
2.2.7 Rehabilitation	33
2.2.8 Weitere Anwendungsfelder	35
2.3 Anwendungen der Elektrostimulation im Sport	37
2.4 Elektrotechnische Grundlagen	40
2.4.1 Gleichspannung/-strom	40
2.4.2 Wechspannung/-strom	41
2.4.3 Mischformen	44
2.4.4 Stromformen in der Elektrotherapie und ihre Wirkung	45
2.4.5 Geräte zur Elektrostimulation	48
2.5 Muskelphysiologische Grundlagen	50
2.5.1 Muskelaufbau und -funktion	50
2.5.2 Muskelfasertypen	55
2.5.3 Muskelinnervation	58
2.6 Muskelinnervation durch EMS – Grundlagen und akute Effekte	65
2.6.1 Innervationsreihenfolge	66
2.6.2 Ermüdung	71
2.6.3 Kraftentwicklung	73
2.6.4 Stromtoleranz	84
2.6.5 Einfluss von Elektrodengröße und -positionierung	87
2.6.6 Hormon- und Enzymreaktionen	90
2.7 Muskelinnervation durch EMS – Gefahren und Kritik	92
2.7.1 Muskelschmerzen und Gewebeschädigungen	93
2.7.2 Beeinträchtigung von Herzschrittmachern	94
2.7.3 Grundsätzliche Kritik	95
2.7.4 Kontraindikationen	96

3	Forschungsstand	97
3.1	Muskellinnervation durch EMS – Statische vs. Dynamische Anwendung	97
3.2	Muskellinnervation durch EMS – Trainingseffekte	99
3.2.1	Muskelfaserspektrum	99
3.2.2	Hypertrophie	105
3.2.3	Maximalkraft	109
3.2.4	Schnellkraft	115
3.2.5	Kraftausdauer	122
3.2.6	Weitere Effekte	124
3.3	Zusammenfassung des Forschungsstandes	125
3.4	Problemformulierung und Hypothesen	126
4	Methodik	127
4.1	Untersuchungsdesign	127
4.2	Mess- und Trainingsplatz	128
4.2.1	Kinematik	129
4.2.2	Dynamik	129
4.2.3	Elektromyographie	130
4.2.4	Elektromyostimulation	136
4.3	Versuchsdurchführung	140
4.3.1	Maximaltest	141
4.3.2	500-m-Test	142
4.3.3	Treatmentphase I	142
4.3.4	Treatmentphase II	143
4.4	Probandenstichprobe	143
4.5	Merkmalsstichprobe	145
4.6	Fehlerbetrachtung	147
4.6.1	Zuverlässigkeit der eingesetzten Auswertroutinen	147
4.6.2	Subjektives Belastungsempfinden	149
4.7	Statistische Datenverarbeitung	149
5	Ergebnisse	151
5.1	Datenübersicht, Überprüfung möglicher Störvariablen	151
5.1.1	Absolvierte Trainingseinheiten, Trainingsintensität, weitere sportliche Betätigung	154
5.1.2	Subjektives Belastungsempfinden	155
5.1.3	Zusammenfassung Datenübersicht und Störvariablen	156
5.2	Entwicklung der Zielgröße 500-m-Zeit	157
5.2.1	Berücksichtigung des subjektiven Belastungsempfindens	161
5.2.2	Zusammenfassung zur Entwicklung der 500-m-Zeit	163
5.3	Entwicklung dynamischer und kinematischer Parameter im 500-m-Test	163
5.3.1	Schlagzeit, Verhältnis Durchzug- zu Vorrollzeit	163
5.3.2	Zuglänge	167
5.3.3	Maximale Zugkraft im Durchzug	170

5.3.4	Kraftstoß im Durchzug	174
5.3.5	Mittlere und maximale Leistung im Durchzug	177
5.3.6	Zusammenfassung zu dynamischen und kinematischen Parametern im 500-m-Test	182
5.4	Entwicklung dynamischer und kinematischer Parameter im Maximaltest	183
5.4.1	Schlagzeit, Verhältnis Durchzug- zu Vorrollzeit	183
5.4.2	Zuglänge	184
5.4.3	Kraftmaximum	185
5.4.4	Kraftstoß im Durchzug	186
5.4.5	Leistung im Durchzug	188
5.4.6	Zusammenfassung zur Entwicklung im Maximaltest	189
5.5	Abhängigkeiten der Einflussparameter zur Zielgröße	189
5.6	Einfluss der EMS während des Rudertrainings	192
5.6.1	Stimulationsstromstärke	192
5.6.2	Kinematische und dynamische Parameter	197
5.6.3	Zusammenfassung zum direkten EMS-Einfluss im Training	200
5.7	Elektromyographische Einzelfallbetrachtungen	200
6	Diskussion	207
6.1	Übersicht objektiver Leistungsparameter	207
6.2	Diskussion möglicher Ursachen nicht nachgewiesener EMS-Effekte	209
6.2.1	Stichprobengröße	209
6.2.2	Untersuchungsdesign und Trainingsprogramm	209
6.2.3	EMS-Parameter	210
6.2.4	Überlastung durch EMS	210
6.2.5	Effekte auf Einflussparameter ohne direkte Wirkung auf das Außenkriterium	211
6.2.6	Verzögerte Wirkung der EMS-Anwendung	211
6.3	Subjektives Belastungsempfinden und Responderproblematik	212
7	Zusammenfassung und Ausblick	217
	Literaturverzeichnis	219
	Anhang	247
	Studienüberblick zur akuten EMS-Wirkung	253
	Studienüberblick zur Trainingswirkung von EMS auf die Maximalkraft	256
	Einfache Technikvorgaben	264
	Einverständniserklärung	265
	Einzelwertdarstellung der Veränderungen von Eingangs- zu Ausgangstest – Streuungen	266
	Einzelwertdarstellung der Veränderungen von Eingangs- zu Ausgangstest – Steigungen	270
	Unveröffentlichte Studie zum EMS-Training mit dem BodyTransformer	274
	Stichwortverzeichnis	278

Vorwort und Danksagung

Erste Gedanken zur vorliegenden Arbeit entstanden bereits 2006 bei der Vorstellung des Bayreuther Sportinstituts im Rahmen eines Empfangs der Delegation der Shanghai University of Sports, bei dem auch die Forschungsarbeiten von AkD Wend-Uwe Boeckh-Behrens zur Ganzkörper-Elektrostimulation Gegenstand waren. In darauf folgenden Gesprächen mit Prof. Dr. Andreas Hohmann und Prof. Dr. Walter Schmidt entstand aus dem anfänglichen Interesse an der Elektromyostimulation schließlich die Idee zu einem Forschungsprojekt. Die Realisation der nachfolgend vorgestellten Untersuchung wurde durch die finanzielle Förderung des Bundesinstituts für Sportwissenschaft (Förderkennzeichen IIA1-070513/07-08) ermöglicht. Hier gilt der Dank namentlich Dr. Andrea Horn, die von Seiten des Bundesinstituts stets kompetente Unterstützung bot sowie Prof. Dr. Ulrich Hartmann, der als Leiter des Fachressorts Bildung, Wissenschaft und Forschung beim Deutschen Ruderverband als externer Partner die Studie unterstützte.

Vor weiteren projektspezifischen Ausführungen gilt mein Dank zunächst meinen Eltern, die mich in der prägenden Studienzeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz stets unterstützten. Dort gilt mein Dank neben Prof. Dr. Manfred Letzelter und PD Dr. Werner Steinmann vor allem Dr. Ronald Burger, der nicht müde wurde, mich in die Biomechanik im Allgemeinen und die Geheimnisse ihrer Messverfahren im Speziellen einzuweihen. Dies ermöglichte schließlich erst meinen weiteren Werdegang als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Trainings- und Bewegungswissenschaft von Prof. Andreas Hohmann an der Universität Bayreuth. Ihm gilt schließlich mein größter Dank – sowohl für die kurzfristige und unbürokratische Anstellung am neu besetzten Lehrstuhl in der Wagnerstadt, die tatkräftige Unterstützung bei der Genese des Forschungsprojekts inklusive Antragsstellung, die finanzielle Beteiligung aus Eigenmitteln des Lehrstuhls als auch insgesamt für die Begleitung des Promotionsvorhabens bis zur nun vorliegenden Dissertation.

Dank gebührt auch den an der Studie beteiligten Probanden, die über insgesamt 18 Wochen viel Zeit opferten und einige Strapazen in Training und Leistungstest über sich ergehen lassen mussten. Für deren hervorragende Betreuung danke ich Frau Katrin Neumann, die die anstehenden Aufgaben trotz kaum gegebener Einarbeitungszeit bestens erfüllen konnte. Explizit danken möchte ich den langjährigen studentischen Hilfskräften Susanne Pfrengle, Susanne Kraus und Kerstin Wetscherek, die in der Entstehungszeit der Arbeit bei vielen Gelegenheiten für Entlastung gesorgt haben sowie Martin Neidich für seine Unterstützung in mathematisch-informatischen Auswertungsfragen.

Bezüglich inhaltlicher Interpretations- und statistischer Auswertprobleme waren mir PD Dr. Susanne Tittbach und insbesondere Dr. Mark Pfeiffer stets hilfreiche und kompetente Ansprechpartner, ebenso wie Frau Dr. Chris Horbel für den „fachfremden“, aber nicht minder erhellenden Blick auf das eine oder andere Thema.

Abschließend gilt mein Dank natürlich auch den ehemaligen und aktuellen „guten Seelen“ unseres Lehrstuhlsekretariats Waltraud Zieher, Birgit Ringlein und Andrea Loch für die vielfache Unterstützung in Verwaltungsbelangen und für die Hinweise auf den einen und anderen unvermeidlichen Tipp- und Rechtschreibfehler.

Abkürzungsverzeichnis

a...	Steigung der Regressionsgeraden als Taktik-/Ermüdungsindikator innerhalb des 500-m-Tests
CMJ	Counter Movement Jump – beidbeiniger Vertikalsprung mit Ausholbewegung
DJ	Drop Jump – beidbeiniger, vertikaler, reaktiver Nieder-Hochsprung
EMG	Elektromyographie
EMS	Elektromyostimulation
ex.	exzentrisch
FES	Funktionelle Elektrostimulation
F_{\max}	Kraftmaximum (Peak) im Durchzug
I	Kraftstoß ($F \cdot t$) im Durchzug
iso.	isometrisch
kon.	konzentrisch
MVC	Maximum Voluntary Contraction – maximale Willkürkontraktion
p	„probability“ – Irrtumswahrscheinlichkeit
P	mittlere Leistung m Durchzug
P_{\max}	maximale Leistung im Durchzug
RM	Repetition Maximum – 1RM = Gewicht mit dem max. eine Wiederholung möglich ist
sB	subjektives Belastungsempfinden
SJ	Squad Jump – beidbeiniger Vertikalsprung aus ruhiger Ausgangsstellung
StdRes	Standardabweichung der Residuen um die Regressionsgerade
s_{Zug}	Zuglänge
t_{500}	Zeit im Rudertest über 500 m
t_D / t_V	Verhältnis von Durchzugs- zu Vorrollzeit
t_D	Durchzugzeit
TENS	Transkutane Elektrische Nervenstimulation
t_s	Schlagzeit (Zeit für einen vollständigen Ruderzyklus; = $t_D + t_V$)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Anzahl publizierter Interventionsstudien mit EMS-Treatment nach Publikationsjahr.	24
Abb. 2:	Moderner Herzschrittmacher mit Notfalldienst-Kommunikation (Biotronik GmbH & Ko.KG).	29
Abb. 3:	Muskelaktivität nach Operation am vorderen Kreuzband – Gruppe II und III mit zusätzlicher EMS-Applikation (mod. nach Buhmann et al., 1998, S. 14).	34
Abb. 4:	Struktur der EMS-Anwendung im Sport.	37
Abb. 5:	Strom-Zeit-Diagramm für konstanten Gleichstrom (1) und Gleichstrom mit Wechselstromanteil (2).	40
Abb. 6:	Strom-Zeit-Diagramm für verschiedene (symmetrische) Wechselstromformen: Sinus (1), Rechteck (2) und Dreieck (3).	41
Abb. 7:	Kenngrößen von Wechselspannungen (Legende siehe Tab. 1).	42
Abb. 8:	Strom-Zeit-Diagramm von Rechteckströmen identischer Periodendauer, jedoch mit unterschiedlichen positiven und negativen Anteilen.	43
Abb. 9:	Strom-Zeit-Diagramm eines unterbrochenen, gepulsten Gleich- bzw. Impulsstroms.	43
Abb. 10:	Ersatzschaltbild des menschlichen Körpers bei der Elektromyostimulation (Krauth & Timmermann GmbH, 2007).	44
Abb. 11:	Wechselspannung mit Gleichspannungsanteil (1), Interferenzmuster zweier Wechselspannungen (2) und gepulste Wechselstromträgerwelle (3).	45
Abb. 12:	Niederfrequente (< 1.000 Hz) Ströme in der Elektrotherapie (Wenk, 2007, S. 608).	46
Abb. 13:	Diadynamische Ströme nach Bernard: diphas fixe 100 Hz (DF), monophas fixe 50 Hz (MF) sowie CP (module en courtes periodes) und LP (module en longs periodes) (mod. nach Bossert, Jenrich & Vogedes, 2006, S. 32). Nicht abgebildet: „rythme syncope“, RS – 1 s MF im Wechsel mit 1 s Pause.	46
Abb. 14:	Potentialfreies Stimulationsgerät „Multostat“ der Fa. SANITAS, Berlin (Electricitätsgesellschaft "SANITAS", 1908, S. 37).	48
Abb. 15:	Consumer-Stimulationsgerät Compex sport elite links (Compex USA, 2009) und Reizstromgerät mit PC-Anbindung zur professionellen Anwendung in der Physiotherapie rechts (Physiomed Elektromedizin AG, 2007).	49
Abb. 16:	Gerät zur Ganzkörperstimulation mit Detailansicht einer Stimulationsweste mit integrierten Elektroden. (miha bodytec GmbH).	49
Abb. 17:	Der hierarchische Aufbau des Skelettmuskels (mod. nach Rüdél & Brinkmeier, 2006, S. 66).	50
Abb. 18:	Elektronenmikroskopische Längsschnittaufnahme eines Skelettmuskels. (Rüdél & Brinkmeier, 2006, S. 69).	51
Abb. 19:	Schematischer Aufbau zweier Sarkomere. (mod. nach Linke & Pfitzer, 2007, S. 113).	52
Abb. 20:	Feinstruktur von Myosinfilament (A) und Myosinmolekül (B und C). (Linke & Pfitzer, 2007, S. 114).	53
Abb. 21:	Schematische Darstellung des ATP-getriebenen Querbrückenzyklus (Linke & Pfitzer, 2007, S. 116).	54
Abb. 22:	Transversale und longitudinale Tuboli im Skelettmuskel (Klinke et al., 2005, S. 108).	54
Abb. 23:	Freisetzung von Ca ²⁺ im Skelettmuskel durch Depolarisation (Lang & Lang, 2007, S. 318).	55

Abbildungsverzeichnis

Abb. 24:	Schematische Darstellung von ST-Faser (links) mit hoher Anzahl rot erscheinenden Myoglobins und rechts FT-Faser.	56
Abb. 25:	Fasern der Pyramidenbahn (Gertz et al., 2003, S. 43).	59
Abb. 26:	Phasen des Aktionspotentials und zeitliche Beziehung zur Muskelkontraktion (de Marées & Heck, 2003, S. 55).	59
Abb. 27:	Summation von einzeln Aktionspotentialen (de Marées & Heck, 2003, S. 61).	60
Abb. 28:	Symboldarstellung der Rekrutierung von langsamen hin zu schnellen Muskelfasern in Abhängigkeit des Kraftniveaus bei langsamen Bewegungen (links, nach Ehlenz, Grosser & Zimmermann, 1995, S. 39) und rechts geschätzter Anteil der verschiedenen Fasertypen einer explosiv-isometrischen Kontraktion der ischiocruralen Muskeln (Wiemann, Tidow & Klee, 1993).	62
Abb. 29:	Symboldarstellung einer It-Kurve für Rechteck- und Dreieckimpulse (links) sowie rechts Unterschiede der It-Kurve eines intakten (B) sowie eines denervierten Muskels (A). Der mit Hilfe der Exponentialkurve (C) entstehende graue Bereich kennzeichnet Impulsbreite und Stromstärke zur selektiven Reizung der gelähmten Muskulatur (Niethard, Pfeil & Biberthaler, 2009, S. 60).	65
Abb. 30:	Schematische Darstellung von erregbarem Gewebe bei EMS (Robinson, 2007, S. 99).	67
Abb. 31:	Innervierte Muskelbereiche (dunkel dargestellt) am M. quadriceps femoris eines Probanden bei verschiedenen EMS-induzierten Kräften relativ zum MVC (Adams et al., 1993, S. 536).	67
Abb. 32:	Muskelbioptisch erhobene Parameter vor (□) und nach (■) EMS-Training (Cabric et al., 1988, S. 4).	68
Abb. 33:	Zusammenhang von EMS-induziertem Drehmoment im Kniegelenk und aktivierter Muskelfläche (Adams et al., 1993, S. 535).	70
Abb. 34:	Drehmomentabfall während 30-minütiger, EMS-induzierter Kniestreckung bei unterschiedlichen Stimulationsfrequenzen und Stimulations-Pausenverhältnissen – 5:5 s bzw. 5:2 s (Lieber & Kelly, 1993, S. 137).	72
Abb. 35:	Drehmoment im Kniegelenk bei unterschiedlichen Kontraktionsformen und –geschwindigkeiten. ● MVC + EMS, ○ EMS, ▲ MVC (Westing et al., 1990, S. 19).	75
Abb. 36:	Abhängigkeit des Drehmoments von Kniewinkel, Kontraktionsform (exzentrisch oben – a bis c und konzentrisch unten – d bis f) bei einer Winkelgeschwindigkeit von 60°/s eines ausgewählten Probanden. c und d MVC, b und f EMS sowie a und e MVC + EMS (Westing et al., 1990, S. 19).	75
Abb. 37:	Drehmoment im Kniegelenk bei unterschiedlicher Innervation (nach Daten von Kramer, 1987).	77
Abb. 38:	Drehmoment im Kniegelenk bei unterschiedlichen Kontraktionsbedingungen (nach Daten von Locicero, 1991, S. 146).	78
Abb. 39:	A: isometrische Kraftwerte mit (rot) und ohne EMS bei verschiedenen Ellbogenwinkeln (mod. nach Strass & Strojnik, 1991, S. 575). B: Kraft-Zeit-Verläufe bei 26,6 kg (oben) und 36,6kg Last – rot mit EMS (ebd., S. 576).	79
Abb. 40:	A: Drehmoment im Kniegelenk mit Willkürkontraktion (TMVC; schraffiert) und zusätzlicher Elektrostimulation (TES) (Strojnik, 1994, S. 85). B: Drehmoment-Zeit-Diagramm mit 0,8 s dauernder Elektrostimulation (senkrechte Linien) nach Erreichen eines Drehmomentplateaus mit Willkürkontraktion (ebd., S. 84).	80

Abb. 41:	A: Drehmoment im Kniegelenk bei einem ausgewählten Probanden – die vertikale Linie kennzeichnet den Beginn der zusätzlich zur Willkürkontraktion applizierten Elektrostimulation. A: Einzelimpuls, B – E: 50, 100, 150 und 200 ms Stimulationsdauer und B: Mittelwert und Standardabweichung des Drehmoments bei Willkürkontraktion (weiß) und mit zusätzlicher Elektrostimulation (Strojnik, 1995, S. 146).	81
Abb. 42:	A: Isometrisches Drehmoment mit (MVC+ES, oben) und ohne zusätzliche EMS bei verschiedenen Kniegelenkwinkeln (** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$) und B: Prozentuales Drehmoment bei Willkürkontraktion in Relation zu dem bei zusätzlicher Elektrostimulation (Ulaga & Strojnik, 1996, S. 78).	82
Abb. 43:	Mittelwerte und Standardabweichungen bei weiblichen (□) und männlichen Probanden (■) zu Beginn (B1) und Ende (B10) der Stimulationseinheiten eins und sechs (S1 und S6) (Alon & Smith, 2005, S. 399).	86
Abb. 44:	Entwicklung der Stromtoleranz innerhalb und zwischen den einzelnen Einheiten. ● Männer, ○ Frauen, E: Einheit, V = Versuch (mod. nach Alon & Smith, 2005, S. 400).	86
Abb. 45:	Magnetresonanzbilder von 7 Probanden (B–H) bei EMS – die dunklen Bereiche zeigen innervierte Muskelgebiete an (Adams et al., 1993, S. 534).	87
Abb. 46:	Kraftentfaltung bei Plantarflexion (Prozent der Maximalkraft) in Abhängigkeit von der Elektrodenfläche am M. gastrocnemius (mod. nach Alon et al., 1994, S. 34).	88
Abb. 47:	Änderung der nötigen Stromstärke zum Erreichen von 10% MVC bei verschiedenen Elektrodenplatzierungen relativ zum motorischen Punkt (nach Daten von Forrester & Petrofsky, 2004, S. 352–353).	89
Abb. 48:	HGH-Konzentration vor (Pre1 und Pre2), während (Mid) und nach Belastung für EMS- und Willkürgruppe (Jubeau et al., 2008, S. 78).	91
Abb. 49:	A: CK-Konzentration vor (Pre) und nach Belastung für EMS- und Willkürgruppe (Jubeau et al., 2008, S. 78). B: Ck-Konzentration bei 15 Probanden 24 h nach EMS- (688 ± 315 U/l) und herkömmlichem Krafttraining (411 ± 245 U/l) sowie in Ruhe (220 ± 96 U/l). (nach Daten von Boeckh-Behrens & Bengel, 2005 – siehe auch Anhang, S.275).	92
Abb. 50:	Strukturelle Veränderungen durch chronische niederfrequente EMS (unten) nach ca. 3 Stunden (A) und 2-12 Tagen (B & C) – Erläuterungen siehe Text (Lieber, 1988a).	100
Abb. 51:	Strukturelle Veränderungen durch chronische niederfrequente EMS nach 14 Tagen – Erläuterungen siehe Text (Lieber, 1988a).	100
Abb. 52:	Strukturelle Veränderungen durch chronische niederfrequente EMS (unten) im Vergleich zu normalem Muskelgewebe nach 28 Tagen – Erläuterungen siehe Text (Lieber, 1988a).	101
Abb. 53:	Abnahme der Syntheserate von Parvalbumin am Hinterlauf von Ratten während 14-tägiger Dauerstimulation (A) sowie B, dessen Wiederherstellung nach Absetzen der Stimulation in nur vier Tagen sogar über das Niveau der Kontrollgruppe hinaus (Huber & Pette, 1996, S. 817).	101
Abb. 54:	Faserverteilung, -querschnitt und -kapillarisierung vor und nach sechswöchiger niederfrequenter Stimulation des M. quadriceps femoris (nach Daten von Thériault et al., 1996, S. 314).	102
Abb. 55:	Zeitliche Abhängigkeit des Fasertypanteils nach Läsion (Burnham, Martin, Stein, Bell, MacLean & Steadward, 1997, S. 89).	103
Abb. 56:	A: Fasertypenverteilung und B: Anzahl der Kapillaren pro Faser am M. vastus lateralis von zehn Probanden (Pérez et al., 2002, S. 870–871).	104

Abbildungsverzeichnis

Abb. 57:	Querschnittsfläche von FT- und FT-Fasern am M. vastus lateralis vor (□) und nach (■) einwöchigem EMS-Training (nach Daten von St. Pierre et al., 1986).	106
Abb. 58:	Veränderungen der Oberschenkel-Querschnittsfläche in verschiedenen Gruppen. EG: EMS, EPG: EMS & Plyometrie, PG: Plyometrie, GC: Kontrollgruppe (Herrero et al., 2006, S. 537).	108
Abb. 59:	Auf das Ausgangsniveau relativierte isometrische Kraftmaximum (■) der (a) Plantarflexoren und (b) Dorsalflexoren (Andrianowa et al., 1974, S. 142).	110
Abb. 60:	Mittelwerte und Standardabweichungen der Maximalkraft (triceps surare) bei (A) 50 Hz, (B) 2.000 Hz und (C) Kontrollgruppe ohne Stimulation (Cabric & Appell, 1987, S. 257).	110
Abb. 61:	Entwicklung der auf das Körpergewicht relativierten Kraft (links) und prozentuale Veränderung zwischen den Testterminen (rechts). CON: Kontrollgruppe, STIM: EMS-Gruppe, WGT: Gewichtstraining, WGT+STIM: Gewichtstraining kombiniert mit EMS (Willoughby & Simpson, 1998, S. 134).	111
Abb. 62:	Isometrische Maximalkraft der Beinstrecker im Testverlauf (Maffioletti et al., 2009, S. 680).	112
Abb. 63:	Anzahl empirischer Befunde zur Effektivität der EMS im Vergleich zu herkömmlichem Maximalkrafttraining.	113
Abb. 64:	Entwicklung der auf das Körpergewicht relativierten Kraft des M. biceps brachii. CON: Kontrollgruppe, STIM: EMS-Gruppe, WGT: Gewichtstraining, WGT + STIM: Gewichtstraining kombiniert mit EMS (Willoughby & Simpson, 1996, S. 42).	114
Abb. 65:	Sprintzeit und Sprunghöhe im Verlauf eines sechswöchigen Trainingsprogramm ohne (E) und mit EMS (ES) (Wolf et al., 1986, S. 22).	116
Abb. 66:	Sprungkraftentwicklung durch vierwöchiges Training, Bestimmung über Flugzeitverfahren, ohne Armeinsatz (Herrero et al., 2006, S. 536).	119
Abb. 67:	Reaktivindex (RI, Sprunghöhe/Kontaktzeit), Sprunghöhe (JH) und Bodenkontaktzeit (GCT) beim Drop Jump in Eingangstest (PRE), Ausgangstest nach 4 Wochen (POST) und TRANSFER, Retentionstest nach 6 Wochen (mod. nach Reiser et al., 2005).	119
Abb. 68:	Sprungkraftentwicklung nach 5 Wochen Training in zwei Treatment- und einer Kontrollgruppe (nach Daten von Alberti & Ragazzi, 2005).	120
Abb. 69:	Entwicklung der Bodenkontaktzeiten im Drop Jump nach EMS-gestütztem Sprungtraining (Bauersfeld & Voss, 1992, S. 53).	124
Abb. 70:	Grafische Darstellung des Versuchsablaufs.	127
Abb. 71:	Ruderergometer Modell E der Firma Concept2 Deutschland GmbH.	128
Abb. 72:	Seilzugsensor (links) und Kraftaufnehmer (rechts) am Concept2-Ruderergometer mit teilweise entfernter Abdeckung.	129
Abb. 73:	Übersicht der elektromyographisch untersuchten Muskeln (mod. nach Konrad, 2005, S. 19–20).	130
Abb. 74:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. latissimus dorsi (Freiwald, Baumgart & Konrad, 2007, S. 70).	131
Abb. 75:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. gastrocnemius.	131
Abb. 76:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. soleus.	132
Abb. 77:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. vastus medialis.	132

Abb. 78:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. vastus lateralis.	133
Abb. 79:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. rectus femoris.	133
Abb. 80:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. erector spinae.	134
Abb. 81:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. trapezius transversalis.	134
Abb. 82:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. deltoideus posterior.	135
Abb. 83:	Positionierung der EMG-Elektroden für die Ableitung des M. biceps brachii.	135
Abb. 84:	Stimulationsgerät MotionStim 8 (links) und graphische Programmierung des Stimulationsablaufs.	136
Abb. 85:	Platzierung der EMS-Elektroden.	137
Abb. 86:	Stimulationsprogramm der beiden EMS-Gruppen im Treatment I.	138
Abb. 87:	Stimulationsprogramm der beiden EMS-Gruppen im Treatment II.	138
Abb. 88:	Stimulationsprogramm der EMS-Gruppe in Treatmentphase I bei 20er Schlagfrequenz.	139
Abb. 89:	Symbolisierter Ablauf einer Testeinheit.	140
Abb. 90:	Proband vor dem 500-m-Eingangstest auf dem Concept2-Ruderergometer.	141
Abb. 91:	Grafische Darstellung der im Maximal- und 500-m-Test gleichermaßen erhobener Parameter (Erläuterungen siehe Tab. 9).	145
Abb. 92:	Regressionsgerade am Beispiel der mittleren Leistung pro Schlag von zwei Probanden bei zwei Messzeitpunkten.	146
Abb. 93:	Atypischer Verlauf der mittleren Leistung pro Schlag von FR bei Test 1 (rot) im Vergleich zu den weiteren Testzeitpunkten desselben Probanden.	152
Abb. 94:	Subjektives Belastungsempfinden der Trainingseinheiten in den einzelnen Phasen.	155
Abb. 95:	Grafische Darstellung der 500-m-Zeiten nach Tab. 18 mit Standardabweichung für Kontroll- und EMS-Gruppe.	158
Abb. 96:	Entwicklung der 500-m-Zeit von Eingangs- zu Ausgangstest für die einzelnen Probanden.	159
Abb. 97:	Streudiagramm: Subjektives Belastungsempfinden zu prozentualer Zeitverbesserung von Eingangs- zu Ausgangstest.	161
Abb. 98:	Verteilung der rangtransformierten Werte des subjektiven Belastungsempfindens in den dichotomisierten Gruppen der Zeitdifferenz von Eingangs- zu Ausgangstest.	162
Abb. 99:	Verlauf der Schlagzeit während des 500-m-Eingangs- (links) und Ausgangstests (rechts).	164
Abb. 100:	Verlauf des Verhältnisses von Durchzug- zu Vorrollzeit während des 500-m-Eingangs- (links) und Ausgangstests (rechts).	165
Abb. 101:	Einzelwerte der prozentualen Differenz von Schlagzeit und Verhältnis von Durchzugs- zu Vorrollzeit zwischen Eingangs- und Ausgangstest für Kontroll- (■) und EMS-Gruppe (■).	166
Abb. 102:	Entwicklung von Schlagzeit und Verhältnis von Durchzug zu Vorrollen von Eingangs- zu Ausgangstest.	167
Abb. 103:	Verlauf der Zuglänge pro Schlag während des 500-m-Eingangs- (links) und Ausgangstests (rechts).	168

Abbildungsverzeichnis

Abb. 104:	Einzelwerte der prozentualen Differenz der Zuglänge zwischen Eingangs- und Ausgangstest für Kontroll- (■) und EMS-Gruppe (■).	169
Abb. 105:	Entwicklung der Zuglänge von Eingangs- zu Ausgangstest (links) und der trendbereinigten Standardabweichung (rechts).	169
Abb. 106:	F_{max} -Verlauf während des 500-m-Eingangs- (links) und Ausgangstests (rechts).	170
Abb. 107:	Einzelwerte der prozentualen Differenz der maximalen Kraft im Durchzug zwischen Eingangs- und Ausgangstest für Kontroll- (■) und EMS-Gruppe (■).	172
Abb. 108:	Entwicklung der maximalen Kraft im Durchzug von Eingangs- zu Ausgangstest.	173
Abb. 109:	Entwicklung der trendbereinigten Standardabweichung von F_{max} über die Messzeitpunkte.	173
Abb. 110:	Verlauf des Kraftstoßes pro Schlag während des Eingangs- (links) und Ausgangstests (rechts) über 500 m.	174
Abb. 111:	Entwicklung des mittleren Kraftstoßes pro Schlag über die 5 Messzeitpunkte (links) und isoliert für Eingangs- und Ausgangstest (rechts).	176
Abb. 112:	Einzelwerte der prozentualen Differenz des Kraftstoßes im Durchzug zwischen Eingangs- und Ausgangstest für Kontroll- (■) und EMS-Gruppe (■).	176
Abb. 113:	Trendbereinigte Standardabweichung des Kraftstoßes im Durchzug über die Messzeitpunkte.	177
Abb. 114:	Verlauf der mittleren Leistung pro Schlag während des 500-m-Eingangs- (links) und Ausgangstests (rechts).	177
Abb. 115:	Verlauf der maximalen Leistung pro Schlag während des 500-m-Eingangs- (links) und Ausgangstests (rechts).	178
Abb. 116:	Steigung der Regressionsgeraden innerhalb des 500-m-Eingangs- und Ausgangstests für die mittlere (links) und maximale (rechts) Leistung.	178
Abb. 117:	Mittlere (links) und maximale (rechts) Leistung im Durchzug über die Messzeitpunkte.	180
Abb. 118:	Einzelwerte der prozentualen Differenz der maximal im Durchzug realisierten Leistung zwischen Eingangs- und Ausgangstest für Kontroll- (■) und EMS-Gruppe (■).	180
Abb. 119:	Einzelwerte der prozentualen Differenz der mittleren im Durchzug realisierten Leistung zwischen Eingangs- und Ausgangstest für Kontroll- (■) und EMS-Gruppe (■).	181
Abb. 120:	Entwicklung der mittleren und maximalen Leistung von Eingangs- zu Ausgangstest.	181
Abb. 121:	Trendbereinigte Standardabweichung der mittleren (links) und maximalen (rechts) Leistung im Durchzug bei Eingangs- und Ausgangstest.	182
Abb. 122:	Schlagzeit (links) und Verhältnis von Durchzug- zu Vorrollzeit bei Eingangs- und Ausgangstest.	184
Abb. 123:	Zuglänge bei Eingangs- und Ausgangstest.	184
Abb. 124:	Kraftmaximum im Durchzug bei Eingangs- und Ausgangstest.	185
Abb. 125:	Kraftstoß im Durchzug bei Eingangs- und Ausgangstest.	187
Abb. 126:	Mittlere (links) und maximale Leistung im Durchzug bei Eingangs- und Ausgangstest.	189
Abb. 127:	Im Mittel über alle Trainingseinheiten und Muskelgruppen von den Probanden tolerierte Stimulationsstromstärke.	192
Abb. 128:	Entwicklung der Stimulationsstromstärke am M. triceps surae innerhalb der Trainingseinheiten.	193

Abb. 129:	Entwicklung der Stimulationsstromstärke am M. quadriceps femoris innerhalb der Trainingseinheiten.	193
Abb. 130:	Entwicklung der Stimulationsstromstärke am M. biceps brachii innerhalb der Trainingseinheiten.	194
Abb. 131:	Entwicklung der Stimulationsstromstärke am M. triceps surae über die insgesamt 24 Trainingseinheiten.	195
Abb. 132:	Entwicklung der Stimulationsstromstärke am M. quadriceps femoris über die insgesamt 24 Trainingseinheiten.	195
Abb. 133:	Entwicklung der Stimulationsstromstärke am M. biceps brachii über die insgesamt 24 Trainingseinheiten.	196
Abb. 134:	An den drei Muskelgruppen tolerierte mittlere Stimulationsstromstärken in den beiden Treatmentphasen.	197
Abb. 135:	Dynamische und kinematische Parameter unter EMS- und Willkürbedingung in Treatmentphase II.	198
Abb. 136:	Variationskoeffizient kinematischer und dynamischer Parameter unter EMS- und Willkürbedingung in Treatmentphase II.	198
Abb. 137:	Zeitnormalisierte Aktivitätsmuster und Zugkraft von 5 Ruderschlägen im Eingangs- (schwarz) und Ausgangstest (rot) von <i>Proband MF (EMS-Gruppe)</i> . Grau gehalten Durchzugszeit von Schlag 5 nach Kraft-Zeit-Kurve.	201
Abb. 138:	Zeitnormalisierte Aktivitätsmuster und Zugkraft von 5 Ruderschlägen im Eingangs- (schwarz) und Ausgangstest (rot) von <i>Proband MW (Kontrollgruppe)</i> . Grau gehalten Durchzugszeit von Schlag 3 nach Kraft-Zeit-Kurve.	202
Abb. 139:	Innervationsdauer der zehn vermessenen Muskeln in Relation zur Dauer des über den Kraftverlauf bestimmten Durchzugs (Mittelwert und Standardabweichung).	203
Abb. 140:	Innervationsbeginn in Relation zu Beginn (0%) und Dauer des Durchzugs (Mittelwert und Standardabweichung; positive Werte kennzeichnen einen zeitlich nach der Zugkraftentfaltung liegenden Innervationsbeginn).	204
Abb. 141:	Innervationsende in Relation zu Ende (0%) und Dauer des Durchzugs (Mittelwert und Standardabweichung; positive Werte kennzeichnen ein Innervationsende zeitlich nach dem Absinken der Zugkraft auf annähernd 0 N).	204
Abb. 142:	Änderung des Variationskoeffizienten von Eingangs- zu Ausgangstest für die Innervationsdauer.	205
Abb. 143:	Streudiagramm subjektives Belastungsempfinden zu prozentualer Zeitverbesserung von Eingangs- zu Ausgangstest.	213

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Kenngrößen von Wechselspannungen (Daten nach Hering, Bressler & Gutekunst, 2005, S. 36).	42
Tab. 2	Übersicht einiger therapeutisch-medizinisch verwendeter Stromformen (nach Bossert et al., 2006; Steuernagel, 1984a; Wenk, Ach & Wolf, 2004; Wenk, 2007; White et al., 2001).	47
Tab. 3	Einfache Muskelfasertypisierung (mod. nach Tomasits & Haber, 2008, S. 36).	56
Tab. 4	Übersicht über die Fasertypen des Skelettmuskels (nach Steinacker, Wang, Lormes, Reißnecker & Liu, 2002, S. 355).	57
Tab. 5	Eigenschaften motorischer Einheiten (mod. nach Tidow & Wiemann, 1993).	61
Tab. 6	Kennziffern bei isometrischer (45°) und exzentrischer (Streckung aus 90° Beugstellung) Arbeitsweise im Kniegelenk (N = 10; nach Daten von Strojnik, 1998, S. 197).	83
Tab. 7	Sprungkraft und Sprintleistungen vor und nach 6 bzw. 12 Wochen Training in EMS- und Kontrollgruppe. * signifikante Differenz zwischen Woche 0 und 12 sowie Woche 6 und 12 (nach Daten von Babault, 2007, .S. 435).	118
Tab. 8	Probandenstichprobe (M – Mittelwert, SD – Standardabweichung).	144
Tab. 9	Merkmalsstichprobe für Maximal- und 500-m-Test	146
Tab. 10	Reliabilitätskoeffizienten (n = 25) und Mittelwertunterschiede zwischen automatisierter und manueller Auswertung.	147
Tab. 11	Reliabilitätskoeffizienten (n = 15) und Mittelwertunterschiede zwischen halbautomatisierter und manueller Auswertung.	148
Tab. 12	Korrelationen des subjektiven Belastungsempfindens zwischen direkt aufeinanderfolgenden Trainingseinheiten ($p < 0,013$).	149
Tab. 13	Absolvierte Test- und Trainingseinheiten.	151
Tab. 14	Probandenstichprobe beim Vergleich von Eingangs- zu Ausgangstest	153
Tab. 15	Mögliche Störfaktoren bezogen auf die Testparameter im Vergleich zwischen Kontroll- und EMS-Gruppe.	154
Tab. 16	Subjektive Belastungsempfinden als mögliche Störgröße im Hinblick auf die Testparameter im Vergleich zwischen Kontroll- und EMS-Gruppe.	156
Tab. 17	Übersicht 500-m-Zeiten über die fünf Messzeitpunkte getrennt nach Untersuchungsgruppen (Fallausschluss Test für Test).	157
Tab. 18	Deskriptive Statistik der 500-m-Zeiten über die fünf Messzeitpunkte getrennt nach Untersuchungsgruppen (nur vollständige Datensätze).	157
Tab. 19	Differenzierte Betrachtung der Leistungsdifferenzen im 500-m-Test bezüglich der Testzeitpunkte in der Gesamtgruppe (N = 20, signifikante und relevante Differenzen fett* markiert).	159
Tab. 20	Deskriptive Statistik 500-m-Zeiten im Eingangs- und Ausgangstest (Tests 1 und 4).	160
Tab. 21	Deskriptive Statistik der 500-m-Zeiten getrennt nach Treatmentphase I und II.	161
Tab. 22	Mittlere Steigungen der Regressionsgeraden als Verlaufparameter für die Schlagzeit innerhalb eines 500-m-Tests bei allen Messzeitpunkten.	164
Tab. 23	Mittlere Steigungen der Regressionsgeraden als Verlaufparameter für die Schlagzeit innerhalb eines 500-m-Tests bei Eingangs- und Ausgangstest.	165

Tabellenverzeichnis

Tab. 24	Zuglänge über alle fünf Messzeitpunkte.	168
Tab. 25	Steigung der Regressionsgerade als Indikator des Kraftabfalls.	170
Tab. 26	Kraftmaximum über alle fünf Messzeitpunkte.	171
Tab. 27	Kraftmaximum im Durchzug bei Eingangs- und Ausgangstest.	172
Tab. 28	Steigung der Regressionsgerade zum Kraftstoß im Durchzug bei Eingangs- und Ausgangstest.	174
Tab. 29	Kraftstoß im Durchzug über alle fünf Messzeitpunkte.	175
Tab. 30	Deskriptive Daten für mittlere und maximale Leistung über alle fünf Messzeitpunkte.	179
Tab. 31	Verhältnis von Durchzug- zu Vorrollzeit über alle fünf Messzeitpunkte.	183
Tab. 32	Zuglänge über alle fünf Messzeitpunkte.	185
Tab. 33	Kraftmaximum über alle fünf Messzeitpunkte.	186
Tab. 34	Kraftstoß über alle fünf Messzeitpunkte.	187
Tab. 35	Mittlere und maximale Leistung im Durchzug über alle fünf Messzeitpunkte.	188
Tab. 36	Schrittweise Korrelation mit Änderung der 500-m-Zeit als abhängige Variable.	190
Tab. 37	Schrittweise Korrelation mit Änderung der 500-m-Zeit als abhängige Variable.	191
Tab. 38	Deskriptive Daten kinematischer und dynamischer Parameter sowie Irrtumswahrscheinlichkeiten und Effektstärken der Prüfung auf Unterschiede zwischen den Innervationsbedingungen (Varianzanalyse mit Messwiederholung – signifikante Unterschiede sind zusätzlich fett markiert).	199
Tab. 39	Übersicht der untersuchten Parameter im Eingangs- und Ausgangstest über 500 m sowie im Maximaltest über 5 Ruderschläge.	208
Tab. 40	Korrelationen zwischen der Differenz verschiedener Merkmale unter EMS- und Willkürbedingungen im Training sowie dem subjektivem Belastungsempfinden.	214
Tab. 41	Korrelationen zwischen der Differenz der zusammengefassten kinematischen und dynamischen Merkmale unter EMS- und Willkürbedingungen im Training sowie dem subjektivem Belastungsempfinden und der Zeitdifferenz im 500-m-Test von Eingangs- zu Ausgangstest (↙↗ kennzeichnet die Gruppe mit niedrigerem bzw. höherem sub. Belastungsempfinden).	215
Tab A1:	Aktivierungsgrad durch reine EMS-Innervation in Relation zum MVC (iso: isometrisch, kon: konzentrisch, ex: exzentrisch, o.A. ohne Angabe, n.s. nicht signifikant, signifikante Differenzen MVC zu EMS sind fett markiert).	247
Tab A2:	Auswirkungen zusätzlicher EMS auf die Maximalkraft (iso: isometrisch, kon: konzentrisch, ex: exzentrisch, o.A. ohne Angabe, n.s. nicht signifikant, signifikante Differenzen MVC zu MVC + EMS sind fett markiert).	248
Tab A1:	Interventionsstudien mit dem Ziel der Maximalkraftsteigerung durch EMS-Einsatz (Legende siehe S. 257)	251