

Aus dem Forschungsbereich Sport- und Bewegungsmedizin
Fachbereich Sportwissenschaft
der Universität Hamburg
Direktor: Prof. Dr. med. Klaus-Michael Braumann

Der 15 Sekunden Foot-Tapping Test (FTT15):
Evaluation als sportmotorisches Testverfahren
sowie
Analyse der Beeinflussbarkeit
leistungsphysiologischer Parameter durch eine
spezifische Vorbelastung

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des doctor medicinae
der medizinischen Fakultät
der Universität Hamburg

vorgelegt von
Thomas Timothy Krauss
aus Düsseldorf
Hamburg 2010

Angenommen von der Medizinischen Fakultät am: 02.08.2011

Veröffentlicht mit Genehmigung der medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende: Prof. Dr. K.-M. Braumann

Prüfungsausschuss, 2. Gutachter/in: PD Dr. E. Scharein

Prüfungsausschuss, 3. Gutachter/in: Prof. Dr. J. M. Rueger

I INHALTSVERZEICHNIS

I INHALTSVERZEICHNIS III

II ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS..... VII

1 EINLEITUNG 1

1.1 HISTORIE UND PROBLEMSTELLUNG 1

1.2 DER FTT15 ALS SPORTMOTORISCHES TESTVERFAHREN..... 2

1.2.1 TAPPING – CHARAKTERISTIK UND GRUNDLAGEN 2

1.2.2 FOOT-TAPPING - BEWEGUNGSABLAUF, PHYSIOLOGIE UND SPORTWISSENSCHAFTLICHE
EINORDNUNG 6

1.2.3 DER 15 SEKUNDEN FOOT-TAPPING TEST (FTT15) – ANFORDERUNGEN AN EIN
GEEIGNETES TESTVERFAHREN 13

1.3 DER EINBEINSTAND-TEST ALS SPORTMOTORISCHES TESTVERFAHREN 17

**1.4 ETABLIERTE TESTVERFAHREN MIT ANGRENZENDEN UNTERSUCHUNGS-
SCHWERPUNKTEN 18**

1.5 AUFWÄRMEN IM SPORT 21

1.6 ERMÜDUNG IM SPORT 25

1.7 FRAGESTELLUNG 30

2 MATERIAL UND METHODEN 31

2.1 MESSVERFAHREN 31

2.1.1 SPIROMETRIE 31

2.1.2 HERZFREQUENZMESSUNG 31

2.1.3 LAKTATKONZENTRATION IM KAPILLARBLUT 32

2.1.4 RPE-SCORE („BORG SKALA⁶⁾) 32

2.1.5 KRAFTMESSPLATTE 33

2.1.6 DATENERHEBUNGSSOFTWARE SIMI MOTION 33

2.1.7 LAUFBANDERGOMETER 33

2.1.8 KÖRPERGEWICHT 34

2.1.9 KÖRPERFETTANTEIL 34

2.2 STUDIENDESIGN 35

2.2.1 VORBELASTUNGSFORMEN 35

2.2.1.1 Aerobe Vorbelastungsform 35

2.2.1.2 Anaerobe Vorbelastungsform	35
2.2.2 FOOT-TAPPING TEST (FTT15)	35
2.2.3 EINBEINSTAND-TEST	36
2.2.4 DURCHFÜHRUNG.....	37
2.2.4.1 Gruppe A (abwechselnde Testinhalte)	37
2.2.4.2 Gruppe B (bleibende Testinhalte).....	39
2.3 PROBANDEN.....	39
2.4 DATENAUSWERTUNG.....	40
2.4.1 POLAR	40
2.4.2 METAMAX.....	41
2.4.3 SIMI MOTION	41
2.4.3.1 Auswertung Tapping-Test.....	41
2.4.3.2 Auswertung Einbeinstand-Test.....	44
2.5 STATISTISCHE AUSWERTUNG	45
2.6 GRAPHISCHE DARSTELLUNG	45
<u>3 ERGEBNISSE</u>	<u>46</u>
3.1 ERGEBNISPROFIL DES 15 SEKUNDEN FOOT-TAPPING TEST.....	46
3.1.1 KONTAKT-ANZAHL.....	46
3.1.2 FREQUENZ	47
3.1.3 STEIGUNG DER REGRESSIONSGERADEN	48
3.1.4 SEGMENT F_{MAX}	49
3.1.5 SEGMENT F_{MIN}	49
3.1.6 PEAK FREQUENZ	49
3.1.7 FATIGUE INDEX	49
3.1.8 HERZFREQUENZ	49
3.1.8.1 Absolute Werte	49
3.1.8.2 Relative Werte	50
3.1.9 LAKTAT.....	50
3.1.10 TIME TO FORCE PLATE	51
3.1.11 RPE.....	51
3.2 ERGEBNISSE DES EINBEINSTAND-TEST	51
3.3 FTT15 RELIABILITÄTSSTUDIE	52
3.3.1 KONTAKT-ANZAHL.....	52
3.3.2 FREQUENZ	53
3.3.3 STEIGUNG DER REGRESSIONSGERADEN	53
3.3.4 RETEST-RELIABILITÄT INNERHALB EINZELNER FTT15-PHASEN	54

3.3.5	PEAK FREQUENZ	54
3.3.6	FATIGUE INDEX	55
3.3.7	HERZFREQUENZ	55
3.3.7.1	Herzfrequenz pre Force Plate.....	55
3.3.7.2	Maximale Herzfrequenz nach FTT15	56
3.3.8	LAKTAT.....	57
3.3.9	RPE	57
3.4	EST RELIABILITÄTSSTUDIE	58
3.5	FTT15 UND EST: EINFLUSS EINER AEROBEN ODER ANAEROBEN VORBELASTUNG	58
3.5.1	KONTAKT-ANZAHL.....	58
3.5.2	FREQUENZ	59
3.5.3	PEAK FREQUENZ	60
3.5.4	FATIGUE INDEX	61
3.5.5	SEGMENT F_{MAX}	62
3.5.6	EINFLUSS DER VORBELASTUNG BEIM EINBEINSTAND-TEST	62
3.5.7	LEISTUNGSPHYSIOLOGISCHE WERTE ZU VERSCHIEDENEN ZEITPUNKTEN DES TESTPROTOKOLLS	63
3.5.8	KORRELATION ZWISCHEN EINBEINSTAND-TEST UND FTT15 PARAMETERN	64
3.6	BESCHREIBUNG DER PROBANDENGRUPPEN	65
3.6.1	ANTHROPOMETRIE.....	65
3.6.2	HAUPTSPORTART	65
3.6.3	LEISTUNGSPHYSIOLOGISCHE ERGEBNISSE DES STUFENTESTS	66
3.7	ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERGEBNISSE	66
4	<u>DISKUSSION</u>	<u>68</u>
4.1	ERGEBNISPROFIL DES FTT15	68
4.2	EST – BEURTEILUNG DER ERGEBNISSE AUS 60 UNTERSUCHUNGEN	76
4.3	FTT15 RELIABILITÄTSSTUDIE	77
4.4	EINBEINSTAND-TEST RELIABILITÄTSSTUDIE.....	79
4.5	AUSWIRKUNG EINER SPEZIFISCHEN VORBELASTUNG AUF DIE DURCH FTT15 UND EST ABGEBILDETEN LEISTUNGSPHYSIOLOGISCHEN PARAMETER	79
4.6	DER FTT15 ALS LEISTUNGSDIAGNOSTISCHES TESTVERFAHREN – ERKENNTNISSE, BEWERTUNG UND AUSBLICK.....	95
4.6.1	FTT15: KRITIK DER METHODIK UND BEURTEILUNG DES TEST-SETTINGS SOWIE DER GEWÄHLTEN MESSPARAMETER	95
4.6.2	DER FTT15: FÜHREND ABGEBILDETE HAUPTBEANSPRUCHUNGSFORMEN	100

4.6.3	FTT15 ALS LEISTUNGSDIAGNOSTISCHER TEST – EINORDNUNG UND VARIATIONSMÖGLICHKEITEN	103
5	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	111
6	<u>QUELLENVERZEICHNIS</u>	113
7	<u>DANKSAGUNGEN</u>	119
8	<u>LEBENS LAUF</u>	120
9	<u>EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG</u>	122

II ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BMI	Body-Mass-Index
BST	Bob-Start Test
CGM	Central Governor Model
COP	Center of Pressure (EST)
EST	Einbeinstand-Test
FI	Fatigue Index
FP	Force Plate, Kraftmessplatte
FT-Faser	Fast-Twitch Muskelfaser
FTT	Foot-Tapping Test
FTT15	Foot-Tapping Test über 15 Sekunden Dauer
HF	Herzfrequenz
Hz	Hertz = 1/Sekunde
IAAS	Individuelle aerob anaerobe Schwelle
KZA	Kurzzeitausdauer
LZA-I	Langzeitausdauer-I
MP	Mean Performance (WAnT)
MRI	Magnetic Resonance Imaging
MST	Margarita Stair-Climbing Test
MZA	Mittelzeitausdauer
O ₂	Sauerstoff
P _i	Inorganic Phosphate / Anorganisches Phosphat
PP	Peak Performance (WAnT)
RPE	Rate of Perceived Exertion
rpm	Revolutions per minute (Umdrehungen pro Minute)
RQ	Respiratorischer Quotient (VO ₂ / VCO ₂)
RR Dias	Diastolischer Blutdruck
RR SYS	Systolischer Blutdruck
RSA	Repeated Sprint Activities
SA	Sway Area (EST)
sEMG	surface Elektro-Myographie (Oberflächenelektromyographie)
SL	Sway Length (EST)
ST-Faser	Slow-Twitch Muskelfaser
SV	Sway Velocity (EST)
TDS	Talent Diagnose System
T _k	Körperkerntemperatur
T _m	Muskeltemperatur
T _r	Rektaltemperatur
VO ₂	Sauerstoffaufnahmekapazität
VO ₂ max	Maximale Sauerstoffaufnahmekapazität
WAnT	Wingate Anaerobic Test

1 EINLEITUNG

1.1 *Historie und Problemstellung*

Der Foot-Tapping Test (FTT) ist ein leistungsdiagnostisches Testverfahren, welches insbesondere im Sportsportbereich zur Anwendung kommt. Auch für Untersuchungen koordinativer Fähigkeiten im Bereich der Neurologie und zur Ermüdungsforschung in der Psychologie finden Tapping-Verfahren immer wieder Anwendung.¹ Hierbei stehen jedoch auch häufig Tapping-Untersuchungen der Hände im Vordergrund. Schon früh tauchten Beschreibungen von Tapping-Tests in der Fachliteratur auf. So existiert eine Arbeit aus dem Jahre 1914 mit dem Titel ‚Functional Periodicity - An Experimental Study of the Mental and Motor Abilities of Women During Menstruation‘, für welche 7 Individuen über einen Zeitraum von ca. 3 Monaten, jeden Tag mit höchstmöglicher Geschwindigkeit ihrer Hände, 400 Tapping-Kontakte zwischen einem Blechstab und einem Blechteller bewerkstelligen sollten. Schon damals entschied sich die Autorin für den Tapping-Test als bekanntes motorisches Testverfahren.²

Anders als im gut etablierten Gebiet der aeroben Leistungsdiagnostik, gibt es gerade im Bereich der anaeroben Testverfahren auch unter Experten häufig Unklarheit über das tatsächliche Vermögen einzelner Tests, anaerobe Kapazitäten umfassend abzubilden. Im Weiteren existieren allgemeine konditionelle Tests, mitunter fehlt jedoch der Transfer zum sportartspezifischen Test für praxisnahe Trainingsempfehlungen. So bleibt die eingeschränkte Übertragbarkeit der Ergebnisse in die spezifischen Disziplinen der untersuchten Athleten eine Herausforderung. Um gerade im Sportsportbereich klare Aussagen zum motorischen und konditionellen Gesamtprofil eines Athleten machen zu können, ist eine komplexe Betrachtung von mehreren konditionellen Leistungsvoraussetzungen im Sinne einer Testbatterie von Nöten. Bisher spielen Tapping-Tests als Verfahren der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik auch in solchen Testbatterien jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

Mit dem FTT15 soll nun ein weiterer kurzer Belastungstest erstmals genauer untersucht und beschrieben werden. Im Gegensatz zu besser etablierten Testverfahren in der aeroben und anaeroben Leistungsdiagnostik (Stufentests, Wingate Anaerobic Test, Drop Jumps, Counter-Movement Jumps, etc.) existiert beim Foot-Tapping Test bisher in den durchführenden Zentren ein uneinheitliches Vorgehen bezüglich der genutzten Versuchsprotokolle und der analysierten Parameter. So steht

je nach Protokoll und gewählten Testparametern die Überprüfung von koordinativen Fähigkeiten, zyklischer Schnelligkeit oder anaerober Leistungsfähigkeit im Vordergrund.³ Datenbanken mit zitierbaren Richtwerten existieren für diesen Test bis dato nicht.

Ebenso wenig gibt die aktuelle Literatur Beschreibungen zu den Testgütekriterien des FTT15 her. Weder die Reliabilität noch die Validität sind bislang hinreichend untersucht worden. Bei der detaillierten Beschreibung des FTT15 steht also auch die Überprüfung der Testgütekriterien, insbesondere der Retest-Reliabilität im Vordergrund. Hinsichtlich der Validität wird man erst zu späteren Zeitpunkten Aussagen treffen können, wenn der FTT15 in umfassenden Studien mit weiteren Leistungsparametern anderer Tests in Beziehung gesetzt wurde.

Obwohl Ermüdung als ein potentieller Einflussfaktor auf die motorische Koordination angesehen wird und eine wichtige Größe in der Trainingsgestaltung darstellt, ist erstaunlich, dass sich in sportwissenschaftlichen und sportmedizinischen Untersuchungen kaum detaillierte Aussagen über den Zusammenhang von Ermüdung und Koordination finden lassen.⁴ Es herrscht nach wie vor ein ausgeprägtes Forschungsdefizit bezüglich des Einflusses von Vorbelastungen auf die Leistungsfähigkeit bei in direktem Anschluss stattfindenden Überprüfungen von Komponenten der Schnelligkeit und Koordination. Um in diesem Bereich zusätzliche Erkenntnisse zu erlangen, wurde das neu definierte Verfahren des FTT15 mit unterschiedlich ermüdenden Vorbelastungsformen kombiniert.

Das Erlangen eines schärferen Bildes vom Foot-Tapping Test und der durch ihn abgebildeten Fähigkeiten sowie die Beurteilung des Einflusses unterschiedlicher Vorbelastungen auf den FTT15 sollten Ziel und Inhalt der vorliegenden Untersuchungen sein.

1.2 Der FTT15 als sportmotorisches Testverfahren

1.2.1 Tapping – Charakteristik und Grundlagen

Die Übersetzung von Tapping aus dem Englischen lautet klopfen, steppen oder antippen. Im Sprachgebrauch von Fachdisziplinen aus den Bereichen Sport, Medizin und Psychologie kann man unter Tapping hochfrequente, repetitive, willkürliche Bewegungen entsprechender Körperteile verstehen, welche als Teil dieser Bewegung zu meist kurzen mechanischen Kontakten mit der Umwelt führen. Soll die jeweilige Tapping Bewegung als Testverfahren genutzt werden, so können diese Kontakte mit

unterschiedlichen Verfahren registriert und über den Testzeitraum gezählt werden. Es handelt sich also in allen Fällen, unabhängig von der gewählten Testdauer, Bewegungsabfolge und Position zur Messeinrichtung, um eine Untersuchung der Beziehung von Kontakten zu Zeit. Grundsätzlich stellt Tapping also ein Testverfahren für schnelle Bewegungsfrequenzen dar.

Schon lange nutzen verschiedene Fachdisziplinen Tapping Bewegungen in klinischen Studien. Die frühesten Dokumente hierzu aus den 1920er Jahren stammen vornehmlich aus dem Bereich der Psychologie. Im Vordergrund standen schon damals Fragestellungen zum Thema der Ermüdung, wobei bereits speziell konstruierte Messapparaturen wie das Whipple-Tapping-Board genutzt wurden.^{5,6}



Abbildung 1.1: Whipple-Tapping-Board (1920er Jahre) für Ermüdungs-Experimente aus dem Bereich der Psychologie

Im Bereich der Neurologie führten Shimoyama et al. an 111 gesunden Testpersonen sowie an Probanden mit cerebellären Erkrankungen, Parkinson und Hemiparese eine quantitative Analyse eines Finger-Tapping Tests durch. Bei den gesunden Probanden zeigten sich eine Abnahme der Tapping Frequenz mit dem Alter, höhere Frequenzen bei männlichen Probanden als bei Frauen, sowie Vorteile der dominanten Seite. Im Weiteren gelang es den Autoren zu zeigen, dass anhand der Finger-Tapping-Frequenz, Patienten mit motorischen Dysfunktionen mit Ursprung im Cerebrum, Cerebellum oder den Basalganglien, von gesunden Probanden abgegrenzt werden können.¹

Im Internet kursieren zurzeit unter dem Suchwort ‚Tapping Test‘ verschiedene Softwarelösungen, mit Hilfe derer man am heimischen PC Finger-Tapping Tests durchführen kann. Beworben werden diese Tests mit der Fähigkeit bei absinkender Tapping-Frequenz Übermüdungs- oder Überarbeitungszustände aufzeigen zu können. Wissenschaftlich fundierte Arbeiten zur Überprüfung der Testgütekriterien und der postulierten Hypothese sind gegenwärtig jedoch noch ausstehend.

Neben den Untersuchungen an der oberen Extremität spielen die Tapping-Bewegungen der Beine eine wichtige Rolle. Hier kann insbesondere zwischen Tapping Tests im Sitzen und im Stehen unterschieden werden. Während bei Probanden in sitzender Haltung, durch eine Entlastung des Eigengewichts, ein größerer Fokus auf neuromuskulär-koordinativen Fähigkeiten liegt, müssen bei im Stehen durchgeführten Untersuchungen, bei denen die Probanden ihr Eigengewicht tragen, auch energetische Einflüsse bedacht werden. Hinsichtlich der meisten sportbezogenen Fragestellungen sind die stehenden Untersuchungen praxisnäher.

Damerow führte im Rahmen seiner Untersuchungen zur Betrachtung der Schnelligkeit im Kontext der konditionellen Fähigkeiten⁷ an Schülern und Schülerinnen der 6. bis 13. Klasse Beintapping-Tests im Sitzen durch, womit der Verlauf der zyklischen Frequenzschnelligkeit der unteren Extremität bestimmt werden sollte. Die gefundenen Ergebnisse lagen hierbei für beide Geschlechter und eine breite Altersspanne recht gleichmäßig um 10 Wdh. / s. mit Schwankungen um etwa 0,3 Wdh./s.

Wiederholt konnte in der Vergangenheit gezeigt werden, dass Probanden mit den oberen Extremitäten, im Vergleich zu den unteren, bei unterschiedlichen Aufgaben in der Lage waren, höhere Frequenzschnelligkeiten zu realisieren.^{8, 9} Über das Wissen um eine kranial verglichen mit kaudal höhere Motoneuronenfrequenz und einen relativ höheren Anteil schnell kontrahierender Fasern (FT-Fasern) in der Muskulatur der Arme ist dieser Extremitätenunterschied gut erklärbar.¹⁰⁻¹² Thienes, der das zitierte wechselseitige Bein-Tapping im Sitzen durchführen ließ, konnte im Weiteren höhere Bewegungsfrequenzen der dominanten Körperseite feststellen und erklärte dies über den Vorteil einer optimierten feinmotorischen Steuerung. Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich jedoch hinsichtlich der untersuchten Frequenzschnelligkeits-Merkmale beim Geschlechtervergleich (vgl. Abb. 1.2).¹³ Auch Weineck beschreibt in seinem Standardwerk für Sportwissenschaftler und Sportmediziner verschiedene Hand- und Fuß-Tapping Tests als gutes Maß für die Erfassung der koordinativen Leistungsfähigkeit.¹⁴

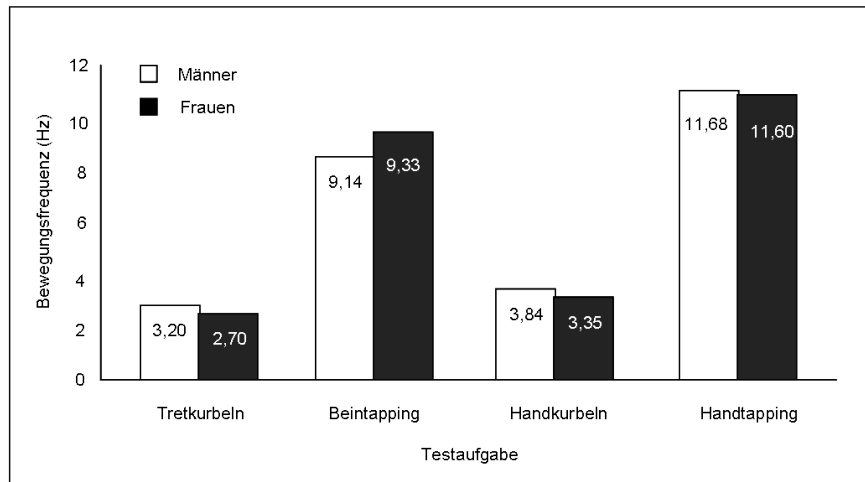


Abbildung 1.2: Bewegungsfrequenzen von Männern und Frauen bei unterschiedlichen Testaufgaben (nach Thienes¹³); bei allen 4 Testaufgaben wurden die Bewegungen der rechten und linken Extremität gezählt, das Bein-Tapping fand im Sitzen statt.

Variationsmöglichkeiten bei Tapping-Tests ergeben sich also durch die Wahl der untersuchten Körperpartie und das Test-Setting einerseits sowie andererseits durch die Vorgabe des Messzeitraumes oder die im Rahmen des Tests zu erreichende Anzahl an Kontakten. Beide Verfahren finden Anwendung.

Mindestvoraussetzung für die Durchführung eines beliebigen Tapping-Tests ist das Vorhandensein einer Stoppuhr. So können, bei moderaten Bewegungsgeschwindigkeiten, einzelne Kontakte gezählt und die Gesamtdauer der Untersuchung mittels Uhr bestimmt werden. Der schnelle Bewegungsablauf mit kurzem Bewegungszyklus beim Finger-Tapping und häufig auch beim Fuß-Tapping verlangt jedoch nach genaueren Messmethoden. So existiert eine Vielzahl von Apparaturen, welche automatische Kontaktzähler beinhalten. Einfache Beispiele sind Messaufbauten mit Kontaktplatten und elektronischen Zählern sowie PC-Tastaturen. Nutzt man Kraftmessplatten, so lassen sich zusätzlich zur Messung von Kontakten und ihrer Dauer auch die wirkenden Bodenkontakt-Kräfte registrieren und für weitere Auswertungszwecke nutzen.

Im Bereich der Sportwissenschaft und Sportmedizin werden heute vor allem Tapping-Tests der Beine durchgeführt. Diese sind häufig Teil umfangreicher Untersuchungen in Form von Messbatterien, mit Hilfe derer das komplexe konditionelle Gesamtprofil von Athleten abgebildet werden soll.

1.2.2 Foot-Tapping - Bewegungsablauf, Physiologie und sportwissenschaftliche Einordnung

Der Bewegungsablauf des Foot-Tappings entspricht einem Sprint auf der Stelle, wobei die Knie in der Flugphase üblicherweise nicht sehr hoch angehoben und die Füße nicht weit von der Kontaktfläche entfernen werden.

Der Bewegungszyklus wird durch ein Abdrücken aus dem Fußgelenk des Standbeines (beispielsweise hier: rechts) initiiert, welches mit einer Gewichtsverlagerung auf die Gegenseite einhergeht. Es folgt die Beugung des rechten Beines im Kniegelenk und ein Anheben des Oberschenkels aus der Hüfte. Zeitgleich wird das gegenseitige Bein gestreckt, worauf der linke Fuß im Vorfußbereich auf dem Boden aufsetzt. Nun folgt auf dieser Seite die Abdrückbewegung ebenfalls über den Vorfuß, so dass die Ferse, zur schnelleren Ausführbarkeit der Bewegung, normalerweise nicht mit dem Boden in Kontakt tritt. Nach dem anschließenden Beugen des Knie- und Hüftgelenkes der linken Seite und Streckung in diesen Gelenken rechts, erreicht der rechte Fuß wieder die Kraftmessplatte und beendet den Zyklus. Geringe, mit den Beinaktionen gegenseitig synchron einhergehende Bewegungen der oberen Extremitäten, können zur Stabilisierung des Bewegungszyklus beitragen.

Zallinger et al. untersuchten in ihrer Studie ‚Charakteristik der Beintapping-Bewegung‘ unter dem Aspekt ausgewählter EMG-Parameter¹⁵ die maßgeblich an diesem Bewegungszyklus beteiligten Muskelgruppen. Detailliert untersuchten sie die Muskeln gastrocnemius (GAS), rectus femoris (REF), adductor longus (ADL), tibialis anterior (TIA), biceps femoris (BIF) und gluteus maximus (GLM). Die Muskelaktivität der genannten 6 Beinmuskeln wurde hierfür synchron mit den Bodenreaktionskräften registriert. Als Parameter wurden aus den zeitnormalisierten EMG-Verläufen das relative Sequencing sowie die Ein- und Ausschaltintervalle ermittelt. Abbildung 1.3 (rechts) zeigt die Aktivität der genannten Muskeln zu verschiedenen Zeitpunkten des Tapping-Zyklus.

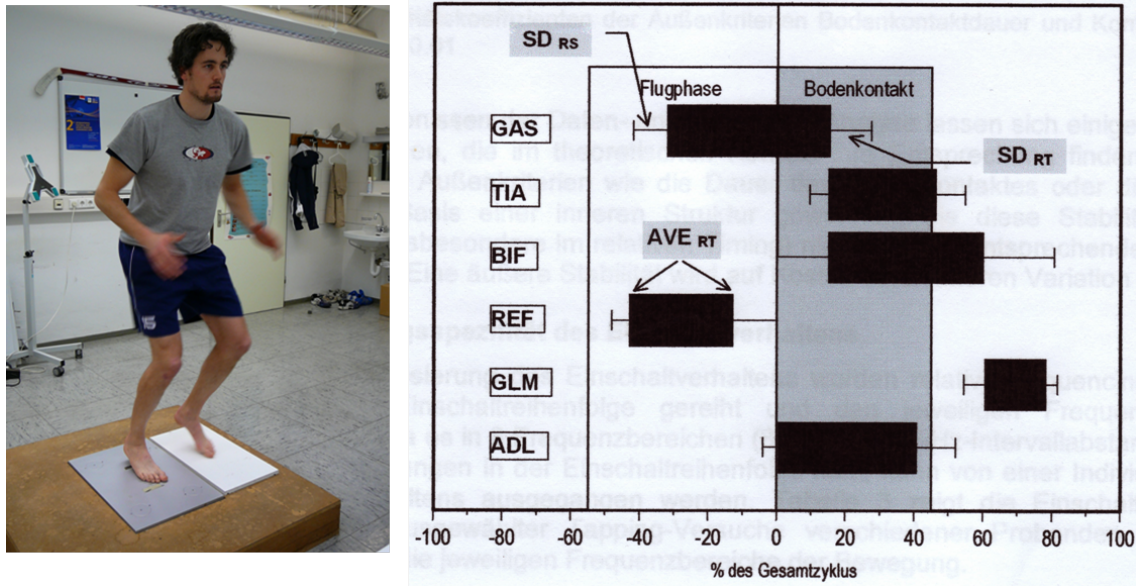


Abbildung 1.3: links: Proband bei der Durchführung eines FTT15; rechts: Darstellung eines Tapping-Versuches als MW und STABW der Muskel-Parameter rel. Sequencing und rel. Timing in Abhängigkeit der mittleren Zyklusdauer (5 Zyklen - 6 Muskeln); GAS = m. gastrocnemius, TIA = m. tibialis anterior, BIF = m. biceps femoris, REF = m. rectus femoris, GLM = m. gluteus maximus, ADL = m. adductor longus (nach Zallinger et al.¹⁵)

Zusammenfassend verweisen die Autoren auf die Divergenz der Untersuchungen mit Grundannahme der Zeitprogrammtheorie. Auf Basis ihrer Ergebnisse empfehlen sie, die in der Literatur bisher vorgeschlagene Kennzeichnung des Bein-Tappings als zyklisches Zeitprogramm nicht als neurophysiologische Realität im Sinne einer Programmsteuerung zu verstehen. Aus ihrer Sicht dürfte es sich bei der Realisierung der Bewegung vielmehr um Mechanismen handeln, die zentrale Bestandteile von systemtheoretischen Überlegungen sind.¹⁵

Tapping-Bewegungen spielen im alltäglichen Leben keine Rolle, im Sport sind sie jedoch häufig vertreten. So werden beispielsweise Skipping-Bewegungen umfangreich in der Leichtathletik genutzt, vorzugsweise im Bereich der kürzeren Disziplinen, zum Techniktraining und im Rahmen von Aufwärmprogrammen. Aber auch in vielen anderen Sportarten spielen Bewegungsschnelligkeit und Sprintfähigkeit eine zunehmende Rolle. Gerade im Bereich der Sportsportarten, wo eine kontinuierliche Tendenz zu ansteigenden Anforderungen der Spielweisen an Athletik und Dynamik festzustellen ist,¹⁶ bedient man sich zunehmend gängiger Praktiken aus der Leichtathletik. Leistungs- und Hochleistungssportler vieler Disziplinen dürften also mit hochfrequenten Lauf- und Skipping-Bewegungen aus dem Vereins- und Kadersport über Jahre vertraut sein.

Komplexe Bewegungsmuster, wie sie in den meisten Sportarten und ebenso sportmotorischen Leistungstests vorkommen, setzen sich aus einer Vielzahl von

Grundfertigkeiten zusammen, welche der jeweilige Athlet in unterschiedlicher Ausprägung beherrscht. Zur Leistungsdiagnostik und Trainingsplanung kann es hilfreich sein, den Einfluss, der für die jeweilige Bewegung wichtigsten Grundfertigkeiten, zu beurteilen. Um bestimmte Qualitäten der untrennbar verbundenen physischen und psychischen Komponenten der menschlichen Motorik zu beschreiben, erarbeitete Fetz 1971 eine Einteilung in die fünf motorischen Hauptbeanspruchungsformen Ausdauer, Kraft, Koordination, Flexibilität und Schnelligkeit, welche von Hollmann weitergeführt wurde und auch heute noch vorwiegend im deutschsprachigen Raum als didaktische Hilfe genutzt wird.¹⁷⁻¹⁹ Von den genannten Begriffen stellen Kraft, Schnelligkeit und Ausdauer gewissermaßen die „klassischen“ Hauptbeanspruchungsformen dar. Auch sie sind aber bereits nicht nach einheitlichen Gesichtspunkten geprägt. Dynamische Kraft und Schnelligkeit sind physikalisch exakt definierbare Begriffe, nicht aber statische Kraft oder Ausdauer.¹⁸ Alle Begriffe haben jedoch gemein, dass das psychisch-zentralnervöse Moment mit eingeschlossen werden soll. Die Koordination und Flexibilität wurden als selektiv motorische Hauptbeanspruchungsformen eingeführt, da sie in ihrer Gesamtheit unter der Oberbezeichnung des Motorischen auch die Gewandtheit und Geschicklichkeit beinhalten. Wie überall in der Natur, so bestehen auch hier fließende Übergänge, teilweise sogar weitgehende Überschneidungen zwischen den einzelnen Bereichen.¹⁸ Auch in Hinblick auf eine genauere Untersuchung der Tapping-Bewegungen ist die beschriebene Einteilung in Hauptbeanspruchungsformen hilfreich. Bei vorliegender Kenntnis des Tapping-Bewegungsablaufes und der Testdauer, müssen aus der Reihe der genannten insbesondere die Schnelligkeit, die Koordination sowie die anaerobe Kapazität als konditionelle Grundeigenschaft als für ein erfolgreiches Absolvieren des FTT15 bedeutungsvoll hervorgehoben werden. Diese drei motorischen Haupteigenschaften sollen im Folgenden näher erläutert werden.

Bereits der oberflächliche Vergleich der Bewegungsmuster beim klassischen Sprint und beim Bein-Tapping erbringt für das hier evaluierte Testverfahren den offensichtlichen Bezug zur Hauptbeanspruchungsform Schnelligkeit. Grosser definierte Schnelligkeit im Sport als die Fähigkeit, aufgrund kognitiver Prozesse, maximaler Willenskraft und der Funktionalität des Nerv-Muskel-Systems höchstmögliche Reaktions- und Bewegungsgeschwindigkeiten unter bestimmten gegebenen Bedingungen zu erzielen.²⁰ Schiffer schlägt eine in Abbildung 1.4 gezeigte Unterteilung der motorischen Schnelligkeit in Subgruppen vor, wobei er „reine“ und „komplexe“ Schnelligkeitsformen unterscheidet und zwischen Reaktions- und Bewegungsschnelligkeit differenziert.²¹ Reaktionsschnelligkeit ist bei Einfachreaktionen

in hohem Maße genetisch determiniert und nur geringfügig trainierbar, während komplexere Auswahlreaktionen in stärkerem Maße gelernt werden können.¹⁷ Bewegungsschnelligkeit ist als multifaktorielle Entität ohne solitäres physiologisches Korrelat zu sehen, wobei eine Unterteilung in zyklische und azyklische Schnelligkeit üblich ist. Seit langem wird die zyklische Schnelligkeit in der Trainingslehre mit der leichtathletischen Sprintleistung gleichgesetzt,⁸ allgemein sind zyklische Bewegungsformen jedoch solche, die sich wie beispielsweise Laufen, Schwimmen, Radfahren oder Rudern gleichmäßig rhythmisch wiederholen. Eine weitere Differenzierung dieser Schnelligkeitsform kann in die Bereiche ‚geführte zyklische Bewegungen‘ und ‚freie zyklische Bewegungen‘ erfolgen, wobei ‚geführte zyklische Bewegungen‘ dadurch charakterisiert sind, dass die räumliche Struktur der Teilbewegung (in der Regel durch mechanische Vorrichtungen) vorgegeben ist. Beispiele sind das Kurbeln, Rudern oder Trainingsgeräte mit geführten Gewichten. Bei ‚freien zyklischen Bewegungen‘ wird die räumliche Struktur nicht durch Geräteeigenschaften, sondern vor allem durch koordinative Prozesse und die Struktur der beteiligten Gelenksysteme konstant gehalten. Dies ist beim Laufen, Schwimmen und Tapping der Fall.⁸ Wurf, Sprung, Schlag und Zug stellen hingegen azyklische Bewegungsformen dar.^{17, 18} Unzweifelhaft muss für eine hohe Bewegungsschnelligkeit eine entsprechende neuromuskuläre Voraussetzung mit hohem Energiedurchsatz bestehen. Aus diesem Grund wird die azyklische Schnelligkeit von einigen Autoren in engem Zusammenhang mit der intramuskulären Koordination gesehen, während die zyklische Schnelligkeit mehr durch die intermuskuläre Koordination beeinflusst sein soll.¹⁷

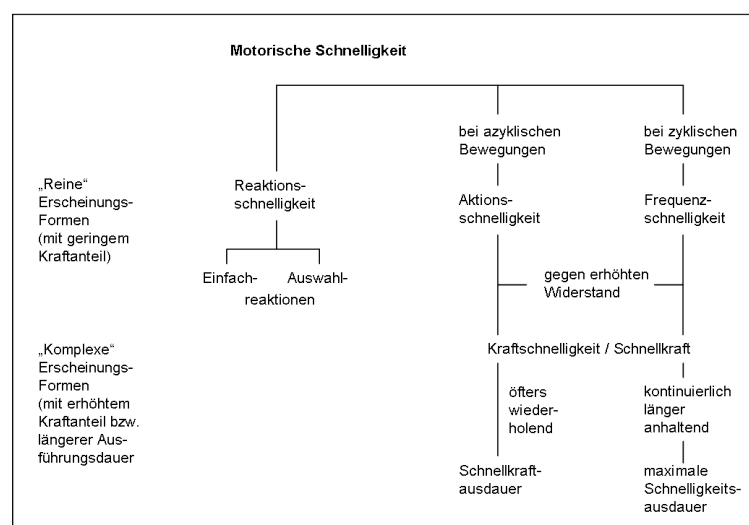


Abbildung 1.4: Die motorische Schnelligkeit und ihre Unterteilungen (Erscheinungsformen, Subkategorien); nach Schiffer²¹

Vor dem Hintergrund des oben beschriebenen Foot-Tapping Bewegungsmusters ist, als Bestandteil der motorischen Schnelligkeit, insbesondere die Frequenzschnelligkeit als für den FTT15 bedeutsam zu sehen. Nach Weineck beinhaltet die zyklische Frequenzschnelligkeit eine sich rhythmisch wiederholende Folge von motorischen Aktionen, wobei diese Bewegungen mit höchster Geschwindigkeit gegen geringe Widerstände ausgeführt werden.¹⁴ Die Fortbewegungsgeschwindigkeit stellt eine Sonderform der zyklischen Schnelligkeit dar und bezieht sich auf die lokomotorische Leistungsfähigkeit der unteren Extremität. Die Bewegungsfrequenz als Ausdrucksform der zyklischen Schnelligkeit ist dabei nach Weineck abhängig von der Geschwindigkeit der jeweiligen Einzelbewegungen. Wie Tabelle 1.1 zu entnehmen ist, fallen die Maximalwerte der Bewegungsfrequenz allerdings in den verschiedenen Gelenken sehr unterschiedlich aus.

Gelenk	Maximale Bewegungsfrequenz pro Minute (pro Sekunde)	
Fingerzwischengelenke	300 – 400	(5 – 6,7 Hz)
Mittelhandgelenke	480 – 540	(8 – 9 Hz)
Handgelenke	690	(11,5 Hz)
Ellebogengelenk	530	(8,8 Hz)
Schultergelenk	310	(5,2 Hz)

Tabelle 1.1: Bewegungsfrequenzen in unterschiedlichen Gelenken (nach Amar, in Simkin²²)

Hollmann definiert Grundschnelligkeit als die maximal erreichbare Geschwindigkeit innerhalb eines zyklischen Bewegungsablaufes und bezieht in diese Definition sowohl Einzelbewegungen (z.B. Lauf auf der Stelle) als auch Fortbewegungen (Lauf mit wachsender Distanz vom Standort) mit ein.¹⁸ Für die Grundschnelligkeit wirken nach Hollmann folgende Faktoren leistungslimitierend:

1. Dynamische Kraft der beanspruchten Muskulatur,
2. Koordination,
3. Kontraktionsgeschwindigkeit,
4. Viskosität des Muskels,
5. Anthropometrische Merkmale,
6. Flexibilität.

Grundschnelligkeit ist im Weiteren eine durch Muskelarchitektur, Größenordnung der Myosin-ATPase und den Anteil an schnellen Muskelfasern in hohem Maße genetisch determinierte Komponente und im Gegensatz zur Ausdauerleistungsfähigkeit nur äußerst begrenzt trainierbar.¹⁸

Mit der Komplexität der Handlungsabfolge steigt auch die Bedeutung der neuromuskulär-koordinativen Fähigkeiten, eine hohe Frequenzschnelligkeit setzt ein hohes Maß an intra- und insbesondere intermuskulärer koordinativer Abstimmung voraus.¹⁴ Die Übergänge der oben genannten Faktoren sind hier also fließend. Schnelligkeit erfordert Koordination, im Umkehrschluss bedarf Koordination als Grundvoraussetzung jedoch nicht im gleichen Maße Schnelligkeit.

Unter Koordination ist allgemein das Zusammenwirken von Zentralnervensystem und Skelettmuskulatur innerhalb eines gezielten Bewegungsablaufes zu verstehen.¹⁴ Die koordinativen Fähigkeiten ermöglichen es dem Sportler, motorische Aktionen in vorhersehbaren (Stereotyp) und unvorhersehbaren (Anpassung) Situationen sicher zu beherrschen und sportliche Bewegungen relativ schnell zu erlernen.²³ Je besser die Koordination ist, desto gradliniger, müheloser und präziser wird das Bewegungsziel erreicht. Die Bewegungsabläufe werden geschmeidiger und ökonomischer, so dass der Energieaufwand und damit der Sauerstoffbedarf für eine gegebene muskuläre Beanspruchung abnehmen. Gleichzeitig sinkt der Ermüdungsgrad. Nach Hollmann sind für die Qualität der Koordination folgende Entitäten entscheidend:

1. Beachtung der für den betreffenden Bewegungsablauf einschlägigen physikalischen Gesetze,
2. Übungsgrad der agonistisch-antagonistisch tätigen Muskeln für den betreffenden Bewegungsablauf,
3. Adaptationszustand des Vestibularapparates.¹⁸

Da die koordinative Leistungsfähigkeit in der Regel nur als theoretisches Konstrukt definiert werden kann, ist ihre direkte Quantifizierung häufig nicht möglich. Demgemäß werden Abschätzungen über Bewegungspräzision und –ökonomie sowie deren Trainierbarkeit anhand der Verbesserung dieser Parameter vorgenommen.¹⁷

In Hinblick auf Tapping-Tests und das Verständnis von hochfrequenten, zyklischen Bewegungen im Kontext der koordinativen Fähigkeiten, ist als Teil dieser koordinativen Grundfertigkeit auch ein relevanter Einfluss des propriozeptiven Systems zu beachten. So steigert eine Erregung der motorischen Zonen im Großhirn beispielsweise Impulse des Gamma-Systems und bereitet den so genannten Vorstartzustand vor, wozu eine Erhöhung des Muskeltonus sowie eine Sensibilitätssteigerung von Mechanorezeptoren und Propriozeptoren gehört.¹⁸ Gerade für den Bereich der Tiefensensibilität ist jedoch charakteristisch, dass die Messbarkeit der vorhandenen Einflüsse, vor allem in Situationen mit komplexen Bewegungen, ein bisher ungelöstes Problem darstellt.

Als dritte für ein erfolgreiches Absolvieren des FTT15 wichtige motorische Hauptbeanspruchungsform ist die anaerobe Kapazität als Komponente der Ausdauerfähigkeit zu nennen. Unter physiologischen Gesichtspunkten lässt sich die Ausdauer als Fähigkeit definieren, eine physische Leistung über einen bestimmten Zeitraum erbringen zu können. Sie wird auch synonym als Ermüdungswiderstandsfähigkeit bezeichnet. Für das Verständnis aus physiologischer und trainingspraktischer Sicht, ist eine Einteilung nach der Zeitdauer der Belastung am sinnvollsten, weil sie sich der Energiebereitstellung zuordnen lässt.¹⁷

Schlüsselsubstanz für die Energiebereitstellung für alle Zellen ist Adenosintriphosphat (ATP). Aus ATP entsteht durch Umwandlung Adenosindiphosphat (ADP), wobei Energie frei wird. Der in der Muskelzelle vorhandene Betrag an ATP reicht jedoch nur für 1- 3 Kontraktionen, schon für die nächsten Kontraktionen muss ATP aus anderer Quelle restituiert werden. Die Resynthese von ATP kann anaerob ohne Beteiligung von Sauerstoff oder aerob durch Oxidation von Substraten unter Sauerstoffverbrauch und Bildung von H₂O und CO₂ erfolgen. Bei der anaeroben Resynthese wird weiter unterschieden zwischen der anaerob-laktaziden Energiebereitstellung, bei der die anaerobe Glykolyse im Vordergrund steht, sowie der anaerob-alktaziden Form, bei der energiereiche Phosphate, insbesondere Kreatinphosphat, genutzt werden.

Es können also drei Energie liefernde Stoffwechselwege unterschieden werden:

1. Anaerob-alktazide Energiebereitstellung,
2. Anaerob-laktazide Energiebereitstellung,
3. Aerobe Energiebereitstellung.

Die einzelnen Energiebereitstellungsformen unterscheiden sich maßgeblich bezüglich der Energieflussraten und der zur Verfügung stehenden Gesamtenergie, was für körperliche Belastungen eine große Bedeutung hat. Die anaerob-alktazide Energiebereitstellung aus dem ATP-Pool und Kreatinphosphat weist die höchste Energieflussrate auf, wobei die Gesamtkapazität bei maximaler Belastung nur für wenige Kontraktionen bzw. Sekunden ausreicht. Der anaerob-laktazide Energiebereitstellungsweg setzt durch den Abbau von Glukose oder Glykogen zu Laktat eine größere Energiemenge frei, die Energieflussrate ist jedoch bereits deutlich niedriger. Bei maximalen Belastungen dominiert dieses System in einem Zeitraum von etwa 10 – 60 Sekunden bei großer individueller Streubreite.¹⁷ Die aerobe Energiegewinnung erfolgt entweder überwiegend aus Kohlehydraten (Glykogen, Glukose) oder aus dem Abbau von freien Fettsäuren und ist nochmals deutlich

langsamer. Eiweiße spielen in diesem Zusammenhang der Energiegewinnung nur eine untergeordnete Rolle.

Die Quelle der Energiebereitstellung ist bei maximalen Belastungen also maßgeblich von ihrer Dauer abhängig. Alle genannten Energie liefernden Prozesse verlaufen mit fließenden Übergängen parallel, ein System ist in Abhängigkeit der geforderten Energieflussrate dominierend. Eine maximale dynamische Beanspruchung von 10 s Dauer wird beispielsweise zu 85 % allein von den energiereichen Phosphaten bestritten. Anschließend beginnt die anaerobe Glykolyse mit der Laktatbildung eine führende Rolle zu spielen, so dass nach etwa 40 Sekunden andauernder Belastung maximale Laktatspiegel erreicht werden. Zeitlich darüber hinausgehende muskuläre Beanspruchungen lassen mehr und mehr die oxidative Phosphorylierung und damit den aeroben Stoffwechsel ins Spiel kommen. Die Tatsache, dass besonders in Spilsportarten ein ständiger Wechsel der Belastungsintensität vorliegt, verdeutlicht für diesen Bereich zusätzlich die Notwendigkeit eines fließenden Überganges zwischen den Energie liefernden Stoffwechselwegen.

1.2.3 Der 15 Sekunden Foot-Tapping Test (FTT15) – Anforderungen an ein geeignetes Testverfahren

Da der in der vorliegenden Studie untersuchte Foot-Tapping Test in seiner Durchführung wie auch in seiner Auswertung noch nicht in der Literatur beschrieben worden ist, soll im Folgenden zunächst dargestellt werden, welche Rahmenbedingungen zu dem hier gewählten Vorgehen geführt haben. Bei ebenfalls fehlender Erstbeschreibung bezüglich der anzuwendenden Testdauer, wurden für die Foot-Tapping Belastung folgende Anforderungen definiert:

- Das Testverfahren soll lang genug sein, um Ermüdungserscheinungen im anaeroben Bereich abzubilden.
- Der Test soll nur so lang sein, dass das hierdurch erfahrene Maß an Belastung die Probanden nicht insofern überfordert, dass sie erneute Durchführungen des Tests verweigern oder diesen ohne maximalen Einsatz wiederholen.
- Die Übertragbarkeit auf Situationen in die Sportpraxis ambitionierter Athleten, gerade im Bereich Mannschaftssport, Spilsport und Ballsportarten soll gegeben sein.
- Zur besseren Vergleichbarkeit soll eine Orientierung an existierenden anaeroben Testverfahren und deren Dauer (100 m – Sprint Zeit, 30 Sek. WAnT) erfolgen.

Nur wenige Weltklassesprinter absolvieren den 100 m - Sprint unter 10 Sekunden Dauer. Der im Leichtathletik-WM Finale von 2009 in Berlin von Usain Bolt aufgestellte und aktuell gültige Weltrekord liegt bei 9,58 Sekunden. Denny berechnete kürzlich anhand seiner statistischen Modelle zu biologisch maximal erreichbaren Laufgeschwindigkeiten eine für Männer maximal erreichbare Rekordzeit von 9,48 Sekunden.²⁴ Im Spportsportbereich bleiben außergewöhnlich schnelle männliche Athleten im 100 m - Sprint deutlich unter 11 Sekunden, gute Sportler in Mannschafts-Ballsportarten erreichen Zeiten um 12 Sekunden Dauer. Eine objektive und subjektive Ermüdung ist für diese Sprint-Disziplin bekannt.^{25, 26} Vor diesem Hintergrund kann bei einer mit 15 Sekunden Testdauer etwas längeren Belastungszeit im Rahmen des FTT15 ebenfalls eine messbare Ermüdung vermutet werden.

Der Wingate-Test (WAnT), für den eine umfangreiche Datengrundlage zur Verfügung steht und welcher zumeist mit einer Belastungszeit von 30 Sekunden Dauer durchgeführt wird, ist ein etabliertes leistungsdiagnostisches Verfahren zur Beurteilung der anaeroben Kapazität.²⁷ In einer nicht veröffentlichten, aber von Vandewalle et al.²⁸ zitierten Untersuchung, fand Raveneau für die beim WAnT erbrachte Gesamtleistung, zwischen einem 20 und 30 Sekunden andauernden Test, einen Korrelationskoeffizienten von 0,99. Dies bestätigte den Autor der vorliegenden Arbeit darin, auch für den FTT einen kürzeren Untersuchungszeitraum zu wählen. Im Weiteren basierte die Entscheidung für eine Testdauer von 15 Sekunden auch auf der Empfehlung von Vandewalle et al.,²⁸ anaerobe Tests, auch wegen der einfacheren Handhabung, nur über eine Dauer von 15 – 20 Sekunden durchzuführen.

Ein weiteres Argument gegen eine Testdauer von deutlich größer 15 Sekunden war die Annahme, dass eine längere Belastung zu einer anfänglich oder gesamthaft submaximalen und somit mangelhaften Ausbelastung der Probanden führen könnte. Da dies einen systemischen Fehler insbesondere im Bereich der ‚Ermüdungsparameter‘ zur Folge hätte, wurde von längeren Testzeiträumen Abstand genommen. Maud et al. zeigten in diesem Zusammenhang bei einem 40 Sekunden WAnT deutlich niedrigere Werte für die Peak Performance (PP) und Mean Performance (MP) als beim regulären WAnT Protokoll über 30 Sekunden.²⁹ In einer aktuellen Veröffentlichung zur Validierung eines modifizierten 20 Sekunden gegen den 30 Sekunden Wingate-Test, zeigten Laurent et al., dass die Ergebnisse der letzten 10 Sekunden des WAnT erfolgreich mit Hilfe einer non-linearen Regressionsgerade vorausgesagt werden können und demzufolge eine auf 20 Sekunden verkürzte Datenerhebung eine Alternative zum etablierten Testprotokoll darstellt.³⁰

Die Auswahl der Testdauer von 15 Sekunden für den FTT stellt schließlich einen Kompromiss zwischen den oben genannten Forderungen dar. Ausschlaggebend für

einen Messzeitraum von 15 Sekunden waren nicht zuletzt auch günstige Ergebnisse bei eigenen Voruntersuchungen.

Vorbelastungen als Einflussfaktoren des Testprotokolls

Ziel des Autors war es, vor Durchführung des FTT15, drei unterschiedliche Belastungszustände herzustellen, welche sich, zur besseren Interpretierbarkeit, einerseits möglichst stark unterscheiden sollten, andererseits in regelmäßigen Trainings – oder Wettkampfsituationen im Bereich Mannschafts-Spielsport vorkommen sollten. Auf dieser Basis wurden die drei Vorbelastungs-Entitäten ‚ohne Belastung‘, ‚Sprint-Belastung‘ und ‚Ausdauer-Belastung‘ ausgewählt.

Ohne Vorbelastung

Diese Testsituation sollte insbesondere als Referenzwert dienen, um mögliche Ergebnisveränderungen durch die anderen Vorbelastungen beurteilen zu können.

Sprint-Vorbelastung

Es war Ziel anhand der Sprint-Vorbelastung für die Probanden eine höchst intensive Belastung im anaeroben Bereich zu schaffen, welche bei diesen subjektiv und objektiv zu einer deutlich spürbaren Ermüdung führen sollte. Rahmenbedingungen waren neben möglichst großer Standardisierung der Belastung ein enger örtlicher Bezug zum Messplatz, um ein kurzes Zeitintervall zwischen Ende der Belastung und Beginn der Tests auf der Kraftmessplatte realisieren zu können.

Im Gegensatz zu aeroben Belastungen, gehen solche anaerober Qualität, ab einer Belastungsdauer von ca. 5 Sekunden, mit einem deutlichen Anstieg des entsprechenden Stoffwechselendproduktes (Laktat) einher. Maximale Blutlaktat-Werte liegen bei ca. 15 – 20 mmol/l, bei speziell trainierten Personen, z.B. 400 m Läufern, auch bis zu 25 mmol/l.³¹ Um die oben genannten Bedingungen zu erfüllen wurde für die vorliegende Arbeit eine standardisierte Sprint-Vorbelastung auf einem Laufbandergometer nach unter 2.2.1.2 beschriebenem Schema ausgewählt. Auf Basis des bekannten Intensitätsgrades und der zu erwartenden Belastungsdauer während des Sprints, kann von einer führenden Beanspruchung des laktazid-anaeroben Systems der Probanden ausgegangen werden.³¹

Ausdauer-Vorbelastung

Die Ausdauer-Vorbelastung sollte im deutlichen Gegensatz zum Sprint eine aerobe, länger andauernde Belastungsform geringerer, aber doch spürbarer Intensität darstellen. Da bei länger dauernder Belastung oberhalb der anaeroben Schwelle die

Laktatkonzentration im Blut trotz konstanter Intensität der Belastung ansteigt,³² galt es diese Schwelle deutlich zu unterschreiten.

Die Leistungsfähigkeit an der anaeroben Schwelle beträgt in Abhängigkeit von der Sportart und dem Trainingszustand ca. 60 bis 85 % der maximalen Sauerstoffaufnahmekapazität VO_{2max} (aerobe Schwelle ca. 40 bis 65 % VO_{2max}).³² Für die vorliegende Studie wählte der Autor eine Ausdauer-Vorbelastung auf einem Laufbandergometer mit einem Belastungsgrad von 65 % der VO_{2max} nach dem unter 2.2.1.1 detailliert beschriebenen Schema. Auf Basis der individuell angepassten Intensität kann so von einer für die Probanden existenten Belastung im Bereich der aeroben Schwelle bzw. im Bereich des aerob-anaeroben Übergangs, sicherlich jedoch unterhalb der anaeroben Schwelle ausgegangen werden.

Die Auswahl der Vorbelastungsdauer von 30 Minuten erfolgte nach dem Prinzip: So lange wie nötig, um die gewünschten physiologischen Anpassungsreaktionen des Körpers zu bewirken, so kurz wie möglich, um die Probanden nicht unnötig zu belasten oder zu ermüden. Da die aerobe Vorbelastung auch als intensiveres Aufwärmprogramm gesehen werden kann, ist eine Untersuchung von Asmussen et al. zu diesem Thema bedeutsam, welche zeigt, dass die Muskeltemperatur im Gegensatz zur Rektaltemperatur erst nach ca. 20 – 30 Minuten körperlicher Aktivität einen stabilen Wert um $38,0^{\circ}C$ erreicht hat³³ (vgl. Abb 1.5).

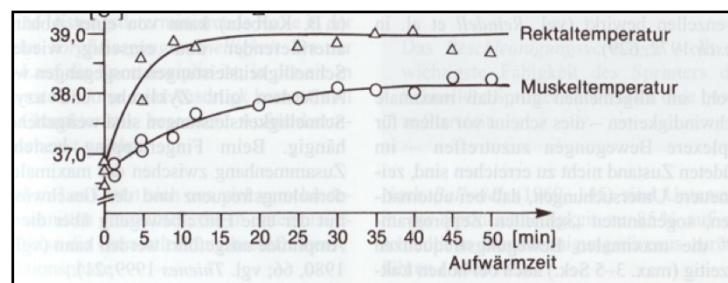


Abbildung 1.5: Verlauf des Anstieges von Rektal- und Muskeltemperatur in Grad Celsius in Abhängigkeit der Aufwärmzeit (modifiziert nach Asmussen et al.³³)

Als optimale Aufwärmzeit gelten allgemein 20 – 45 Minuten.¹⁴ Da dieser Zeitrahmen auch der im Spilsportbereich verbreiteten Praxis entspricht, ist bei der gewählten Dauer von 30 Minuten, die Übertragbarkeit der Studienergebnisse in den Leistungssport-Trainingsalltag gegeben.

1.3 Der Einbeinstand-Test als sportmotorisches Testverfahren

Einbeinstand-Tests sind etablierte Testverfahren, die in verschiedenen Fachdisziplinen, insbesondere in der Neurologie, Psychiatrie und Psychologie, Allgemeinmedizin und Geriatrie sowie in der Sportmedizin zur Überprüfung koordinativer Fähigkeiten eingesetzt werden.^{34, 35} In der Präventivmedizin, zur allgemeinen Überprüfung des Gleichgewichts und der Körperkontrolle und im Rahmen von Interventionsstudien, beispielsweise zur Überprüfung der Auswirkung eines Gleichgewichtstrainings, sind diese Testverfahren beliebt.^{36, 37} Gerade auch zur Überprüfung von neuromuskulären und propriozeptiven Defiziten sowie von funktioneller Instabilität, z.B. nach Verletzungen, werden Einbeinstand-Tests eingesetzt.³⁸⁻⁴⁰

Je nach Fragestellung wählen Untersucher Testprotokolle auf festen oder weichen Unterlagen, mit geöffneten oder geschlossenen Augen und mit unterschiedlich langen Messzeiträumen. Auf einer weichen Standunterlage zählten Jerosch et al. beispielsweise die unfreiwilligen Bodenkontakte des contralateralen Beines als Indikator einer funktionellen Fußgelenksinstabilität.⁴¹ Neuerdings werden Einbeinstand-Tests häufiger auf Kraftmessplatten durchgeführt, womit es gelingt, Kräfte in drei Ebenen zu messen. Aus diesen Kräften lassen sich mit entsprechenden Algorithmen hochauflösende Parameter bestimmen, welche sich zur Beschreibung des Gleichgewichtsverhaltens als geeignet herausgestellt haben.⁴²⁻⁴⁴ Die hierbei häufig genutzten Größen sind ‚Sway Length‘ (SL, Länge des Schwankungsweges), ‚Sway Area‘ (SA; Fläche des Schwankungsbereiches) und ‚Sway Velocity‘ (SV; Geschwindigkeit der Schwankbewegungen), jeweils bezogen auf den ‚Center of pressure‘ (COP; Körperschwerpunkt) eines Probanden.

Wie zuvor beschrieben, basieren koordinative Fähigkeiten auf einem komplexen Zusammenspiel aus Sinnesorganen, Zentralnervensystem und Skelettmuskulatur, wobei sich die im Einzelnen führend einflussnehmenden Systeme häufig nicht klar voneinander abgrenzen lassen. So erlauben Einbeinstand-Tests mit geschlossenen Augen zwar die Untersuchung von propriozeptiven Fähigkeiten. Ein Problem bei dieser Methodik ist jedoch die Tatsache, dass sie komplexe koordinative Funktionen, einschließlich afferenter Informationen vom Vestibularsystem sowie motorische Fertigkeiten, ebenfalls misst.⁴⁵

1.4 Etablierte Testverfahren mit angrenzenden Untersuchungsschwerpunkten

Zur Beurteilung des FTT15 und der durch diesen Test führend abgebildeten Hauptbeanspruchungsformen, ist ein Vergleich mit etablierten sportmotorischen Tests aus den Bereichen Schnelligkeit, Koordination und anaerobe Kapazität hilfreich. Anerkannte Tests mit den genannten Untersuchungsschwerpunkten sollen im Folgenden näher erläutert werden.

Schnelligkeit / Frequenzschnelligkeit

Testverfahren der Schnelligkeit existieren sportartspezifisch in vielen Disziplinen. Zu nennen sind Tretfrequenz-Tests im Radsportbereich, Zugfrequenz-Tests beim Schwimmen und Rudern, aber auch komplexere Bewegungsabläufe gerade in den Ballsportarten (z.B. Dribbeln beim Fußball, Basketball und Hockey) und im Kampfsport (Schlagfrequenz beim Boxen). Am weitesten verbreitet sind Sprint-Tests zur Schnelligkeitsüberprüfung des Laufens, wobei auch hier nach erfolgter Beschleunigung häufig die Grundschnelligkeit erreicht wird. Sprint-Tests sind in jeder Form denkbar, häufig werden sie in Anlehnung an das Anforderungsprofil der Primärsportart strukturiert. Die gewählten Distanzen sind also sportartspezifisch (häufig zwischen 5 und 100 m) wobei gerade die kürzeren Entfernungen auch wiederholt, in Form von Pendelsprints oder mit komplexen Richtungswechseln durchlaufen werden. Zur genauen Erfassung der Laufgeschwindigkeiten haben sich im Leistungssportbereich Lichtschranken-Messsysteme durchgesetzt.

Neuromuskuläre Koordination

In einfachen Testverfahren der neuromuskulären Koordination sind Probanden aufgefordert, innerhalb eines definierten Testzeitraumes vorgegebene koordinative Aufgaben im Raum zu erfüllen. Dies können beispielsweise zielgerichtete Bewegungen des Rumpfes oder der Extremitäten, Winkelreproduktionen der Gelenke, oder Einbeinstand-Tests mit geöffneten oder geschlossenen Augen sein. Die Genauigkeit der Erfassung der jeweiligen Bewegung im Raum unterliegt dabei der genutzten Untersuchungsmethodik. Diese kann von einer einfachen qualitativen Erfassung und Beurteilung durch den Testleiter (z.B. Anzahl der unfreiwilligen Bodenkontakte beim Einbeinstand) bis zu hochempfindlichen mechanischen, elektronischen oder optischen Messverfahren reichen, wobei letztere eine quantitative und häufig sogar dreidimensionale Erfassung der Bewegungen im Raum ermöglichen. Die Differenz zwischen vorgegebener und erbrachter Bewegung im Raum gibt im Rahmen der

jeweiligen Fragestellung Hinweise auf die neuromuskulär koordinative Leistungsfähigkeit und mögliche koordinative Defizite.

Anaerobe Kapazität

Es existiert eine Vielzahl von anaeroben Belastungs-Tests, welche ihrer Dauer entsprechend, entweder als sehr kurze Tests (Dauer 1 – 10 s) oder kurze Tests (Dauer 20 – 60 s) klassifiziert werden können.²⁷ Zu den sehr kurzen Tests gehören Maximalkrafttests der Beinextensoren, kurze Sprints, Vertical Jump Tests oder der Margaria Stair-Climbing Test. Der WANt gehört nach dieser Einteilung zu den kurzen anaeroben Belastungs-Tests genau so wie bis zu 60 Sekunden dauernde Belastungen auf einem Laufbandergometer. Einige Autoren haben schon früh bis zur Erschöpfung fortgeführte Hochgeschwindigkeits-Laufbanduntersuchungen als Test der anaeroben Leistungsfähigkeit durchführen lassen,⁴⁶ wobei diese den Nachteil beinhalteten, dass keine mechanische Leistung erfasst wurde und der Endpunkt eher durch Angst des Probanden als durch einen physiologischen Grund determiniert wurde.

Margaria Stair-Climbing Test (MST)

Der Margaria Stair-Climbing Test war vor der Entwicklung des WANt einer der am besten bekannten Tests, mit dessen Hilfe man die, innerhalb eines Zeitraumes von weniger als 1 Sekunde erbrachte, maximale mechanische Leistung bestimmen konnte.⁴⁷ Von seinen Entwicklern wurde dieser Test intensiv genutzt um die Muskelenergetik während supramaximaler Kurzzeit-Belastungen zu erforschen. Beim Stair-Climbing Test startet der Athlet 2 m von einer Treppe entfernt, welche in 2er-Stufen-Schritten schnellstmöglich erklommen werden soll. Mit Hilfe von Stoppuhr, Lichtschranken oder Kontaktmatten wird die Zeit zwischen der 8. und 12. Stufe gemessen, diese Höhe soll ca. 1,75 m betragen. Anhand Formel 1.1 wird die maximale Leistungsfähigkeit („Peak Power“) des Athleten bestimmt. Der Wirkungsgrad der Belastungsform liegt um 25 %.⁴⁸ Auf dieser Voraussetzung basiert die Errechnung des Energieaufwandes.

$$Leistung(W) = \frac{Körpergewicht(kg) \times vertikalerAbstand(m) \times 9,8 \frac{m}{s^2}}{Zeit(s)}$$

Formel 1.1: Berechnung der maximalen Leistungsfähigkeit 'Peak Performance' beim Margaria Stair-Climbing Test⁴⁷

10 Sekunden Bob-Start Test (BST)

Im Jahr 2005 wurde mit dem Bob Start Test ein neues Laufband-Testverfahren zur führenden Beurteilung der anaerob-alaktaziden Kapazität vorgestellt.⁴⁹ Zur Durchführung wurde bei einem motorbetriebenen Laufband die Polarität des Motors umgekehrt, so dass dieser als Bremse und nicht als beschleunigendes Element des Laufbandes wirkte. Die Probanden standen aufrecht auf dem Laufband und hatten die Aufgabe, mit den Händen gegen eine sich in Brusthöhe befindliche Halterung zu drücken. Durch Aufbringen einer horizontalen Kraft gegen die Laufbandfläche sollte, nach erfolgtem Startsignal, für die Dauer von 10 Sekunden, das Laufband möglichst schnell gegen den mechanischen Widerstand rückwärtig bewegt werden.

Als zentrales Test-Kriterium wurde die innerhalb der 10 Sekunden Testdauer zurückgelegte Strecke erfaßt, zusätzlich dokumentierten die Autoren die Strecke der letzten 3 Testsekunden als Ermüdungsindikator. Der Name des Tests verweist auf die Parallelen zur Startsituation im Bob-Sport.

Kibele et al. konnten für den BST eine gute empirische Übereinstimmung mit anderen Tests für anaerob-alaktazide Kapazität finden und sehen in dieser Untersuchung eine wertvolle Alternative zu etablierten Labor-Tests an Kurbel-Ergometern oder Kraftmaschinen.⁴⁹

Wingate Anaerobic Test

Der Wingate Anaerobic Test (WAnT) wurde in den 70er Jahren im ‚Wingate Institute for Physical Education and Sport‘ in Israel entwickelt. Seit der Einführung seines Prototyps⁵⁰ hat er in Laboren auf der ganzen Welt als Test zur Bewertung von Muskelkraft, Muskelausdauer und Ermüdbarkeit Anerkennung gefunden.⁵¹ Einen wichtigen Grund für die Entwicklung des WAnT stellte der Mangel an einfach durchführbaren Tests der anaeroben Kapazität dar. Der WAnT nach Standardprotokoll erfordert eine 30 s Tretbewegung der Beine oder Kurbelbewegung der Arme gegen einen konstanten Widerstand. Dieser Widerstand ist vorbestimmt, um eine supramaximale Leistung und eine schon in den ersten Sekunden feststellbare Ermüdung zu generieren. Beim WAnT werden drei Parameter gemessen, wobei diese jeweils Mittelwerte über 3 oder 5 Sekunden Segmente darstellen: die Peak Power (PP) (vgl. Abb. 4.3, Punkt A) als höchste während des Tests erbrachte mechanische Leistung, die Mean Power (MP) als durchschnittliche Leistung über die 30 Sekunden Periode und der Fatigue Index (FI) als Grad des Leistungsabfalls während des Tests.

Maximales, den Widerstand überwindendes Laufen auf dem Laufband

Bei einem kürzlich als Alternativ-Belastung für die Diagnostik anaerober Leistungsfähigkeit vorgestellten maximalen Laufbandtest, erfordert die Methodik, dass die untersuchten Athleten mit einem Hüftgurt ein Seil hinter sich herziehen, welches an der Wand hinter der Anlage verankert ist.⁵² Über ein einfaches Computersystem konnten die Autoren die horizontale Zugkraft, die Laufgeschwindigkeit sowie die erbrachte Leistung über einen Testzeitraum von 30 Sekunden erheben. In Analogie zum WAnT wurden über 5-Sekunden Intervalle die maximale Leistung P_{max} , die mittlere Leistung P_{mean} sowie ein Fatigue Index $(P_{max} - P_{min} / P_{max})$ bestimmt. Vergleiche mit dem WAnT erbrachten weder für die maximale noch für die mittlere Leistung signifikante Unterschiede zwischen den beiden Testverfahren, so dass die Autoren ihren Laufbandtest als akzeptable Alternative zur Diagnostik der anaeroben Kapazität ansehen, bei der allerdings, im Vergleich zum Fahrradergometertest, die Blutlaktat-Werte sowie der Fatigue Index etwas höher ausfallen.

Da jeder sportmotorische Test mit seinen Stärken und Schwächen Teilbereiche der jeweiligen Fragestellung unterschiedlich gut abbilden kann, ist zur umfassenden Leistungsdiagnostik häufig die Bündelung wichtiger Tests im Sinne einer Testbatterie hilfreich. Hierbei können, zur leichteren Interpretation, einzelne Messergebnisse zu Koeffizienten zusammengefasst werden. Beispielhaft kann das Talent Diagnose Systems (TDS) der Werthner Sport Consulting KEG für die sportmotorische Leistungs- und Entwicklungsdiagnostik von Nachwuchssportlern im Ballsportbereich angeführt werden, wo die Ergebnisse von Tapping Übungen, verschiedener Sprint- und Sprungtests, Hindernis- und Ausdauerläufe sowie multipler Geschicklichkeitsübungen separat und im Altersgruppenvergleich dargestellt, aber auch in einem Koeffizienten zusammengefasst werden.³ Gerade komplexe Anforderungsprofile lassen sich anhand solcher Koeffizienten schneller auswerten und zur Leistungsbeurteilung und weiteren Trainingsplanung anschaulich darstellen.

1.5 Aufwärmen im Sport

Für die meisten Sporttreibenden im Breitensportbereich gehört ein Aufwärmprogramm zur Routine, im Leistungs- und Hochleistungssportbereich werden sich nur wenige Athleten finden, die ein Training oder einen Wettkampf ohne adäquates ‚Warm-Up‘ beginnen. Der feste Platz des Aufwärmens als Teil des Sportprogrammes wird über Jahre als normale Gewohnheit erlernt und wenig hinterfragt. Als Motiv für die Vorbereitung wird gerade von Freizeitsportlern die Verletzungsprävention angegeben,

eine Abnahme der elastischen und viskösen Widerstände im gesamten Bewegungsapparat soll hierfür ein möglicher Grund sein.¹⁴ Aktuelle Metaanalysen zeigen jedoch eine uneinheitliche Studienlage bezüglich signifikant verminderter Verletzungsraten nach Aufwärmen, mit nur geringen Evidenz-Vorteilen zu Gunsten einer Verletzungsreduktion.^{53, 54}

In Anbetracht der bei Sportlern weit verbreiteten und selbstverständlichen Ausübung von Aufwärmprogrammen, existiert erstaunlicherweise nur eine dünne und uneinheitliche wissenschaftliche Datenlage hinsichtlich effektiver ‚Warm-Up‘-bedingter Leistungsbeeinflussungen. In den vorhandenen Studien werden Aufwärmtechniken zumeist in zwei Hauptkategorien eingeteilt: passives und aktives Aufwärmen. Beim passiven Aufwärmen wird die Muskeltemperatur (T_m) durch externe Maßnahmen, beispielsweise heiße Bäder, Saunagänge oder die Nutzung von Wärmedecken angehoben. Bei fehlendem Verbrauch von Energiesubstraten erlaubt diese Methode die Überprüfung der ausschließlich temperaturvermittelten Effekte, ist jedoch im Trainings- und Wettkampfalltag nur selten realisierbar und daher eher akademischer Natur. Aktives Aufwärmen beinhaltet körperliche Aktivität und induziert vermutlich größere kardiovaskuläre und metabolische Veränderungen als die passive Form.

Obwohl zunehmend temperatur-unabhängige Effekte des aktiven Aufwärmens ebenfalls als Erklärung für Leistungssteigerungen herangezogen werden, wird weiterhin ein Grossteil der Aufwärm-Effekte der Temperatursteigerung per se zugeschrieben.

Mögliche Effekte des Aufwärmens im Sport

Temperatur-abhängige Effekte

- + Reduzierte Viskosität in Muskeln und Gelenken
- + Erleichterte Sauerstoffdissoziation vom Hämoglobin und Myoglobin
- + Beschleunigung metabolischer Reaktionen
- + Gesteigerte Nervenleitungsgeschwindigkeit
- Gesteigerte thermoregulatorische Belastung

Temperatur-unabhängige Effekte

- + Gesteigerte Muskeldurchblutung
- + Anheben des ‚Basis-Sauerstoffverbrauchs‘
- + Post-Aktivierungs-Potentierung der Muskulatur
- + Psychologische Effekte und gesteigertes Bereitschaftsniveau

Tabelle 1.2: Mögliche Effekte des Aufwärmens, modifiziert nach Bishop⁵⁵; + kennzeichnet leistungssteigernde Effekte, - kennzeichnet leistungsmindernde Effekte

Ein in seiner Dimension unklarer Anteil der Effekte basiert also auf der Tatsache, dass Arbeit der großen Muskelgruppen, durch stark erhöhte Wärmeproduktion, zu einem Anstieg der Muskel- (T_m) und Körperkerntemperatur (T_k) führt. Mit zunehmender

Temperatur steigt die Geschwindigkeit der Stoffwechselprozesse an, es kommt zu einer zunehmenden Enzymaktivität.¹⁴ Das Temperaturoptimum liegt etwa bei 38,5 – 39° C.⁵⁶ Im Rahmen der Temperaturerhöhung kommt es zu einer reduzierten Viskosität in Muskeln und Gelenken und damit zu reduzierten passiven Widerständen.⁵⁷

Schon früh konnte gezeigt werden, dass ein Temperaturanstieg im Gewebe, wie auch ein Absinken des pH-Wertes oder ein Anstieg des CO₂-Partialdruckes, zu einer Rechtsverschiebung der Sauerstoffbindungskurve des Hämoglobins mit folglich erleichterter O₂-Dissoziation ins Gewebe führt.⁵⁸ Ein über diesen Mechanismus gesteigertes Sauerstoffangebot im Muskel ist wahrscheinlich. Zu einer verbesserten aeroben Energiebereitstellung würde dieser Effekt jedoch nur im Falle einer Limitation der Sauerstoffverbrauchs-Kinetik durch eine mangelnde Sauerstoffzufuhr führen, was bisher zumindest für Belastungen im Bereich von Ruhe bis 60 % VO₂max widerlegt werden konnte.⁵⁹

Auch Prozesse, die mit der Entstehung der Erregung verknüpft sind (Chronaxie, Anstieg des Aktionspotentials, Leitungsgeschwindigkeit) laufen bei steigenden Temperaturen schneller ab.¹⁴ Durch erhöhte Erregbarkeit des ZNS lassen sich gesteigerte Reaktions- und Kontraktionsgeschwindigkeiten beobachten. Ebenfalls kommt es zu einer zunehmenden Empfindlichkeit vieler Sinnesrezeptoren, welches vornehmlich die koordinative Leistungsfähigkeit steigert.

Hinsichtlich temperatur-unabhängiger Effekte kann Aufwärmen auf psychologischer Ebene eine optimale Erregung des Nervensystems hervorrufen, insbesondere über eine Aktivierung zentraler Strukturen im Bereich der *Formatio reticularis*. So kann beim Athleten eine Erhöhung der Leistungsbereitschaft erreicht werden, welche wiederum Einstellung und Konzentration auf die sportliche Leistung verbessert.

Ein vorbelastungsvermitteltes Anheben der ‚Basis-Sauerstoffaufnahme‘ ist ebenfalls nicht direkt temperaturassoziiert, gilt jedoch in Hinblick auf eine anschließende Leistungssteigerung insbesondere bei Belastungen mittlerer Dauer (> 10 Sekunden, < 5 Minuten) als wichtiger Effekt des aktiven Aufwärmens. Während es keine Hinweise gibt, dass Aufwärmen die Sauerstoffaufnahme-Kinetik selbst verbessert, erscheint es wahrscheinlich, dass nachfolgende Belastungen mit einer erhöhten Basis-Sauerstoffaufnahme begonnen werden können. Infolgedessen wird ein geringerer Anteil der initialen Arbeit im anaeroben Bereich absolviert, wodurch mehr anaerobe Kapazität für einen späteren Zeitpunkt der Belastung erhalten bleibt. Insbesondere bei Aufgaben, die einen signifikanten Anteil anaerober Energiebeisteuerung erfordern, kann dieser als ‚Mobilisations-Theorie‘ beschriebene Zusammenhang die

Leistungsfähigkeit steigern und die Zeit bis zur Erschöpfung verlängern (vgl. Abb. 1.6).^{55, 60}

Multiple Studien in denen nach entsprechendem Aufwärmen bei der sich anschließenden Belastung eine Steigerung des aeroben Energiebeitrages und / oder ein geringeres Sauerstoffdefizit gezeigt werden konnte, unterstützen die ‚Mobilisations-Theorie‘.⁶¹⁻⁶³

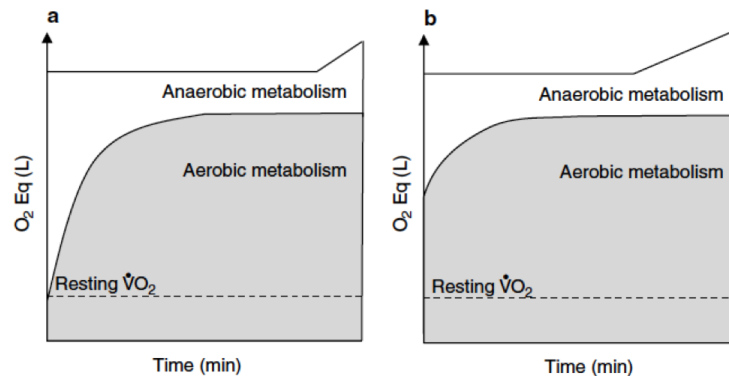


Abbildung 1.6: ‚Mobilisations-Theorie‘ beim ‚Warm-Up‘: Schematische Darstellung des aeroben und anaeroben Anteils der Energiebereitstellung bei einer körperlichen Maximalbelastung mit (a) und ohne (b) vorhergehendes Absolvieren eines Aufwärmprogrammes; O_2Eq = Sauerstoffequivalent, $\dot{V}O_2$ = Sauerstoffaufnahme; nach Bishop 2003⁵⁵

Ebenso als direkt mit aktivem Aufwärmen assoziiert aber temperaturunabhängig wird ein Zustand erhöhter Muskelkontraktilität und folglich kurzfristig gesteigerter Leistungsfähigkeit gesehen, der als ‚Post-Aktivierungs-Potentierung‘ bezeichnet wird.⁵⁵ Insbesondere wenn Vorbelastungen von hoher Intensität waren, Sprint Elemente und maximale willkürliche Kontraktionen enthielten sowie vor dem sich anschließenden Test eine ausreichend lange Pause (3–5 Minuten) gewährt wurde, konnte in mehreren Studien eine signifikante Zunahme der dynamischen Leistung gezeigt werden.^{64, 65} Erhöhte Ca^{2+} Spiegel im Zytosol und / oder eine Phosphorylierung von Leichtketten-Myosin stellen mögliche Erklärungen für diesen Leistungszuwachs dar.^{66, 67}

Eine weitere Erscheinung, welche günstig durch Aufwärmprogramme beeinflusst oder sogar vermieden wird, ist der so genannte ‚Tote Punkt‘, ein primär metabolisch zu erklärender Zustand, der bei intensiven dynamischen Beanspruchungen großer Muskelgruppen in den ersten Arbeitsminuten auftreten kann und mit Dyspnoe und einer Verkrampfung einhergeht, während die Belastung subjektiv als sehr hart empfunden wird. Untersuchungen konnten während dieses Zustandes hohe Laktatkonzentrationen, EKG-Veränderungen und Blutdruckspitzen objektivieren, wobei alle Parameter bei in gleicher Intensität fortgesetzter Belastung wenig später deutlich rückläufig waren und die subjektive Belastung ebenfalls sank.¹⁸

Als Erklärung für den ‚Toten Punkt‘ dient die Hypothese, dass bei plötzlichem Arbeitsanfang eine relative Hypoventilation in Relation zum Sauerstoffbedarf entsteht, wodurch Arbeitsmuskulatur und Atemmuskulatur ungenügend mit Sauerstoff versorgt werden. Mit der sich anschließenden Anpassung von Atmung und Kreislauf inklusive einer Umverteilung des Blutvolumens vom Splanchnikusgebiet in die Arbeitsmuskulatur tritt ein Gefühl der erneut verbesserten Leistungsbereitschaft ein, welches in der Sportwissenschaft häufig als ‚second wind‘ bezeichnet wird.¹⁸

1.6 Ermüdung im Sport

Die Ermüdungsforschung hat in der Medizin eine lange Tradition. Die Entdeckung elektrischer Potentiale durch L. Galvani Ende des 18. Jahrhunderts bildete in diesem Zusammenhang die Basis für elektrische Stimulationsversuche und detaillierte Experimente zur Muskelfunktion und -ermüdung. Größere Fortschritte in der Ermüdungsforschung waren verbunden mit der Entwicklung neuer Untersuchungsmethoden, beispielsweise der Anwendung supramaximaler Stimuli durch Verbesserung der EMG-Methoden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Weitere Erfolge erbrachte später die Analyse einzelner motorischer Einheiten oder auch die Einführung der Nadelbiopsie Anfang der 60er Jahre. Gerade in den letzten 15 Jahren eröffneten sich durch die Entwicklung der NMR-Technik (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy) oder der MRS-Technik (C-Magnetic Resonance Spectroscopy) neue Möglichkeiten den Muskelenergiestoffwechsel in situ bzw. die Substratregulation im Zitronensäurezyklus zu studieren.⁴

In Anlehnung an Enoka et al. und Sogaard et al. kann muskuläre Ermüdung als belastungsinduzierte Verminderung der Fähigkeit von Muskeln Kraft oder Energie zu produzieren definiert werden, woraufhin die Aufgabe als Folge der Ermüdung gegebenenfalls nicht fortgeführt werden kann.^{68, 69} Schon bei der Definition der muskulären Ermüdung gibt es jedoch auf Expertenebene Uneinigkeit und eine Vielzahl von differierenden Beschreibungen, die teilweise auch das Gefühl der subjektiv erfahrenen Ermüdung oder funktionelle MRI-Untersuchungsergebnisse mit einschließen.^{70, 71}

Ermüdung stellt im Training einerseits ein notwendiges Ziel dar, um überhaupt Adaptation als Folge des Wechsels von Belastung, Ermüdung und Erholung auszulösen und einen Trainingseffekt zu erzielen.⁴ Sie ist also Voraussetzung für sportliche Leistungsfähigkeit, da nur wiederholte Belastungen, die zu

Ermüdungserscheinungen führen, Überkompensationsprozesse mit Anpassungswirkungen im Organismus auslösen.⁷² Andererseits sind ermüdungsbedingte, leistungsmindernde Veränderungen, beispielsweise in der Bewegungskoordination, unter verschiedenen Aspekten unerwünscht. So gilt es, etwa unter dem Wettkampfaspekt, koordinative Verschlechterungen und einen möglicherweise daraus resultierenden Leistungsabfall zu verhindern oder auch unter dem Aspekt der Stabilität und Kontinuität den Lernprozess und den Erwerb gut koordinierter Bewegungsmuster nicht durch negative Einflussfaktoren zu verzögern oder gar zu gefährden.⁴

Zur näheren Strukturierung von Ermüdungserscheinungen kann eine Unterscheidung zwischen einer akuten und einer chronischen Form der Ermüdung erfolgen. Erstere beinhaltet Ermüdungserscheinungen im Anschluss an eine akute muskuläre Belastung, letztere können noch Tage oder Wochen nach einer Beanspruchung festgestellt werden. Sowohl einzelne Muskelgruppen als auch der Gesamtorganismus können betroffen sein.¹⁸

Ende des 20. Jahrhunderts wurde auf Expertenebene kontrovers diskutiert, ob Ermüdung zentraler oder peripherer Natur sei und ob die Elektrizität oder die Chemie maßgeblich als Ursache für Ermüdung aufgeführt werden könne. Schon damals gab es vermehrt Anhänger der Theorie, dass sich beide Mechanismen nicht gegenseitig ausschließen, sondern für die im Rahmen von Ermüdung einhergehenden Veränderungen zusammen verantwortlich sind. „Obviously fatigue cannot be ‚all in electricity‘ or ‚all in chemistry‘: both are required. There are two extreme hypothesis about fatigue, that there is something wrong with energy transduction processes in the muscle fibrils, or that something is wrong with activation, but they are not mutually exclusive. In fact, we have reason to think that both operate“.⁷³

Ermüdung entsteht wenn einer oder mehrere der physiologischen Prozesse, die daran beteiligt sind, dass die kontraktilen Proteine Kräfte generieren, beeinträchtigt werden. Dies kann von der Anhäufung von Metaboliten in den Muskelfasern bis zu inadäquaten motorischen Signalen im Motorkortex reichen (vgl. Tab. 1.3). Heute herrscht die Meinung vor, dass es nicht einen global verantwortlichen Mechanismus für die muskuläre Ermüdung gibt, sondern dass die jeweils beeinträchtigten Mechanismen grundsätzlich aufgabenabhängig sind. Im englischen Sprachraum wird dieses Prinzip als ‚task dependancy of muscle fatigue‘ bezeichnet.⁶⁸ Der Ort der Beeinträchtigung hängt also von der durchgeführten Tätigkeit ab. Es existiert keine solitäre Ursache der muskulären Ermüdung, und der jeweils dominierende Mechanismus ist spezifisch für

diejenigen Prozesse, welche im Rahmen der ermüdenden Aufgabe beansprucht werden.⁷⁴

Voellestad bestätigte 1995 die oben genannte ‚task dependency‘ explizit auch für metabolische Veränderungen im Muskel. So variieren dem Autor nach die ermüdungsbedingten oder im Zusammenhang mit Ermüdung auftretenden metabolischen Änderungen stark mit unterschiedlichen Aufgaben, Muskelaktivitäten und Intensitäten. Die Bedeutung biochemischer Veränderungen für den unter Ermüdung zu beobachtenden Kraftverlust sei daher auch unterschiedlich einzuschätzen, und die Ergebnisse nicht von einer Kondition auf die andere übertragbar.⁷⁵

Kent-Braun konnte anhand einer Untersuchung fortwährender isometrischer, maximaler Kontraktionen der Wadenmuskulatur zeigen, dass zentrale Faktoren, welche nicht mit einer veränderten peripheren Erregbarkeit assoziiert waren, für diese spezielle Belastung mit etwa 20 % zur muskulären Ermüdung beitrugen. Der verbleibende Anteil war intramuskulären (z.B. metabolischen) Faktoren zuzuschreiben.⁷⁶ Dass auch in diesem Zusammenhang in weiteren Veröffentlichungen den zentralen Faktoren der Ermüdung im Vergleich zu Kent-Braun sowohl höhere als auch vernachlässigbar geringe Bedeutung eingeräumt wurde,^{77, 78} verdeutlicht erneut, dass Beeinträchtigungen auf allen Ebenen der willkürlichen Muskelkontraktion bestehen können und dass eine ausgeprägte Aufgaben-Spezifität besteht, die keine allgemeinen Antworten zulässt.⁶⁸

**Ermüdungsbedingte Beeinträchtigung willkürlicher Muskelkontraktion
- Orte und Mechanismen**

- Frontalhirn (Motivation und damit Beanspruchungsintensität und Zahl der aktivierten motorischen Einheiten)
- Rückenmark (segmentale afferente Hemmung, Muskelspindelinput)
- Peripherer Nerv (Synapse, Nervenleitgeschwindigkeit und Neurotransmittererschöpfung)
- Muskelfasermembran (motorische Nervenendplatte)
- Transversales Tubulussystem (Erregbarkeit)
- Kalzium-Freisetzung
- Aktin-Myosin-Interaktion (Zahl der Brückenbildungen)
- Entleerung von Kreatinphosphatspeichern in der Muskelzelle
- Laktatanhäufung in der Muskelzelle
- Entleerung von intramuskulären Glykogenspeichern
- Anstieg von Ammoniak
- Absinken des Blutglukosespiegels
- Intrazellulärer Kaliumverlust bzw. extrazelluläre Kaliumanhäufung
- Hormonelle Dysbalancen

Tabelle 1.3: Mögliche Orte und Mechanismen der ermüdungsbedingten Beeinträchtigung willkürlicher Muskelkontraktionen (in Anlehnung an Hollmann¹⁸)

Eine neuerliche Diskussion bezüglich des Einflusses peripherer und zentraler Ermüdungsmechanismen erbrachte das insbesondere von Noakes et al. befürwortete ‚Central governor model‘ (CGM), welches periphere metabolische Faktoren zur Erklärung von Ermüdungserscheinungen grundsätzlich in Frage stellte. Das CGM postuliert, dass das Gehirn in Form des Unterbewusstseins während jeder körperlichen Belastung die Anzahl der aktiven motorischen Einheiten mit dem Ziel einer Aufgabenbewältigung in möglichst effizienter Art und Weise reguliert. Die zentral gesteuerte Rekrutierung motorischer Einheiten begrenzt demnach das Ausmaß körperlicher Belastung um die Homöostase zu wahren und ermüdungsbedingtes Systemversagen („catastrophic system failure“) wie beispielsweise Rigor zu vermeiden.⁷⁹

In Ihrer kritischen Übersichtsarbeit zum ‚Central governor model‘, schließen Weir et al. allerdings mit der Feststellung, dass die Suche nach einer großen vereinenden Theorie der neuromuskulären Ermüdung aussichtslos sei. Weder das CGM noch periphere Ermüdungsmechanismen seien in der Lage alle durch körperliche Belastung verursachten Ermüdungserscheinungen zu erklären. Weir et al. befürworten weiterhin die ‚Task Dependency‘ als im Vergleich zum CGM logischere Sichtweise, welche versuche, alle Ermüdungs-Phänomene anhand eines gemeinsamen Mechanismus zu erklären und sowohl periphere als auch zentrale Faktoren einbeziehe.⁸⁰

Ermüdung und Koordination:

Potentielle Veränderungen der Bewegungskoordination durch Ermüdung fanden bisher in der Forschung relativ wenig Beachtung. Die zu dieser Fragestellung vorhandenen experimentellen Untersuchungen erweisen sich als entweder sehr praxisorientiert oder nur auf eine mögliche Ursache der Ermüdung beschränkt.⁴ In der Mehrzahl der Fälle thematisieren sie ausschließlich die Zusammenhänge von Ermüdung und motorischem Lernen, welche gerade in der sportwissenschaftlichen Betrachtung und Trainingsplanung eng verknüpft sind.^{81, 82}

In einer der wenigen Analysen über den Zusammenhang von Koordination und Ermüdung konnte Hahn für den Schwimmsport (hier: Brustschwimmen) ebenfalls deutliche koordinative Mängel unter Ermüdungsbedingungen zeigen, welche sich in einem Geschwindigkeitsabfall durch verkürzte Zykluswege äußerten und durch eine Erhöhung der Frequenz in der ersten Phase der Ermüdung hinausgeschoben werden konnten. In Fällen von extremen Frequenzerhöhungen konnten sogar grundlegende Fehler in der Bewegungstechnik nachgewiesen werden.⁸³

Nach Weineck bewirkt Ermüdung eine zunehmende Hemmung in den für die motorische Steuerung verantwortlichen zentralnervösen Strukturen. Die Weiterführung

einer gegebenen koordinativen Aufgabe wird vermehrt durch den Einsatz von so genannten Hilfsmuskeln bewerkstelligt. Dadurch kommt es zu unökonomischen und unrationellen Bewegungsexkursionen, die sich in ausladenden Bewegungen und einem Abbau der figuralen Leistung manifestieren.¹⁴

Pedersen et al. beschreiben eine ermüdungsbedingte Verschlechterung der propriozeptiven Leistungsfähigkeit, welche selbst einen wesentlichen Bestandteil der Koordination ausmacht. Die Autoren schließen aus ihren Ergebnissen, dass die Propriozeptoren eines ermüdeten Sportlers – insbesondere die Muskelspindel – in der räumlich-zeitlichen und kraftdosierenden Feinabstimmung aufgrund eines gestörten Informationsinputs zunehmend Fehler machen.⁸⁴

Vor dem Hintergrund einer unter Ermüdung möglicherweise reduzierten koordinativen Leistungsfähigkeit haben sich in der Vergangenheit Sportwissenschaftler immer wieder dafür ausgesprochen, sportmotorisches Lernen und Techniktraining in ausgeruhtem Zustand durchzuführen, zumindest aber zeitlich vor dem Konditionstraining, um ein optimales Zusammenspiel der einzelnen Muskelgruppen im Sinne der intra- und intermuskulären Koordination, sowie eine höchstmögliche Konzentrationsfähigkeit zu gewährleisten.^{85, 86} In Anbetracht neuer Forschungsergebnisse, die dieses traditionelle Verständnis in Frage stellen, gibt es heute jedoch auch Befürworter eines Techniktrainings sowohl in ausgeruhtem Zustand wie auch im Zustand der Ermüdung.⁸³

1.7 Fragestellung

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war:

- I. Die Beschaffenheit eines typischen Leistungsprofils beim FTT15 zu analysieren und zu beschreiben. Dies beinhaltet auch eine erste Sammlung von Referenzdaten.

Im Detail sollte bezüglich des Leistungsprofils geklärt werden:

- a. In welchem Bereich liegen die beim FTT15 erzielten Tapping-Frequenzen?
 - b. Wie sieht eine charakteristische Leistungskurve (der Tapping-Frequenzen) beim FTT15 aus? Existiert eine Beschleunigungsphase welche zu einer ‚Höchstgeschwindigkeit‘ führt? Gibt es einen ‚Ermüdungsprozess‘ (Abnahme einzelner Leistungsparameter) während der 15 Sekunden des FTT? In welchen Dimensionen befindet sich eine möglicherweise über den Testzeitraum zu dokumentierende Leistungsabnahme?
 - c. In welchem Maße werden Probanden durch den FTT15 objektiv und subjektiv beansprucht?
- II. Die Überprüfung des Testgütekriteriums Reliabilität für den FTT15. Hierbei sollte die Retest-Reliabilität im Vordergrund stehen.
 - III. Die Auswirkung einer spezifischen Vorbelastung (aerob / anaerob) auf die durch den FTT15 abgebildeten leistungsphysiologischen Parameter zu untersuchen.

2 MATERIAL UND METHODEN

Die Datenerhebung fand im Zeitraum Oktober 2004 bis Juli 2005 in den Räumlichkeiten des Forschungsbereiches Sport- und Bewegungsmedizin der Universität Hamburg statt.

2.1 Messverfahren

2.1.1 Spirometrie

Die spirometrischen Daten wurden mit dem stationären Spiroergometriesystem MetaMax [MetaMax Ergometriesystem, Version 3.21, Cortex Biophysik GmbH, Borsdorf/Leipzig, Deutschland] während der gesamten Untersuchung aufgezeichnet. Das System arbeitet über ein Mischkammerverfahren, welches aus einem Intervall von 10 Sekunden die spirometrischen Parameter aufzeichnet und mittelt. Die Auswertung der gemessenen Daten erfolgte mit dem Programm MetaSoft [Version 1.11.5, Cortex Biophysik GmbH, Borsdorf/Leipzig, Deutschland]. Abbildung 2.1 zeigt das eingesetzte Spiroergometriesystem sowie einen Screenshot der verwendeten Software.

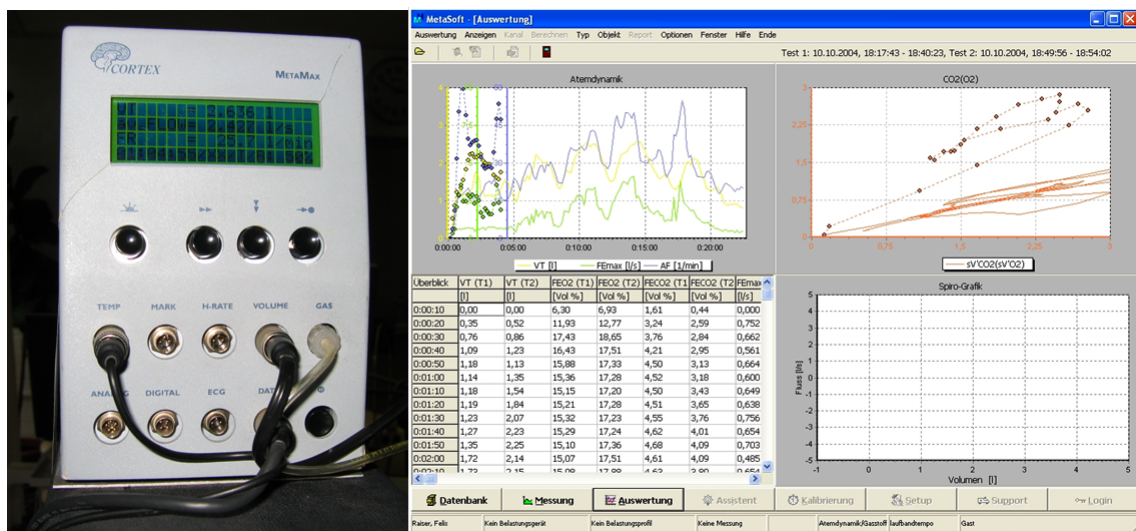


Abbildung 2.1: Spirometriegerät MetaMax (links), Screenshot der genutzten Software MetaSoft (rechts)

2.1.2 Herzfrequenzmessung

Die Herzfrequenz wurde mittels eines Herzfrequenz-Messgeräts Polar S810i [Polar Electro GmbH, Büttelborn, Deutschland] kontinuierlich während des gesamten Testablaufes aufgezeichnet. Die Datenübertragung erfolgte mit einem Brustgurtsender

[Polar Electro GmbH, Büttelborn, Deutschland]. Nach Testende ließen sich die Daten mit einem Personal Computer und der dazugehörigen Software [Polar Precision Pro, Version 3.02, Polar Electro GmbH, Büttelborn, Deutschland] über eine Infrarotschnittstelle auslesen, darstellen und speichern.

2.1.3 Laktatkonzentration im Kapillarblut

Zur Blutlaktatbestimmung wurde Kapillarblut aus dem mechanisch hyperämisierten rechten Ohr läppchen entnommen, das mit einer Blutlanzette [Solofix, B. Braun Petzold GmbH, Melsungen, Deutschland] angestochen wurde. Es folgte das Auffangen des Blutropfens mit einer 20 µl End-zu-End-Kapillare [Eppendorf-Netheler-Hinz GmbH, Hamburg, Deutschland] in einem Probegefäß mit 1000 µl Systemlösung [Eppendorf-Netheler-Hinz GmbH, Hamburg, Deutschland], welches geschüttelt und bis zur Analyse aufbewahrt wurde (Lagerung < 12 h bei Raumtemperatur, > 12 h bei 8 - 12° C).

Der Untersucher trug während der Untersuchung Handschuhe „Vasco ungepudert“ [B. Braun Petzold GmbH, Melsungen, Deutschland].

Zur Laktatanalyse kam das Gerät Biosen 5130 AutoCal [EKF diagnostic GmbH, Barleben / Magdeburg, Deutschland] zur Anwendung. Bei diesem Messgerät wird die Laktatkonzentration enzymatisch-amperometrisch bestimmt (MB 4,5-270 mg/dl bzw. 0,5-30 mmol/l Laktat, Unpräzision <1,5 % bei 12 mmol/l). Beim Ansaugen in eine Messkammer (Ansaugvolumen ca. 90 µl) passiert die Probenlösung eine Membran, auf der Laktat-Dehydrogenase immobilisiert ist, welche eine Oxidation des Laktats katalysiert. Das neben Pyruvat entstehende Wasserstoffperoxid wird nach Passage einer zweiten Membran an einer Platinelektrode bei + 600 mV nach folgender Reaktionsgleichung oxidiert: $H_2O_2 = 2H^+ + O_2 + 2e^-$. Die Elektronen erzeugen ein Mess-Signal (Strom-Zeit-Kurve), dessen maximaler Anstieg zur Laktatkonzentration in der Probe proportional ist (Maximum-Bestimmung der ersten Ableitung nach der Zeit). Mit einem angeschlossenen Thermodrucker [DPU-414, Seiko, Willich, Deutschland] konnten die Messergebnisse zur Auswertung ausgedruckt werden.

2.1.4 RPE-Score („Borg Skala“)

Zur subjektiven Einschätzung der Belastungsintensität wurde von den Probanden nach jeder Laufbandergometer-Untersuchung sowie nach dem Foot-Tapping Test der Grad der Erschöpfung in Form des RPE-Scores (Borg Skala, ‚Rate of Perceived Exertion‘) angegeben und dokumentiert.⁸⁷ Hierbei wurde die 15 Punkte Borg Skala (6-20) genutzt, da ihre Ergebnisse im Vergleich zu anderen Skalen am besten mit objektiven

Leistungs-Parametern korrelieren.⁸⁸ Der Wert 6 entspricht dabei einer sehr leichten und der Wert 20 einer höchst anstrengenden Belastung.

2.1.5 Kraftmessplatte

Für die Messung von Kräften, Zeit – und Richtungsparametern beim Foot-Tapping Test sowie beim Einbeinstand-Test stand eine Mehrkomponenten-Messplattform 9281CA [Kistler Instrumente GmbH, Ostfildern, Deutschland] zur Verfügung. Die Messplattform (Fläche 40 x 60 cm) besteht aus einer Deckplatte mit vier eingebauten 3-Komponenten-Kraftsensoren. Die Deckplatte ist in Leichtbauweise mit Aluminium-Deckblechen aufgebaut.

Die Ausgänge der vier 3-Komponenten-Kraftsensoren sind intern auf 8 Kanäle reduziert, so dass Kraft- und Momentmessungen in allen drei Achsen möglich sind. Die Plattform ist fest im Boden verschraubt, um Artefakte durch ungewollte Schwingungen zu eliminieren. Abbildung 2.2 zeigt die verwendete Kraftmessplatte sowie ein Schema der von ihr erfassten Kraftvektoren.

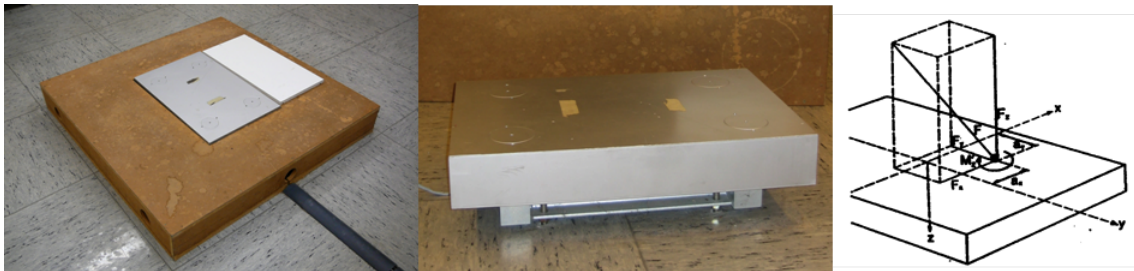


Abbildung 2.2: Kraftmessplatte mit und ohne Rahmen, Schema der erfassten Kraftvektoren

2.1.6 Datenerhebungssoftware SIMI Motion

Die Erfassung und Auswertung der mit der Kraftmessplatte erzeugten Daten erfolgt anhand der Software SIMI Motion [Version 6.1 für Windows, SIMI Reality Motion Systems GmbH, Unterschleißheim, Deutschland] auf einem Personal Computer mit Windows 2000 Betriebssystem [Microsoft Inc., USA].

2.1.7 Laufbandergometer

Die aerobe Leistungsfähigkeit der Probanden wurde mittels eines standardisierten Stufentests (Laufbandsteigung 2 %, Beginn des Laufens mit 8 km/h, Steigerung der Laufgeschwindigkeit um jeweils 2 km/h alle 3 min mit 30 s Pause zur Blutentnahme, Abbruch bei subjektiver Erschöpfung) auf dem motorisierten Laufbandergometer

‚Venus‘ [Lauffläche 200 x 75 cm, h/p/cosmos sports & medical GmbH, Nussdorf-Traunstein, Deutschland] bestimmt.

Auf dem genannten Laufbandergometer fanden außerdem aerobe Ausdauer-Belastungen sowie anaerobe Sprint-Belastungen statt. Während der anaeroben Laufbandbelastung trugen die Probanden ein Brustgeschirr [h/p/cosmos sports & medical GmbH, Nussdorf-Traunstein, Deutschland]. Dieses war mit einem ca. 2 m langen Seil und einem Karabiner Haken an einer sich an der Decke zentral über dem Laufband befindlichen Metall-Öse befestigt. Die Länge des Sicherungsseils wurde so eingestellt, dass für Probanden keine Gefahr bestand, im Rahmen der Testdurchführung auf dem Laufband zu stürzen.

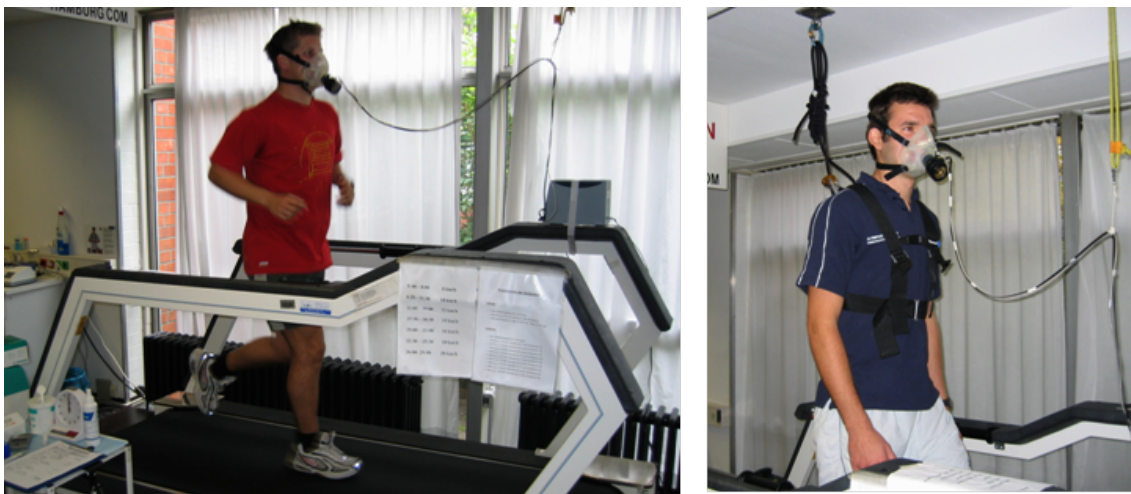


Abbildung 2.3: links: Proband mit Spirometermaske und Spirometriegerät auf dem für die Vorbelastungen und den Stufentest genutzten Laufbandergometer Venus der Firma h/p/cosmos; rechts: Proband mit Sicherheits-Brustgeschirr

2.1.8 Körpergewicht

Das Gewicht der Probanden wurde mit Hilfe der mechanischen Balkenwaage ‚Seca 710‘ [Seca, Vogel & Halke GmbH & Co., Hamburg, Deutschland] mit Tarierrad zur Einstellung der Nullstelle bestimmt.

2.1.9 Körperfettanteil

Der Anteil des Körperdepotfettes wurden auf der Grundlage einer metrischen Erfassung der Hautfaltendicke an zehn repräsentativen Stellen des Körpers bestimmt. Hierbei kam die Kalipermetrie nach Parizkova⁸⁹ zum Einsatz. Mit einem Kaliper ‚Harpenden Skinfold Caliper‘ [baty, West Sussex, England] wurde die doppelte

Hautfalte durch Abheben der Haut mittels Zeigefinger und Daumen gemessen, einem standardisierten und in der Sportpraxis viel genutzten Verfahren.⁹⁰

2.2 Studiendesign

2.2.1 Vorbelastungsformen

Die gewählten Beanspruchungsformen ‚aerobe Ausdauer‘ und ‚anaerober Sprint‘ wurden so gewählt, dass sie als möglichst typisch für den Trainingsalltag von gut trainierten Leistungssportlern im Spisportbereich gelten konnten. Dies sollte die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Studie von standardisierten Laborbedingungen zur praxisorientierten Umsetzung erleichtern.

2.2.1.1 Aerobe Vorbelastungsform

Um die notwendige Geschwindigkeit für eine aerobe Ausdauer-Belastung auf dem Laufband zu ermitteln, (Laufbandsteigung 2 %, Laufbandgeschwindigkeit individuell für 65 % VO_2max , Laufzeit 30 min) wurden die bereits vorliegenden individuellen Leistungsdaten aus dem Stufentest genutzt.

2.2.1.2 Anaerobe Vorbelastungsform

Die anaerobe Sprint-Belastung auf dem Laufband (5 min Einlaufen bei Laufbandgeschwindigkeit 8 km/h, Laufbandsteigung 2 %, 30 s Pause zur Blutentnahme, dann Laufbandgeschwindigkeit 22 km/h, Laufbandsteigung 7,5 %, Belastungszeit: bis zur subjektiven Erschöpfung) ist ein in der Sportmedizin gängiges Testverfahren für anaerobe Kapazität.⁹¹

2.2.2 Foot-Tapping Test (FTT15)

Auf einer Mehrkomponenten-Messplattform 9281C [Kistler Instrumente GmbH, Ostfildern, Deutschland] wurde ein Foot-Tapping Test durchgeführt, bei dem die Probanden in einem Testzeitraum von 15 Sekunden eine möglichst hohe Anzahl an Bodenkontakten realisieren sollten. Auf der Kraftmessplatte setzte hierbei nur der Fuß des zuvor ermittelten dominanten Beins auf, der zweite Fuß wurde in gleicher Höhe auf dem Rahmen der Messplatte aufgesetzt. Die Probanden waren instruiert, nach jedem Plattenkontakt die Platte wieder messbar zu verlassen. Diese Vorgehensweise

ermöglichte eine klare Abgrenzung zwischen Sprung- und Standphase. Die Testleiter starteten die Messung manuell zum Zeitpunkt des ersten Plattenkontaktes.



Abbildung 2.4: Proband bei der Durchführung des FTT15 auf einer Kraftmessplatte

Bei allen Messungen auf der Kraftmessplatte trugen die Probanden weder Schuhe noch Socken. Als dominantes Bein galt jenes, mit dem die Probanden ihren Angaben zufolge eher einen Fußball schießen würden.

2.2.3 Einbeinstand-Test

Auf der Mehrkomponenten-Messplattform 9281C [Kistler Instrumente GmbH, Ostfildern, Deutschland] wurden Einbeinstand-Tests mit geschlossenen Augen durchgeführt. Die Probanden standen dabei mit dem zuvor ermittelten dominanten Bein mittig auf der Messplattform und waren instruiert, ihr Gleichgewicht bestmöglich zu halten. Der Fuß des anderen Beins sollte die Messplatte nicht berühren, die Probanden waren jedoch aufgefordert, es nicht höher als 10 cm über der Platte zu halten. Ein Abstützen mit dem Schwungbein führte zu einem Messabbruch. Die Probanden wurden instruiert, in eine sog. „Achtsamkeitshaltung“ überzugehen. Dabei befand sich das Knie des Standbeines in ca. 135° Beugehaltung. Hierdurch wurde eine Haltung mit durchgestrecktem Knie vermieden, sowie die Belastung der Knie umspannenden Muskulatur sichergestellt. Die Arme konnten zur Stabilisierung des Gleichgewichtes genutzt, sollen jedoch ebenfalls in Ruhe gehalten werden.

Sobald die Probanden die Messplatte betreten hatten, startete der Testleiter innerhalb der ersten Sekunde die Messung, welche 7 Sekunden andauerte. Als Messwert wurde das Ausmaß des Schwankweges des Körperschwerpunktes (Sway Length) erfasst.



Abbildung 2.5: Proband bei der Durchführung des Einbeinstand-Test

2.2.4 Durchführung

Zur Untersuchung der oben formulierten Fragestellungen wurden randomisiert zwei Probanden-Gruppen gebildet, die unabhängig voneinander unterschiedliche Versuchsprotokolle durchführten.

2.2.4.1 Gruppe A (abwechselnde Testinhalte)

Die Probanden der Gruppe A ($n = 25$) führten in randomisierter Reihenfolge an jeweils 6 Test-Terminen innerhalb von ca. 2 Wochen aerobe oder anaerobe Vorbelastungen auf dem Laufband sowie anschließend Einbeinstand-Tests und Tapping-Tests auf einer Kraftmessplatte durch. Bei der Hälfte der Test-Termine applizierten die Probanden für die auf der Kraftmessplatte durchgeführten Tests zusätzlich Kniebandagen. Die hierbei erhobenen Daten sind nicht Grundlage dieser Arbeit, sondern zentraler Bestandteil einer separaten Studie.

An den ersten zwei Test-Terminen fand die Durchführung des Einbeinstand-Tests und Tapping-Tests nach vorherigem Aufwärmen auf dem Laufband (5 min, Laufbandsteigung 2 %, Laufbandgeschwindigkeit 5 km/h) ohne weitere Vorbeanspruchung statt. Im Anschluss erfolgte auf dem Laufband entweder die Ermittlung der aeroben Leistungsfähigkeit oder eine anaerobe Sprint-Belastung.

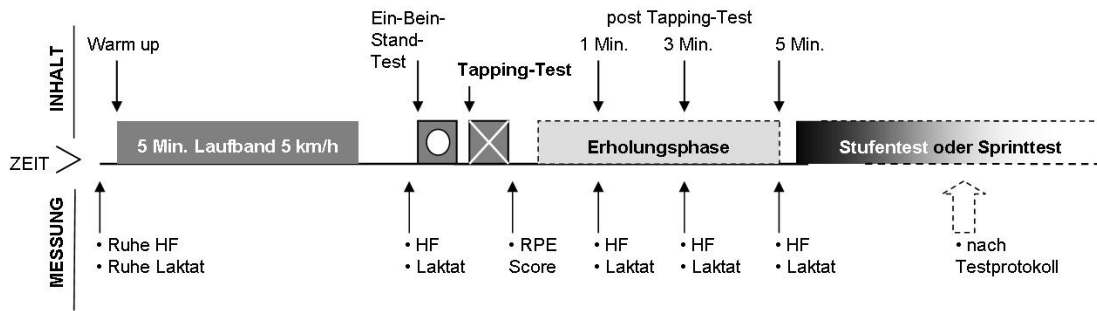


Abbildung 2.6: Zeitleiste mit schematischer Darstellung der Durchführung und Reihenfolge der Testinhalte, Test-Termin 1 und 2

Zur Ermittlung der aeroben Leistungsfähigkeit wurde ein standardisierter Stufentest durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Tests galten als eigenständige Leistungskriterien sowie als Basis für die Bestimmung der Intensität von aeroben Vorbelastungen für spätere Test-Termine. Beim Stufentest wurden die Laktat-Werte aus Blut des mechanisch hyperämisierten Ohrläppchens vor der Belastung, nach Beendigung jeder Laufgeschwindigkeitsstufe, am Belastungsende sowie 1, 3 und 5 Minuten nach Belastungsende bestimmt.

Die erste anaerobe Sprint-Belastung diente insbesondere der Habitualisierung an hohe Laufgeschwindigkeiten auf einem Laufband. Auch bei dieser Belastungsform wurden die Laktat-Werte aus Blut des mechanisch hyperämisierten Ohrläppchens vor Belastung, nach Beendigung der Einlaufphase, nach Beendigung der Sprint-Belastung sowie 1, 3 und 5 Minuten nach Belastungsende bestimmt.

An den Test-Terminen 3 - 6 führten die Probanden in randomisierter Reihenfolge jeweils zwei aerobe Vorbelastungen und zwei anaerobe Vorbelastungen auf dem Laufband durch.

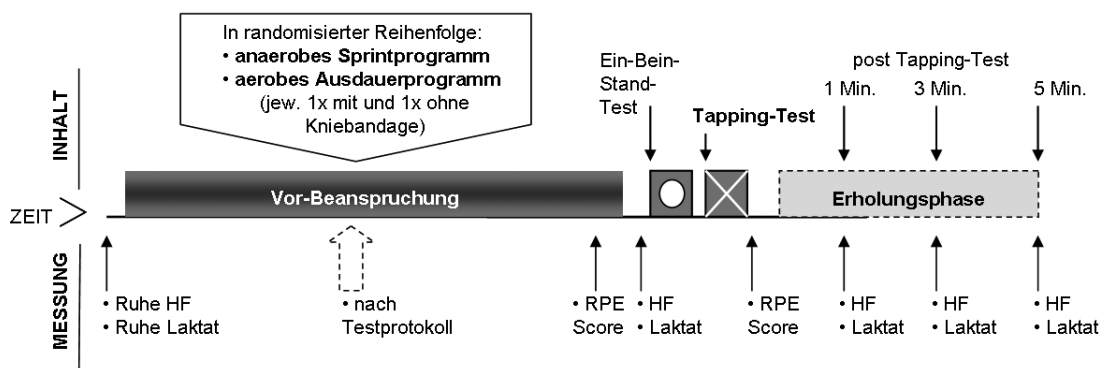


Abbildung 2.7: Zeitleiste mit schematischer Darstellung der Durchführung und Reihenfolge der Testinhalte, Test-Termin 3 bis 6

Im sofortigen Anschluss an die jeweilige Vorbelastung fanden die oben beschriebenen Tests (EST und FTT15) auf der Kraftmessplatte statt.

An allen Test-Terminen wurden die respiratorischen Parameter während der Laufbandbelastungen mittels Spirometriesystem ‚MetaMax‘ kontinuierlich erhoben. Die Herzfrequenz wurde kontinuierlich während aller Tests auf dem Laufband, wie auch auf der Kraftmessplatte, aufgezeichnet.

Bei jedem Proband wurden vor dem jeweiligen Laufband-Test das Gewicht und der Körperfettanteil bestimmt. Nach Belastungsende der jeweiligen Laufbandbelastung sowie nach Durchführung des Tapping-Tests, gaben die Probanden das subjektiv erfahrene Maß der Erschöpfung als numerischen Wert der Borg Skala an.

2.2.4.2 Gruppe B (bleibende Testinhalte)

Die Probanden der Gruppe B (n=10) führten an 6 aufeinander folgenden Test-Terminen innerhalb eines Zeitraumes von ca. zwei Wochen ein Testprogramm durch, welches aus Aufwärmen auf dem Laufband (5 min, Laufbandsteigung 2 %, Laufbandgeschwindigkeit 5 km/h) und anschließender Testdurchführung auf der Kraftmessplatte (EST und FTT15) bestand. Die Laktat-Werte wurden vor dem Aufwärmen, vor Beginn der Tests auf der Kraftmessplatte, sowie 1, 3 und 5 Minuten nach FTT15-Ende bestimmt. Auch in dieser Gruppe wurde die Herzfrequenz kontinuierlich und der RPE-Wert nach FTT15-Ende aufgezeichnet. Die Inhalte der folgenden 5 Test-Termine waren mit dem hier beschriebenen identisch.

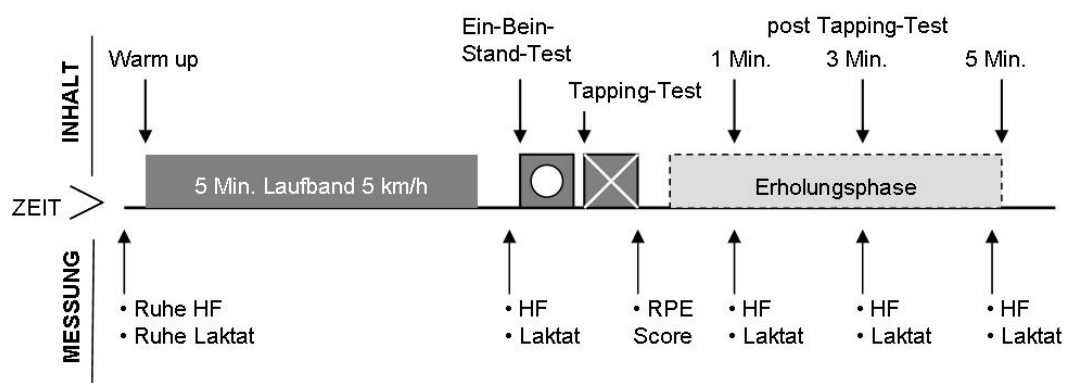


Abbildung 2.8: Zeitleiste mit schematischer Darstellung der Durchführung und Reihenfolge der Testinhalte, Gruppe B

2.3 Probanden

Als Probanden standen vorwiegend männliche Hockeyspieler der 3 höchsten deutschen Spielklassen aus dem Raum Hamburg und leistungssportlich aktive

Tennisspieler zur Verfügung. Außerdem wurden männliche Sportler aus anderen Sportsportarten und dem Laufsportbereich mit vergleichbaren Leistungsniveaus und Trainingsintensitäten in das Probandenkollektiv aufgenommen.

Durch regelmäßiges Sprinttraining und Skipping-Übungen im Trainingsbetrieb kannten die Probanden dem Foot-Tapping Test ähnliche Belastungsformen. Die Probanden wurden darauf hingewiesen, am Vortag der Untersuchung nicht zu trainieren. Außerdem wurden sie gebeten, an den Tagen und Vortagen der Tests auf kohlehydratreiche Ernährung zu achten. Eine Glykogenverarmung wurde anamnestisch und anhand der Laktatleistungskurve ausgeschlossen. 24 Stunden vor ihrem jeweiligen Test durften die Probanden keinen Alkohol konsumieren.

An anthropometrischen Daten wurde bei den Probanden Alter, Größe, Gewicht, Körperfettgehalt, Body Mass Index (BMI), Blutdruck, Trainingsalter und sportliche Aktivität pro Woche erfasst. Die genannten Werte der Anthropometrie sind, wie auch ein statistischer Vergleich der beiden Probandengruppen, Tabelle 3.10 zu entnehmen (vgl. Kapitel 3.6). Die Teilnahme erfolgte auf freiwilliger Basis.

2.4 Datenauswertung

Da ein Großteil der Rohdaten in Spezialsoftware (MetaMax, Polar, Simi Motion) erhoben wurde und in sinnvoller Weise aggregiert werden musste, folgte ein intensiver Prozess der Datenbereinigung, -Konzentrierung und des Daten-Transfer in leichter zugängliche Software Lösungen (MS Excel). Des Weiteren galt es die vorliegenden Rohdaten mit Hilfe von MS Excel entsprechend der Fragestellung zu filtern und weiterzuverarbeiten.

2.4.1 Polar

Mit Hilfe der Polar Precision Performance Software [Polar Electro GmbH, Büttelborn, Deutschland] konnten die Herzfrequenz-Daten aus der Uhr ausgelesen, graphisch dargestellt und fehlerbereinigt werden. Es folgte der Export der Daten in MS Excel. Die kontinuierliche Herzfrequenzmessung ermöglichte im Rahmen der Datenauswertung eine Kontrolle und gegebenenfalls Korrektur der handschriftlich erfassten Testergebnisse.

2.4.2 MetaMax

Nach Erfassung der spiroergometrischen Parameter mit Hilfe der Software MetaSoft Version 1.11.5 [CORTEX Biophysik GmbH, Leipzig] erfolgte der Export dieser Rohdaten in MS Excel, wo eine weitere Prozessierung der Daten durchgeführt wurde.

2.4.3 SIMI Motion

2.4.3.1 Auswertung Tapping-Test

Die Software SIMI Motion erlaubt eine differenzierte Darstellung der mittels Kraftmessplatte erhobenen Daten aufgeteilt in Flug- und Standphase. Auf Grund der hohen Messempfindlichkeit gab es Situationen, in denen ungleichmäßiges Anheben oder Absetzen des Fußes während der Untersuchung zu Messwerten führte, die von der Software als separate Phasen definiert wurden, in Realität jedoch Artefakte darstellten. Hier war es notwendig, im Anschluss an die Datenerhebung eine manuelle Kontrolle jeder einzelnen Phase sowie gegebenenfalls Korrekturen durchzuführen. Ein Beispiel für die Oberfläche zur Datenkorrektur zeigt Abbildung 2.9.

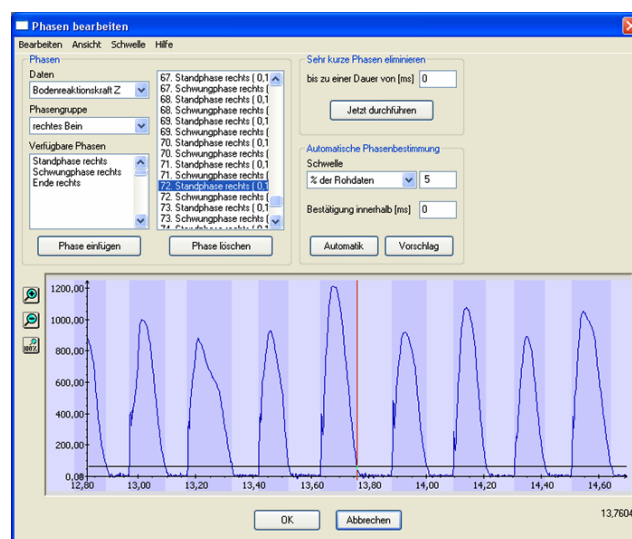


Abbildung 2.9: Screenshot SIMI Motion Software zur Korrektur der FTT15 Ergebnisse; Darstellung der einzelnen Flug- und Standphasen

Es folgte der Export der phasenbereinigten Daten in MS Excel, wo, mit Hilfe eines programmierten ‚Tapping-Tools‘, die Berechnung der relevanten Parameter erfolgte. Ein Screenshot dieses ‚Tapping-Tools‘ mit bereits eingegebenen Messdaten einer FTT15-Untersuchung ist exemplarisch in Abbildung 2.10 dargestellt.

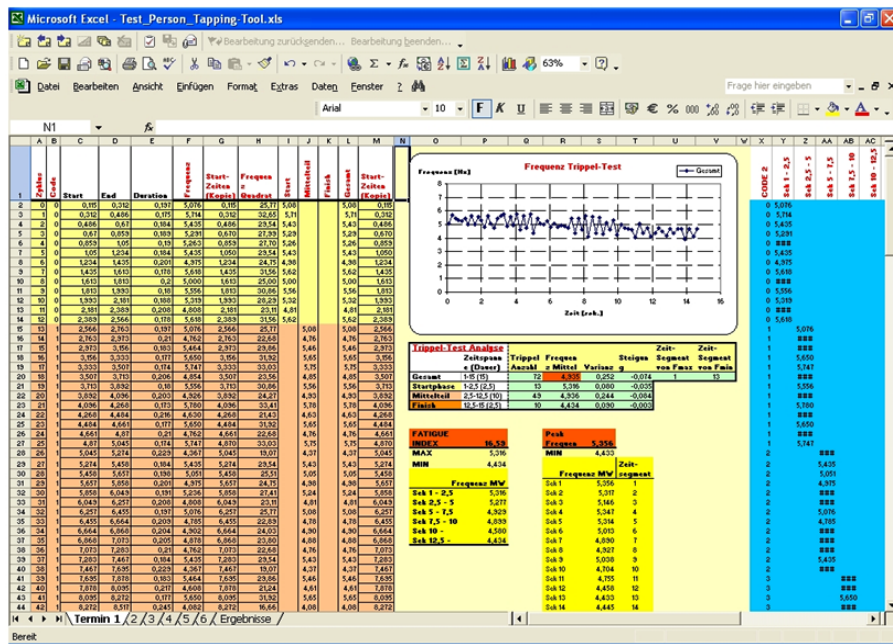


Abbildung 2.10: 'Tapping-Tool', Screenshot des MS Excel Tools zur Bearbeitung der FTT15 Rohdaten

FTT15-Auswertungsintervalle und errechnete Parameter

Zur Auswertung des Foot-Tapping Tests mit Hilfe des oben exemplarisch abgebildeten 'Tapping-Tools', erfolgte eine Aufteilung des Gesamt-Messzeitraumes in kürzere Zeitintervalle (vgl. Abb. 2.11). Dies war die Voraussetzung, später Messergebnisse verschiedener Zeitpunkte eines Tests oder Messergebnisse gleicher Zeiträume verschiedener Tests, vergleichend untersuchen zu können.

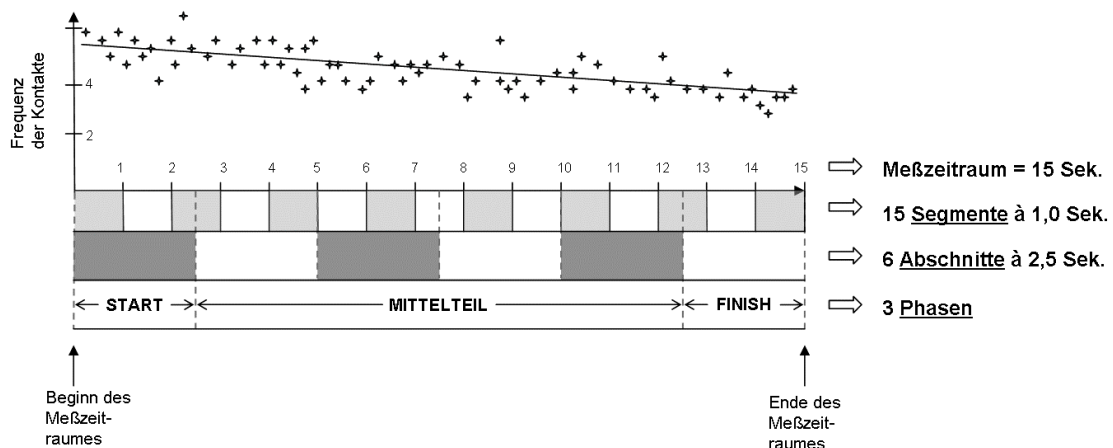


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der Aufteilung eines 15 Sekunden Foot-Tapping Tests in die gewählten Auswertungsintervalle

Die Aufteilung des Messzeitraumes in 3 Phasen ergab sich aus dem initialen Vorhaben, ein ausreichend langes (um zufällige Ausreißer herausmitteln zu können), aber zugleich sich möglichst stark unterscheidendes Intervall zu Beginn und Ende des

Tests hinsichtlich der genannten Parameter miteinander vergleichen zu können. Dies erklärt die mit 10 Sekunden vierfach größere Dauer des Mittelteils.

Ebenso, wie schon bei Abspaltung der Start- und Finish-Phase geschehen, wurde der gesamte Messzeitraum in 6 Abschnitte à 2,5 Sekunden eingeteilt. Zielsetzung hierbei war die Abtrennung sinnvoller Intervalle zur Berechnung des Fatigue Index in Anlehnung an den Wingate Test,²⁷ wobei die Zeiten des dort beschriebenen Verfahrens auf Grund der kürzeren Testdauer des FTT15 halbiert wurden.

Die Unterteilung des Gesamt-Messzeitraumes in 15 Segmente von jeweils einer Sekunde Dauer hatte zum Ziel, Intervalle zu bilden, die ausreichend kurz waren um auch punktuell im Verlaufe des Tests einzelne Parameter untersuchen zu können. Um verlässliche Daten zu erhalten mussten diese Segmente eine Mindestdauer umfassen, die einige Tapping-Kontakte einschloss, welche gemittelt werden konnten.

Für den 15 Sekunden betragenden **Gesamt-Messzeitraum** wurden die folgenden Parameter erhoben bzw. errechnet:

- Kontakt-Anzahl: Die Anzahl der Kontakte des dominanten Fußes auf der Kraftmessplatte innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens stellte den einfachsten zu erhebenden Parameter dar. Er ist dimensionslos.
- Tapping-Frequenz: Als Tapping-Frequenz oder auch Kontakt-Frequenz wurde die Anzahl der Kontakte des dominanten Fußes auf der Kraftmessplatte geteilt durch den jeweiligen Zeitraum in Sekunden bezeichnet. Die Tapping-Frequenz wurde für jeden einzelnen Kontakt separat berechnet, konnte später jedoch über einzelne Sekunden-Segmente oder auch längere Zeitintervalle gemittelt werden. Ihre Einheit lautet Hertz ($\text{Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$).
- Steigung der Regressionsgeraden: Durch die Tapping-Frequenzen einzelner Kontakte über den Messzeitraum ließ sich mathematisch eine Gerade legen. Die (im vorliegenden Fall negative) Steigung dieser Regressionsgeraden war als gemitteltetes Maß für den Abfall der Tapping-Frequenzen über den Untersuchungszeitraum zu sehen. Die Steigung der Regressionsgeraden ist dimensionslos.

Aus den 15 **Segmenten** von jeweils einer Sekunde Dauer, wurden die folgenden Parameter abgeleitet:

- Zeitsegment F_{\max} als diejenige Sekunde des Gesamt-Messzeitraumes, in welcher der Proband das höchste Sekunden Frequenz-Mittel erreichte.

- Zeitsegment F_{\min} als diejenige Sekunde des Gesamt-Messzeitraumes, in welcher der Proband das geringste Sekunden Frequenz-Mittel erreichte.
- Peak-Frequenz als größtes 1-Sekunden Frequenz-Mittel des Tapping-Tests.

Aus den 6 **Abschnitten** von jeweils 2,5 Sekunden Dauer wurde der Fatigue Index berechnet, indem der Abschnitt mit der höchsten Tapping-Durchschnittsfrequenz (A_{FTT}) zu demjenigen mit der geringsten Tapping-Durchschnittsfrequenz (B_{FTT}) nach Formel 2.1 in Beziehung gesetzt wurde.

$$Fatigue\ Index(FI) = \frac{(A_{FTT} - B_{FTT}) \cdot 100}{A_{FTT}}$$

Formel 2.1: Fatigue Index (FI)

Hierbei konnten beide Abschnitte an beliebiger Stelle liegen. Es wurde jedoch gefordert, dass der höchste 2,5-Sekunden-Abschnitt vor dem niedrigsten lag.

Die Parameter Tapping-Anzahl, mittlere Tapping-Frequenz sowie Steigung der Regressionsgeraden konnten anhand der Aufteilung in 3 **Phasen** innerhalb des FTT15 verglichen werden. Von besonderer Bedeutung war hier die Gegenüberstellung der gleich langen Phasen Start und Finish.

2.4.3.2 Auswertung Einbeinstand-Test

Die Simi Motion Software erlaubte eine graphische sowie numerische Darstellung der beim Einbeinstand-Test zurückgelegten Strecke (vgl. Abb. 2.12). Weiter war es möglich, den Untersuchungszeitraum nachträglich zu modulieren. In der vorliegenden Studie wurden der Gesamt-Messzeitraum (7 Sekunden) wie auch ein nachträglich um die ersten 2 Sekunden verkürzter Zeitraum von 5 Sekunden erfasst. Zur weiteren Akkumulation der Schwankweg-Daten unterschiedlicher Testinhalte sowie verschiedener Probanden und zur Vorbereitung auf die nachfolgende statistische Auswertung, erfolgte der Export der numerischen Werte in MS Excel.

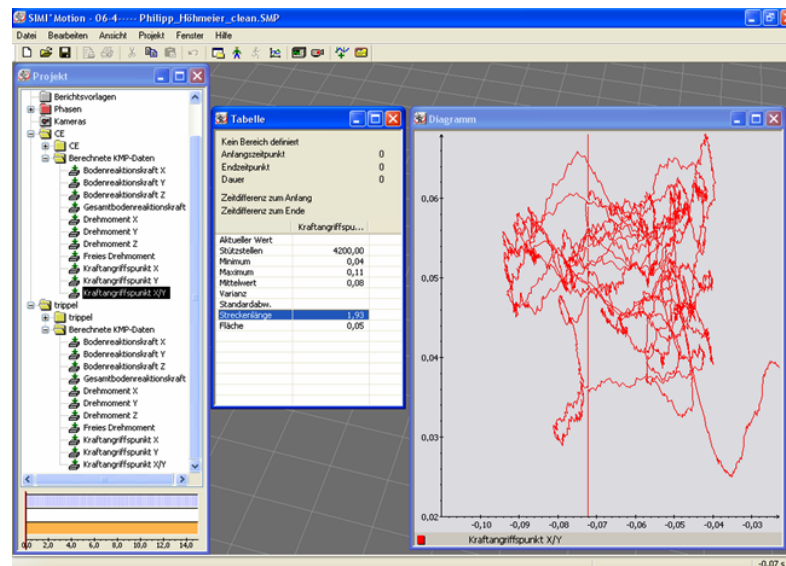


Abbildung 2.12: Screenshot SIMI Motion Software zur Auswertung eines Einbeinstand-Test; graphische Darstellung der Sway Length und zugehörige Testergebnisse

2.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem wissenschaftlichen Statistikprogramm ‚SPSS‘ [Version 12.0, SPSS inc., Chicago, IL/USA]. Mittelwerte (MW) der Stichprobe und die Standardabweichung (STABW) dienen als Ausgangsbasis zur Überprüfung der Grundgesamtheit. Die Normalverteilungsannahme wurde mittels Kolmogorow-Smirnow-Test geprüft.

Bei abhängigen Ausgangsdaten fand bei vorliegender Normalverteilung der t-Test für verbundene Stichproben und bei nicht normalverteilten Daten der nichtparametrische Vorzeichen-Rang-Test nach Wilcoxon Anwendung. Unverbundene Stichproben wurden bei vorliegender Normalverteilung mittels t-Test für ungepaarte Stichproben, bei nicht normalverteilter Grundgesamtheit mittels U-Tests nach Wilcoxon, Mann und Whitney evaluiert. Bei Vorliegen von mehr als 2 Gruppen wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) mit post hoc Prüfung durch einen Scheffé-Test bzw. Turkeys-Test durchgeführt. Mittels Korrelationsanalyse nach Pearson wurde der Korrelationskoeffizient r bestimmt, um den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen zu überprüfen. Daten wurden als Mittelwert \pm Standardabweichung angegeben.

2.6 Graphische Darstellung

Mit Hilfe des statistischen Graphikprogramms SigmaPlot für Windows [Version 8.02, SPSS inc., Chicago, IL/USA] wurden die relevanten Graphen erstellt. Im Weiteren wurde auch die Software MS PowerPoint [Version 2003; Microsoft Corp., Redmond, USA] für die Erstellung schematischer Abbildungen genutzt.

3 ERGEBNISSE

Als Irrtumswahrscheinlichkeit wurde ein Niveau von Alpha = 5 % ($p < 0,05$) festgesetzt. Folgende Symbole wurden bei der Beurteilung der Ergebnisse der statistischen Prüfverfahren verwandt:

- $p > 0,05$: nicht signifikant (n.s.)
- $p < 0,05$: signifikant (*)
- $p < 0,01$: hoch signifikant (**)
- $p < 0,001$: höchst signifikant (***)

Bei Bestimmungen des Pearson Korrelationskoeffizienten im Rahmen von Korrelationsanalysen wurden folgende Richtwerte bei der Interpretation der Ergebnisse zugrunde gelegt:

Betrag des Korrelationskoeffizienten	Interpretation
0	Keine Korrelation
über 0 bis 0,2	Sehr schwache Korrelation
0,2 bis 0,4	Schwache Korrelation
0,4 bis 0,6	Mittlere Korrelation
0,6 bis 0,8	Starke Korrelation
0,8 bis unter 1	Sehr starke Korrelation
1	Perfekte Korrelation

3.1 Ergebnisprofil des 15 Sekunden Foot-Tapping Test

Die folgenden Unterkapitel zeigen die beim Foot-Tapping Test und Einbeinstand-Test ermittelten Ergebnisse als Durchschnittswerte aus 60 Untersuchungen der Probanden-Gruppe B ($n = 10$).

3.1.1 Kontakt-Anzahl

Im Mittel wurde über die gesamte Testdauer eine Kontakt-Anzahl von $70,9 \pm 8,1$ erreicht. Diese gliederte sich in die Startphase ($13,2 \pm 1,7$), den vierfach längeren Mittelteil ($47,8 \pm 5,4$) und die Finish-Phase ($9,6 \pm 1,3$) auf. Ein Vergleich der Kontakt-Anzahl zwischen den gleich langen Phasen Start und Finish zeigte eine höchstsignifikante Abnahme der Kontakt-Anzahl ($p < 0,001$).

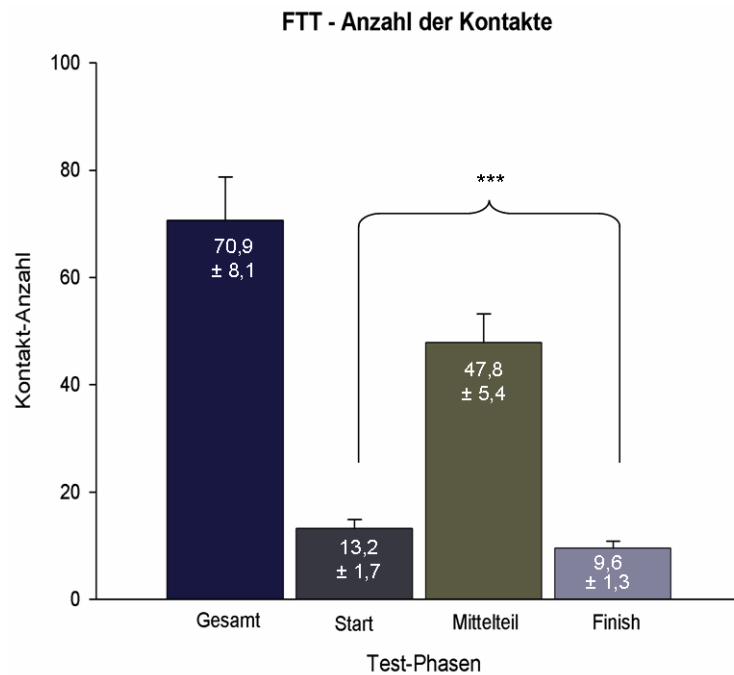


Abbildung 3.1: Durchschnittliche Kontakt-Anzahl bei 60 Tests verteilt auf die gewählten Test-Phasen

3.1.2 Frequenz

Die durchschnittliche Tapping-Frequenz betrug in der ersten Sekunde des FTT15 $5,3 \pm 0,5$ Hz. Das Profil der Kontaktfrequenzen in Abb. 3.2 zeigt einen sehr gleichmäßigen Abfall der Frequenz über die gesamte Testdauer bis zu der geringsten Tapping-Frequenz innerhalb der 15. Sekunde von $4,2 \pm 0,5$ Hz.

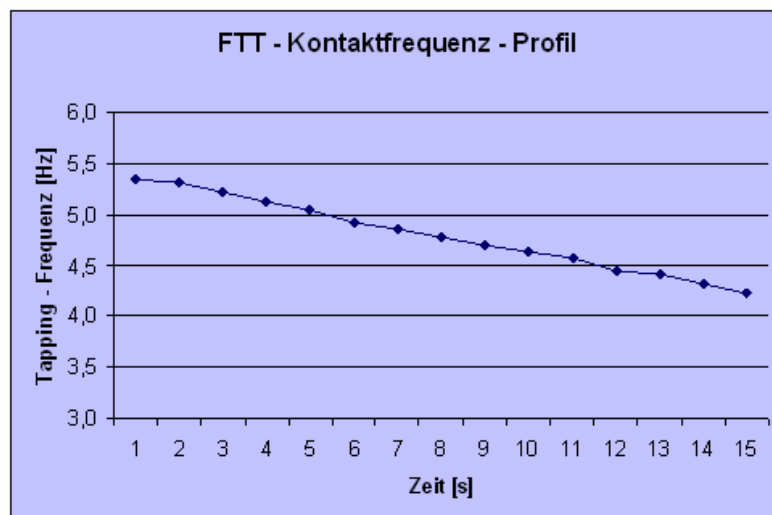


Abbildung 3.2: Kontaktfrequenz - Profil aus 60 FTT15 Tests

Die durchschnittliche Tapping-Frequenz über die Gesamt Testdauer betrug $4,8 \pm 0,5$ Hz. Die separate Betrachtung der gewählten Phasen zeigt einen Abfall der Tapping-

Frequenz vom Start ($5,3 \pm 0,6$ Hz) über den Mittelteil ($4,8 \pm 0,6$ Hz) bis zum Finish ($4,3 \pm 0,5$ Hz). Die statistischen Vergleiche der 3 untersuchten Test-Phasen zeigten jeweils höchstsignifikante Unterschiede (Start vs. Mittelteil: $p < 0,001$; Start vs. Finish: $p < 0,001$; Mittelteil vs. Finish: $p < 0,001$).

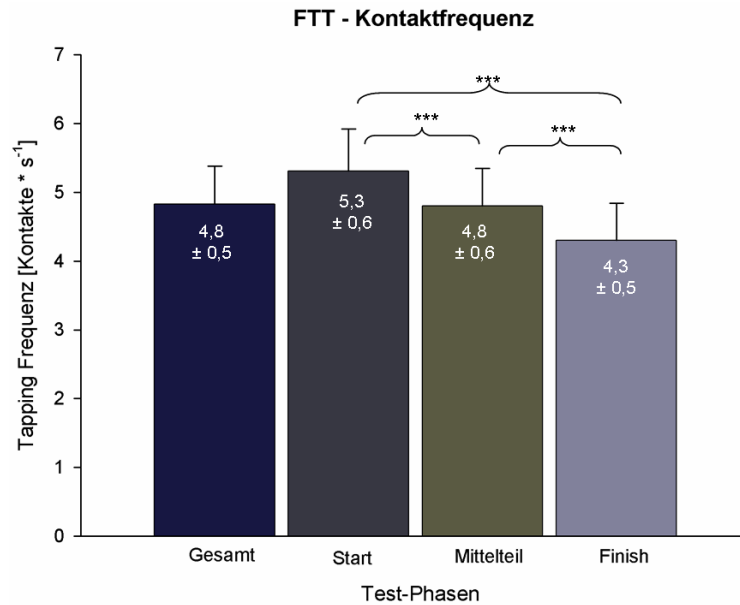


Abbildung 3.3: Durchschnittliche Kontakt-Frequenz bei 60 FTT15 Tests verteilt auf die gewählten Test-Phasen

3.1.3 Steigung der Regressionsgeraden

Die aus den einzelnen Tapping-Frequenz Werten gebildete Regressionsgerade zeigte für die gesamte Testdauer eine negative Steigung von $-0,08 \pm 0,02$. Die einzelnen Phasen (Start: $-0,04 \pm 0,16$; Mittelteil: $-0,08 \pm 0,03$; Finish: $-0,09 \pm 0,10$) unterschieden sich nicht signifikant (Start vs. Mittelteil: $p = 0,087$; Start vs. Finish: $p = 0,068$; Mittelteil vs. Finish: $p = 0,668$).

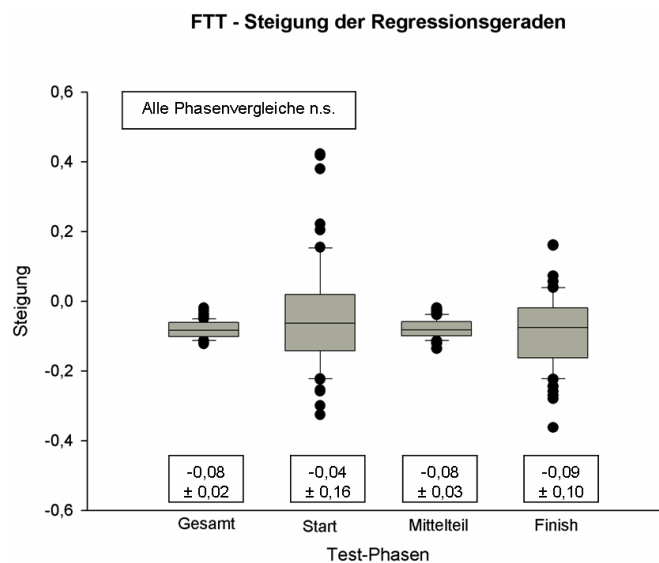


Abbildung 3.4: Durchschnittliche Steigung der Regressionsgeraden bei 60 FTT15 Tests verteilt auf die gewählten Test-Phasen

3.1.4 Segment F_{max}

Eine Analyse der Zeitpunkte des Erreichens der maximalen Tapping-Frequenz ergab, dass in 95 % der durchgeführten Tests, die Probanden ihre ‚Peak Performance‘ innerhalb der ersten 3 Sekunden erreichten.

Anteil der maximalen Tapping-Frequenz Werte in	absolut	prozentual
Test-Sekunde 1	34	56,7
Test-Sekunde 2	16	26,7
Test-Sekunde 3	7	11,7
sonstigem Zeitpunkt des Tests	3	5,0

Tabelle 3.1: Verteilung der maximalen Tapping-Frequenz Werte

3.1.5 Segment F_{min}

Eine Analyse der Zeitpunkte der kleinsten Tapping-Frequenzen ergab, dass in 96,7 % der durchgeführten Tests diese innerhalb der letzten 3 Sekunden des Untersuchungszeitraumes vorkamen.

Anteil der kleinsten Tapping-Frequenz Werte in	absolut	prozentual
Test-Sekunde 15	39	65,0
Test-Sekunde 14	13	21,6
Test-Sekunde 13	6	10,0
sonstigem Zeitpunkt des Tests	2	3,3

Tabelle 3.2: Verteilung des kleinsten Tapping-Frequenz Werte

3.1.6 Peak Frequenz

Im Mittel erreichten die Probanden bei 60 durchgeführten Untersuchungen eine Peak-Frequenz von 5,44 Hz. Die Standardabweichung betrug hierbei $\pm 0,63$ Hz.

3.1.7 Fatigue Index

Der Fatigue Index betrug im Mittel bei 60 durchgeführten Tests 19,28 ($\pm 5,22$).

3.1.8 Herzfrequenz

3.1.8.1 Absolute Werte

Die Herzfrequenz der Probanden betrug im Mittel vor Beginn des standardisierten Aufwärmprogrammes $76,0 \pm 13,0$ Schläge/min vor Testbeginn auf der Kraftmessplatte ($95,8 \pm 11,7$), nach Beendigung des FTT15 waren die Herzfrequenzwerte höchstsignifikant größer ($145,3 \pm 12,9$). Auch die Situationen vor und nach

Durchführung des FTT15 unterschieden sich höchstsignifikant (alle Vergleiche $p < 0,001$).

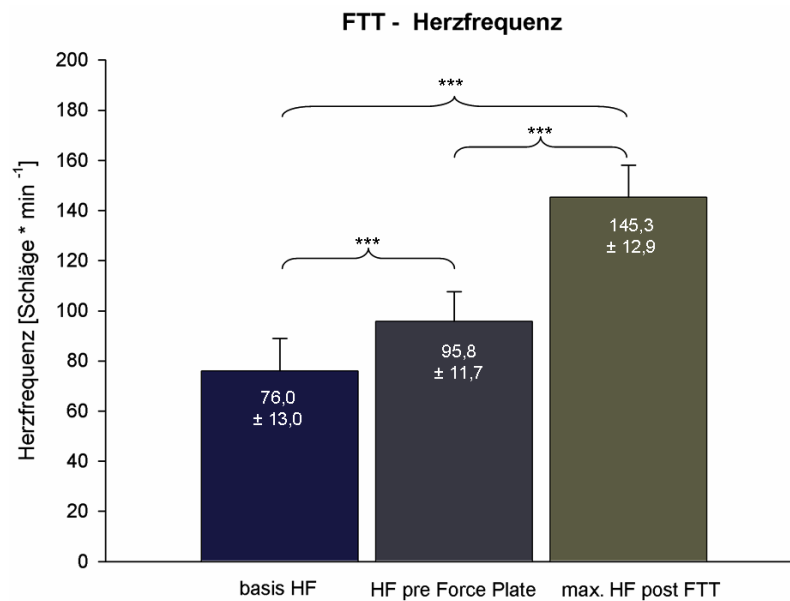


Abbildung 3.5: Durchschnittliche Herzfrequenz bei 60 Tests zum Zeitpunkt des Testbeginns, vor und nach Durchführung des FTT15

3.1.8.2 Relative Werte

Die Herzfrequenzwerte konnten auch als prozentualer Anteil des beim Stufentest maximal erreichten Herzfrequenzwertes der Probanden, sozusagen als individueller Referenzwert der maximalen Ausbelastung, dargestellt werden. In diesem Kontext wurde vor Beginn der Untersuchungen auf der Kraftmessplatte ein Wert von $49,9 \pm 6,5$ % der maximalen Stufentest-Herzfrequenz gemessen, nach Beendigung des FTT15 waren es $75,5 \pm 5,8$ %. Der Unterschied dieser beiden relativen Herzfrequenzwerte war höchstsignifikant ($p < 0,001$).

3.1.9 Laktat

Zu Testbeginn wurde bei den Probanden im Mittel ein Blutlaktat-Wert von $1,1 \pm 0,4$ mmol/l gemessen, welcher sich nach standardisiertem Eingeh-Programm auf $0,8 \pm 0,3$ mmol/l reduzierte. Nach der Belastung durch den FTT15 betrug der maximal erreichte Blutlaktat-Wert $5,4 \pm 1,6$ mmol/L. Die Werte aller drei Messzeitpunkte unterschieden sich höchstsignifikant von einander (alle Vergleiche $p < 0,001$).

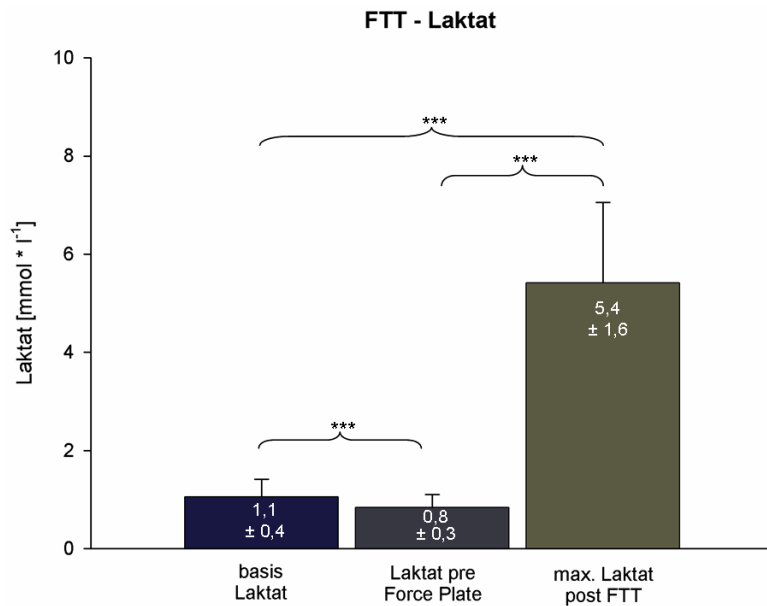


Abbildung 3.6: Durchschnitt der gemessenen Laktat-Werte bei 60 Tests zum Zeitpunkt des Testbeginns, vor und nach Durchführung des FTT15

3.1.10 Time to Force Plate

Die Messung der von den Probanden benötigten Zeit vom Beenden des standardisierten Eingeh-Programms bis zum Beginn der Tests auf der Kraftmessplatte wurde als ‚Time to Force Plate‘ bezeichnet und ergab einen Mittelwert von 65,5 Sekunden ($\pm 28,2$ s).

3.1.11 RPE

Der von den Probanden im direkten Anschluss an den Tapping-Test angegebene und subjektiv empfundene Anstrengungsgrad ergab im Mittel einen RPE Wert von $14,1 \pm 1,5$. Dieser Wert entspricht auf der standardisierten Skala einer subjektiven Belastung zwischen ‚etwas schwer‘ (RPE = 13) und ‚schwer‘ (RPE = 15).

3.2 Ergebnisse des Einbeinstand-Test

Für die Auswertungsphase Sekunde 1-7 ergab sich bei 60 durchgeführten Einbeinstand-Tests für den Parameter Sway Length ein Mittelwert von $2,65 \text{ m} \pm 0,64 \text{ m}$. Für die Auswertungsphase Sekunde 3-7 zeigte sich ein mittlerer Schwankweg von $1,89 \text{ m} \pm 0,35 \text{ m}$.

3.3 FTT15 Reliabilitätsstudie

Um die Reliabilität der Testverfahren FTT15 und EST zu untersuchen, wiederholten 10 Probanden (Testgruppe B) an 6 Test-Terminen das oben beschriebene jeweils identische Testprotokoll. Die Untersuchungen fanden zumeist innerhalb eines Zeitraumes von 2 – 3 Wochen statt.

3.3.1 Kontakt-Anzahl

Für den ersten Test-Termin zeigte sich eine Kontakt-Anzahl von $67,6 \pm 9,1$. Diese unterschied sich signifikant von den Ergebnissen am 2. Test-Termin ($71,1 \pm 8,1$; $p = 0,038$). Die Vergleiche zwischen allen weiteren Test-Terminen (3: $70,8 \pm 8,1$; 4: $70,9 \pm 8,3$; 5: $71,1 \pm 8,1$; 6: $72,2 \pm 8,4$) zeigten jedoch keine signifikanten Unterschiede. Eine exemplarisch für die Gesamt-Kontaktanzahl durchgeführte Korrelationsanalyse zeigte zwischen allen 6 Terminen starke bis sehr starke Korrelationen (vgl. Tabelle 3.3).

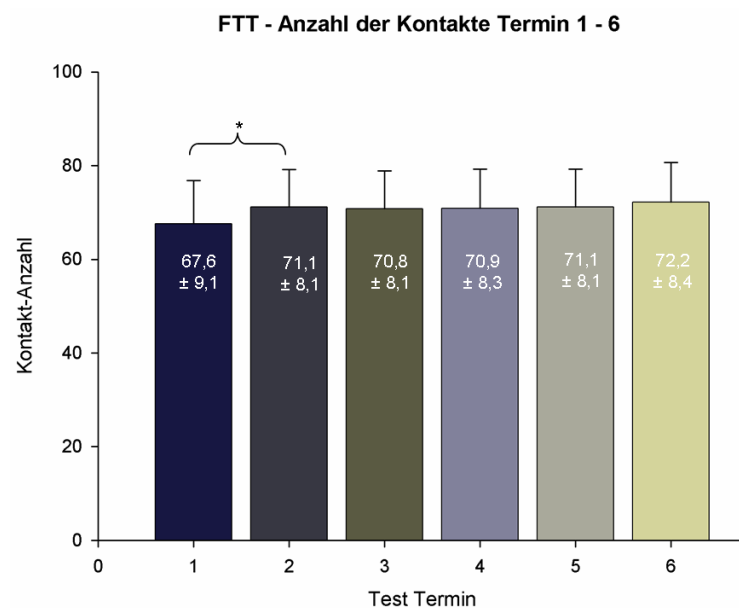


Abbildung 3.7: Vergleichende Darstellung der Kontaktzahl beim FTT15 für die Test-Termine 1 – 6

		Termin 2	Termin 3	Termin 4	Termin 5	Termin 6
Termin 1	Korrelation	,867	,827	,844	,701	,688
	p	,001	,003	,002	,024	,028
Termin 2	Korrelation		,983	,951	,803	,763
	p		,000	,000	,005	,010
Termin 3	Korrelation			,977	,881	,834
	p			,000	,001	,003
Termin 4	Korrelation				,923	,881
	p				,000	,001
Termin 5	Korrelation					,967
	p					,000

Tabelle 3.3: Korrelations-Analyse nach Pearson für den Parameter ‚Anzahl der Kontakte‘ im Gesamt-Messzeitraum (Test-Termine 1 – 6)

3.3.2 Frequenz

Beim Vergleich der mittleren Tapping-Frequenzen über den Gesamt-Zeitraum an 6 aufeinander folgenden Terminen gleichen Inhalts zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen Termin 1 und 2 ($p = 0,047$) sowie zwischen Termin 1 und 3 ($p = 0,042$). Alle anderen Vergleiche waren nicht signifikant.

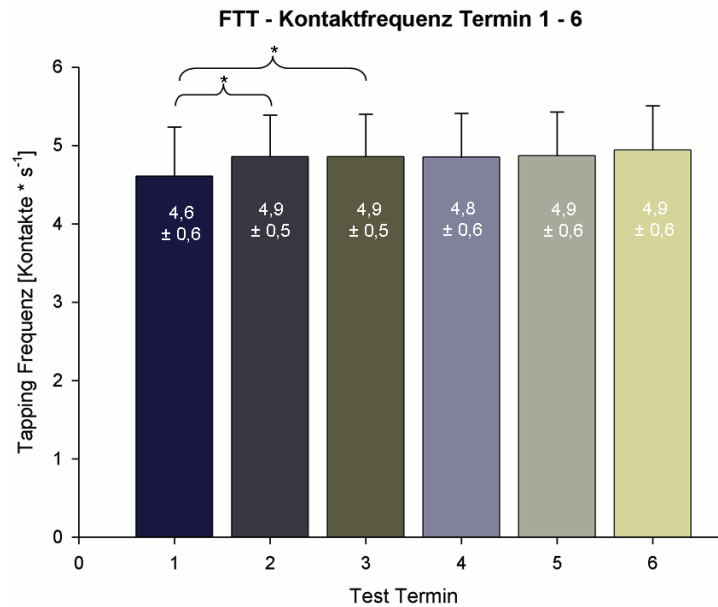


Abbildung 3.8: Darstellung der mittleren Tapping-Frequenz beim FTT15 für die Test-Termine 1 – 6

3.3.3 Steigung der Regressionsgeraden

Bei der vergleichenden Untersuchung der mittleren Steigung über den Gesamt-Zeitraum zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen Test-Termin 1 und 4 ($p = 0,023$). Alle anderen Vergleiche der Termine zeigten keine signifikanten Unterschiede.

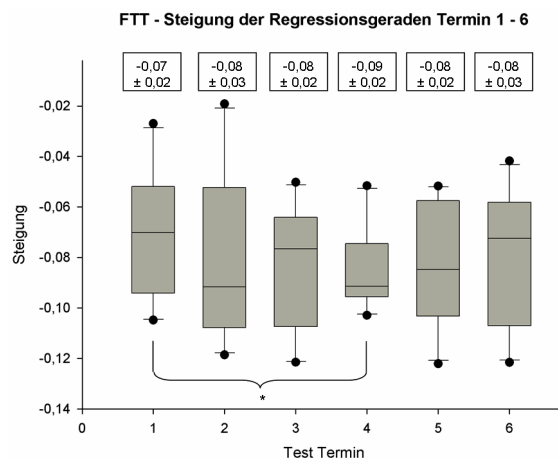


Abbildung 3.9: Vergleichende Darstellung der Steigung der Regressionsgeraden in der Test Phase ‚Gesamt‘ für die Test-Termine 1 - 6

3.3.4 Retest-Reliabilität innerhalb einzelner FTT15-Phasen

Die FTT15-Parameter Kontakt-Anzahl, Frequenz und Steigung der Regressionsgeraden wurden auch innerhalb der Subsegmente (Start, Mittelteil, Finish) statistisch untereinander und insgesamt auf Reproduzierbarkeit untersucht. Hierbei zeigten sich bis auf wenige Ausnahmen keine signifikanten Unterschiede. Die Ausnahmen sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

Parameter	Phase	Termin	Signifikanzniveau p
Kontakt-Anzahl	Start	1 vs. 2	0,037
		1 vs. 6	0,023
	Mittelteil	1 vs. 2	0,046
Frequenz	Start	1 vs. 3	0,036
		1 vs. 2	0,049
	Mittelteil	1 vs. 2	0,038
Steigung	Mittelteil	1 vs. 2	0,043
		1 vs. 3	0,027
	Mittelteil	1 vs. 4	0,015

Tabelle 3.4: Signifikante Unterschiede zwischen den Terminen 1- 6 innerhalb der Phasen Start, Mittelteil, Finish

3.3.5 Peak Frequenz

Die Analyse der Peak-Frequenz ergab für die 6 Test-Termine im Mittel Werte zwischen 5,2 Hz und 5,5 Hz (Test-Termin 1: $5,2 \pm 0,8$ Hz; 2: $5,4 \pm 0,7$ Hz; 3: $5,5 \pm 0,6$ Hz; 4: $5,5 \pm 0,6$ Hz; 5: $5,5 \pm 0,6$ Hz; 6: $5,5 \pm 0,5$ Hz). Der statistische Vergleich aller Test-Termine untereinander zeigte bei der Peak Frequenz keine signifikanten Unterschiede.

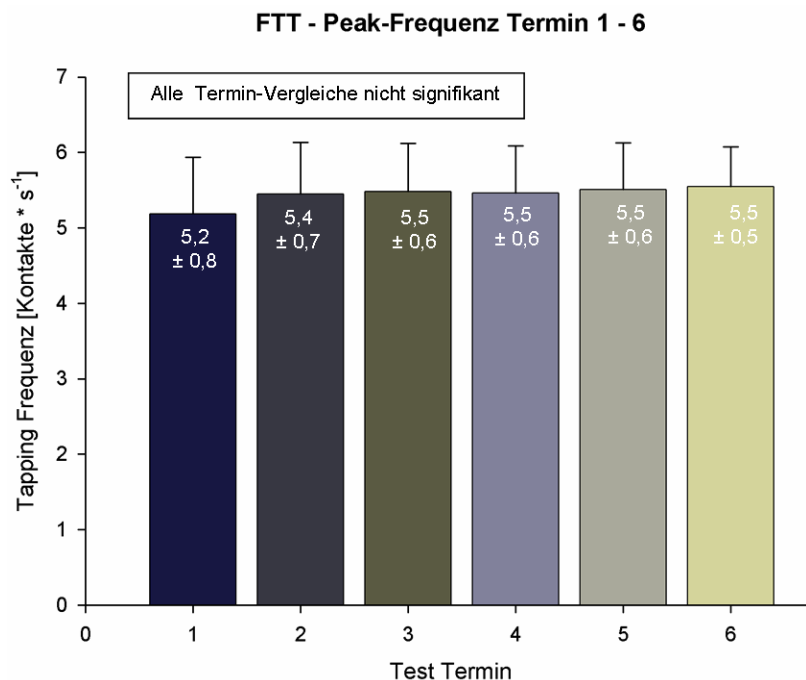


Abbildung 3.10: Vergleichende Darstellung der Peak Frequenz für die FTT15 Test-Termine 1 – 6

3.3.6 Fatigue Index

Die Analyse des Fatigue Index ergab für die 6 Test-Termine im Mittel Werte zwischen 17,7 und 20,0 (Test-Termin 1: 17,7 ± 5,5; 2: 20,0 ± 6,5; 3: 19,5 ± 4,9; 4: 19,6 ± 3,4; 5: 19,5 ± 4,8; 6: 19,3 ± 6,6). Der statistische Vergleich aller Test-Termine untereinander zeigte bei diesen Ergebnissen keine signifikanten Unterschiede.

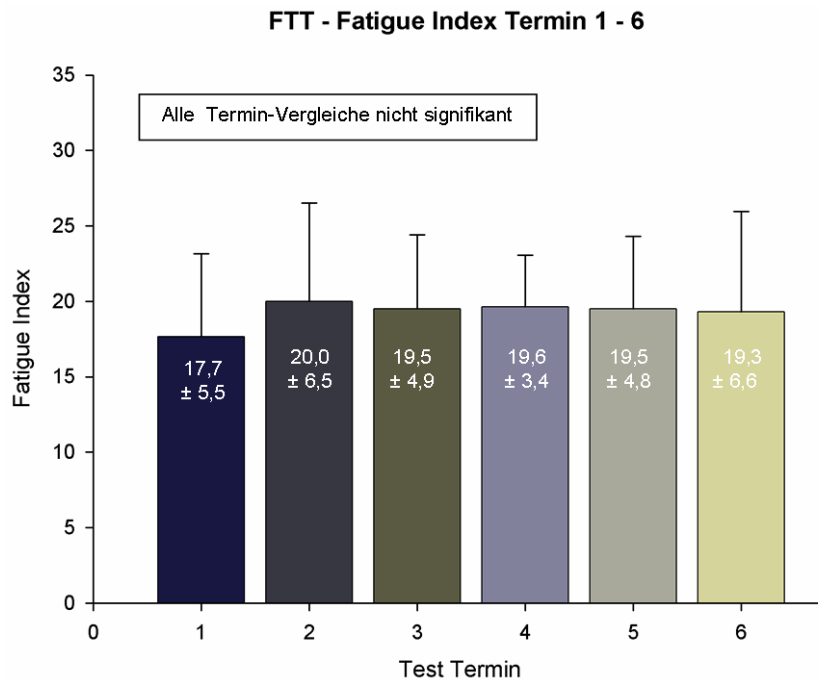


Abbildung 3.11: Vergleichende Darstellung der Peak Frequenz für die FTT15 Test-Termine 1 – 6

3.3.7 Herzfrequenz

3.3.7.1 Herzfrequenz pre Force Plate

Absolute Werte / Relative Werte

Die Mittelwerte der Herzfrequenz vor Beginn der Tests auf der Kraftmessplatte sind in Tabelle 3.5 als absolute Werte sowie prozentual als Anteil der beim Stufentest erreichten maximalen Herzfrequenz dargestellt.

	Termin 1	Termin 2	Termin 3	Termin 4	Termin 5	Termin 6
MW	98,8 / 51,5	100,0 / 52,1	90,0 / 46,9	95,9 / 49,9	94,1 / 49,1	96,2 / 50,1
STABW	11,5 / 6,5	11,6 / 6,8	12,9 / 6,8	10,8 / 5,6	12,0 / 6,9	11,2 / 6,6

Tabelle 3.5: Absolute Herzfrequenz / Herzfrequenz relativ zur maximalen Stufentest-Herzfrequenz vor Testbeginn auf der Kraftmessplatte

3.3.7.2 Maximale Herzfrequenz nach FTT15

Absolute Werte

Die durchschnittliche maximal beim FTT15 erreichte Herzfrequenz lag bei Test-Termin 1 bei $150,2 \pm 13,7$ Schlägen. In den hierauf folgenden Tests wurden kontinuierlich geringere Werte ermittelt (2: $148,7 \pm 9,7$; 3: $145,5 \pm 13,8$; 4: $144,6 \pm 12,1$; 5: $141,7 \pm 12,9$; 6: $140,9 \pm 15,1$). Zwischen dem ersten und 5. Termin ($p = 0,022$) sowie dem 3. und 6. Termin ($p = 0,033$) waren die Abnahmen statistisch signifikant, zwischen dem ersten und 6. Termin ($p = 0,009$) hochsignifikant. Alle anderen Vergleiche wiesen keine statistisch signifikanten Unterschiede auf.

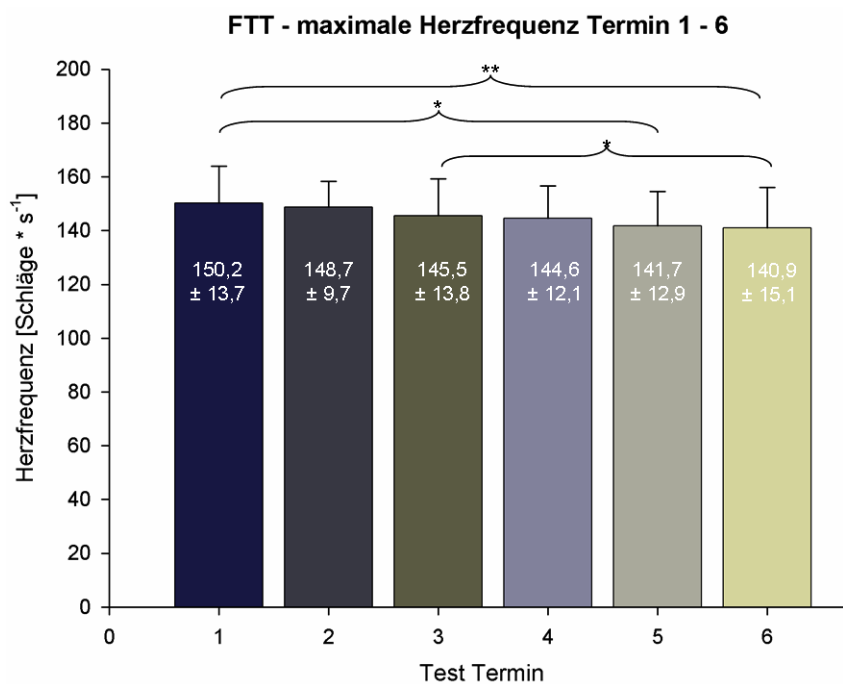


Abbildung 3.12: Vergleichende Darstellung der beim FTT15 maximale erreichten Herzfrequenz für die Test-Termine 1 – 6

Relative Werte

Die Mittelwerte der maximal nach FTT15 erreichten Herzfrequenzen sind in Tabelle 3.6 prozentual als Anteil der beim Stufentest erreichten maximalen Herzfrequenz dargestellt.

	Termin 1	Termin 2	Termin 3	Termin 4	Termin 5	Termin 6
MW	78,0	77,4	75,1	75,2	73,7	73,2
STABW	5,3	4,9	6,1	5,3	6,1	6,9

Tabelle 3.6: Maximale Herzfrequenz nach FTT15 relativ zur maximalen Stufentest-Herzfrequenz

3.3.8 Laktat

Der Mittelwert des im Anschluss an den FTT15 maximal erreichten Laktat-Wertes betrug am ersten Test-Termin $5,6 \pm 0,7$ mmol/l (2: $5,8 \pm 1,9$ mmol/l; 3: $5,6 \pm 1,5$ mmol/l; 4: $5,5 \pm 1,6$ mmol/l; 5: $5,2 \pm 2,3$ mmol/l). Am letzten Test-Termin betrug der maximal erreichte Laktat-Wert nur noch $4,7 \pm 1,7$ mmol/l. Dieser Unterschied war zwischen dem ersten und 6. Test-Termin signifikant ($p = 0,033$) und zwischen dem 3. und 6. Test-Termin hochsignifikant ($p = 0,001$). Alle anderen Vergleiche der Test-Termine ergaben keine statistisch signifikanten Differenzen.

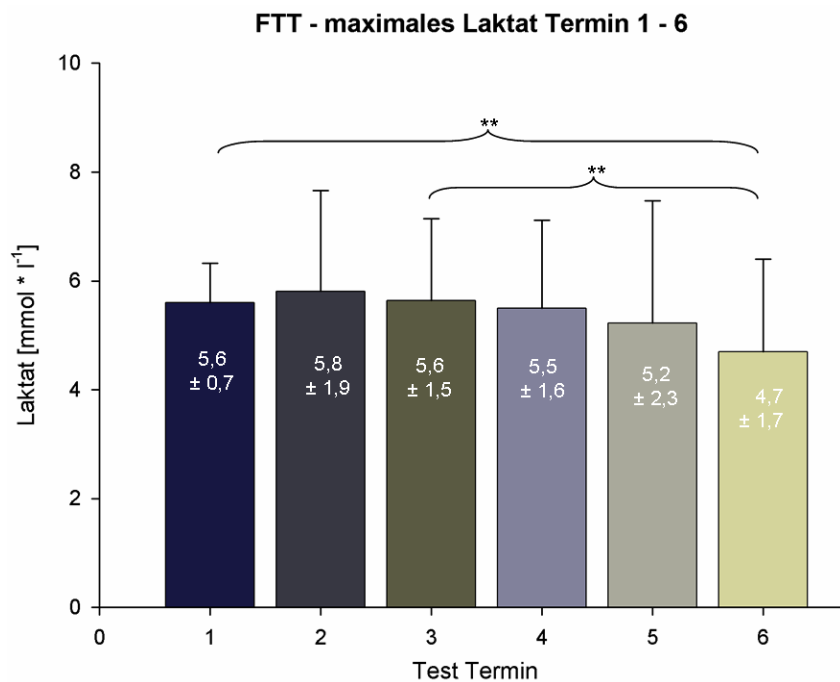


Abbildung 3.13: Vergleichende Darstellung der maximalen Laktat-Werte beim FTT15 für die Test-Termine 1 – 6

3.3.9 RPE

Das Maß der subjektiven Erschöpfung gaben die Probanden im Anschluss an den FTT15 mit Werten zwischen $13,8 \pm 1,6$ am ersten Test-Termin und $14,5 \pm 1,8$ am 6. Test-Termin an (2: $13,9 \pm 1,4$; 3: $14,1 \pm 1,6$; 4: $14,4 \pm 1,5$; 5: $14,1 \pm 1,4$). Auf der RPE-Skala entspricht dabei der Wert RPE = 13 dem Begriff ‚etwas schwer‘ und der Wert RPE = 15 dem Begriff ‚schwer‘. Beim Vergleich der 6 Test-Termine zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede.

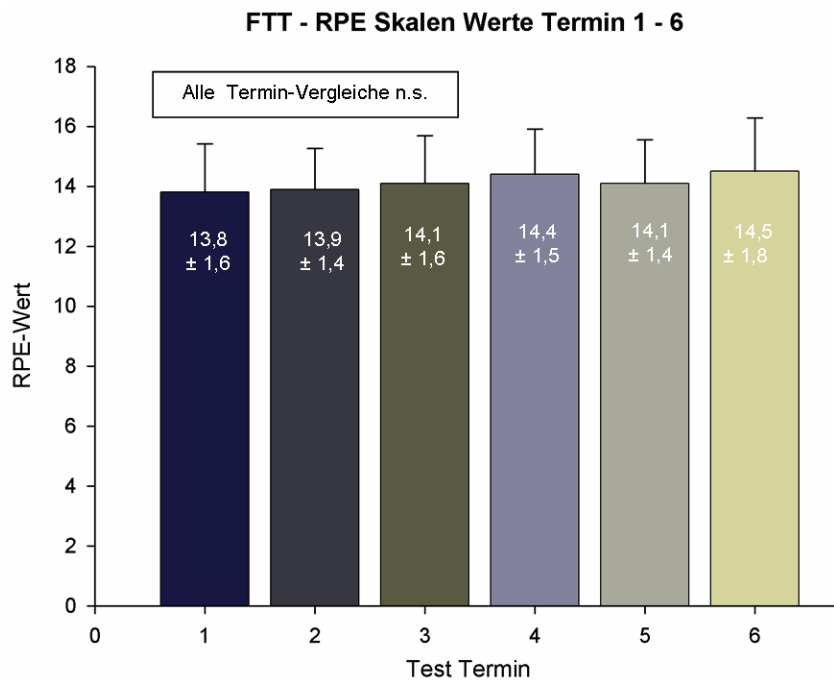


Abbildung 3.14: Vergleichende Darstellung beim FTT15 angegebener RPE-Werte für die Test-Termine 1 – 6

3.4 EST Reliabilitätsstudie

Bei den vergleichenden Untersuchungen des Einbeinstand-Test-Parameters Sway Length der Test-Termine 1 bis 6 ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Dies gilt sowohl für den Auswertungszeitraum Sekunde 1 - 7 (1: $2,58 \pm 0,48$ m; 2: $2,72 \pm 0,62$ m; 3: $2,67 \pm 0,46$ m; 4: $2,76 \pm 0,38$ m; 5: $2,54 \pm 0,42$ m; 6: $2,67 \pm 0,41$ m) als auch für den Auswertungszeitraum Sekunde 3 – 7 (1: $1,88 \pm 0,36$ m; 2: $1,93 \pm 0,43$ m; 3: $1,85 \pm 0,36$ m; 4: $1,95 \pm 0,32$ m; 5: $1,81 \pm 0,31$ m; 6: $1,93 \pm 0,36$ m).

3.5 FTT15 und EST: Einfluss einer aeroben oder anaeroben Vorbelastung

3.5.1 Kontakt-Anzahl

Ohne Vorbelastung erreichten die Probanden im Mittel eine Kontaktanzahl von $68,0 \pm 12,3$, wobei die Werte im Vergleich hierzu nach Sprint-Belastung ($69,4 \pm 13,7$; $p = 0,912$) nicht signifikant, nach Ausdauer-Vorbelastung ($73,1 \pm 11,6$; $p < 0,001$) jedoch höchstsignifikant größer waren. Der statistische Vergleich zwischen Sprint- und Ausdauer-Vorbelastung zeigte für letztere Testsituation ebenfalls einen signifikant höheren Wert ($p = 0,020$).

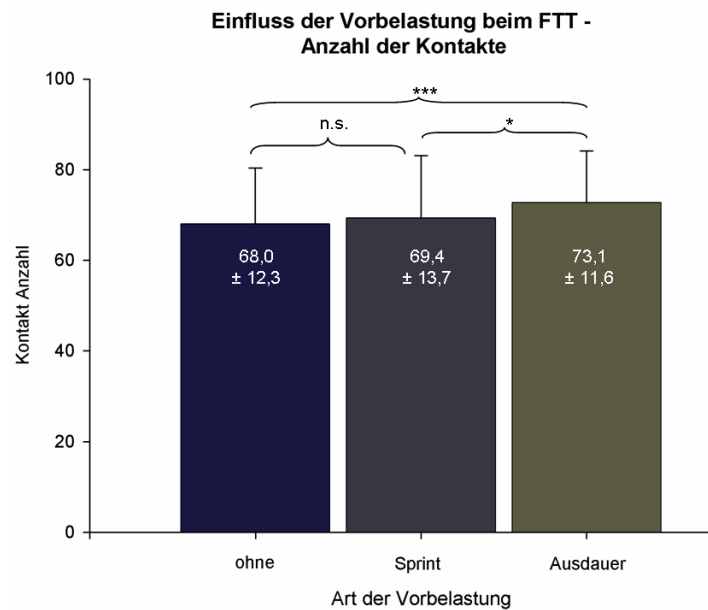


Abbildung 3.15: Anzahl der Kontakte beim FTT15 in drei Testsituationen verschiedener Vorbelastung

3.5.2 Frequenz

Ohne Vorbelastung erreichten die Probanden auf den gesamt Testzeitraum bezogen im Mittel eine Tapping-Frequenz von $4,66 \pm 0,82$ Hz, wobei die Werte im Vergleich hierzu nach Sprint-Vorbelastung ($4,75 \pm 0,92$ Hz; $p = 0,854$) nicht signifikant, nach Ausdauer-Vorbelastung ($4,96 \pm 0,77$ Hz; $p < 0,001$) jedoch hochsignifikant größer waren. Der statistische Vergleich zwischen den Testsituationen Sprint- und Ausdauer-Vorbelastung zeigte für letztere ebenfalls einen signifikant größeren Wert ($p = 0,026$).

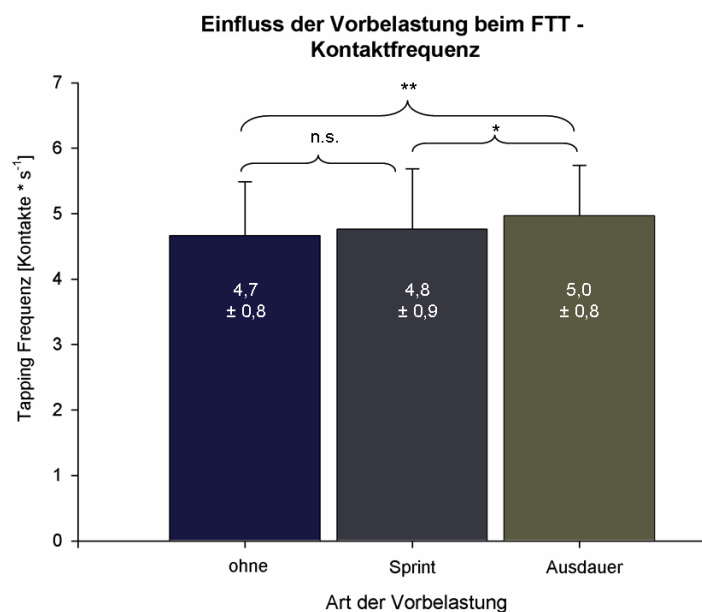


Abbildung 3.16: Tapping-Frequenz beim FTT15 in drei Testsituationen verschiedener Vorbelastung

Das FTT15-Kontaktfrequenz-Profil der drei Testsituationen unterschiedlicher Vorbelastung gibt einen guten Überblick über die drei von der Charakteristik her ähnlichen Kurvenverläufe (vgl. Abb. 3.17). Auffällig ist die nur bei der Sprint-Vorbelastung deutlich sichtbare Beschleunigung der Tapping Frequenz von Sekunde 1 zu Sekunde 2 sowie die über den gesamten Testzeitraum nach oben verschobenen Tapping-Frequenzen nach Ausdauer-Vorbelastung.

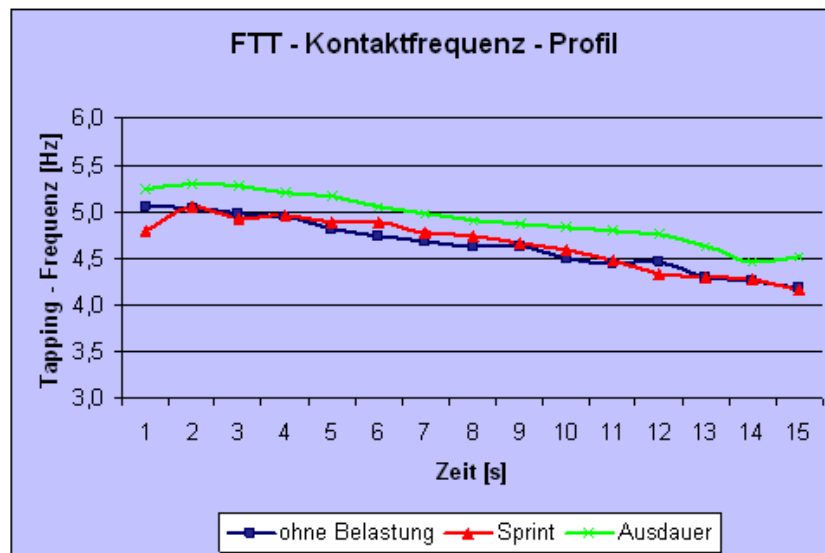


Abbildung 3.17: FTT15 Kontaktfrequenz - Profil in drei Testsituationen unterschiedlicher Vorbelastung

Der statistische Vergleich der Tapping-Frequenzen innerhalb der einzelnen Test-Sekunden zeigte zwischen den Situationen ohne Vorbelastung und mit Sprint-Vorbelastung in keiner Test-Sekunde einen signifikanten Unterschied. Beim Vergleich der Situationen ohne Vorbelastung und mit Ausdauer-Vorbelastung waren hingegen nach Ausdauer-Vorbelastung, mit Ausnahme der ersten Sekunde, die Tapping-Frequenzen in allen Sekunden signifikant größer. Der Vergleich Sprint-Vorbelastung gegen Ausdauer-Vorbelastung unterschied sich in dieser Hinsicht noch signifikant in den Sekunden 1, 3, 5, 9, 11 – 13 und 15.

3.5.3 Peak Frequenz

In der Testsituation ohne Vorbelastung erreichten die Probanden im Mittel eine Peak Frequenz von $5,2 \pm 0,9$ Hz, wobei die Werte im Vergleich hierzu nach Sprint-Belastung ($5,2 \pm 1,1$ Hz; $p = 0,911$) nicht signifikant, nach Ausdauer-Vorbelastung ($5,5 \pm 0,9$ Hz; $p = 0,015$) jedoch signifikant größer waren. Der statistische Vergleich zwischen Sprint- und Ausdauer-Vorbelastung zeigte für letztere Testsituation ebenfalls einen signifikant höheren Wert ($p = 0,029$).

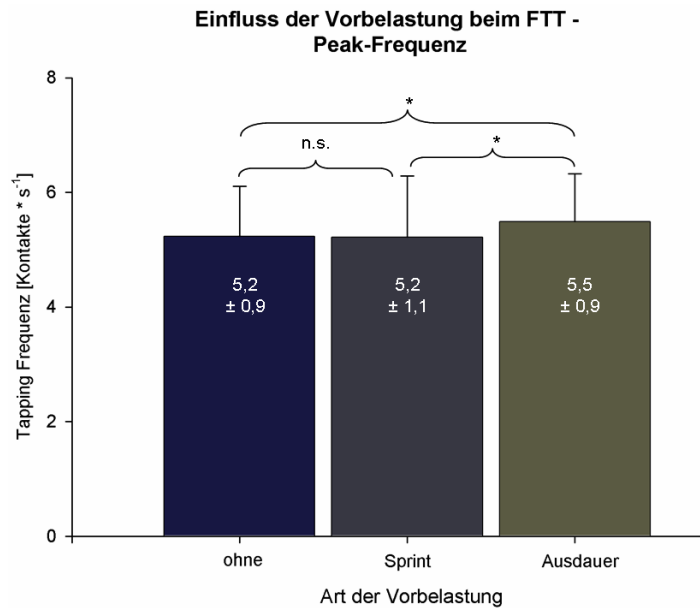


Abbildung 3.18: Peak-Frequenz beim FTT15 in drei Testsituationen verschiedener Vorbelastung

3.5.4 Fatigue Index

Für die Testsituation ohne Vorbelastung wurde bei den Probanden im Mittel ein Fatigue Index von $16,7 \pm 6,5$ berechnet. Nach Sprint-Vorbelastung lag der Fatigue Index bei $16,3 \pm 7,2$ und nach Ausdauer-Vorbelastung bei $16,6 \pm 5,7$. Eine vergleichende Untersuchung der drei Testsituationen zeigte keine Signifikanz der Unterschiede.

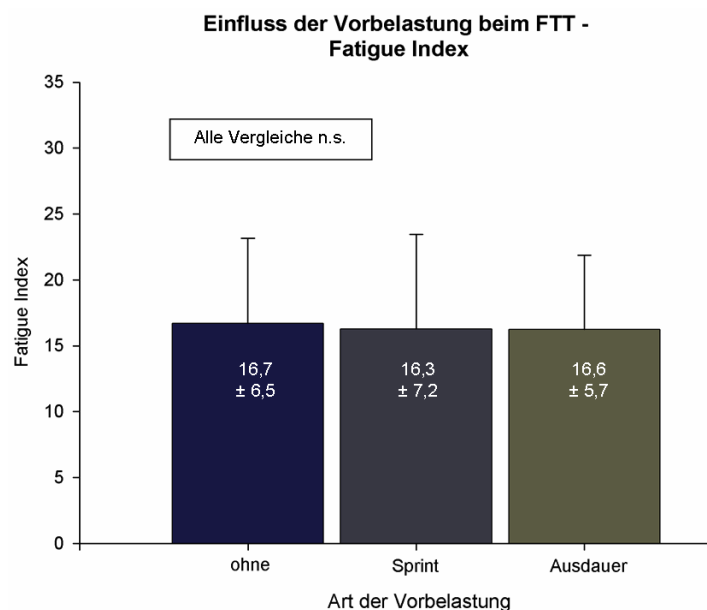


Abbildung 3.19: Fatigue Index beim FTT15 in drei Testsituationen verschiedener Vorbelastung

3.5.5 Segment F_{max}

Ohne Vorbelastung erreichten die Probanden ihre höchste Tapping-Frequenz zu Beginn des 2. Zeitsegmentes ($2,2 \pm 2,0$). Nach Sprint-Vorbelastung ($3,5 \pm 2,5$) sowie nach Ausdauer-Vorbelastung ($2,9 \pm 2,5$) lagen die Zeitpunkte etwas später. Die vergleichende Betrachtung der Testsituationen zeigt eine statistische Signifikanz des Unterschiedes jedoch nur für den Vergleich ohne Vorbelastung vs. Sprint-Vorbelastung ($p = 0,048$).

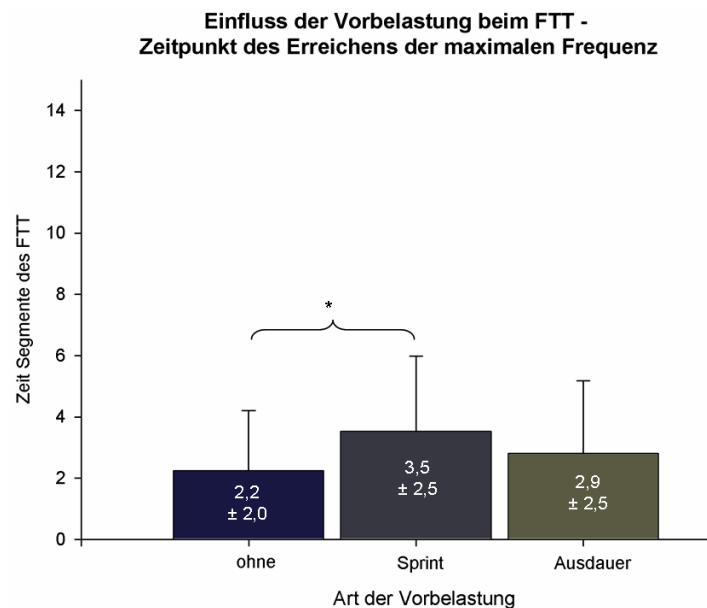


Abbildung 3.20: Zeitpunkt des Erreichens der höchsten Tapping-Frequenz (Segment F_{max}) beim FTT15 in drei Testsituationen verschiedener Vorbelastung

3.5.6 Einfluss der Vorbelastung beim Einbeinstand-Test

Die Werte für den Parameter Sway Length betragen in der Testsituation ohne Vorbelastung für den Messzeitraum Sekunde 1 – 7 $2,3 \pm 0,4$ m (3 – 7: $1,7 \pm 0,4$ m). Im Vergleich hierzu lagen die Werte nach Sprint-Vorbelastung (1 – 7: $2,6 \pm 0,6$ m, $p = 0,008$; 3 – 7: $1,9 \pm 0,6$ m, $p = 0,008$) signifikant höher. Die Vergleiche der Ausdauer-Vorbelastung (1 – 7: $2,8 \pm 0,4$ m; 3 – 7: $2,1 \pm 1,4$ m) zu den anderen beiden Testinhalten zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede.

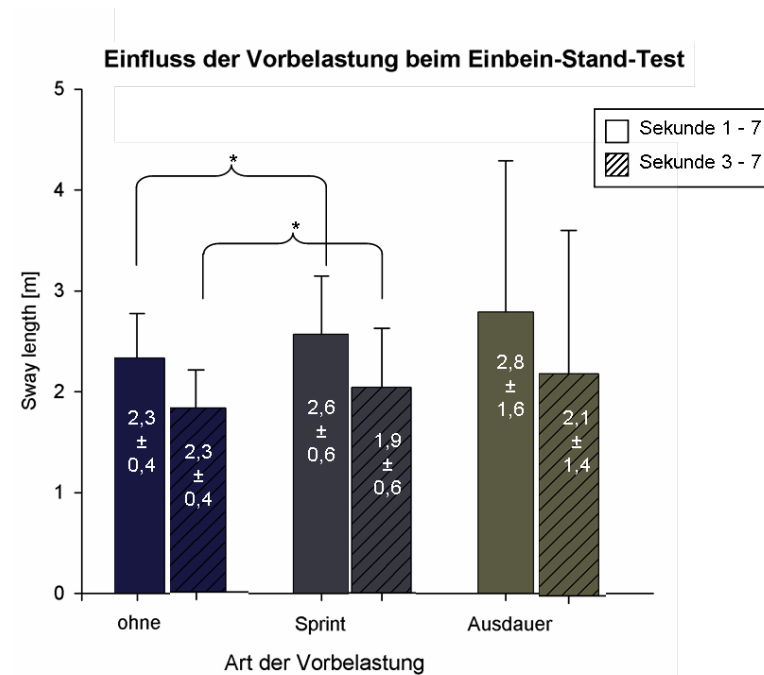


Abbildung 3.21: Schwankweg des Körperschwerpunktes (Sway Length) beim Einbeinstand-Test in drei Testsituationen verschiedener Vorbelastung

3.5.7 Leistungsphysiologische Werte zu verschiedenen Zeitpunkten des Testprotokolls

Zu Testbeginn

Die in Tabelle 3.7 dargestellten Parameter ‚Basis Laktat‘, ‚Laktat bei 5 km/h‘ und ‚Basis Herzfrequenz‘ unterschieden sich in den drei unterschiedlichen Testsituationen nicht signifikant.

Parameter	Ohne Vorbelastung		Sprint-Vorbelastung		Ausdauer-Vorbelastung		Signifikanzniveau p		
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW	Ohne vs. Sprint	Ohne vs. Ausdauer	Sprint vs. Ausdauer
Basis Laktat	1,2	0,3	1,1	0,3	1,2	0,4	0,156	0,90	0,19
Laktat 5 km/h	0,9	0,2	0,9	0,3	-	-	0,638	-	-
Basis HF	78,2	9,5	79,3	11,2	74,6	12,2	0,578	0,130	0,072

Tabelle 3.7: Leistungsphysiologische Parameter zum Zeitpunkt des Testbeginns an drei Test-Terminen mit unterschiedlichen Vorbelastungen

Vor FTT15-Beginn

In Tabelle 3.8 sind leistungsphysiologische Parameter dargestellt, die den körperlichen Belastungszustand der Probanden vor Beginn des EST und FTT15 auf der Kraftmessplatte belegen. Sowohl die absoluten und relativen Herzfrequenzwerte, wie auch der Blutlaktat-Wert unterschieden sich beim Vergleich der drei Vorbelastungssituationen hoch – bzw. höchstsignifikant.

Parameter	Ohne Vorbelastung		Sprint-Vorbelastung		Ausdauer-Vorbelastung		Signifikanzniveau p		
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW	Ohne vs. Sprint	Ohne vs. Ausdauer	Sprint vs. Ausdauer
Time to FP	90,8	35,1	104,8	20,4	106,8	29,5	0,063	0,039	0,748
HF pre FP	90,6	12,7	136,0	15,7	124,3	12,3	< 0,001	< 0,001	0,002
HF pre FP %	46,7	6,5	70,1	7,2	63,9	6,4	< 0,001	< 0,001	0,002
Laktat pre FP	0,9	0,2	7,4	2,0	1,4	0,5	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Tabelle 3.8: Leistungsphysiologische Parameter vor Beginn der Tests auf der Kraftmessplatte an drei Test-Terminen mit unterschiedlichen Vorbelastungen; grau hinterlegte Felder = statistisch signifikanter Unterschied

Nach FTT15-Ende

Nach Beenden des FTT15 unterschieden sich beim Vergleich der drei Vorbelastungssituationen das maximal erreichte Laktat und der RPE Wert bei allen Gegenüberstellungen hoch – bzw. höchstsignifikant. Die zu diesem Zeitpunkt erreichten maximalen Herzfrequenzwerte unterschieden sich in den Vergleichssituationen ohne Vorbelastung gegen Vorbelastung (Sprint / Ausdauer) höchst – und hochsignifikant, beim Vergleich der Testsituationen Sprint und Ausdauer war kein signifikanter Unterschied festzustellen (vgl. Tabelle 3.9).

Parameter	Ohne Vorbelastung		Sprint-Vorbelastung		Ausdauer-Vorbelastung		Signifikanzniveau p		
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW	Ohne vs. Sprint	Ohne vs. Ausdauer	Sprint vs. Ausdauer
Laktat _{max}	4,9	1,6	12,4	1,9	4,1	1,3	< 0,001	0,006	< 0,001
HF _{max}	151,3	16,7	165,2	10,6	163,8	10,0	< 0,001	0,001	0,368
HF _{max} prozentual	78,0	8,4	85,2	4,5	84,3	3,7	< 0,001	0,001	0,363
RPE	14,4	1,2	16,2	1,4	15,6	1,3	< 0,001	0,001	0,008

Tabelle 3.9: Leistungsphysiologische Parameter nach Beenden des FTT15 an drei Test-Terminen mit unterschiedlichen Vorbelastungen; grau hinterlegte Felder = statistisch signifikanter Unterschied

3.5.8 Korrelation zwischen Einbeinstand-Test und FTT15 Parametern

Mittels Korrelationsanalyse nach Pearson wurden die Zusammenhänge zwischen EST-Ergebnissen und leistungsphysiologischen Parameter des FTT15 überprüft, sowohl ohne Vorbelastung, als auch für die Testsituationen mit Sprint- bzw. Ausdauer-Vorbelastung. Hierbei zeigten sich in allen überprüften Fällen nur schwache bis sehr schwache Korrelationen. Dies galt für beide Untersuchungszeiträume (Sekunde 1-7 und Sekunde 3-7) des Einbeinstand-Tests.

3.6 Beschreibung der Probandengruppen

3.6.1 Anthropometrie

Die anthropometrischen Daten der beiden Probandengruppen sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst. Beim Vergleich der beiden Gruppen A und B zeigte sich, im Bereich der Anthropometrie, in keinem der untersuchten Parameter ein signifikanter Unterschied.

Parameter	Gruppe A (n = 25)		Gruppe B (n = 10)		Signifikanzniveau p
	MW	STABW	MW	STABW	
Alter	23,4	3,9	23,8	5,1	0,734 n.s.
Größe	182,3	7,2	178,8	5,7	0,440 n.s.
Gewicht	81,9	8,1	76,0	6,4	0,060 n.s.
Körperfett	16,2	4,6	15,9	3,9	0,262 n.s.
BMI	24,7	2,7	23,8	2,0	0,156 n.s.
RR SYS	127,9	5,5	132,2	10,7	0,642 n.s.
RR Dias	79,0	4,6	78,2	3,2	0,298 n.s.
Trainingsalter	16,8	4,6	16,4	5,5	0,409 n.s.
Trainingsstunden/ Woche	7,2	2,5	8,3	3,4	0,719 n.s.

Tabelle 3.10: Anthropometrische Daten der Probandengruppen A und B

3.6.2 Hauptsportart

Die Verteilung der Hauptsportarten zeigt ein deutliches Übergewicht an Hockeyspielern in der Gruppe A, wobei die Gruppe B aus Tennisspielern und Läufern besteht (vgl. Tabelle 3.11).

Sportart	Gruppe A (n = 25)		Gruppe B (n = 10)	
	Häufigkeit	Verteilung in %	Häufigkeit	Verteilung in %
Hockey	19	76	---	---
Tennis	2	8	6	60
Laufen	2	8	4	40
Basketball	2	8	---	---
Gesamt	25	100	10	100

Tabelle 3.11: Verteilung der Hauptsportarten innerhalb der Probandengruppen A und B

3.6.3 Leistungsphysiologische Ergebnisse des Stufentests

Die in Tabelle 3.12 dargestellte vergleichende Analyse der beim Stufentest erfassten Leistungsparameter beider Probanden-Gruppen zeigt in keinem der erhobenen Parameter einen signifikanten Unterschied.

Parameter	Gruppe A (n = 25)		Gruppe B (n = 10)		Signifikanz-niveau p
	MW	STABW	MW	STABW	
Basis Laktat	1,2	0,3	1,0	0,2	0,061 n.s.
Laktat bei 5 km/h	0,9	0,3	0,8	0,2	0,077 n.s.
Basis Herzfrequenz	80,4	10,6	78,2	12,99	0,201 n.s.
Max. gelaufene Geschwindigkeit	16,2	1,5	15,9	1,61	0,697 n.s.
Max. Herzfrequenz	194,0	8,0	192,3	8,5	0,385 n.s.
Max. Laktat	10,4	2,1	11,0	2,3	0,583 n.s.
RPE nach Abbruch des Stufentests	18,2	1,1	18,1	1,3	0,227 n.s.
VO _{2max}	60,1	5,1	56,2	1,9	0,446 n.s.
RQ _{max}	1,03	0,0	1,06	0,05	0,360 n.s.
Geschwindigkeit an der IAAS	13,2	1,3	12,5	0,9	0,599 n.s.
Herzfrequenz an der IAAS	175,0	7,9	172,2	7,8	0,600 n.s.
Laktat an der IAAS	3,5	0,7	3,9	0,9	0,501 n.s.

Tabelle 3.12: Leistungsphysiologische Ergebnisse der Probandengruppen A und B beim Stufentest

3.7 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Ergebnisprofil des FTT15

- In Bezug auf die in der vorliegenden Studie erhobenen Parameter existierte beim FTT15 ein „typisches Profil“, bei dem sich die Start und Finish Phasen signifikant unterschieden und für den die durchschnittliche Tapping-Frequenz bei $4,8 \pm 0,5$ Hz lag.
- Die mittlere Peak Frequenz lag bei $5,4 \pm 0,6$ Hz.
- Bei der untersuchten Probandengruppe wurde die Peak-Frequenz zu 95 % innerhalb der ersten 3 Sekunden erreicht, die kleinste Frequenz zu über 95 % innerhalb der letzten 3 Sekunden.
- Der gefundene Fatigue Index lag für die untersuchte Probandengruppe bei ca. 20 %.
- Die erhobenen Werte für Laktat, Herzfrequenz und RPE bestätigten den anaeroben Charakter der FTT15 Belastung.

Ergebnisse des Einbeinstand-Tests

- Die durchgeführten Messungen erbrachten einen mittleren Schwankweg von 2,65 m \pm 0,64 m.

FTT15 Reliabilitätsstudie

- Der FTT15 zeigte bei 6 in Folge durchgeführten Untersuchungen in Bezug auf die erhobenen Parameter eine gute Reliabilität. Vom ersten zum zweiten Test-Termin war jedoch eine signifikante Leistungszunahme festzustellen.
- Bei den erhobenen Leistungsdaten Herzfrequenz und Laktat ließ sich im Verlauf der Testserie eine signifikante Abnahme beobachten. Die RPE-Werte blieben stabil.

EST Reliabilitätsstudie

- Die Ergebnisse des EST ließen sich in 6 aufeinander folgenden Test-Terminen ohne signifikante Unterschiede wiederholen.

FTT15 und EST: Einfluss einer aeroben oder anaeroben Vorbelastung

- Eine aerobe Vorbelastung führte bei den im Rahmen der vorliegenden Studie erhobenen leistungsphysiologischen Parametern zu einer Leistungssteigerung.
- Nach aerober Vorbelastung unterschieden sich die EST-Ergebnisse nicht signifikant vom Zustand ohne Vorbelastung.
- Nach anaerober Vorbelastung entsprach die FTT15-Leistungsfähigkeit im Wesentlichen der Situation ohne Vorbelastung.
- Eine anaerobe Vorbelastung führte zu einer signifikanten Leistungsminderung beim Einbeinstand-Test.

4 DISKUSSION

4.1 Ergebnisprofil des FTT15

Um die Wertigkeit eines sportmotorischen Tests abschätzen zu können, um besser zu verstehen, welche Fertigkeiten überprüft und gemessen werden können und um Testergebnisse mit anderen Vergleichen zu können, bedarf es nicht nur fundierter theoretischer Kenntnisse, sondern auch praktischer Erfahrung in der jeweiligen Testgestaltung, besser noch detaillierter Referenzwerte. Bei etablierten Testverfahren existieren inzwischen umfangreiche Referenzdatenbanken, welche über Jahrzehnte gesammelte Ergebnisse unterschiedlicher Zentren und vielfältiger Fragestellungen beinhalten.²⁷ Weiter ist auch durch unzählige Durchführungen gängiger Tests bei den entsprechenden Instituten und Zentren ein relevanter Erfahrungsschatz vorhanden.

Bei einem sportmotorischen Testverfahren wie dem FTT15 ist die vorhandene Datenlage ungleich geringer. Nicht zuletzt auf Grund der uneinheitlichen Testprotokolle und Datenauswertungen, existiert zum jetzigen Zeitpunkt für den FTT15 keine zitierfähige Referenzdatenbank, viele Fragen bleiben offen. Um hier Abhilfe zu schaffen, soll die Bündelung der Daten in diesem Abschnitt zur Festigung eines ersten typischen FTT15 Testergebnisses beitragen. Es versteht sich von selbst, dass bei der gewählten Probandenanzahl und den begleitend durchgeführten Untersuchungen, kein Anspruch auf Vollständigkeit des FTT15 Testbildes erhoben werden kann. Vielmehr soll eine Diskussionsgrundlage geschaffen werden, auf deren Basis weitere Untersuchungsergebnisse das Bild vervollständigen und möglicherweise auch verändern können.

Kernaussagen zum FTT15 Ergebnisprofil

Die folgende Zusammenfassung liefert Antworten zu den unter 1.7 formulierten Fragestellungen bezüglich des FTT15 Ergebnisprofils.

- a. Die gefundenen Werte für Tapping-Frequenzen liegen bei etwa 5 Hz je Bein.
- b. Die typische Leistungskurve des FTT15 zeigt bereits zu Beginn des Tests die höchsten Frequenzwerte (vgl. Abb. 4.1), bei der untersuchten Probandengruppe wurde die Peak-Frequenz zu 95 % innerhalb der ersten 3 Sekunden erreicht. Eine Beschleunigungsphase konnte nicht beobachtet werden. Über den weiteren Testzeitraum ist ein sehr gleichmäßiger Rückgang der Tapping-Frequenzen zu verzeichnen, welcher als Ermüdungsprozess

gedeutet werden kann. Wie in Kapitel 3.1.2 gezeigt, ist dieser Abfall der Kontaktfrequenz vom Start über den Mittelteil zum Finish jeweils höchstsignifikant. Aus den abnehmenden Tapping-Frequenzen lässt sich ein Fatigue Index berechnen, welcher zwischen dem stärksten und dem schwächsten 2,5-Sekunden-Abschnitt eine Verminderung der Leistungsfähigkeit von etwa einem Fünftel zeigt. Die negative Steigung der Regressionsgeraden belegt über den Gesamt-Zeitraum gemittelt einen Leistungsabfall von knapp 10%.

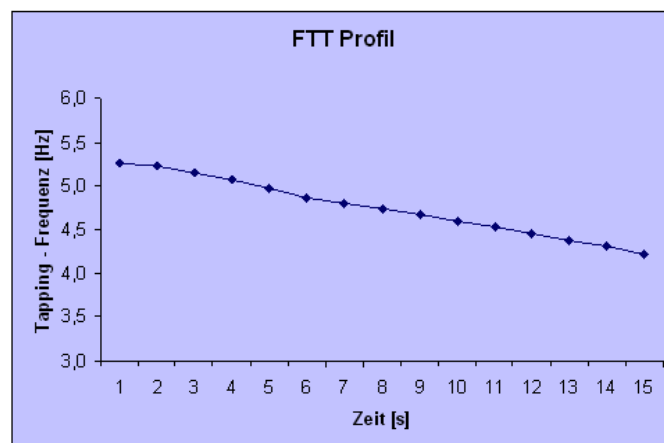


Abbildung 4.1: Typische Leistungskurve des FTT15, gemittelt aus 60 Test

- c. Die gefundenen Werte für Laktat (vor FTT15: 0,8 mmol/L; nach FTT15: 5,4 mmol/L), Herzfrequenz (vor FTT15: 50 % der HF_{max} ; nach FTT15: 76 % der HF_{max}) und RPE (14 = zwischen ‚etwas schwer‘ und ‚schwer‘) bestätigen den anaeroben Charakter der Foot-Tapping Belastung im FTT15 und zeigen ein erhebliches Maß an objektiver und subjektiver Beanspruchung der Probanden an.

Die aktuell vermutlich umfangreichste Zusammenstellung von Bewegungsfrequenzen bei zyklischen Schnelligkeitsleistungen lieferte Thienes in seinem Werk ‚Motorische Schnelligkeit bei zyklischen Bewegungsabläufen‘.⁸ Die an Thienes angelehnte und hier modifizierte Auflistung der Bewegungsfrequenzen in Tabelle 4.1 verdeutlicht, dass die in der vorliegenden Arbeit gefundenen mittleren und maximalen Tapping-Frequenz Werte deutlich höher liegen als alle dargestellten sportartbezogenen Frequenzanforderungen. Im Vergleich mit anderen Tapping – oder Kurbeltests zur Überprüfung der grundlegenden zyklischen Schnelligkeitsleistung decken sich die vorliegenden Ergebnisse hinsichtlich der Größenordnung gut.

Sportartbezogene Frequenzanforderung		Grundlegende zyklische Schnelligkeitsleistungen	
Leichtathletischer Sprint	1,9 – 2,6 Hz	Wechsels. Bein-Tapping	3,4 – 8,2 Hz
Dauerlauf	1,5 – 1,8 Hz	Skipping – Test	3,8 – 6,4 Hz
Rudern	0,5 – 0,6 Hz	Einseitiges Finger-Tapping	4,4 – 6,7 Hz
Eisschnelllauf	0,7 – 1,2 Hz	Einseitiges Fuß-Tapping	5,1 Hz
Skilanglauf	0,5 Hz	Handkurbelfrequenz	3,6 – 4,0 Hz
Radsport	1,4 – 2,0 Hz	Tretkurbelfrequenz	2,9 – 3,7 Hz
Kanurensport	0,7 – 1,0 Hz	Einseitiges Handkurbeln	3,2 – 3,5 Hz

Tabelle 4.1: Übersicht sportartbezogener Frequenzanforderungen und grundlegender zyklischer Schnelligkeitsleistungen; modifiziert nach Thienes⁸; Anmerkung: zur leichteren Vergleichbarkeit mit dem FTT15 wurden alle oben dargestellten Bewegungsfrequenzen bei wechselseitigen Bewegungen wie auch beim Laufen/Sprinten etc. auf die Erfassung nur einer Körperseite angepasst. Für den Sprint gilt hier beispielsweise nicht mehr die Einheit Schritte/Zeit sondern kompletter Bewegungszyklus (rechtes Bein + linkes Bein)/Zeit als Bewegungsfrequenz.

Thienes genauere Untersuchungen des Bein-Tappings erbrachten für die Testdurchführung im Sitzen (wechselseitiges Bein-Tapping, Untersuchungsdauer 15 Kontakte, Registrierung nur eines Beines) ein Frequenzmaximum von 6,1 Hz sowie bei 92 Probanden ein Frequenzmittel von 4,6 Hz.⁸ Die in der vorliegenden Arbeit ermittelte Peak Frequenz von 5,4 Hz liegt damit etwas niedriger als die zuvor genannte, wobei auch in der vorliegenden Arbeit einzelne Athleten kurzzeitig Frequenzwerte zwischen 6 und 7 Hz erreichten. Der beim FTT15 über die gesamte Testdauer gemittelte Wert von 4,8 Hz liegt sogar leicht über der Angabe von Thienes. Dies ist nicht selbsterklärend wenn man bedenkt, dass die Untersuchungen von Thienes im Sitzen stattfanden sowie eine deutlich kürzere Testdauer von nur etwa 3 Sekunden umfassten. Bei fehlender Eigengewichtsbelastung und damit erheblich geringerer Kraftaufwendung im Sitzen im Vergleich zum Stand sowie kurzer Testdauer, wären bei Thienes vergleichsweise höhere Tapping-Frequenzen zu erwarten, insbesondere bei in diesem Zusammenhang fehlendem Faktor Ermüdung und einem besseren Fokus auf die koordinative Leistung. Trotz unterschiedlicher Methodik können also grundsätzlich ähnliche Tapping-Frequenzen festgehalten werden. Mögliche Erklärungen für geringere Frequenzen bei Thienes sind eine durchschnittlich geringere Leistungsfähigkeit im Bereich zyklische Schnelligkeit bei den vom Autor gewählten Probanden oder eine in der vorliegenden Arbeit verwendete genauere Messmethodik.

Zur weiteren Charakterisierung von zyklischen Schnelligkeitsleistungen des menschlichen Körpers konnte Thienes mit seiner Arbeit eine signifikant höhere Frequenzschnelligkeit in den oberen Extremitäten bestätigen. Dies ist auch durch die elektrophysiologischen Untersuchungen von Bélanger et al. gut erklärt, die für die Muskeln der oberen Extremität kürzere Kontraktionszeiten als in den Beinmuskeln fanden.⁹² Armmuskeln verfügen über einen höheren Anteil an FT-Fasern als die Beinmuskeln, gleichzeitig nimmt die Entladungsfrequenz der Motoneurone vom Kopf

zu den Füßen hin ab.¹¹ Beides erklärt die höhere Frequenzschnelligkeit der Arme, welche Thienes mit einer Differenz von etwa 20 % zugunsten der oberen Extremität beschreibt.

Zum Besseren Verständnis des FTT15-Ergebnisprofils und zu dessen Beschreibung soll im folgenden Abschnitt ein Vergleich zu anderen hochfrequenten Bewegungszyklen kurzer Belastungsdauer gezogen werden.

100 m Sprint

Der klassische Sprint über kurze Distanzen (100 m oder kürzer) ist die schnellste leichtathletische Laufdisziplin und setzt sich nach Hollmann aus 4 Hauptabschnitten zusammen:

1. Startreaktion
2. Positive Beschleunigung
3. Grundschnelligkeit
4. Negative Beschleunigung.¹⁸

Der Abschnitt der positiven Beschleunigung kann bei Weltklassesprintern teilweise über 50 m beibehalten werden, wobei weniger gute Athleten bereits nach 25 m das Ende ihrer Beschleunigungsphase erreicht haben. Je nach Leistungsstärke kann also bis zum Erreichen der maximalen Sprintgeschwindigkeit eine Beschleunigungsphase von 3 - 5 Sekunden Dauer angenommen werden. Da für hohe Sprintgeschwindigkeiten sowohl die Schrittfrequenz als auch die Schrittlängen von großer Bedeutung sind,⁹³ ist in der Beschleunigungsphase des 100 m Sprints eine Steigerung beider Entitäten relevant. Wie aus Abbildung 4.2 zu entnehmen ist, erfordert die Schrittlängenzunahme einen etwas größeren Zeitaufwand als die Schrittfrequenzsteigerung. Für Vergleiche mit dem FTT15-Ergebnisprofil ist der letztgenannte Parameter offensichtlich am günstigsten, auch der gleichen Einheiten wegen.

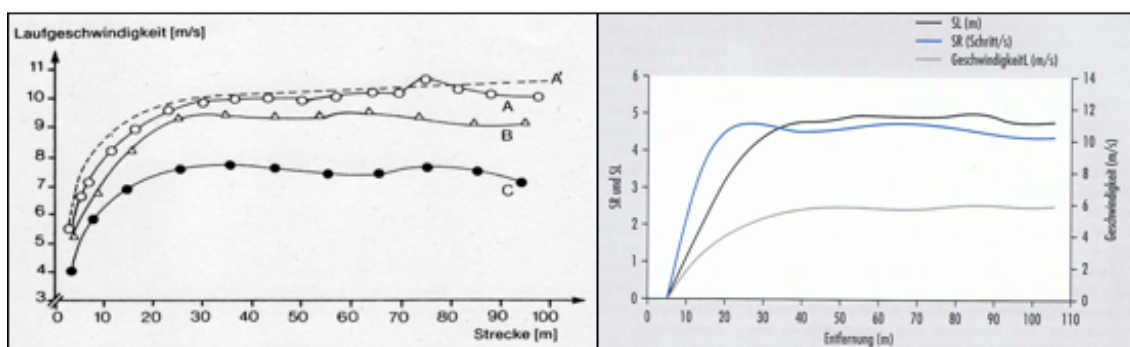


Abbildung 4.2: links: Geschwindigkeitskurven beim 100 m Sprint, A = erstklassiger Sprinter, B = zweitklassiger Sprinter, C = Sportstudent, A' = idealisierte Kurve (nach Ikai²⁵); rechts: das Verhalten von Schrittrate (SR) und Schrittlänge (SL) bei einem 100 m Lauf. Männliche Endlaufteilnehmer der Leichtathletikweltmeisterschaften 1991 (nach Ae et al.⁹⁴)

Im 100 m Sprint existiert also auch für die Schrittfrequenz über die ersten Sekunden eine Akzeleration. Diese Beschleunigungsphase konnte, wie oben angegeben, im charakteristischen Leistungsprofil des FTT15 nicht nachgewiesen werden. Vielmehr waren hier die höchsten Bewegungsfrequenzen zumeist in der ersten Testsekunde zu verzeichnen. Ursächlich ist der differierende Bewegungsablauf zu sehen, wobei das Tapping keine Fortbewegung und damit auch keine Beschleunigung des Körpers in horizontaler Richtung erfordert, sondern nur hochfrequente Bewegungen in vertikaler Dimension. Ebenso wenig spielt beim Tapping im Gegensatz zum Sprint die Überwindung des Luftwiderstandes eine Rolle.

Einschränkend muss jedoch festgehalten werden, dass eine sehr kurze Beschleunigungsphase auch beim FTT15 existieren könnte, diese aber von der gewählten Methodik möglicherweise nicht erfasst worden ist. So könnte die Mittelung der Kontaktfrequenz-Werte in Ein-Sekunden-Segmente dazu geführt haben, dass eine sehr kurze und weniger als eine Sekunde andauernde Beschleunigungscharakteristik in der Bewegung übersehen wurde. Weiter ist festzustellen, dass die Messung bei Durchführung des FTT15 jeweils manuell vom Testleiter gestartet wurde, wenn der Proband einen oder mehrere Kontakte mit der Kraftmessplatte hergestellt hatte. Dies birgt die Möglichkeit, dass der eigentliche Belastungsbeginn nicht korrekt erfasst wurde. In zukünftigen Untersuchungen könnte diese Unsicherheit dadurch beseitigt werden, dass, soweit technisch möglich, Messungen auf Kraftmessplatten nicht manuell sondern automatisch bei dem ersten Plattenkontakt gestartet werden.

Weltklassesprinter erreichen ihre maximale Geschwindigkeit nach etwa 50 Metern. Mit 44,72 km/h zwischen Meter 60 und 80 die bis dato höchste gemessene Geschwindigkeit erreichte Usain Bolt am 16.08.2009 bei seinem Weltrekord im Rahmen der Leichtathletikweltmeisterschaft in Berlin.

In ihrer Untersuchung zur Interaktion von Schrittlänge und Schrittfrequenz beim Sprinten fanden Hunter et al. bei den getesteten Athleten, welche sprinterfahren aber keine Hochleistungssprinter waren, Frequenzen zwischen 4,1 und 4,4 Hz,⁹³ eine Größenordnung, die von anderen Autoren auch für gute Sprint-Spezialisten bestätigt werden konnte.⁹⁵ Für die weltbesten Sprinter werden Schrittfrequenzen von 4,6 – 4,9 Hz angegeben. Es gilt zu beachten, dass in diese Angaben jeder getätigte Schritt des Athleten eingeht, also sowohl das rechte wie auch das linke Bein separat gezählt werden. Elite-Sprinter benötigen für die 100 m Distanz ca. 41 – 44 Schritte, was sich mit den obigen Angaben für die Schrittfrequenz deckt. Vor diesem Hintergrund unterscheidet sich jedoch die Definition eines Bewegungszyklus grundsätzlich von der einseitigen Zählweise im FTT15, welches, beim Vergleich beider Untersuchungen, eine Halbierung der angegebenen Sprint-Frequenzen erfordert.

Die beim 100 m Sprint von ausgezeichneten Athleten erreichten maximalen und durchschnittlichen Schrittfrequenzen liegen jeweils bei etwa 45 % der beim FTT15 erreichten Vergleichswerte. Erneut muss auch hier betont werden, dass beim Sprint eine hohe Laufgeschwindigkeit, also eine schnelle Horizontalbewegung des Körpers das primäre Ziel darstellt und nicht allein eine hohe Schrittfrequenz wie es beim Foot-Tapping der Fall ist.

Auch Weltklassesprintern ist es nicht möglich, die einmale erreichte Grundschnelligkeit, welche vielfach als maximale Sprintgeschwindigkeit bezeichnet wird, bis zum Ende des 100 m Laufes durchzuhalten. Zuvor setzt eine Phase der negativen Beschleunigung ein. Das gilt auch für Laufzeiten unterhalb von 10 s,^{25, 26} und ist durch eine Kombination aus zunehmender metabolischer und neuraler Ermüdung zu erklären. Bei der zuletzt genannten stellten Veränderungen im Bereich des motorische Kortex einen potentiell leistungsbegrenzenden Faktor dar.⁹⁶

Dick analysierte die Leistung der drei bestplatzierten Männer und Frauen der 100 m Endläufe der Olympischen Spiele von 1988 zur Erläuterung von Trainingsgrundsätzen. Dem zufolge kann die beste 10 m Zeit nur einmal erbracht werden. Die beste 10 m Zeit plus 0,01 s kann 30 m lang gehalten werden. Der Geschwindigkeitsverlust am Ende des 100 m Laufes liegt bei 0,02-0,04 s.⁹⁷

Beim Geschwindigkeitsprofil zweitklassiger Sprinter kann man ebenfalls eine Abnahme der Leistungsfähigkeit gegen Ende des Belastungszeitraumes erkennen (vgl. Abb. 4.2). Orientierend scheint diese bei etwa 10 % zu liegen, was einer Größenordnung entsprechen würde, die mit dem Abfall der Regressionsgeraden beim FTT15 vergleichbar wäre.

Radsport

Die Tret-Schnelligkeit auf dem Fahrrad soll ebenfalls als Analogie zur Tapping-Bewegung herangezogen werden. Hohe Frequenzen bei gleichzeitig hohen Energieleistungen effektiv zu treten ist eine koordinativ höchst anspruchsvolle Fähigkeit, die bei leistungsorientierten Radsportlern über Jahre ihrer aktiven Laufbahn antrainiert wird. Beim Tretkurbeln liegt das Ökonomieoptimum (errechnet aus dem Quotienten von Energieumsatz und Leistung) bei 40 bis 65 Umdrehungen pro Minute (höheres Drehzahloptimum bei höherer Leistung). Als Gründe für die Wahl energetisch ungünstiger Tretfrequenzen im Radrennsport werden taktische Überlegungen und der nicht lineare Verlauf des Zusammenhangs von physikalischer Leistung und Kraftempfinden aufgeführt.⁹⁸

Gerade im Profisport wird die Kraftübersetzung durch Montage entsprechender Zahnräder regelmäßig an die Fähigkeiten des Athleten und die im Rennabschnitt zu erwartenden Geschwindigkeiten angepasst, so dass unökonomisch hohe Tretfrequenzen vermieden werden. Ausnahmen können steile Abfahrten bei Bergetappen bilden. Untersuchungen maximaler Tretfrequenzen stellen also eher praxisferne Größen dar, welche als aussagekräftiger Transfer in den Leistungssportbereich angezweifelt werden müssen. Zur orientierenden Einschätzung der Interaktion und neuromuskulär koordinativen Fähigkeit der unteren Extremitäten können sie jedoch von Nutzen sein.

Beim Start aus dem Stand ist auch beim Rad-Sprint, der sich am ehesten zum Vergleich mit dem FTT15 eignet, eine initiale Akzeleration der Bewegungsfrequenz als notwendige Voraussetzung der Beschleunigung selbstverständlich. Im Gegensatz zum Tapping und zum 100 m Sprint existiert hier allerdings mit dem zwischen Mensch und Umwelt positionierten Fahrrad noch ein weiterer Einflussfaktor. Dieser führt durch biomechanische Größen wie Kraftübertragung, Gangschaltung und Sitzposition bezogen auf die Tretfrequenz zu einer weniger klaren Unterteilung des Bewegungszyklus in eine Beschleunigungs-, Höchstgeschwindigkeits-, und Ermüdungsphase. Auch Luftwiderstand und Aerodynamik haben auf Grund der höheren Geschwindigkeiten beim Radsport einen größeren Einfluss.

Beim Vergleich von Tapping-Frequenzen mit Bewegungsfrequenzen auf dem Fahrrad ist zu beachten, dass im Radsport normalerweise ein Optimum an vortriebswirksamer Leistung das Ziel darstellt, nicht jedoch eine höchstmögliche Tretfrequenz. Gute Radrennfahrer erlangen meist die Fähigkeit mit Tretfrequenzen von > 90 rpm (1,5 Hz) zu fahren, während freizeitlich orientierte Radfahrer oder Anfänger gewöhnlich geringere Frequenzen bevorzugen.^{99, 100} Daran gemessen liegt der auf einem Radergometer ermittelte Frequenzrekord mit 271 rpm¹⁰¹ (4,5 Hz) deutlich höher und fast im Bereich der beim FTT15 ermittelten Tapping-Frequenz.

Eine ebenfalls die Tretbewegung einbeziehende bessere Vergleichsmöglichkeit als die Freiluftuntersuchung, bietet der laborbasierte Wingate Anaerobic Test über 30 s mit seinem in Abbildung 4.3 dargestellten typischen Ergebnisprofil. Haupteinschränkung ist hier jedoch, dass nicht die maximal und über den Messzeitraum erbrachte Tretfrequenz, sondern die erbrachte Leistung gemessen und wiedergegeben wird. Umso mehr eignet sich der Wingate Test zur Überprüfung der anaerobe Kapazität und der kurzfristigen Ermüdung eines Athleten, zu deren Messung dieser Test letztlich entwickelt wurde (vgl. Kapitel 1.4).

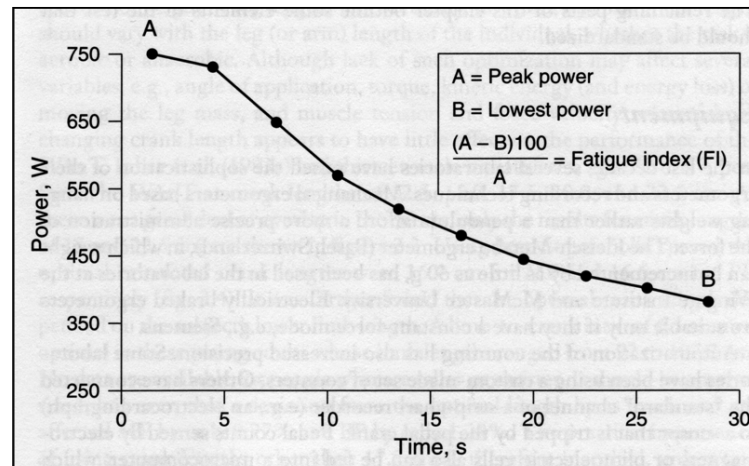


Abbildung 4.3: Der Wingate Anaerobic Test über 30 s: ein typischen Testprofil; aus: Inbar et al., The Wingate Anaerobic Test²⁷

Der Verlauf der ‚Wingate-Kurve‘ vermittelt den Eindruck, dass auch bei diesem Test das Leistungsmaximum vom Probanden sofort nach Testbeginn erbracht wird. Aus differenzierter betrachtender Literatur geht jedoch hervor, dass die maximale Leistung bei der höchsten Pedalgeschwindigkeit in der Regel nach ca. 3 – 5 Sekunden erreicht wird.³¹ Dies ist maßgeblich durch die Test-Methodik vorgegeben, da nach erfolgter Beschleunigung (ca. 3 – 4 s) die volle Bremslast erst bei maximaler Geschwindigkeit appliziert wird. Auch die in Abbildung 4.3 dargestellte Kurve lässt erkennen, dass etwa bis zur 5. Sekunde die Leistung noch fast in vollem Umfang erbracht werden kann, zwischen der 5. und 10. Sekunde sind der Leistungsabfall und damit auch die negative Steigung der Kurve am größten. Von hier an zeigt sich bis zum Ende der Belastung nach 30 Sekunden ein recht gleichmäßig abfallender Verlauf. Würde man anhand von Abbildung 4.3 den Wingate-Test künstlich auf die Dauer des FTT15 verkürzen, so hätte man nach 15 Sekunden einen Leistungsabfall auf etwa 500 Watt zu verzeichnen. Das entspricht einer ermüdungsbedingten Abnahme der Leistungsfähigkeit um etwa ein Drittel und liegt damit deutlich über dem Frequenzabfall des FTT15 von ca. 10 %. Hierbei gilt es zu beachten, dass der direkte Vergleich von zwei unterschiedlichen Parametern der Leistungsfähigkeit (Leistung und Frequenz) dem besseren Verständnis dienen soll, jedoch schon in sich einen Kunstgriff darstellt, und nur begrenzt zulässig ist.

Zusammenfassend liegt die Bewegungsfrequenz des Tappings beim FTT15 deutlich höher als die Bewegungsfrequenzen der anderen zum Vergleich herangezogenen Disziplinen.

Auf Grund der biomechanischen Eigenart des Bewegungsablaufes und der vom Probanden hierfür aufzubringenden Koordination und Kräfte, ist eine deutliche

Anfangsbeschleunigung der zyklischen Schnelligkeitsbewegung beim FTT15 nicht vorhanden. Sieht man von fliegenden Starts ab, ist im Gegensatz dazu, sowohl beim klassischen 100 m Sprint, als auch bei Radtests, das Vorhandensein einer deutlichen Beschleunigungsphase offensichtlich.

In Bezug auf das Ausmaß des ermüdungsbedingten Leistungsabfalls, liegt der 15 Sekunden FTT, bei zugegeben mangelhafter Vergleichbarkeit, qualitativ im Bereich zwischen dem nur sehr geringen Geschwindigkeitsverlust beim 100 m Sprint und dem ausgeprägten Leistungsabfall beim Wingate Anaerobic Test.

4.2 EST – Beurteilung der Ergebnisse aus 60 Untersuchungen

Um einen etablierten Test zur Überprüfung koordinativer Fähigkeiten zu nutzen und diesen zum FTT15 in Beziehung setzen zu können, wurde der EST als zusätzliches Testverfahren im Anschluss an die genannten Vorbelastungen durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit konnte so ein mittlerer Schwankweg (Sway Length; SA) von 2,65 m \pm 0,64 m für den Erfassungszeitraum von 7 Sekunden dokumentiert werden (Sekunde 3-7: 1,89 m \pm 0,35 m). Ein quantitativer Vergleich dieses Messergebnisses mit der Literatur gelingt trotz zunehmender wissenschaftlicher Nutzung von kraftmessplattenbasierten Gleichgewichts-Tests und dem Vorhandensein von epidemiologischen Studien zur Gleichgewichtskontrolle aus methodischen Gründen nicht. Nach Kenntnis des Autors der vorliegenden Studie existieren gegenwärtig keine publizierten Daten zum Schwankweg beim EST, die in einem Test-Setting erhoben wurden, welches einen aussagekräftigen Vergleich mit den vorliegenden Daten zulässt.

Zur Beschreibung des Gleichgewichtsverhaltens finden sich in der Literatur mehrheitlich die Parameter Schwankfläche (Sway Area; SA), Schwankgeschwindigkeit (Sway Velocity; SV) und maximale Entfernung des COP vom Ausgangspunkt.³⁵ Gerade die zeitgleiche Erfassung von Schwankgeschwindigkeit einerseits und von Aktivitätsmustern der fußgelenksumspannenden Muskulatur mittels EMG andererseits, haben zu neuen Erkenntnissen bei der Kontrolle des Gleichgewichts beim Einbeinstand geführt.¹⁰² Weder die genannten Kraftmessplattenparameter noch eine elektromyographische Datenerfassung waren jedoch Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Schwierigkeiten beim Vergleich mit der Literatur ergeben sich auch aus stark differierenden Untersuchungszeiten (wenige Sekunden bis zu mehreren Minuten) und heterogenen Testprotokollen hinsichtlich der an Probanden oder Patienten gestellten Aufgaben (Augen auf / zu; Bewegungsaufgaben; Störung des Gleichgewichts durch

den Testleiter etc.). Besonders deutlich wird auch die fehlende Möglichkeit eines direkten Vergleiches von Schwankwegen unterschiedlicher Studienprotokolle vor dem Hintergrund vielfach bestehender messtechnischer Unterschiede bei der Nutzung von Kraftmessplatten (Erfassungsfrequenz des COP, mathematische Algorithmen zur Berechnung der Zielparameter).

Um eine mögliche Einpendelphase innerhalb der ersten 2 Sekunden des EST besser beurteilen zu können und die Qualität der erhobenen Daten durch eine solche Phase nicht zu vermindern, wurde die vorliegende Auswertung der EST-Daten in zwei unterschiedlich langen Messzeiträumen vorgenommen, einmal mit und einmal ohne die ersten 2 Sekunden. Diesbezüglich zeigte sich jedoch kein unterschiedliches Ergebnis, was die Schlussfolgerung zulässt, dass eine Einpendelphase innerhalb der ersten 2 Sekunden mit deutlichem Unterschied zu dem restlichen Test nicht existierte. Entweder entsprachen die koordinativen Fähigkeiten der Probanden innerhalb EST-Sekunde eins und zwei ihren Leistungen im weiteren Verlauf des Tests, oder ein möglicher Einpendelprozess war viel kürzer und fand früher statt. Im Falle eines früheren Stattfindens ist denkbar, dass eine kurze Einpendelphase mit der hier gewählten Messmethode durch zu spätes manuelles Starten der Messung verpasst wurde. Zur weiteren Klärung dieses Zusammenhanges ist in zukünftige Studien ein automatischer Messbeginn beim ersten Plattenkontakt eines Probanden empfehlenswert.

Unklar bleibt, inwiefern der EST dadurch, dass er zeitlich zwischen Vorbelastung und FTT15 durchgeführt wurde, letzteren beeinflusst haben könnte. In diesem Zusammenhang muss festgehalten werden, dass die gewählte Reihenfolge zu einer geringfügigen Verlängerung der Erholungszeit vor Beginn des FTT15 geführt hat. Ob der EST selbst im Sinne einer Gleichgewichtsübung einen Einfluss auf die koordinativen Fähigkeiten der Probanden im nachfolgenden FTT15 gehabt haben könnte, bleibt offen.

4.3 FTT15 Reliabilitätsstudie

Die Reliabilität stellt neben der Validität und Objektivität eines der drei wichtigen Gütekriterien für empirische Untersuchungen dar und spielt daher auch im Rahmen von sportmotorischen Testverfahren eine große Rolle. Nur wenn die Replizierbarkeit der Ergebnisse unter gleichen Bedingungen gegeben ist, können Einflüsse durch veränderte Parameter beurteilt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie konnte an 6 aufeinander folgenden Test-Terminen bei allen untersuchten FTT15-Kraftmessplatten-Parametern eine gute Reliabilität

gezeigt werden. Nur vom ersten auf den zweiten Test-Termin wurde bei den Parametern ‚Anzahl der Kontakte‘ und ‚Kontaktfrequenz‘ (auch signifikanter Unterschied zwischen Termin 1 und 3) ein signifikanter Unterschied beobachtet. Als Grund für diesen initialen Leistungszuwachs muss eine Habitualisierung bezüglich des Bewegungsablaufes vermutet werden. Auch ein unterschiedlicher Motivationszustand der Probanden an den verschiedenen Test-Terminen kann als Einflussfaktor nicht ausgeschlossen werden. Die Motivationslage wurde jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht erfasst. Da es sich bei den meisten untersuchten Probanden bei dem ersten hier aufgeführten Test-Termin auch um den ersten Aufenthalt in den Räumlichkeiten des Hamburger Instituts für Sportmedizin handelte, ist auch eine Gewöhnung an die neue Umgebung denkbar. Als Reaktion auf diese in Gruppe B gefundenen Ergebnisse wurden in einer weiteren Probandengruppe (Gruppe A) vor Beginn einer Testreihe mit anderer Fragestellung Habitualisierungsversuche im Rahmen des Mannschaftstrainings durchgeführt. Diese beinhalteten Simulationen der Tapping-Bewegung über den geforderten Zeitraum von 15 Sekunden ohne Kraftmessplatte.

Für den Wingate-Test wurden in Retest-Reliabilitätsstudien Korrelationskoeffizienten zwischen 0,89 und 0,99 gefunden.²⁷ Die in der vorliegenden Studie für 6 aufeinander folgende Termine gefundenen Korrelationskoeffizienten lagen für den Parameter Gesamt-Kontaktanzahl zwischen 0,69 und 0,98 und somit etwas niedriger als beim WANt. Insgesamt zeigten sich jedoch auch hier durchgehend Koeffizienten starker oder sehr starker Korrelation (vgl. Tabelle 3.3). Hebestreit et al. kamen in ihrer Studie zum WANt sogar zu dem Ergebnis, dass 20 Minuten Pause zwischen zwei Tests für reliable Ergebnisse mehr als ausreichend ist.¹⁰³ Dieser Zusammenhang ist beim FTT bisher nicht bekannt, könnte jedoch Subjekt weiterer Forschungsarbeit sein.

Bei der Reliabilitäts-Analyse der weiteren leistungsphysiologischen Parameter des FTT15 zeigte sich im Laufe der Testserie ein signifikantes Absinken der nach FTT15-Durchführung maximal erreichten Herzfrequenz (vgl. Kapitel 3.3.7.2) und ein ebenso signifikantes Absinken der nach FTT15-Durchführung maximal erreichten Laktat Werte (vgl. Kapitel 3.3.8). Die RPE-Werte sowie Maximal- und Durchschnitts-Tappingfrequenzen zeigten über die 6 Test-Termine jedoch einen stabilen Verlauf. Es kann also festgehalten werden, dass die objektive Leistung sowie der subjektive Grad der Belastung gleich blieben, das Ausmaß der objektiven Beanspruchung jedoch abnahm. Hier kann von einer Ökonomisierung der Tapping-Bewegung ausgegangen werden, welche im Verlauf der Testserie bei den untersuchten Probanden stattgefunden hat.

4.4 Einbeinstand-Test Reliabilitätsstudie

Da auch beim EST keine signifikanten Unterschiede von Termin 1 bis 6 festzustellen waren, kann eine gute Reliabilität für dieses Untersuchungsverfahren mit den vorliegenden Ergebnissen bestätigt werden.

In der Literatur finden sich widersprüchliche Aussagen zur Reliabilität von kraftmessplattenbasierten Untersuchungen der Gleichgewichtsfähigkeit. So fanden Ishizaki et al. eine gute Reliabilität bei Untersuchungen des Schwankweges und der Schwankgeschwindigkeit an 24 gesunden Probanden,¹⁰⁴ Levine et al. konnten eine ausreichende Reliabilität für den Schwankweg bei 20 hemiplegischen Patienten dokumentieren.¹⁰⁵ Auch Benvenuti et al. zeigten mittels dreidimensionaler Bewegungsanalyse und Untersuchungen auf Kraftmessplatten bei 36 älteren Probanden mit Gleichgewichtsproblemen für das Körperschwanken ein hohes Maß an Retest-Reliabilität.¹⁰⁶ Dem gegenüber stehen Publikationen von Goldie et al. und Hill et al., die auf die schlechte Retest-Reliabilität beim Einsatz von Kraftmessplatten zur Gleichgewichtsdagnostik hinweisen.^{42, 107} Als Grund für die differierenden Reliabilitätswerte bei Einbeinstand-Tests können Unterschiede im Probanden-/Patientenkollektiv sowie in der Methodik angenommen werden.

4.5 Auswirkung einer spezifischen Vorbelastung auf die durch FTT15 und EST abgebildeten leistungsphysiologischen Parameter

Eine Aerobe Vorbelastung verbessert die FTT15-Leistungsfähigkeit

Nach Absolvieren einer 30 Minuten andauernden Vorbelastung im Grundlagenausdauerbereich zeigten Probanden, verglichen mit Testsituationen ohne Vorbelastung oder nach Sprint-Vorbelastung, bei vielen Parametern des FTT15 einen signifikanten Leistungszuwachs. Beim Parameter Kontaktanzahl konnte über den Testzeitraum von 15 Sekunden im Mittel ein Zuwachs von 7,5 % (ohne: 68,0; Ausdauer: 73,1) dokumentiert werden, dies entspricht einer mittleren Tapping-Frequenz von 4,7 Hz in der Testsituation ohne Vorbelastung und 5,0 Hz nach Ausdauer-Vorbelastung. Die gesteigerte Leistungsfähigkeit zeigte sich auch in einem Zuwachs der maximalen Schnelligkeitsleistung um 5,8 % (Peak Frequenz ohne Vorbelastung: 5,2 Hz; nach Ausdauer-Vorbelastung: 5,5 Hz), wobei sich der Ermüdungsparameter ‚Fatigue Index‘ beim Vergleich der Vorbelastungsformen unverändert zeigte. Zusammenfassend ist nach einer Vorbelastung im

Grundlagenausdauerbereich die Foot-Tapping Leistungsfähigkeit über die gesamte Testdauer angehoben, der ermüdungsbedingte Leistungsabfall innerhalb des FTT15-Testzeitraumes bleibt unverändert.

Erklären lässt sich dieser signifikante Leistungszuwachs über eine Vielzahl biologischer, neurophysiologischer und psychologischer Veränderungen, die im weitesten Sinne unter dem Begriff ‚Aufwärmen‘ subsumiert werden können. Differenzierter betrachtet spielen temperaturvermittelte Faktoren, wie die Ökonomisierung und Beschleunigung von Stoffwechselprozessen, eine Abnahme elastischer und visköser Widerstände, sowie eine höhere Nervenleitgeschwindigkeit eine wichtige Rolle. Ebenfalls von großer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die temperaturunabhängigen Faktoren Bewegungsbahnung und Automatisierung, der Vorstartzustand sowie ein gesteigertes Bereitschaftsniveau.

Bei einer FTT15 Untersuchungszeit von 15 Sekunden und damit formaler Zugehörigkeit zu Tests intermediärer Beanspruchungsdauer erscheint es weiter möglich, dass die mit aktivem Aufwärmen assoziierte Leistungssteigerung teilweise aus einer erhöhten Basis-Sauerstoffaufnahme bei Beginn des Tapping-Tests resultiert. Dies führt, der Mobilisations-Theorie entsprechend, anfänglich zu einem geringeren Sauerstoffdefizit und in späteren Testphasen zu einer größeren Reserve anaerober Kapazität (vgl. Kapitel 1.5).⁵⁵

Zur Beurteilung des potentiell leistungsbeeinflussenden Effektes von Aufwärm-Programmen auf nachfolgende Untersuchungen und Belastungen, ist eine weitere Erfassung und Unterteilung hinsichtlich folgender Kriterien relevant:

- Aufwärm-Dauer
- Aufwärm-Intensität
- Aufwärm-Charakteristik
- Ausmaß des Temperaturanstieges in der Muskulatur

Die Dauer eines Aufwärmprogrammes sowie seine Intensität und Charakteristik haben direkten Einfluss auf den Anstieg der Muskeltemperatur.^{60, 108} Neuromotorische Leistungssteigerungen nach Aufwärmprogrammen werden zu einem erheblichen Anteil als direkt temperaturvermittelt angesehen. Bei fehlender Erfassung der Temperaturveränderungen, wie es in der vorliegenden Arbeit der Fall ist, können Rückschlüsse auf das Erwärmungsniveau nur über die bekannten Parameter Aufwärm-Dauer, -Intensität und -Charakteristik gezogen werden. In diesem Zusammenhang haben Untersuchungen von Asmussen et al. gezeigt, dass die Muskeltemperatur im Gegensatz zur Rektaltemperatur erst nach ca. 20 – 30 min einen stabilen Wert um

38,0° C erreicht. Die parallel dazu gemessenen Sprintzeiten korrelieren negativ mit der Körpertemperatur (vgl. Abb. 4.4).³³

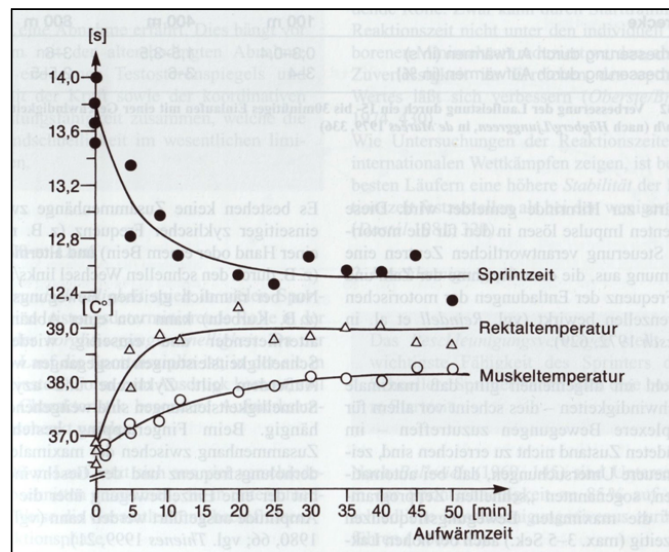


Abbildung 4.4: Bedeutung des Aufwärmens für die Sprintleistung (nach Asmussen et al.³³)

Bei einer Belastungsdauer von 30 Minuten und einer Intensität von 65% der VO_{2max} kann davon ausgegangen werden, dass die in der vorliegenden Arbeit gewählte aerobe Vorbelastung eine ausreichende Erwärmung der Arbeitsmuskulatur verursacht hat. Die oben aufgeführten Kriterien können also bezüglich Erwärmungs-Dauer und Intensität als erfüllt angesehen werden.

Dieser Zusammenhang gilt nicht für die zum Vergleich herangezogene Testsituation ‚ohne Vorbelastung‘. Hier absolvierten die Probanden ein definiertes ‚Eingehen‘, welches bei einer Dauer von 5 Minuten und einer Laufbandgeschwindigkeit von 5 km/h erheblich kürzer und weniger intensiv war. Die leistungsphysiologischen Parameter dokumentieren, dass Probanden nach dem ‚Eingehen‘ weder objektiv noch subjektiv belastet waren (vgl. Kapitel 3.5.7). Auch ohne das Vorliegen von Temperaturwerten erscheint es plausibel, dass in der Testsituation ‚ohne Vorbelastung‘ keine relevante T_M Erhöhung stattgefunden hat, temperaturabhängige Einflüsse auf den nachfolgenden FTT15 daher ausgeschlossen werden können. Ob das ‚Eingehen‘ temperaturunabhängig für Folgetests leistungsbeeinflussend war, kann anhand der vorliegenden Daten nicht beurteilt werden. Eine vergleichende Untersuchung der Testsituationen mit und ohne Ausdauer-Vorbelastung erscheint vor dem genannten Hintergrund zulässig.

Höhere Herzfrequenz- und RPE-Werte bei niedrigeren Laktat-Werten nach stattgehabter aerober Vorbelastung: Zeichen der Ökonomisierung beim FTT15

Die leistungssteigernde und in Zusammenhang mit dem Aufwärmen stehende Ökonomisierung der Stoffwechselprozesse lässt sich auch anhand weiterer leistungsphysiologischer Parameter dokumentieren. So erreichten die Probanden beim FTT15 nach stattgehabter Ausdauer-Vorbelastung im Vergleich zur Situation ohne Vorbelastung eine höhere maximale Herzfrequenz. Dies ist als Ausdruck der objektiv insgesamt größeren Beanspruchung des Körpers und der schon vor Betreten der Kraftmessplatte signifikant erhöhten Herzfrequenzwerte zu sehen. Auch subjektiv empfanden die Probanden beim Vergleich der genannten Testsituationen durch den FTT15 nach aerober Vorbelastung eine größere Anstrengung (höherer RPE Wert nach dem Test) im Vergleich zur Ruhe-Situation. Der maximal erreichte Laktat-Wert zeigte sich beim FTT15 nach erfolgtem Aufwärmen jedoch signifikant erniedrigt (vgl. Kapitel 3.5.7). Eine Ökonomisierung der im Rahmen des FTT15 bedeutsamen Stoffwechselaktivität mit gesteigerten Laktat-Abbauraten und / oder einer verminderten Laktat-Produktion bei geringerem Ausschöpfen anaerob-laktazider Energiequellen und verhältnismäßig höherem Anteil aerober Energiegewinnung nach Aufwärmen durch eine halbe Stunde moderates Laufen, stellen hierfür mögliche Erklärungen dar.^{55, 60}

Die Ergebnisse und Erklärungsmodelle der vorliegenden Studie werden durch eine Veröffentlichungen von Gray et al. gestützt, welche in einem Fahrradtest von 6 Sekunden Dauer und maximaler Intensität nach passiver Muskelerwärmung ebenfalls eine temperaturvermittelte signifikante Zunahme der Trittfrequenz und Leistung fanden.¹⁰⁹ Mittels Muskelbiopsien und Oberflächen-Elektromyographie Messungen (sEMG) gelang es den Autoren in der Testsituation mit erhöhter T_M eine signifikant gesteigerte ATP-Umsatzrate und Muskelfaserleitungsgeschwindigkeit als Erklärung für den Leistungszuwachs zu liefern.

Der mit pre Test Aufwärmen assoziierte Leistungszuwachs beim FTT15 ist auch quantitativ mit der Literatur konsistent

Die Annahme, dass ein vorbelastungsvermittelter T_M Anstieg zu einer Leistungssteigerung im sich anschließenden FTT15 führt, ist konsistent mit Untersuchungen von Stewart et al., die Auswirkungen verschiedener Aufwärm-Intensitäten (15 Minuten Lauf bei 60, 70 oder 80 % VO_2max) auf die anaerobe Leistungsfähigkeit in einem sich anschließenden maximalen Laufband-Test (Zeit bis zur Erschöpfung bei 13 km/h, 20 % Steigung) evaluierten und bei einer Intensität von 60 und 70 % VO_2max signifikante Verbesserungen der anaeroben Leistungsfähigkeit

dokumentieren konnten (60 % VO₂max: Steigerung um 10 %; 70 % VO₂max: Steigerung um 13 %).⁶²

In einer weiteren Studie zur körperlichen Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der Muskeltemperatur fand Sargeant nach passiver Kühlung und Erwärmung der Muskulatur von Probanden bei einem 20-Sekunden-Fahrradtest und einer Tretfrequenz von 54 rpm einen Anstieg der Maximalkraft um 2 % pro °C Steigerung der Muskeltemperatur. Bei sonst gleichen Bedingungen aber einer Tretfrequenz von 140 rpm zeigte sich ein Maximalkraftzuwachs um 10 % pro °C Muskeltemperaturanstieg.¹¹⁰ Bei einem angenommenen und mit der Literatur gut vereinbaren Muskeltemperaturanstieg von 2 °C,¹⁰⁸ ist der Leistungszuwachs (Anzahl der Kontakte) in der vorliegenden Arbeit mit ca. 3,8 % pro °C Steigerung der Muskeltemperatur auch quantitativ konsistent mit den Ergebnissen von Sargeant. Mit weiteren Studien, die bei Kurzzeitbelastungstests (z.B. Vertical Jump-Tests) eine Leistungssteigerung nach aktivem Aufwärmen von > 3,5 % pro °C Steigerung der Muskeltemperatur aufzeigen, ist das vorliegende Ergebnis bei eingeschränkter Vergleichbarkeit ebenfalls vereinbar.^{111, 112} Im Weiteren deuten die von Sargeant erhobenen Ergebnisse darauf hin, dass temperaturvermittelte Änderungen in der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung möglicherweise bei hochfrequenten Bewegungen, wie es auch der FTT15 eine ist, größer ausfallen.

Dass die Effekte passiver Muskelerwärmung auf die Leistungsfähigkeit bei sich anschließenden Belastungen mittlerer Dauer (> 10 Sekunden, < 5 Minuten) stark von der Bewegungsgeschwindigkeit abhängen, konnten auch Ferguson et al. bestätigen. Bei gesteigerter T_m und einer Tretgeschwindigkeiten von 60 rpm im Fahrrad-Test, fanden die Autoren sogar eine insgesamt reduzierte mechanische Effizienz, wobei die doppelte Tretgeschwindigkeiten von 120 rpm eine im Vergleich höhere mechanische Effizienz bei geringerem Energieumsatz erbrachte.¹¹³

Bishop beschreibt zusammenfassend in seiner Übersichtsarbeit zur Beeinflussbarkeit der sportmotorischen Leistungsfähigkeit durch passives Erwärmen, dass bei kurzzeitigen Belastungen (< 10 Sekunden) passives Erwärmen isometrische Kräfte nicht verbessert, dynamische Kräfte jedoch möglicherweise erhöht werden. In diesem Zusammenhang scheint die temperaturabhängige Leistungssteigerung insbesondere bei hohen Kontraktionsgeschwindigkeiten ins Gewicht zu fallen. Obwohl der genaue Mechanismus noch zu klären bleibt, scheint passives Erwärmen die Leistungsfähigkeit bei Belastungen mittlerer Dauer (> 10 Sekunden; < 5 Minuten) ebenfalls zu verbessern, während Erwärmen vor Belastungen langer Dauer (> 5 Minuten) nicht leistungssteigernd und möglicherweise sogar leistungsmindernd wirkt.⁵⁵

Mit einer Testdauer von 15 Sekunden kann der FTT15 in Anlehnung an Bishop im Bereich der Belastungen kurzer und mittlerer Dauer gesehen werden, zusätzlich handelt es sich um eine hochfrequente Bewegungsabfolge. Die in der vorliegenden Arbeit gefundenen Ergebnisse, die eine signifikante FTT15-Leistungssteigerung nach stattgehabtem Aufwärmen belegen, stehen also in gutem Einklang mit der Literatur.

Die einzige dem Autor bekannte Veröffentlichung, welche sich direkt mit dem Einfluss von Ermüdung auf einen sich anschließenden 15 Sekunden Tapping-Test (der Hände) bezieht, ist eine Studie an 24 männlichen Box-Sportlern, in der Ross et al. den Einfluss von Angst und Ermüdung auf bestimmte leistungsphysiologische Parameter untersuchten. Die Autoren stellten fest, dass die Athleten im Mittel nach einer körperlich ermüdenden Vorbelastung signifikant höhere Tapping-Geschwindigkeiten erreichten als in der Situation ohne Vorbelastung.¹¹⁴ Thienes stellte in Frage, inwieweit die in der genannten Untersuchung genutzten boxspezifischen Belastungsparameter zentral oder peripher für die am Tapping beteiligte Muskulatur relevant seien und formulierte auf Basis dieser Ergebnisse die These, dass allgemeine körperliche Beanspruchungen die spezifische Leistung bei grundlegenden motorischen Schnelligkeitsleistungen nicht beeinträchtigen.⁸ Würde man die von Ross gewählte Beanspruchung bezüglich der lokalen Muskelermüdung als submaximal und ausreichend aufgabenspezifisch ansehen, so wären die Leistungssteigerung nach Vorbelastung gut mit den Prinzipien ‚Aufwärmen‘ und ‚Erlangen eines Aktivierungszustandes‘ zu erklären, was sie mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit zu Übereinstimmung bringt.

Nach anaerober Vorbelastung (Sprint) unterscheiden sich die wesentlichen FTT15 Ergebnisse nicht von der Testsituation ohne Vorbelastung, die Peak Frequenz wird jedoch erst später erreicht

Die in der vorliegenden Studie durchgeführte anaerobe (Sprint) Vorbelastung hatte bei allen Probanden eine erhebliche neuromuskuläre Ermüdung zur Folge, welche sich anhand der subjektiv erfahrenen Beanspruchung (RPE) und der objektiven leistungsphysiologischen Parameter (HF, Laktat, RQ) demonstrieren lässt (vgl. Kapitel 3.5.7 und Kapitel 4.6.1).

Bei dem sich an diese Vorbelastung in engem zeitlichen Kontext anschließenden FTT15, war zwar im Vergleich zur aeroben Vorbelastungssituation eine Leistungseinbuße bei vielen FTT15-Parametern festzustellen, verglichen mit der Testsituation ohne Vorbelastung war jedoch kein relevanter Unterschied vorhanden. Dies gilt für die Kontaktanzahl, die maximal erreichte Tapping-Frequenz F_{\max} wie auch

für das FTT15-Kontaktfrequenz-Profil. Eine Ausnahme bildete in diesem Zusammenhang der Zeitpunkt der Maximalfrequenz, welcher nach anaerober Vorbelastung signifikant später (Sekunde 3,5) als in der Testsituation ohne Vorbelastung (Sekunde 2,2) lag. Abgesehen vom verspäteten Erreichen der Maximalfrequenz entsprachen die FTT15-Ergebnisse nach maximal ermüdender Vorbelastung also im Wesentlichen den Werten, welche im ausgeruhten Zustand zu erheben waren.

Ermüdungserscheinungen nach stattgehabter anaerober Vorbelastung beeinflussen die FTT15-Leistungsfähigkeit

Die Frage nach einer exakten Lokalisierung der Ermüdungserscheinungen, welche nach anaerober Vorbelastung zu beobachten waren und mutmaßlich mit einer neuromuskulären Leistungsminderung in Zusammenhang stehen, bleibt auch mit der vorliegenden Arbeit unbeantwortet. Eine Hemmung an allen Mechanismen und Orten der willkürlichen Muskelkontraktion ist denkbar (vgl. Tab. 1.3), ein multifaktorielles Geschehen gilt als hochwahrscheinlich. In Anbetracht der zeitlich begrenzten und maximal ermüdenden Sprint-Vorbelastung, sowie der sich anschließenden intensiven Kurzzeitbelastung beim FTT15, kann jedoch vermutet werden, dass im genannten Test-Setting insbesondere die lokale muskuläre Ermüdung eine relevante Größe darstellt.

Umfassende Erkenntnisse bezüglich lokaler muskulärer Ermüdung bei sukzessiven Belastungen liefern Studien zu Leistungsfähigkeit, Ermüdung und unterliegenden metabolischen Prozessen bei wiederholten kurzen Sprints, so genannten ‚Repeated-Sprint Activities‘ (RSA). Im Rahmen dieser Untersuchungen, welche repetitive, hochintensive Belastungen simulieren, wie sie regelmäßig bei Feldsportarten (z.B. Hockey, Fußball, Rugby) vorkommen, konnte eine fortschreitende Abnahme der erbrachten Leistung festgestellt werden, deren Ausmaß im Wesentlichen durch die Dauer der dazwischen liegenden Pausen bestimmt war.¹¹⁵

In seiner Übersichtsarbeit ‚Multiple Sprint Work‘ beschreibt Glaister detailliert die Energetik wiederholt durchgeführter intensiver Schnelligkeitsbelastungen und verweist in diesem Zusammenhang auf eine vornehmlich Kreatinphosphat vermittelte ATP-Bereitstellung in Belastungsphasen und einen ausschließlich aeroben Energiebeitrag zur Restitution der Homöostase während der Erholungsphasen.¹¹⁶ Für den Erhalt der Leistungsfähigkeit beim multiplen Sprinten, scheinen aus energetischer Sicht, die Kreatinphosphat Verfügbarkeit und die Menge der intrazellulären P_i Akkumulation die wichtigsten Determinanten darzustellen. Die Tatsache, dass sowohl die Kreatinphosphat Resynthese wie auch die intrazelluläre P_i Beseitigung

sauerstoffabhängige Prozesse sind, legt zusätzlich nahe, dass ein hohes Mass an aerober Fitness eine gesteigerte Widerstandsfähigkeit gegen Ermüdung bei repetitiven Sprintbelastungen vermittelt.¹¹⁶

Zur Einordnung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in den Fundus bestehender Literatur ist es zweckmäßig, die durchgeführte Sprint-Vorbelastung als Aufwärm-Programm besonders hoher Intensität zu sehen.

In diesem Kontext fanden Stewart et al. in Ihrer Studie über Auswirkungen verschiedener Aufwärm-Intensitäten auf die anaerobe Leistungsfähigkeit in einem sich anschließenden maximalen Laufband-Test, bei einer Vorbelastungs-Intensität von 80 % VO_2max im Gegensatz zu den geringeren Intensitäten keinen Leistungszuwachs.⁶² Es kann davon ausgegangen werden, dass bei 80 % VO_2max ein für Aufwärmen günstiges Intensitätsniveau überschritten wurde und sich ermüdungsbedingt die bei geringerer Vorbelastung beobachteten leistungssteigernden Effekte nicht einstellten. Die anaerobe Vorbelastung der vorliegenden Arbeit war als Sprint-Maximalbelastung bezüglich ihrer Intensität deutlich über der von Stewart et al. beschriebenen 80% VO_2max einzuordnen, woraus eine verhältnismäßig größere neuromuskuläre Beanspruchung und Ermüdung gefolgert werden kann. Die in der vorliegenden Arbeit gefundene fehlende Leistungssteigerung im FTT15 nach hochintensiver Vorbelastung steht also in gutem Einklang mit der zuvor genannten Literatur.

Ähnliche Ergebnisse in einer anderen Sportart fand Bishop, der den Einfluss der Aufwärm-Intensität auf die supramaximale Kajak-Leistungsfähigkeit untersuchte, wobei auf eine 15 Minuten andauernde Vorbelastung an der aeroben Schwelle, der anaeroben Schwelle, oder einer dazwischen liegenden Vorbelastungsintensität ein 2-minütiger maximaler Kajak-Ergometer-Test folgte. Nur nach dem intensivsten Aufwärmen an der anaeroben Schwelle war die anschließende Leistungsfähigkeit signifikant reduziert, was die Autoren auf eine in dieser Testsituation stärker ausgeprägte metabolische Azidose zurückführten, welche die supramaximale Leistungsfähigkeit durch eine Reduktion des anaeroben Energiebeitrages und / oder eine Störung des muskulär-kontraktilen Prozesses behindere.¹¹⁷

Erneut muss beim Studienvergleich hinsichtlich der Vorbelastungsintensitäten das ‚Aufwärmen‘ der vorliegenden Arbeit als intensiver und damit neuromuskulär ermüdender angesehen werden. Trotz eingeschränkter Vergleichbarkeit bei großem Unterschied in der Dauer des sich an die Vorbelastung anschließenden Belastungstests (FTT15: 15 Sekunden; Kajak-Test: 2 Minuten), ist das vorliegende Ergebnis einer Leistungseinschränkung nach hochintensiver im Vergleich zu weniger

intensiver Vorbelastung konsistent mit den Erhebungen von Bishop, der in seiner Übersichtsarbeit zu diesem Thema, unter Einbezug der Ergebnisse anderer Autoren, zusammenfasst: „While a greater warm-up intensity will cause a greater increase in T_M , increasing the workload intensity above $\sim 60\%$ VO_{2max} has also been shown to increasingly deplete high-energy phosphate concentration.¹¹⁸ Consequently, at workloads greater than $\sim 60\%$ VO_{2max} , an inverse relationship between warm-up intensity and subsequent short-term performance has been reported.“^{60, 119, 120}

Vor dem Hintergrund einer signifikanten Leistungszunahme beim FTT15 nach stattgehabter aerober Vorbelastung bei einer Intensität von 65% VO_{2max} , kann für diese spezifische Testsituation, der von der Höhe der Vorbelastungsintensität abhängige Umkehrbereich ‚Leistungssteigerung‘ / ‚Leistungshemmung‘, bei $\sim 75-85\%$ VO_{2max} gesehen werden, was sich gut mit den bereits oben genannten Ergebnissen von Stewart et al.⁶² deckt und in Abbildung 4.5 verdeutlicht werden soll. Als Erklärung für die gefundenen Differenzen zwischen Bishop und der vorliegenden Arbeit können methodische Unterschiede sowie das Prinzip der Aufgaben-Spezifität der Ermüdung („Task dependency“), welche auch für die Vorbelastung gilt, genannt werden.

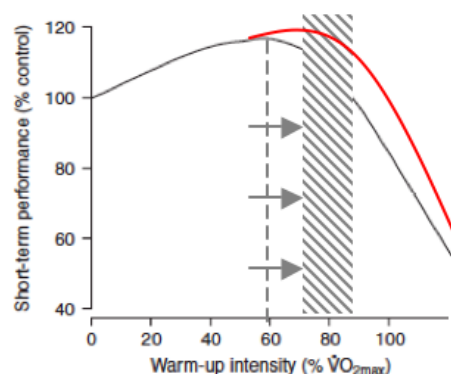


Abbildung 4.5: Veränderungen der Leistungsfähigkeit bei Kurzzeitbelastungen in direktem Anschluss an Aufwärm-Programme unterschiedlicher Intensität (als Anteil der maximalen Sauerstoffaufnahme; Vergleich zur Durchführung der Kurzzeitbelastungen ohne vorheriges Aufwärmen); Darstellung des Umkehrpunktes ‚Leistungssteigerung‘ / ‚Leistungshemmung‘ bei 60% VO_{2max} Vorbelastungsintensität nach Bishop (gestrichelte Linie) und nach rechts verschoben für den FTT15 bei $75 - 85\%$ VO_{2max} nach Ergebnissen der vorliegenden Studie (schraffierter Balken / projizierter Kurvenverlauf rot). Graphik modifiziert in Anlehnung an Bishop⁶⁰

Deutliche Parallelen zu den vorliegenden Untersuchungsergebnissen lassen sich auch in einer Arbeit von Oliver finden, der den Einfluss maximaler bzw. submaximaler fahrradergometrischer Belastungen unterschiedlicher Dauer (KZA – Kurzzeitausdauer; MZA – Mittelzeitausdauer; LZA-I – Langzeitausdauer-I) auf das Schnellkraftniveau der Beinextensoren (Flughöhe des Körperschwerpunktes bei bipedalen vertikalen Maximalsprüngen) untersuchte.¹²¹ Die Abnahme des Schnellkraftniveaus war am deutlichsten nach der KZA-Belastung, gefolgt von der MZA-Belastung. Nach

submaximalen LZA-I-Belastungen hingegen, wurde eine Steigerung des Schnellkraftniveaus nachgewiesen. Als Ursache für das nach intensiver Vorbelastung verminderte Schnellkraftniveau vermutete Oliver eine metabolische Beanspruchung im Sinne der Reduktion des muskulären ATP- und Kreatinphosphat-Gehaltes sowie des pH-Wertes. Auch eine stärkere Beanspruchung von FT-Fasern mit einer entsprechend zu erwartenden Reduktion der mittleren Erregungsfrequenz sei aus Sicht des Autors ursächlich bedeutsam.¹²¹

Die Ergebnisse von Oliver, sowie der weiteren zuvor genannten Autoren bezüglich muskulär-metabolischer Veränderungen bei intensiven Vorbelastungen, liefern Erklärungsansätze für den in der vorliegenden Arbeit beobachteten Zusammenhang, dass eine anaerobe Ausbelastung die Leistungsfähigkeit in der Frühphase des FTT15 zu vermindern scheint. Dies zeigt sich in einem signifikant späteren Erreichen der Peak Frequenz nach Sprint-Vorbelastung im Vergleich zu den Testsituationen ohne Vorbelastung / Ausdauer-Vorbelastung (vgl. Kapitel 3.5.5). Eine durch den Sprint verursachte und nur in der Anfangsphase noch relevante Ermüdung mit reduziertem Kreatinphosphat-Niveau, intrazellulärer P_i Akkumulation und pH Reduktion kann ursächlich als wahrscheinlich angesehen werden. Das verspätete Erreichen der maximalen Tapping-Frequenz nach hochintensivem Aufwärmen, ist demnach als Belastungszeichen in der Frühphase des FTT15 zu interpretieren.

Im Gegensatz zu den beschriebenen Veränderungen des Maximalfrequenzzeitpunktes blieben FTT15-Parameter, welche der Ermüdung zugeordnet werden können (Fatigue Index, Steigung der Regressionsgeraden), durch die spezifischen Vorbelastungen unbeeinflusst. Die mutmaßlich ermüdungsbedingte Leistungsabnahme innerhalb des FTT15 Testzeitraumes verlief im Anschluss an alle Vorbelastungssituationen parallel, nach anaerober Vorbelastung sowie ohne Vorbelastung jedoch auf niedrigerem Niveau. Das absolute Ausmaß der Ermüdung und der zeitliche Verlauf waren also durch die Vorbelastung im Gegensatz zum Ausgangsleistungsniveau nicht verändert.

Die Fähigkeit, einen Frequenzschnelligkeits-Test von 15 Sekunden Dauer nach stattgehabter maximaler Ermüdung mit unverändertem Fatigue Index absolvieren zu können, setzt möglicherweise einen bis zur 3. Testsekunde anhaltenden zwischenzeitlichen Erholungsprozess voraus. Eine während dessen stattfindende Annäherung der metabolischen Verhältnisse an die Ausgangssituation ohne Vorbelastung liefert also eine mögliche Erklärung für vergleichbare Ermüdungsresistenzen im FTT15 nach grundverschiedenen Vorbelastungen. In wie weit längere Testzeiträume hier Unterschiede im Ermüdungsverhalten aufzeigen

könnten, sollte Subjekt weiterer Studien sein. Für den WAnT konnten Inbar et al. zeigen, dass nach erfolgtem Aufwärmen die im Mittel erbrachte Leistung signifikant höher lag, die maximale Leistungsfähigkeit sich jedoch unveränderter präsentierte.²⁷ Für das Ermüdungsverhalten (Fatigue Index) nach stattgehabter Vorbelastung liegen gegenwärtig weder für den WAnT noch für andere Testprotokolle Daten vor, so dass in diesem Bereich ein ausgeprägtes Forschungsdefizit zu erkennen ist.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit decken sich nur teilweise mit einer Veröffentlichung von Hoffmann. In umfangreichen Untersuchungen zum Einfluss von Ermüdung auf Koordination konnte die Autorin ebenfalls eine deutliche Abnahme der koordinativen Leistungsfähigkeit (gemessen an der dreidimensionalen Bewegung des gerichteten Wurfes) nach primär komplexer (400 Würfe) und primär muskulärer (Maximalkraft M. triceps brachii) Vorbelastung dokumentieren. Nach einer primär metabolischen Vorbelastung (Fahrradergometer-Belastung oberhalb der IAAS) waren die Test-Resultate jedoch sogar besser.⁴

Die von Hoffmann beschriebene Steigerung der koordinativen Leistungsfähigkeit im Anschluss an eine hochintensive Vorbelastung steht in klarem Kontrast zur vorliegenden Arbeit und den Ergebnissen weiterer oben genannter Autoren. Ursächlich müssen hier große methodische Unterschiede angeführt werden. Dies gilt insbesondere bezüglich des getesteten Zielwertes, der bei Hoffmann aus einer koordinativen Aufgabe (gerichteter Wurf) und nicht einer Überprüfung der Frequenzschnelligkeit bestand. Bei zusätzlich unbekannter Pausendauer ist die Vergleichbarkeit mit den FTT15 Testergebnissen, welche in geringerem Maße von neuromuskulär koordinativen Fähigkeiten bestimmt werden als der gerichtete Wurf, stark eingeschränkt.

Ebenfalls konträr sind jedoch die Ergebnisse von Hoffmann zu den vorliegenden Resultaten beim Einbeinstand-Test, welcher durchaus in höherem Maße koordinative Leistungsmerkmale abbildet und damit eher vergleichbar erscheint. Beim EST zeigten sich in der vorliegenden Arbeit nach stattgehabter Sprint Vorbelastung signifikant schlechtere Koordinations-Werte als in der Testsituation ohne Vorbelastung (vgl. Kapitel 3.5.6). Zu beachten gilt es hierbei, dass im Anschluss an diese hochintensive Vorbelastung, im Vergleich zur Testsituation mit geringerer Vorbelastung, auch andere leistungsphysiologische Parameter signifikant verändert waren (Herzfrequenz, Laktat, RPE), wodurch die Koordinationsfähigkeit mutmaßlich ebenfalls beeinflusst wurde. Eine in diesem Zusammenhang abgeleitete Korrelationsanalyse zum Erfassen möglicher relevanter leistungsphysiologischer Einflüsse auf die EST-Ergebnisse

erbrachte jedoch nur schwache und sehr schwache Korrelationen der untersuchten Parameter zum EST (vgl. Kapitel 3.5.8).

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse kann also nur allgemein geschlossen werden, dass eine subjektiv und objektiv vergleichbar höhere Beanspruchung nach anaerober Vorbelastung beim anschließenden EST zu koordinativen Mängeln führt. Mögliche Erklärungen bieten eine vermehrte körperliche Unruhe im Rahmen der adäquat gesteigerten Atemarbeit und Herzfrequenz sowie die oben aufgeführten lokal muskulär-metabolischen Ermüdungsfolgen. Bezüglich der Differenzen zu Hoffman müssen erneut methodische Unterschiede mit stark variierenden Erholungszeiten vermutet werden.

Weitere teilweise gegensätzliche Ergebnisse zur vorliegenden Arbeit fand Martin, der das schnellkoordinative Leistungsvermögen (Sprintschnelligkeit, Absprunggeschwindigkeit, Bewegungskonstanz bei Wiederholung schneller Bewegungsausführung) nach harten Ausdauer- und/ oder Krafttrainingseinheiten untersuchte. Er tat dies vor allem vor dem Hintergrund, dass in Mehrkampfsportarten, wie beispielsweise dem Zehnkampf, dem Athleten sowohl im Training als auch im Wettkampf Ausdauer-, Schnellkraft-, Schnelligkeits- und Koordinationsleistungen in Kombination bzw. in unmittelbarer Reihenfolge abverlangt werden. Martin schloss aus seinen Ergebnissen, dass das schnellkoordinative Leistungsvermögen durch einmalige Ausdauer-, Maximalkraft- und Schnelligkeitsbelastung nahezu unbeeinflusst bleibe.¹²²

Dies widerspricht der hier und in weiteren zuvor genannten Studien gefundenen Leistungssteigerung im schnellkoordinativen Bereich nach erfolgter Ausdauer-Vorbelastung und deckt sich ebenfalls nicht mit dem Ergebnis einer verspäteten maximalen schnellkoordinativen Leistungsfähigkeit im FTT15 nach stattgehabter anaerober Vorbelastung. Ursächlich müssen für diese differierenden Ergebnisse ausgeprägte Unterschiede in der Methodik und Genauigkeit der Datenerfassung vermutet werden.

Die Erholungsphase hat nach stattgehabter anaerober Vorbelastung einen relevanten Einfluss auf die FTT15-Leistungsfähigkeit

Es ist davon auszugehen, dass nicht nur die Dauer, Charakteristik und Intensität der Vorbelastung und die hierdurch vermittelten biologischen und physiologischen Veränderungen die Ergebnisse beim anschließenden FTT15 beeinflussen, sondern dass auch die Dauer des zwischen Vorbelastung und Test liegenden Erholungsintervalls eine Rolle spielt. Von der Erholungszeit hängt das Ausmaß der Kreatinphosphat Resynthese ab, ein Prozess der relativ schnell erfolgt und maßgeblich

nach spätestens 5 Minuten abgeschlossen ist.^{123, 124} Nach etwa 15 bis 20 Minuten Pause kommt es, abhängig von Dauer und Intensität des stattgehabten Aufwärmens sowie von den Umgebungsbedingungen, zu einem Absinken der Muskeltemperatur.¹⁰⁸ Nach Bishop ist daher ein Erholungsintervall von größer 5 Minuten jedoch kleiner 15 Minuten empfehlenswert, um Kurzzeitbelastungen nach Aufwärmprogrammen erfolgreicher absolvieren zu können.⁶⁰

Diese Aussage deckt sich auch mit den Ergebnissen von Phillips, der die Auswirkung unterschiedlicher Vorbelastungsformen auf die Bewegungsschnelligkeit der oberen Extremitäten untersuchte. Im Abstand von 7,5 Minuten nach Beendigung einer 2,5 Minuten andauernden Vorbelastung (Armkurbelarbeit ohne Widerstand mit maximal möglicher Frequenz und signifikantem Frequenzabfall während der Belastung) zeigte sich im Vergleich zur unbelasteten Kontrollgruppe und zum Test unter Ruhebedingungen keine Veränderung der Bewegungsschnelligkeit der Arme. Der Autor folgerte hieraus, dass die Erholungsdauer von 7,5 Minuten von ausreichender Länge war, um die Belastungswirkung abzubauen.¹²⁵

In der vorliegenden Arbeit entsprach die Erholungsdauer in den verschiedenen Testsituationen im Mittel 90 – 107 Sekunden (vgl. Kapitel 3.5.7). In Anlehnung an die oben genannte Literatur kann folglich vermutet werden, dass nach stattgehabter anaerober und maximal ermüdender Vorbelastung vor Beginn des FTT15 nur eine unvollständige Kreatinphosphat Resynthese erfolgt ist. Ein signifikanter Abfall der Muskeltemperatur T_M gilt in Anbetracht der kurzen Pause trotz fehlender Temperaturerfassung als unwahrscheinlich.

Auch nach stattgehabter anaerober Vorbelastung müssen für den FTT15 leistungsfördernde Effekte vermutet werden

Trotz der verhältnismäßig kurzen Vorbelastungsdauer (5 min bei 8 km/h + im Mittel 41 s bei 22 km/h) muss davon ausgegangen werden, dass die hochintensive und maximal ermüdende Sprint-Vorbelastung im Vergleich zur Ruhesituation zu einer relevanten Erwärmung der Körpertemperatur und damit auch der Muskeltemperatur geführt hat. Die im Rahmen der Erläuterungen zur anaeroben Vorbelastung (vgl. Kapitel 2.2.1.2 und Kapitel 4.6.1) sowie in der Einleitung (vgl. Kapitel 1.5) ausführlich diskutierten leistungsfördernden Aufwärmefekte müssen also auch nach ausgeführter Sprint-Vorbelastung als existent angesehen werden. Ob zusätzlich gerade nach stattgehabter Sprint-Vorbelastung der positive Effekt der ‚Post-Aktivierungs-Potentierung‘ der kontraktilen Elemente eine leistungssteigernde Rolle spielt, bleibt unklar.

Einfluss von Vorbelastungen auf den FTT15 - Zusammenfassung

Bezüglich des Einflusses von Vorbelastungen auf eine in direktem Anschluss stattfindende kurze Überprüfung der zyklischen Schnelligkeit (z.B. FTT15) konnte in der vorliegenden Arbeit in Einklang mit der Literatur gezeigt werden, dass die Leistungsfähigkeit gesteigert ist, wenn die Vorbelastung von ausreichender Intensität und Bewegungsspezifität, sowie die zwischen Vorbelastung und Test liegende Pause von adäquater Dauer ist. Eine hinreichende Intensität ist hierbei durch eine relevante Erhöhung der Muskeltemperatur und ein Anheben der Basis-Sauerstoffaufnahme definiert. Eine Vorbelastung, die in ihrer Charakteristik dem Testinhalt nahe liegt, ist insbesondere für nicht direkt temperaturvermittelte leistungssteigernde Effekte von Bedeutung. Eine kurze Pause verhindert ein Absinken der zuvor erwärmten Muskulatur sowie eine Rückkehr der zuvor erhöhten Basis-Sauerstoffaufnahme auf das Ruhe-Niveau, welches etwa innerhalb einer 5 Minuten andauernden Pause erreicht wird.¹²⁶ Eine vorbelastungsbedingte Verbesserung der FTT15 Ergebnisse kann vor diesem Hintergrund erwartet werden, wenn die Vorbelastung der Bewegungsabfolge des nachfolgenden Tests gleicht, die Vorbelastungs-Intensität bei ca. 65 % VO_{2max} liegt, und die Pausendauer 5 Minuten deutlich unterschreitet. Alle genannten notwendigen Voraussetzungen erfüllt die aerobe Vorbelastung der vorliegenden Studie.

Eine vorbelastungsassoziierte Leistungsminderung bei kurzen Tests der zyklischen Schnelligkeit ist zu erwarten bei hohen (maximalen) Vorbelastungsintensitäten, einer guten Übereinstimmung von Belastungscharakteristik und Kriteriumsbeziehung, sowie einer kurzen Pausendauer. Entsprechend hohe Belastungsintensitäten führen zu Ermüdungserscheinungen bei denen ein Mangel an hochenergetischen Phosphaten und / oder eine lokale Akkumulation von Metaboliten relevante Größen darstellen. Eine kurze Pause verhindert eine zwischenzeitliche Erholung mit kompletter Restitution der Homöostase. Gerade auch im Rahmen von Ermüdungserscheinungen ist eine ausreichende Bewegungsspezifität bedeutsam, da nur spezifische Belastungen bei nachfolgenden Aufgaben der motorischen Schnelligkeit zu leistungsnegativen Effekten führen.⁸

Eine vorbelastungsassoziierte Verschlechterung der FTT15 Ergebnisse kann vor diesem Hintergrund erwartet werden, wenn die Vorbelastung der Bewegungsabfolge des nachfolgenden Tests gleicht, wenn die Intensität bei ca. 75 – 85 % VO_{2max} oder größer liegt und wenn die Pause nur wenige Sekunden andauert. Die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführte anaerobe Vorbelastung erfüllt viele der hier genannten Kriterien.

Es erscheint nahe liegend, dass bei jeder Form der neuromuskulären Beanspruchung mit zuvor stattgehabter Vorbelastung die oben als voneinander klar getrennt beschriebenen leistungsmindernden und leistungsfördernden Effekte immer gleichzeitig wirken und nur in ihrer Ausprägung stark variieren.

Das Ausmaß der vorbelastungsassoziierten Leistungsunterstützung oder -hemmung wird hierbei durch die Vorbelastung selbst und die sie beschreibenden Faktoren (Intensität, Dauer, Charakteristik, Umgebungsbedingungen, Pause, ...) vorgegeben. Die Summe aller positiven und negativen Einflüsse determiniert das Ergebnis der sich anschließenden Leistungsüberprüfung.

Gerade für einen komplexen Bewegungsablauf, wie er beim FTT15 existiert, gilt dieser Zusammenhang. Eine Interaktion zwischen leistungsmindernden und leistungsfördernden Effekten ist hier Dauerzustand. Für die drei in der vorliegenden Arbeit gewählten Vorbelastungs-Entitäten ist diese wechselseitige Beeinflussung schematisch in Abbildung 4.6 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die überwiegenden leistungsfördernden Faktoren nach stattgehabter Ausdauer-Vorbelastung zum erfolgreichsten Absolvieren des FTT15 führten, während davon ausgegangen werden kann, dass sich nach erfolgter Sprint-Vorbelastung leistungspolitische und leistungsnegative Effekte ausglich und damit ein Leistungszustand erreicht wurde, welcher der Testsituation ohne Vorbelastung entsprach.

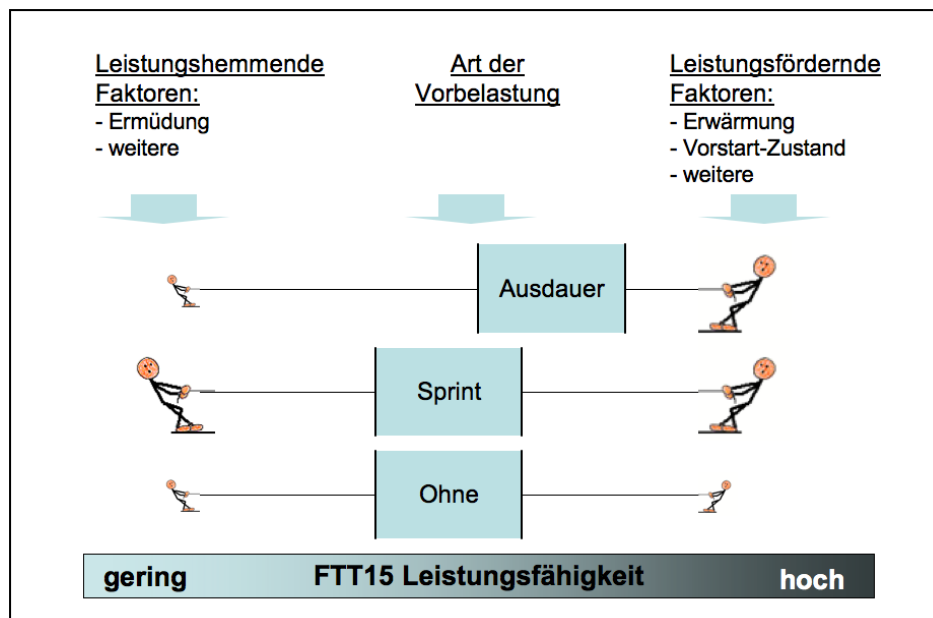


Abbildung 4.6: Vereinfachte schematische Darstellung zur Verdeutlichung des Einflusses von 3 Vorbelastungsformen auf die Leistungsfähigkeit beim sich anschließenden FTT15: Beim Überwiegen der leistungsfördernden Faktoren nach einer Ausdauer-Vorbelastung ist die FTT15 Leistungsfähigkeit besonders hoch, nach einer Sprint-Vorbelastung halten sich große leistungsfördernde und leistungsmindernde Faktoren die Waage. Ohne Vorbelastung gleichen sich kleinere leistungsfördernde und leistungshemmende Faktoren aus. Die Größe des Strichmännchens repräsentiert qualitativ das Ausmaß des leistungshemmenden oder leistungsfördernden Einflusses.

In ihren umfangreichen Untersuchungen über den Zusammenhang von Koordination und Ermüdung unterstreicht Hoffmann, dass insgesamt gesehen Ermüdung ein potentieller Einflussfaktor auf die motorische Koordination und eine wichtige Größe der Trainingssteuerung ist.⁴ Dieser Zusammenhang lässt sich im weiteren Sinne auch anhand der Daten der vorliegenden Arbeit bestätigen.

Zum sinnvollen Transfer der gefundenen Ergebnisse in den sportmotorischen Trainingsalltag muss festgehalten werden, dass eine ermüdungsbedingte neuromuskuläre Leistungseinschränkung beim FTT15 kurz nach stattgehabter maximaler Sprint-Vorbelastung nur im Vergleich zum optimal vorbereiteten Zustand (aerobe Vorbelastung) vorhanden war. Diese Beeinträchtigung bezog sich jedoch führend auf die Frühphase des sich anschließenden koordinativ anspruchsvollen kurzen Tests, spätere Testzeitpunkte waren weniger beeinflusst. Mittel- oder längerfristige negative Auswirkungen aufgrund von Beanspruchungseffekten des neuromuskulären Systems waren nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. In Einklang mit Oliver¹²¹ waren diese Beeinträchtigungen also, soweit in der vorliegenden Arbeit untersucht, auch hier eher kurzfristiger Natur. Vor diesem Hintergrund lassen sich Erkenntnisse zum sportmotorischen Lernen und der inhaltlichen Trainingsplanung ziehen, welche zumindest für kurze, intensive und koordinativ anspruchsvolle Aufgaben nach stattgehabten maximal ermüdenden Vorbelastungen gelten. So kann davon ausgegangen werden, dass hohe konditionelle Belastungen das sich anschließende sportmotorische Lernen und Techniktraining möglicherweise sehr viel weniger beeinträchtigen, als von einigen Autoren zuvor angenommen worden ist.^{85, 86} Der Aussage von Oliver „Techniktraining dürfe sinnvoller Weise nicht nur im ausgeruhten Zustand bzw. unermüdet durchgeführt werden“ kann sich daher genauso angeschlossen werden, wie der Forderung, dass „Techniktraining innerhalb einer Trainingseinheit zeitlich nun nicht immer vor dem Konditionstraining angesetzt werden müsse“.¹²¹

4.6 Der FTT15 als leistungsdiagnostisches Testverfahren – Erkenntnisse, Bewertung und Ausblick

4.6.1 FTT15: Kritik der Methodik und Beurteilung des Test-Settings sowie der gewählten Messparameter

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde der FTT15 als sportmotorisches Testverfahren genutzt, aber auch selbst umfangreich hinsichtlich der an diesen Test gestellten Anforderungen evaluiert. Diese Überprüfung galt neben dem obig beschriebenen Test-Güte Kriterium Reliabilität und der noch im weiteren Verlauf diskutierten Validität auch der Frage, in wie weit die geforderten Vorbelastungszustände (objektive und subjektive Ermüdung) erreicht wurden, und ob ausreichend kurze Zeiträume zwischen den verschiedenen Testinhalten eingehalten werden konnten. Einige wichtige Ergebnisse hierzu sollen im folgenden Abschnitt genauso diskutiert werden, wie die Erkenntnisse zur Aussagekraft der einzelnen im Rahmen des FTT15 erhobenen Test-Parameter.

Test-Setting

Anaerobe Sprint-Vorbelastung:

Wenige Sekunden nach Beendigung der unter 1.2.3 detailliert beschriebenen anaeroben Vorbelastung, konnte bei den Probanden im Mittel ein Laktat Wert von $7,4 \pm 2,0$ mmol/l bestimmt werden. Die Herzfrequenz lag im Anschluss an diesen Laufband-Sprint und vor den nachfolgenden Tests auf der Kraftmessplatte noch bei $136,0 \pm 15,7$ Schlägen pro Minute, welches einer relativen maximalen Herzfrequenz von durchschnittlich $70,1 \pm 7,2$ % entsprach. Zum Zeitpunkt des Testbeginns auf der Kraftmessplatte waren seit Abbruch der Sprint-Belastung im Mittel 105 Sekunden vergangen (vgl. Tab. 3.8). Die genannten objektiven Testparameter belegen ebenso wie die subjektiv erfahrene Beanspruchung nach dem Laufband-Sprint ($RPE = 17,1 \pm 1,3$) den anaeroben Charakter der gewählten Vorbelastung und die objektiv existierende Erschöpfung bei der sich anschließenden FTT15 Durchführung. Die für die anaerobe Vorbelastung formulierten Anforderungen können somit als erfüllt betrachtet werden.

Das hier genutzte Vorbelastungs-Protokoll ist in dieser Form bereits von Schnabel et al. als eigenständiges Testverfahren zur Untersuchung der anaeroben Kapazität verwendet und beschrieben worden.⁹¹ Dabei untersuchte die Arbeitsgruppe für unterschiedlich spezialisierte Läufer (400 m, Mittelstrecke, Langstrecke, Marathon,

Sportstudenten als Kontrolle) die Laufzeit bis zum Belastungsabbruch, sowie den maximal erreichten Blutlaktat-Wert, wobei die auf kürzere Laufstrecken spezialisierten Probanden längere Test-Laufzeiten und höhere Test-Laktat-Werte zeigten. Hierbei lagen die Laufzeiten im Mittel je nach Gruppe zwischen 44 und 88 Sekunden, die maximalen Laktat-Werte zwischen 17,5 mmol/l und 10,1 mmol/l. Die im Rahmen der vorliegenden Studie gefundenen im Mittel kürzeren Laufzeiten (41 Sekunden) sprechen für einen Leistungsunterschied der in beiden Studien untersuchten Athleten, sowie für eine ungleiche sportartspezifische Spezialisierung (Spezialisten in der Leichtathletik vs. Spilsportler). Die im Vergleich zu Schnabel et al. geringeren Laktat-Werte sind methodischer Genese. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Laktat-Bestimmung nach Sprint-Abbruch noch innerhalb der ersten Minute, also zu einem Zeitpunkt, als die Umverteilung des Laktats vom Entstehungsort im Muskel zum Messort im Kapillarblut noch nicht im vollen Umfang stattgefunden haben konnte. In diesem Zusammenhang empfehlen Röcker et al. nach eigenen Untersuchungen zur Laktat-Verteilung im zeitlichen Kontext eine wenigstens dreiminütige Belastungsdauer um das Erreichen eines Equilibriums zu gewährleisten.¹²⁷ Mader et al. dokumentierten bei einer kurzen Maximalbelastung den Laktat-Gipfel zwischen der 3. und 15. Minute nach Belastungsabbruch.¹²⁸

Der später nach durchgeführtem FTT15 erneut gemessene höhere Laktat-Wert, erklärt sich also einerseits durch die additive Beanspruchung, andererseits durch die zusätzliche Umverteilungszeit. Abbildung 4.7 zeigt den zeitlichen Verlauf der Laktat-Elimination und verdeutlicht die beschriebenen Zusammenhänge.

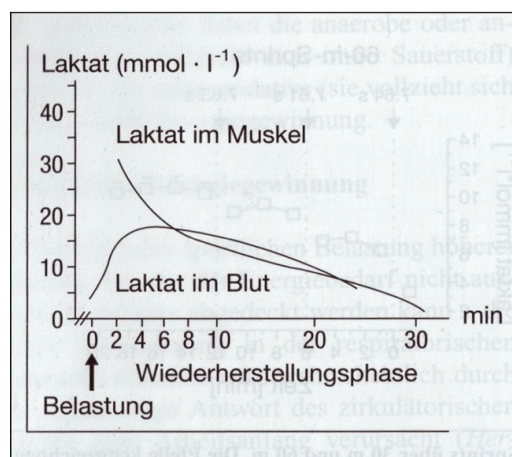


Abbildung 4.7: Laktatkonzentration unmittelbar nach einer Maximalbelastung und in der Nachbelastungsphase in der Arbeitsmuskulatur bzw. im Blut (nach Badtke¹²⁹)

Ausdauer-Vorbelastung:

Die während der Ausdauer-Vorbelastung bei den Probanden gemessene maximale Sauerstoffaufnahme lag bei $64,8 \pm 6,3$ % der individuellen $VO_2\text{max}$, womit der

angestrebte und zuvor berechnete Belastungsbereich von 65 % VO_2max fast exakt erreicht wurde. Auch die gemessenen Laktat-Werte (nach 15 Minuten: $1,5 \pm 0,5$ mmol/l, vor Testbeginn auf der Kraftmessplatte: $1,4 \pm 0,5$ mmol/l) lassen darauf schließen, dass die gewählten Laufgeschwindigkeiten zu Leistungen unterhalb der jeweiligen anaeroben Schwelle und zu der damit gewünschten Vorbelastung geführt haben. Als weitere Parameter konnten hier noch die Herzfrequenz (nach 15 Minuten: $150,8 \pm 11,2$ (= $77,8 \pm 5,1$ %), nach 30 Minuten $156,7 \pm 12,1$ ($80,8 \pm 5,8$ %), vor Testbeginn auf der Kraftmessplatte: $123,4 \pm 12,2$ ($63,7 \pm 6,2$ %)) und das subjektive Belastungsempfinden der Probanden ($\text{RPE} = 13,1 \pm 1,6$) nach erfolgter Ausdauer-Vorbelastung hinzugezogen werden, welche die zuvor genannten Ergebnisse bestätigen.

Time to force plate

Als optimaler zeitlicher Abstand zwischen dem Abschluss des Aufwärmens und dem Wettkampfstart werden in der Literatur 5 – 10 Minuten angegeben, wobei der Aufwärmeeffekt etwa 20 – 30 Minuten nachweisbar bleibt.⁵⁶ In der vorliegenden Arbeit betrug die Zeitspanne von Beendigung der Vorbelastung bis zum Beginn der Tests auf der Kraftmessplatte im Mittel 105 Sekunden. Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass sich das Testprotokoll bezüglich des gewählten Zeitrahmens gut für den Nachweis von Aufwärmeeffekten eignete. Die obige Beschreibung der erhobenen Bioparameter (HF, Laktat, RPE) verdeutlicht zudem, dass die mittlere ‚Time to force plate‘ als ausreichend kurz angesehen werden kann, um mögliche Vorbelastungs-Veränderungen in die sich anschließenden Kraftmessplattentests einfließen zu lassen.

Parameter

Kontakt-Anzahl: Die Kontakt-Anzahl stellt den einfachsten Parameter der FTT-Auswertung dar und bildet gleichzeitig die Grundlage für weitere Parameter, welche aus ihr, in Zusammenspiel mit den jeweiligen Zeiten, errechnet werden.

Kontakt-Frequenz: Die Kontaktfrequenz ist die direkte Verbindung der Kontakte und der jeweils dafür benötigten Zeitintervalle. Sie bildet die Basis für viele der im Rahmen dieser Studie erhobenen Ergebnisse und gewählten Interpretationsansätze.

Varianz der Tapping Frequenz: Untersucht werden sollte anhand dieses Parameters, ob sich intra- oder interindividuelle Unterschiede in der Regelmäßigkeit der Tapping-Bewegung darstellen lassen. Es bestand die Hypothese, dass, gerade nach

hochintensiven Vorbelastungen, die Gleichmäßigkeit der Tapping-Bewegung gestört sein könnte, und dieses indirekt auch einen Hinweis auf einen neuromuskulären Ermüdungszustand geben könnte. Insgesamt zeigte die Varianz im Rahmen der Vorbelastungsstudie jedoch keine signifikanten Unterschiede (Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit nicht dargestellt).

Es kann also geschlossen werden, dass eine interpretierbare Unregelmäßigkeit der Bewegung entweder nicht existierte, mit dem genutzten Testprotokoll nicht zu provozieren, oder mit der angewandten Methode nicht zu erfassen war. Auf der Basis dieser Erkenntnisse kann möglicherweise in zukünftigen FTT15 Untersuchungen auf die Varianz als Untersuchungsparameter verzichtet werden.

Steigung der Regressionsgeraden: Dieser Parameter beschreibt den Verlauf der Kontaktfrequenzen über die Untersuchungsdauer. Die gefundenen Steigungswerte sind kleiner Null, zeigen also eine Abnahme der Tapping-Frequenz im Verlauf des Tests an, welche mutmaßlich ermüdungsbedingt ist. Vor diesem Hintergrund kann die Steigung der Regressionsgeraden als ‚Ermüdungsparameter‘ des FTT15 bezeichnet und zum Vergleich von Ermüdungsverhalten in variablen Testprotokollen herangezogen werden. Erste Versuche, die Steigung der Regressionsgeraden beim FTT15 zu chronischen Ermüdungszuständen und Überlastungserscheinungen in Beziehung zu setzen, erscheinen viel versprechend (unveröffentlichte Daten Institut für Sport- und Bewegungsmedizin Hamburg). Die im Rahmen der vorliegenden Studie gefundenen Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass der Parameter Fatigue Index (FI) durch Aggregation von Mittelwerten zu Beginn und Ende des Testzeitraumes, beim FTT15 hinsichtlich der Interpretation von Ermüdungserscheinungen aussagekräftiger sein könnte.

Peak Frequenz: Die Peak Frequenz entspricht der maximal erreichten zyklischen Geschwindigkeit. Sie ist in hohem Masse durch neuromuskulär-koordinative Fähigkeiten geprägt. Die Peak Frequenz ist ein wichtiger Parameter zum Vergleich mit Kriterien der maximalen Leistungsfähigkeit anderer etablierter sportmotorischer Tests. Durch die Mittelung über eine Sekunde in der vorliegenden Arbeit ist dieser Wert, trotz der theoretischen Möglichkeit von falsch hohen Messergebnissen, als valide anzusehen.

Zeitsegment F_{max} : Dieser Parameter liefert wichtige Erkenntnisse zur Tapping-Leistung in der Anfangsphase des FTT15 und war insbesondere bei der Erforschung des Tapping-Frequenz-Profiles relevant. Auch im Rahmen von Vorbelastungs-

Untersuchungen ist das Zeitsegment F_{\max} wertvoll, da erst hierdurch Verschiebungen des Zeitpunktes der maximalen Frequenz erkennbar werden.

Zeitsegment F_{\min} : Das Zeitsegment F_{\min} bestimmt den Zeitpunkt der kleinsten Tapping-Frequenz innerhalb des FTT15-Untersuchungszeitraumes. Durch den Einfluss von Messungenauigkeiten einerseits und Test-Durchführungs-Fehlern der Probanden andererseits, ist dieser Parameter potentiell fehleranfällig. Insgesamt ist die Aussagekraft fraglich, so dass eine Bestimmung und Bewertung dieses Messwertes in zukünftigen Untersuchungen vernachlässigt werden kann.

Fatigue Index: Der Fatigue Index ist ein wertvoller Parameter zur Beurteilung des ermüdungsbedingten Leistungsabfalls. Durch die Bündelung von Zeit-Segmenten und die Gegenüberstellung der besten und schlechtesten 2,5-Sekunden Abschnitte, treten beim FI, gegenüber der Regressionsgeraden, die durch nachlassende Tapping-Frequenzen bedingten Veränderungen deutlicher hervor, was bei der Interpretation hilfreich sein kann.

Vorteilhaft beim Fatigue Index ist seine methodische Anlehnung an das etablierte Auswertungsverfahren des WAnT, wo dieser Parameter ebenfalls eines der wichtigen Leistungskriterien darstellt. Dieser Zusammenhang ermöglicht einen testübergreifenden Vergleich, welcher insbesondere durch Modifikationen des FTT15 im Sinne der Abbildung eines höheren Anteils an anaerober Kapazität (vgl. Kapitel 4.6.3), weiter an Aussagekraft hinzugewinnen könnte.

Hinsichtlich der Validität des FI ist bedeutsam, dass die potentiell fehleranfälligen schwächsten 2,5-Sekunden Abschnitte auf Mess- und Durchführungsfehler, sowie ihr zeitliches Vorkommen im Test, geprüft werden müssen, bevor sie in die Berechnung dieses Indexes eingehenⁱ.

Vorteile in der Methodik des FTT15

In früheren laufbandbasierten Testverfahren der anaeroben Kapazität, bei denen die Belastung üblicherweise bis zur Erschöpfung durchgeführt wurde,⁴⁶ war die Angst der

ⁱ Da beim FI der schwächste und stärkste 2,5-Sekunden-Abschnitt des FTT15 zueinander in Beziehung gesetzt werden und der kleinste Abschnitt potentiell fehleranfällig ist (z.B. niedriger Wert nicht real ermüdungsbedingt, sondern auf Grund von Durchführungsfehler oder Messfehler), wurde im Rahmen der Datenbereinigung folgendes Vorgehen definiert und angewandt: Falls sich beim Parameter Fatigue Index der kleinste 2,5-Sekunden-Abschnitt in zeitlicher Abfolge vor dem größten 2,5-Sekunden-Abschnitt befindet, ist diese Situation nicht zur Berechnung des FI geeignet und wird als fehlerhaft eingestuft. Im Weiteren wird der kleinste fehlerhafte 2,5-Sekunden-Abschnitt durch den kleinsten ‚glaubhaften‘ 2,5-Sekunden-Abschnitt ersetzt. Entsprechendes gilt, falls sich der größte 2,5-Sekunden-Abschnitt in Abschnitt Nr. 6 befindet.

Probanden zu stürzen ein wichtiger Faktor, der Athleten daran hinderte, ihre tatsächliche Leistungsgrenze zu erreichen. Während der Sprint-Vorbelastung der vorliegenden Studie konnte diese Beeinträchtigung durch eine Deckenhalterung mit Tragegeschirr minimiert werden. Da der FTT15 selbst auf der Stelle durchgeführt wird, ist hier der störende Einflussfaktor Angst als sehr gering anzusehen, was einen wesentlichen Vorteil des FTT15 darstellt.

Kritik der Methodik

Bezüglich der Methodik der vorliegenden Arbeit muss kritisch festgehalten werden, dass es den Studienleitern nicht für alle Probanden gelang, den geforderten Zeitplan des Testprotokolls (6 aufeinander folgende Test-Termine innerhalb eines Zeitraumes von ca. zwei Wochen) einzuhalten. Ursächlich sind hier Krankheitsfälle im Probandenkollektiv sowie terminbedingte, kurzfristige Absagen zu sehen, wodurch sich zwischen zwei Test-Terminen teilweise deutlich längere Zeitintervalle als die geforderten 48 h Erholungszeit ergaben.

Im Weiteren muss kritisiert werden, dass die erst im Nachhinein festgestellte, bezüglich der Hauptsportart ungleiche Einteilung der Probandengruppen A und B, die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Kapiteln 3.1 und 3.3 schmälern könnte.

4.6.2 Der FTT15: führend abgebildete Hauptbeanspruchungsformen

Zyklische Schnelligkeit

Als kurzer, standardisierter Labortest mit hochfrequenter Bewegungsabfolge erscheint der FTT15 geeignet, bei Probanden die grundsätzliche Leistungsfähigkeit im Bereich freier, zyklischer Schnelligkeitsbewegungen zu überprüfen. Auch wenn direkte Vergleiche zu etablierten Sprint- und Schnelligkeitstests bisher noch ausstehen, kann eine ausreichende positive Korrelation der Ergebnisse auf Grund des ähnlichen Bewegungsablaufes und der sich deckenden Grundvoraussetzungen angenommen werden. Da das Ausmaß, die Richtung sowie die zeitliche Abfolge der Bodenreaktionskräfte beim leichtathletischen Sprint für die Schnelligkeit und damit auch für die erreichte Maximalgeschwindigkeit eines Athleten eine erhebliche Bedeutung haben,¹³⁰ könnten zukünftig während des Foot-Tappings erhobene Bodenreaktionskräfte zusätzliche Erkenntnisse liefern und das Profil des FTT15 als Test für zyklische Schnelligkeit weiter schärfen.

Neuromuskuläre / koordinative Fähigkeiten

Bei hohen Bewegungsgeschwindigkeiten, wie sie beim FTT15 vorkommen, kann von einer umfangreichen koordinativen Beanspruchung der Probanden ausgegangen

werden,⁴⁹ ein gut ausgebildetes neuromuskulär-koordinatives System ist als Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Absolvieren jeder zyklischen Schnelligkeitsbewegung zu sehen. Es kann gefolgert werden, dass das Ausmaß koordinativer Fähigkeiten eines Athleten das FTT15 Ergebnis beeinflusst, der Test bildet also koordinative Kapazitäten ab. Die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführte Korrelationsanalyse von EST und FTT15-Parametern erbrachte jedoch keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Foot-Tapping und dem Einbeinstand-Test als etabliertem Testverfahren für koordinativ-propriozeptive Fähigkeiten. Hieraus lässt sich eine fehlende Deckung des koordinativen Anforderungsprofils der genannten sportmotorischen Tests schließen.

Beim EST steht eine möglicherweise bewusster kontrollierte „Ruhekoordination“ mit dem Bestreben möglichst still zu halten im Vordergrund, die „Bewegungskoordination“ bei Durchführung des FTT15 erfordert ein Abrufen gespeicherter und über Jahre erlernter, schneller Bewegungsprogramme.

Die inter- und intramuskuläre koordinative Kapazität eines Athleten bei zyklischen Schnelligkeitsbewegungen wird also indirekt über die Ergebnisse des FTT15 abgebildet, für eine separate Betrachtung und Bewertung neuromuskulär-koordinativer Fähigkeiten erscheint der FTT15 nicht geeignet.

Anaerobe Kapazität

Gerade bei sportmotorischen Tests zur Überprüfung der anaeroben Kapazität gibt es weiterhin auch bei den etablierten Verfahren Uneinigkeit darüber, was die jeweiligen Tests abbilden und in wie weit dies der anaeroben Leistungsfähigkeit eines untersuchten Athleten entspricht.²⁷

Die gewählte Testdauer sowie die Intensität der Belastung beim FTT15 weisen auf eine führende Substrat-Bereitstellung aus anaerober Quelle hin. Dies wird in Anlehnung an die in Kapitel 1.2.2 beschriebenen Zusammenhänge deutlich, sowie durch einen Vergleich mit dem 100 und 200 m Sprint, für den bekannt ist, dass für die metabolisch ausgelöste Ermüdung eine Erschöpfung von Kreatinphosphat im Vordergrund steht. Die maximale Leistungsfähigkeit im Sprint kann nur erreicht werden, wenn sowohl die aerobe Glykolyse als auch führend Kreatinphosphat zur ATP-Erzeugung eingesetzt werden.^{18, 131} Da der FTT15 einen ‚maximal Test‘ von etwas länger als 10 Sekunden Dauer darstellt, welcher somit zeitlich zwischen dem 100 und 200 m Sprint einzuordnen ist, kann davon ausgegangen werden, dass, vom energetischen Standpunkt überwiegend die anaerobe alaktazide sowie die anaerobe laktazide Leistungsfähigkeit eines Athleten für ein erfolgreiches Absolvieren des FTT15 ausschlaggebend ist.³¹

Im Weiteren beansprucht der FTT, wie auch der Tretkurbel-Wingate-Test, fast ausschließlich die untere Körperpartie. Die Tatsache, dass anaerobe Kapazität im Gegensatz zur aeroben Kondition eher eine lokale als eine systemische Größe darstellt, unterstreicht die Wertigkeit des FTT15 als anaerobes Testverfahren.

Das in der vorliegenden Arbeit gewählte FTT15-Testprotokoll bedingt jedoch, dass eine Bestimmung der durch Probanden erbrachten mechanischen Leistung im physikalischen Sinne nicht stattfindet. Auch kein anderes energetisches Equivalent wird erhoben. Ausschließlich die objektiven und subjektiven Biomarker (HF, Laktat, RPE) weisen auf den Belastungsgrad der Probanden während und nach der Untersuchung hin. Dieser Belastungsgrad liefert mit der bekannten Belastungsdauer, sowie theoretischen Vergleichen mit ähnlichen Belastungssituationen, einen indirekten Hinweis auf die führend genutzten Substrate anaerober Quelle. Ein direkter Beweis einer überwiegend anaeroben Energiebereitstellung ist unter den genannten Bedingungen nicht möglich. Im Vergleich zu Tests der anaeroben Kapazität, welche erbrachte Leistung messen, stellt dieser Zusammenhang einen Nachteil dar.

Auf Basis der erhobenen FTT15-Messwerte, der subjektiven und objektivierten Probandenerschöpfung, sowie der theoretischen Überlegungen und Vergleiche mit bestehenden Testverfahren der anaeroben Kapazität, kann vermutet werden, dass die anaerobe Leistungsfähigkeit eines Athleten einen relevanten Einfluss auf das Leistungsprofil beim FTT15 hat. Der FTT15 kann demzufolge als Testverfahren der anaeroben Kapazität gesehen werden. Dies gilt insbesondere nach Durchführung der in Kapitel 4.6.3 beschriebenen Test-Modifikationen, sowie für Athleten aus dem Spportsportbereich und der Leichtathletik, wo sprint-ähnliche Belastungen häufig einer geführten Kurbelbewegung vorgezogen werden.

In wie weit sich eine geringere oder höhere anaerobe Leistungsfähigkeit in den Ermüdungsparametern (Fatigue Index, Steigung der Regressionsgeraden) oder anderen Messwerten des FTT dokumentieren lässt, muss jedoch Inhalt weiterer Forschungsarbeit sein.

Alle drei für das Foot-Tapping bedeutsamen, im Rahmen der vorliegenden Studie untersuchten, und oben diskutierten Hauptbeanspruchungsformen Koordination, anaerobe Kapazität und zyklische Schnelligkeit, spielen eine relevante Rolle für das erfolgreiche absolvieren des FTT15 und werden durch diesen Test untersucht und abgebildet. Eine klare Abgrenzung und differenzierte Betrachtung der einzelnen Entitäten ist durch den FTT15 jedoch bei enger Überlappung und gegenseitiger

Abhängigkeit nur eingeschränkt möglich. Qualitativ scheint der FTT15 in höherem Masse geeignet, motorische Fähigkeiten im Bereich der zyklischen Schnelligkeit abzubilden. Auch für die Untersuchung der anaeroben Kapazität ist der Test grundsätzlich geeignet, wenn auch in leicht modifizierter Form wie in Kapitel 4.6.3 beschrieben. Die Beurteilung von koordinativer Leistungsfähigkeit ist nicht als Stärke des FTT15 einzuschätzen. Abbildung 4.8 soll die genannten Erkenntnisse verdeutlichen.

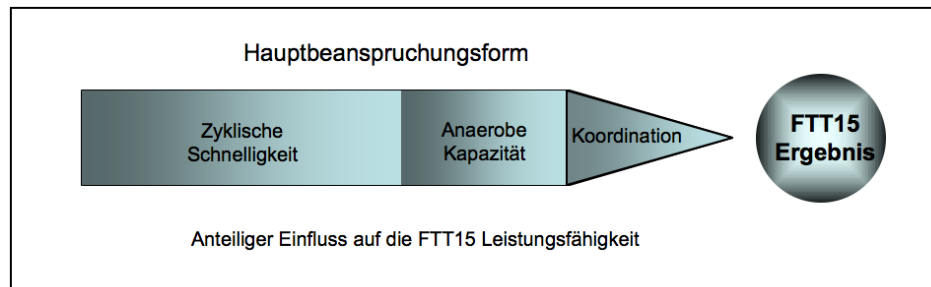


Abbildung 4.8: Hauptbeanspruchungsformen, welche führend über den FTT15 abgebildet werden und zum erfolgreichen Absolvieren des Tests beitragen; qualitativ-schematische Darstellung des anteiligen Einflusses von zyklischer Schnelligkeit, anaerober Kapazität als energetischer Komponente sowie von Koordination auf das Ergebnis des FTT15

4.6.3 FTT15 als leistungsdiagnostischer Test – Einordnung und Variationsmöglichkeiten

Der bis hier umfangreich beschriebene und im Detail untersuchte FTT15 ist nun in die Gruppe bestehender Testverfahren, welche für ähnliche und angrenzende Fragestellungen genutzt werden, einzuordnen. Erst hierdurch wird die Wertigkeit des Tests mit seinen Stärken und Schwächen deutlich und mögliche Verwendungen offensichtlich. Die in Abbildung 4.9 gewählte Darstellungsform erscheint geeignet, diese Zusammenhänge anschaulich wiederzugeben.

Um Komplexität zu reduzieren, wurden in Abbildung 4.9 die Hauptbeanspruchungsformen Koordination und zyklische Schnelligkeit bewusst zu einer Größe zusammengefasst und der anaeroben Kapazität gegenübergestellt. Wie in Kapitel 1.2.2 beschrieben, sind Schnelligkeit und Koordination zwar auch beim Tapping als solitäre Hauptbeanspruchungsformen zu sehen, eine hohe Frequenzschnelligkeit setzt jedoch ein gutes koordinatives Leistungsniveau als eine ihrer Determinanten voraus. Schnelligkeit und Koordination scheinen in diesem Dreierkonstrukt der für den FTT15 führend relevanten Hauptbeanspruchungsformen enger miteinander verbunden zu sein, als es jeweils mit der anaeroben Kapazität der Fall ist. Vor diesem Hintergrund erscheinen die gewählte Darstellung und die darauf aufbauenden Beschreibungen legitim.

Nochmals soll darauf hingewiesen werden, dass im Testprotokoll der vorliegenden Arbeit die Erhebung, Auswertung und Interpretation der Daten auf dem Zusammenspiel von zyklischen Bewegungsabläufen und Zeit basierte. Dies steht in klarem Kontrast zu den meisten etablierten Testverfahren der anaeroben Kapazität (z.B. WANt), wo die erbrachte Leistung, also Energie pro Zeit, den wichtigsten Parameter darstellt.²⁷

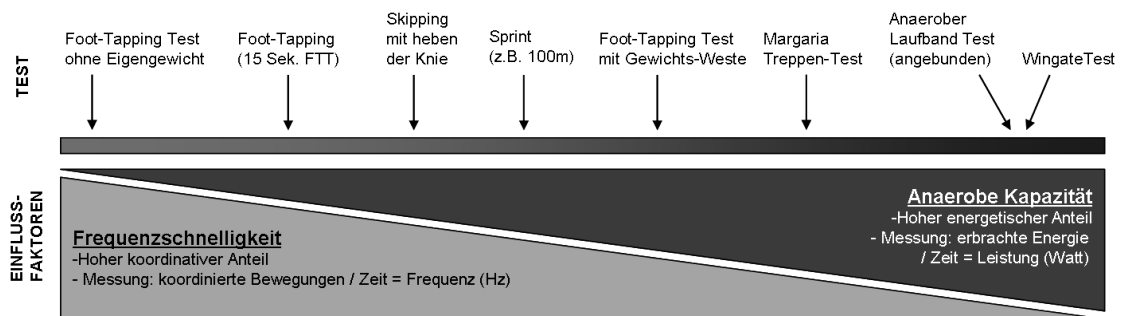


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung der anteiligen Bedeutung von Frequenzschnelligkeit und anaerober Kapazität für ein erfolgreiches Abschneiden bei unterschiedlichen Testverfahren

Die Foot-Tapping Bewegung findet auf der Stelle statt. Hierbei ist der Körper führend der Erdanziehung als auf ihn wirkende Kraft ausgesetzt, in geringem Maße spielt auch der Luftwiderstand eine Rolle. Bei vielen anderen Bewegungsabläufen kommen weitere zu überwindende Kräfte hinzu. So sind beim Sprint zusätzliche Kräfte zur horizontalen Fortbewegung aufzubringen, auch der Luftwiderstand spielt unter diesen Umständen eine größere Rolle. Unterschiede zwischen einer hochfrequenten Schnelligkeitsbewegung auf der Stelle und einer Translations-Bewegung werden so deutlich.

Vor dem Hintergrund sich stark unterscheidender Methodik und Testprotokolle bei oft verwendeten sportmotorischen Testverfahren, ist die mangelnde Vergleichbarkeit von Testergebnissen trotz ähnlicher Fragestellungen ein häufiges Problem. Eine Veränderung der Methodik kann in solchen Fällen dazu führen, dass Parameter besser vergleichbar werden und sich Ergebnisse in sportartspezifische Abläufe übertragen lassen.

Dieses Vorgehen soll auch auf den FTT15 angewandt werden, so dass Überlegungen zur Variation des hier vorgestellten Testprotokolls folgen. Ziel ist es einerseits, das bestehende Protokoll besser in den Fundus existierender anaerober Tests einordnen zu können, andererseits, das Spektrum und möglicherweise auch die Aussagekraft der Tapping-Tests selbst zu erweitern. Hintergrund ist das Prinzip, die Tapping Belastung selbst zu erleichtern, um höhere Bewegungsfrequenzen zu realisieren, oder gegenteilig

diese zu erschweren, um dem Athleten eine größere energetische Belastung abzuverlangen. Auf der in Abbildung 4.9 dargestellten Achse kann es also zu Verschiebungen in beide Richtungen kommen. Sowohl die Entlastung als auch eine zusätzliche Belastung des Sportlers sind Grundsätze, welche insbesondere im Training verschiedener Sportarten mit repetitiven Bewegungszyklen schon länger eine Rolle spielen, um Leistungszuwachs zu generieren.^{132, 133}

Bei supramaximalen Bewegungsabläufen soll das neuromuskuläre System an höhere Frequenzen, die wenige Prozent oberhalb der eigentlichen Maximalfrequenz des Athleten liegen, herangeführt werden. Anschließend besteht die Hoffnung, dass auch ohne Beschleunigungshilfen oder andere Formen der Entlastung der schnellere Bewegungsablauf zumindest teilweise umgesetzt werden kann. Beim Sprinten könnte das beispielsweise zu einer nachhaltig höheren Schrittfrequenz führen. Auf der anderen Seite steht der Ansatz, durch Ausführen der gelernten Bewegungsabläufe gegen höhere Widerstände die Leistungsfähigkeit über einen Kraftzuwachs zu steigern.

Auch und gerade beim Foot-Tapping Test sind Variationen denkbar. Als ‚FTT15 ohne Eigengewicht‘ und ‚FTT15 mit Zusatzgewicht‘ sollen zwei dieser Varianten im Folgenden noch genauer beschrieben werden.

Die Durchführung eines FTT15 gänzlich ohne oder mit reduziertem Eigengewicht oder aber mit zusätzlicher Muskelstimulation ist eine Überlegung zur weiteren Steigerung der Frequenzschnelligkeit und damit Verschiebung des Tests auf der gezeigten Skala nach links.

Für die leichtathletischen Sprint-Disziplinen ist bekannt, dass so genanntes ‚Überfrequenztraining‘ oder ‚supramaximales Training‘ mit Beschleunigungshilfen wie Zugmaschinen, gegenseitigem Ziehen oder Bergablaufen über eine Steigerung der Schrittfrequenz zu höheren Sprint-Geschwindigkeiten führen kann.¹³⁴ Auch beim Schwimmen existieren Verfahren zur Verringerung der vom Athleten aufzubringenden Kräfte. So können höhere Geschwindigkeiten und Zugfrequenzen durch Schwimmen mit dem Strom, beispielsweise im Strömungskanal, oder Ziehen des Schwimmers mit Hilfe von elastischen Bändern, erreicht werden.¹³³

Im Radsport repräsentiert weder die Tretgeschwindigkeit noch die Fahrtgeschwindigkeit direkt die Leistungsfähigkeit des Sportlers, da diese durch zahlreiche Widerstandskomponenten beeinflusst werden. Hierzu zählen die Hangabtriebskomponente, die Rollreibung und der Luftwiderstand, wobei letzterer auf die Fahrtgeschwindigkeit den größten Einfluss hat.¹⁰¹ Am Fahrrad und Ergometer lassen sich die jeweils zu Trainings- oder Testzwecken gewünschten Widerstände oder

Tretfrequenzen jedoch sehr leicht über die Gangschaltung anpassen, so dass eine fast widerstandsfreie Tretbewegung leicht realisierbar ist.

Als Foot-Tapping Bewegung mit Eigengewichtsentlastung ist bisher lediglich eine Durchführung im Sitzen beschrieben. Thienes hat mit dieser Methodik, bei welcher der Grossteil des Eigengewichtes durch die Sitzfläche getragen wird, die in Kapitel 4.1 beschriebene und diskutierte Kontaktfrequenz von maximal 6,1 Hz gefunden.⁸ Es kann vermutet werden, dass eine aufrechte Haltung mit zusätzlicher Gewichtsentlastung im Vergleich zum Sitzen Vorteile bezüglich der Koordination und Ökonomie der Bewegungsabfolge bietet. Daraus folgend könnten mit einer aufrechten Haltung und Gewichtsentlastung mutmaßlich höhere Tapping Frequenzen erzielt werden, als sie bei Thienes und in der vorliegenden Arbeit beschrieben worden sind. Im Vergleich zum Original würden bei einem so modifizierten FTT15 in deutlich höherem Maße Fähigkeiten im Bereich der zyklischen Schnelligkeit und Koordination abgebildet werden. Energetische Komponenten wären durch die Gewichtsentlastung erst bei erheblich längerer Testdauer bedeutsam.

Eine leicht realisierbare Methode zur Gewichtsentlastung wäre beispielsweise der Einsatz von Gummiseilen, wie sie als so genannte Sprungspinne existieren. Hierbei wäre eine Fixierung der Seile im Bereich der Fuß- oder Kniegelenke denkbar. Alternativ könnten Probanden mit einer weniger elastischen Tragekonstruktion (Tragegurt) in definiertem Abstand über der Messplatte hängend in Position gebracht werden.

Als invasivere Methode stünde das Verfahren der Elektrostimulation zur Verfügung. Die zeitliche Koordination dieser Stimuli dürfte bei hochfrequenten Tapping-Bewegungen allerdings ein Hindernis darstellen. Mit beiden der genannten Verfahren zur Unterstützung der Muskelkontraktion, Gummispinne und Elektrostimulation, konnte bei Niedersprüngen eine Reduktion der Bodenkontaktzeiten dokumentiert werden.¹³⁵ Im Kontext der Muskelstimulation konnten Szecsi et al. sogar zeigen, wie über ein System der funktionellen Elektrostimulation querschnittsgelähmten Patienten das (Drei-) Radfahren mit eigener Muskelkraft ermöglicht wurde.¹³⁶

Der 15 Sekunden FTT ist in der vorliegenden Arbeit umfangreich beschrieben worden. Koordinations- und Schnelligkeitsvoraussetzungen für das erfolgreiche absolvieren dieses Tests wurden detailliert abgehandelt. Auf energetische Aspekte konnte nur indirekt über die im Rahmen dieser Studie erhobenen Ermüdungsparameter (Steigung der Regressionsgeraden, Fatigue Index), sowie über die gewählten Belastungszeiten und Bio-Parameter (HF, Laktat), eingegangen werden. Durch zusätzliche Auswertung

der mittels Kraftmessplatte registrierten Bodenkontaktkräfte könnten Ergebnisse zur erbrachten Leistung das Bild in zukünftigen Studien vervollständigen.

Beim Skipping mit Heben der Knie ist, im Vergleich zum Tapping, die von den Knien und Füßen teilweise auch als Hubarbeit zurückgelegte Strecke größer. Dies impliziert, dass die Bewegungsabfolge entsprechend langsamer sein muss, also geringere Kontaktfrequenzen erzielt werden. In einer Längsschnittuntersuchung zur Betrachtung der Schnelligkeit im Kontext der konditionellen Fähigkeiten an Schülern und Schülerinnen der 5. bis 13. Klasse konnte Damerow für beide Geschlechter relativ gleich bleibende Skipping-Frequenzen um 4,5 Wiederholungen pro Sekunde bestimmen.⁷ Es ist davon auszugehen, dass bei diesem Ergebnis die abwechselnden Kontakte beider Beine Berücksichtigung fanden. Die Anzahl der Kontakte liegt also etwa bei der Hälfte des für den FTT15 gefundenen Wertes und deckt sich mit den beim 100 m Sprint guter Athleten beobachteten Schrittfrequenzen. Hinsichtlich der bei Skipping-Bewegungen tatsächlich gemessenen Kontaktfrequenzen oder energetischen Beanspruchungen existieren aktuell keine weiteren Daten, was nicht überrascht, da Skipping-Übungen im Training zwar häufig genutzt werden, als standardisierte sportmotorische Leistungstests jedoch bedeutungslos sind.

Im Vergleich zum Skipping muss beim 100 m Sprint zusätzlich zum Heben der Beine eine erhebliche Menge an Energie für Beschleunigung und Aufrechterhalten der Geschwindigkeit in horizontaler Richtung, sowie für die Überwindung des Luftwiderstandes, aufgebracht werden. Anhand von Geschwindigkeitskurven des 100 m Sprints von Weltmeistern und einem mathematischen Modell bestimmten Arsac et al. die vom Athleten hierfür aufzubringende Gesamtenergie und die entsprechende anaerobe (ca. 95 %) und aerobe (ca. 5 %) Energiebereitstellung. Den für die Vorwärtsbewegung benötigten Energie-Anteil bestimmten die Autoren auf etwa 60 – 70 %, wobei der für die anfängliche Beschleunigung relevante Anteil 20 – 30 % und die Überwindung des Windwiderstandes etwa 10 % ausmachten.¹³⁷ Beim 100 m Sprint als sportmotorischem Test nimmt also im Vergleich zum Tapping und Skipping der koordinative Anteil als Faktor für ein erfolgreiches Absolvieren zu Gunsten der aufzubringenden Kraft und damit auch der verbrauchten Energie deutlich ab.

Der Foot-Tapping Test mit Zusatzgewicht stellt eine Überlegung dar, zusätzlich zum koordinativen Anteil, eine größere energetische Komponente in die Tapping-Bewegung einfließen zu lassen, und somit auf der in Abbildung 4.9 gezeigten Skala eine Rechtsverschiebung zu bewirken.

Beim leichtathletischen Sprinttraining und im Ballsportbereich sind den Widerstand erhöhende Trainingsmittel wie Zugseile mit Reifen, Gummibänder oder Fallschirme immer weiter verbreitet. Ziel ist hier eine Intensivierung der Belastung und Kräftigung der beteiligten Muskulatur. In diesem Zusammenhang zeigten Zafeiridis et al., dass bei nicht Elite-Athleten ein mit Brems-Schlitten durchgeführtes Sprint Training zu einer verbesserten Beschleunigung und ein ungebremstes Training zu einer verbesserten Maximalgeschwindigkeit führte.¹³²

Im Schwimmsport sind Techniken zur Steigerung der wirkenden Kräfte durch die Nutzung von Paddeln, durch Schwimmen gegen den Strom, oder durch Bremsen des Athleten mit Hilfe von elastischen Bändern ebenfalls gängige Trainingsmethoden. Girold et al. verglichen Sprint Training im Schwimmsport als assistierte oder gebremste Methode jeweils mit Hilfe von elastischen Bändern. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass sowohl das gebremste wie auch das assistierte Training dem traditionellen Programm überlegen war, wobei Training mit Widerstandserhöhung einen insgesamt größeren positiven Einfluss auf Muskelkraft, Schwimmleistung und Zugtechnik hatte.¹³³

Die Durchführung eines Foot-Tapping Tests mit Zusatzgewichten ist bis dato nicht beschrieben worden. Die Applikation einer Gewichtsweste oder das Tragen von Gewichtsmanschetten beim FTT15 erscheinen jedoch leicht realisierbar. Diese Hilfsmittel würden dem Probanden zusätzliche Ressourcen, insbesondere in der getesteten Beinmuskulatur, abverlangen. Alternativ oder additiv wären zwischen dem Boden und einem Hüftgurt befestigte Gummizüge denkbar.

Beide genannten Verfahren würden, abhängig vom Umfang der Zusatzgewichte oder der Seilspannung, den Fokus des Tests verhältnismäßig der Überprüfung der anaeroben Kapazität näher bringen. Besonders interessant könnte in diesem Zusammenhang die Überprüfung der koordinativen Leistungsfähigkeit und der zyklischen Schnelligkeit in der Endphase eines unter diesen Bedingungen mutmaßlich muskulär stärker belastenden Tests sein. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass die Bewegung beim FTT15, im Gegensatz zum WAnT, eine freie, zyklische Schnelligkeitsbewegung ohne Führung darstellt. Durch Veränderung der Gewichte und eine vorgegebene Mindesthubhöhe für die Füße oder Knie, könnten beim FTT15 gegebenenfalls sogar erbrachte Leistungen im physikalischen Sinne berechnet und bewertet werden.

Ein Foot-Tapping Test mit Zusatzbelastung kombiniert die Vorteile eines schnell durchführbaren stationären Testverfahrens mit der Aussagekraft etablierter Tests im Bereich zyklische Schnelligkeit und anaerobe Leistungsdiagnostik. Gegenüber dem WAnT als gängigem Testverfahren der anaeroben Kapazität, hätte ein Tapping-Test den Vorteil, dass es sich im weitesten Sinne um einen Lauftest handelt, was

hinsichtlich des Bewegungsablaufes verglichen mit einem Kurbeltest von vielen Athleten aus den Bereichen Leichtathletik und Ballsport favorisiert wird.

Es erklärt sich von selbst, dass es sich bei den obigen Aussagen um Hypothesen handelt, welche gegenwärtig nicht wissenschaftlich belegt werden können. Auf Grund des offensichtlich fortbestehenden Forschungsbedarfes sollten diese Hypothesen Subjekt zukünftiger sportwissenschaftlicher Studien sein, um die entsprechenden Zusammenhänge zu klären.

Der hochfrequente Bewegungsablauf beim Margaria Stair-Climbing Test (MST) ist der Skipping Bewegung sehr ähnlich (vgl. Kapitel 1.4). Hinzu kommt jedoch, durch die bei jedem Schritt notwendige Stemmarbeit der Beine, ein zusätzlicher hoher energetischer Aufwand. Dies, gekoppelt mit dem im Vergleich zum FTT15 sehr kurzen Messintervall von weniger als einer Sekunde Dauer, ergibt beim Margaria Treppen-Test einen Untersuchungsschwerpunkt im Bereich Schnellkraft und anaerob-alktazide Energiebereitstellung. Vorteilhaft ist, dass die Methodik eine Bestimmung der erbrachten Leistung im physikalischen Sinne erlaubt.

Anaerober Laufband-Test (angebunden) / Bob Start Test

Sowohl beim maximalen Laufbandtest mit Applikation eines Zugkraft-Sensors zwischen Athlet und hinterer Untersuchungsapparatur, als auch beim Bob Start Test (vgl. Kapitel 1.4) ist es den Autoren gelungen, das ursprüngliche Mess-Konzept eines Laufbandtests mit den Parametern Zeit, zurückgelegte Distanz, und berechnete Geschwindigkeit zu verlassen und zuverlässige Aussagen über die tatsächlich von Probanden erbrachte mechanische Leistung zu erheben.

Da es sich in beiden genannten Tests unter den gegebenen Untersuchungsbedingungen um moderate Schrittgeschwindigkeiten, also eine einfache motorische Aufgabe handelt, wird deutlich, dass bei diesen Tests die energetische Komponente als Einflussfaktor zum erfolgreichen Absolvieren im Vergleich zum koordinativen Aspekten bei weitem überwiegt. Ein großer Vorteil der Methodik ist eine gute Vergleichbarkeit der erbrachten mechanischen Leistung zum WAnT, sowie die Vorliebe vieler Athleten, Trainer und Sportwissenschaftler für einen Laufbandtest, der bei überwiegend laufenden Sportlern die Bewegungsabläufe und Muskelgruppen besser abbilden kann, als ein Tretkurbelverfahren oder eine isokinetische Kraftmaschine.

Wingate Anaerobic Test (WAnT)

Der WAnT ist der am häufigsten genutzte und damit auch untersuchte Test zur Überprüfung der anaeroben Kapazität. Zahlreiche Labore haben seine hohe Reliabilität wie auch seine Validität in der Bestimmung von maximaler mechanischer Leistung und lokaler Muskelausdauer wiederholt bestätigt.²⁷ Da es sich beim WAnT um eine geführte zyklische Bewegungen handelt, ist ein verhältnismäßig geringer Einfluss des Faktors Frequenzschnelligkeit / Koordination offensichtlich. Nachteilig ist beim WAnT die alleinige Durchführbarkeit als Kurbeltest, eine Bewegungsabfolge, welche Athleten aus Laufdisziplinen und Ballsportarten nicht im gleichen Maße liegt wie beispielsweise Radsportlern.

Zusammenfassend ist der im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellte FTT15 ein reliables sportmotorisches Testverfahren, dessen Validität es in weiteren Studien zu überprüfen gilt. Der theoretische Hintergrund hierzu sowie die Einordnung in die existierende Literatur liegen vor. Die zur Durchführung des FTT15 gewählte und ausführlich beschriebene Methodik in der Erfassung, Auswertung und Interpretation der Daten stellt die für diesen Labor-Test geforderte Objektivität sicher.

Ein klares FTT15 Testprofil wurde demonstriert. Theoretisch konnte gezeigt werden, wo der FTT15 im Vergleich zu bestehenden und etablierten Testverfahren, insbesondere der zyklischen Schnelligkeit sowie der anaeroben Kapazität, zu positionieren ist. Weiter wurden Möglichkeiten dargestellt, welche die Weiterentwicklung des FTT15 und daraus folgend eine erhebliche Ausdehnung des Nutzungsspektrums betreffen. Vor diesem Hintergrund ist es denkbar, dass erweiterte Kenntnisse und eine fortgeführte Testoptimierung zukünftig zu einer breiteren Anwendung des FTT15 als sportmotorischem Test führen.

Die Untersuchungen zum Einfluss von Vorbelastungen auf die Leistungsfähigkeit beim FTT15 und EST erbrachten Ergebnisse, welche sich mit den bekannten Prinzipien des Aufwärmens und Ermüdens erklären, und mit vorhandener Literatur in Einklang bringen lassen.

Ein erheblicher Forschungsbedarf in den behandelten Themengebieten bleibt bestehen. Dies gilt sowohl für den FTT15 als sportmotorisches Testverfahren, wie auch zur weiteren Klärung des Einflusses von Vorbelastungen auf sich anschließende leistungsphysiologische Tests der zyklischen Schnelligkeit.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die leistungsdiagnostische Überprüfung der anaeroben Kapazität stellt bisher eine Herausforderung dar. Es mangelt an standardisierten Testverfahren, teilweise herrscht bei etablierten Methoden Uneinigkeit bezüglich der abgebildeten Fertigkeiten. Bei sportmotorischen Tests der zyklischen Schnelligkeitsleistung sind eine mangelhafte Übertragbarkeit von Untersuchungsergebnissen in die Primärsportart sowie das Fehlen von standardisierten Laborbedingungen ungelöste Probleme. Auch hinsichtlich des Einflusses von Vorbelastungen unterschiedlicher Intensität auf die Leistungsfähigkeit bei einem in direkter Folge stattfindenden kurzen Test der zyklischen Frequenzschnelligkeit ist der aktuelle Forschungsstand unvollkommen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, anhand eines bisher in der Literatur nicht beschriebenen sportmotorischen Tests, den Kenntnisstand in den Bereichen anaerobe Kapazität und Frequenzschnelligkeit zu erweitern, sowie den Einfluss von Vorbelastungen auf diese Hauptbeanspruchungsformen zu untersuchen. Dies beinhaltete auch das Etablieren von Referenzwerten für einen neuen 15 Sekunden andauernden Foot-Tapping Test (FTT15).

Hierzu führten 10 männliche Probanden (Alter: $23,8 \pm 5,1$ Jahre; Gewicht: $76,0 \pm 6,4$ kg; Trainingsstunden/Woche: $8,3 \pm 3,4$) innerhalb von 2 Wochen jeweils 6 mal den FTT15 auf einer Kraftmessplatte durch, wobei die Parameter Kontakt-Anzahl, Tapping-Frequenz, Steigung der Regressionsgeraden, Peak Frequenz, Zeitsegment F_{\max} und Zeitsegment F_{\min} bestimmt wurden.

Zur Überprüfung des Einflusses einer Vorbelastung unterschiedlicher Intensität auf die FTT15-Leistungsfähigkeit, führten in einer zweiten Datenerhebung 25 männliche Probanden (Alter: $23,4 \pm 3,9$ Jahre; Gewicht: $81,9 \pm 8,1$ kg; Trainingsstunden/Woche: $7,2 \pm 2,5$) in randomisierter Reihenfolge innerhalb von 2 Wochen den FTT15 ohne Vorbelastung, nach stattgehabtem 30-minütigem Lauf im aeroben Bereich sowie nach erfolgtem maximal ermüdendem Sprint durch.

Für den FTT15 konnte ein typisches Testprofil mit Erfassung der höchsten Tapping-Frequenzen zu Testbeginn und einem kontinuierlichen Leistungsabfall über den Testzeitraum etabliert werden, wobei die durchschnittliche Tapping-Frequenz bei $4,8 \pm 0,5$ Hz, die mittlere Peak Frequenz bei $5,4 \pm 0,6$ Hz und der Fatigue Index bei ca. 20 % lag. Nur vom ersten zum zweiten Test-Termin zeigte sich eine signifikante Leistungssteigerung, anschließend konnte für den FTT15 bei weiteren 5 Untersuchungen eine gute Retest-Reliabilität dokumentiert werden.

Nach aerober Vorbelastung zeigte sich eine signifikante Leistungszunahme beim FTT15. Abgesehen von einer signifikanten Leistungsreduktion in der Test-Frühphase, entsprachen die FTT15-Ergebnisse nach stattgehabter anaerober Vorbelastung im Wesentlichen dem Zustand ohne Vorbelastung.

Der Einfluss von Vorbelastungen auf die Leistungsfähigkeit beim sich anschließenden FTT15 ist durch bekannte Mechanismen zu erklären, welche dem Aufwärmen und der Ermüdung zugeordnet werden können. Die höchste FTT15 Leistungsfähigkeit nach aerober Vorbelastung ist im Wesentlichen über Erwärmungsprozesse zu erklären, nach stattgehabter anaerober Vorbelastung gleichen sich leistungspositive und -negative Faktoren aus, so dass sich ein Zustand einstellt, welcher der Ruhe-Situation entspricht.

Der FTT15 ist ein innovatives sportmotorisches Testverfahren, welches besondere Stärken in der Überprüfung der zyklischen Schnelligkeit und der anaeroben Kapazität besitzt. Der spezifischen Fragestellung entsprechend sind Testmodifikationen wie eine Durchführung mit Zusatzgewichten oder unter Gewichtsentlastung möglich, wodurch die Vielseitigkeit dieses Tests deutlich wird. Im Weiteren zeichnet sich der FTT15 durch eine schnelle und standardisierte Durchführbarkeit aus.

Vor dem Hintergrund einer im Vergleich zum Kurbeltest dem Laufsport näher liegenden FTT15-Bewegungscharakteristik, kann eine gute Annahme des Testverfahrens von Athleten aus dem Spilsportbereich und eine sich hieraus ableitende günstige Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Primärsportart vermutet werden.

Ergänzend oder als Alternative zu etablierten Testverfahren kann der FTT15 auf Basis der nun vorliegenden Erkenntnisse und Referenzwerte zukünftig eine breite Anwendung als neuer sportmotorischer Belastungstest erfahren.

6 QUELLENVERZEICHNIS

1. Shimoyama I, Ninchoji T, Uemura K. The finger-tapping test. A quantitative analysis. *Arch Neurol.* 1990;47(6):681-684.
2. Hollingworth LS. Functional Periodicity: an experimental study of the mental and motor abilities of women during menstruation. In: Teachers College CU, ed. *Contributions to Education.* Vol No. 69. New York; 1914.
3. Werthner R, Werthner G, Werthner U. TDS - Talent Diagnose System. Moderne Talent- und Trainingsdiagnostik mittels EDV. Available at: www.werthner.at/tds/tds-german.
4. Hoffmann M. *Koordination und Ermüdung, Experimentelle Untersuchung zu Veränderungen der Bewegungskoordination unter dem Einfluß von Ermüdung:* Herbert Utz Verlag; 2001.
5. Wells FL. A neglected measure of fatigue. *Amer. J. Psychol.* 1908;19:345-358.
6. Dunlap K. Improved form of steadiness tests and tapping plate. *J. exp Psychol.* 1921;4:430 - 433.
7. Damerow M. *Die Betrachtung der Schnelligkeit im Kontext der konditionellen Fähigkeiten und die Notwendigkeit einer neuartigen Sichtweise - ein Modellansatz zur Strukturierung der Schnelligkeit.* Magdeburg: Fakultät für Geistes-, Sozial- und Erziehungswissenschaften, Otto-von-Guericke-Universität; 2005.
8. Thienes G. *Motorische Schnelligkeit bei zyklischen Bewegungsabläufen.* Münster: LIT Verlag; 1998.
9. Schaper A, Letzelter M. Dimensionen der motorischen Schnelligkeit. *Sportwissenschaft.* 1994;24(4):358-369.
10. Israel S, Weidner A, Stengel K. Die Alterscharakteristik der Muskelkraft sportlich aktiver und inaktiver Frauen und Männer zwischen dem 30. und 60. Lebensjahr. *Theorie und Praxis der Körperkultur.* 1986;35(2):127-135.
11. Israel S. Akzentuierung bei der Ausbildung körperlicher Fähigkeiten für verschiedene Körperpartien. *Theorie und Praxis der Körperkultur.* 1976;25(2):118-127.
12. Kuchler G. *Motorik: Steuerung der Muskeltätigkeit und begleitende Anpassungsprozesse.* Stuttgart: Fischer; 1983.
13. Thienes G. Zyklische Schnelligkeit: trainingswissenschaftliche Bestimmung, empirische Befunde, Konsequenzen für die Trainingsgestaltung. *Leistungssport.* 1999;29(2):18-22.
14. Weineck J. *Sportbiologie.* 9 ed. Balingen: Spitta Verlag; 2004.
15. Zallinger G, Müller E. Charakteristik der Beintapping-Bewegung unter dem Aspekt ausgewählter EMG-Parameter. *Spectrum Suppl.* 1999:79-86.
16. Arnason A, Sigurdsson SB, Gudmundsson A, Holme I, Engebretsen L, Bahr R. Physical fitness, injuries, and team performance in soccer. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36(2):278-285.
17. Dickhuth HH, Mayer F, Röcker K, Berg A. *Sportmedizin für Ärzte - Lehrbuch auf der Grundlage des Weiterbildungssystems der Deutschen Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention (DGSP).* Köln: Deutscher Ärzte-Verlag; 2007.
18. Hollmann W, Strüder HK. *Sportmedizin - Grundlagen für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin.* 5 ed. Stuttgart: Schattauer; 2009.
19. Fetz F. Sportmotorische Grundeigenschaften. *Maandblad v. lichamelijke opvoeding.* 1971;3.
20. Grosser M. *Schnelligkeitstraining: Grundlagen, Methoden, Leistungssteuerung, Programme.* München, Wien, Zürich: BLV; 1991.
21. Schiffer J. *Schnelligkeit - Trainingsmethodische, biomechanische, leistungsphysiologische und leistungsdiagnostische Aspekte. Eine kommentierte Bibliographie.* Köln: Sport und Buch Strauß; 1993.
22. Simkin NW. *Physiologische Charakteristik von Kraft, Schnelligkeit und Ausdauer.* Berlin: Deutscher Sportverlag; 1960.
23. Frey G. Zur Terminologie und Struktur physischer Leistungsfaktoren und motorischer Fähigkeiten *Leistungssport.* 1977;7:339-362.
24. Denny MW. Limits to running speed in dogs, horses and humans. *J Exp Biol.* 2008;211(Pt 24):3836-3849.
25. Ikai M. Dynamics of sprint running with respect to the speed curve. 1. *Internationales Seminar über Biomechanik.* Zürich; 1967.
26. Ballreich R. *Weg- und Zeit-Merkmale von Sprintbewegungen.* Berlin, München, Frankfurt: Bartels u. Wernitz; 1969.

27. Inbar O, Bar-Or, O., Skinner, J. S. *The Wingate Anaerobic Test*. Champaign: Human Kinetics; 1996.
28. Vandewalle H, Peres G, Monod H. Standard anaerobic exercise tests. *Sports Med*. 1987;4(4):268-289.
29. Maud PJ, Shultz BB. Norms for the Wingate anaerobic test with comparison to another similar test. *Res Q Exerc Sport*. 1989;60(2):144-151.
30. Laurent CM, Jr., Meyers MC, Robinson CA, Green JM. Cross-validation of the 20-versus 30-s Wingate anaerobic test. *Eur J Appl Physiol*. 2007;100(6):645-651.
31. Heck H, Schulz H. Methoden der anaeroben Leistungsdiagnostik. *Dtsch Z Spomed*. 2002;53(7 u. 8):202-212.
32. Kindermann W. Anaerobe Schwelle. Standards der Sportmedizin. *Dtsch Z Spomed*. 2004;55(6):161-162.
33. Asmussen E, Boje O. Body temperature and capacity for work. *Acta Physiol Scand*. 1945;10:1-22.
34. Hilberg T, Herbsleb M, Puta C, Gabriel HHW, Schramm W. Körperliches Training steigert die isometrische Muskelkraft und sensomotorische Fähigkeiten bei hämophilen Personen. *Dtsch Z Spomed*. 2003;54(10):281-287.
35. Hertel J, Gay MR, Denegar CR. Differences in Postural Control During Single-Leg Stance Among Healthy Individuals With Different Foot Types. *Journal of Athletic Training*. 2002;37(2):129-132.
36. Verhagen E, Bobbert M, Inklaar M, van Kalken M, van der Beek A, Bouter L, van Mechelen W. The effect of a balance training programme on centre of pressure excursion in one-leg stance. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2005;20(10):1094-1100.
37. Patla AE, Frank JS, Winter DA. Balance control in the elderly: implications for clinical assessment and rehabilitation. *Can J Public Health*. 1992;83 Suppl 2:S29-33.
38. O'Connell M, George K, Stock D. Postural sway and balance testing: a comparison of normal and anterior cruciate ligament deficient knees. *Gait Posture*. 1998;8(2):136-142.
39. Tropp H, Ekstrand J, Gillquist J. Stabilometry in functional instability of the ankle and its value in predicting injury. *Med Sci Sports Exerc*. 1984;16(1):64-66.
40. Gauffin H, Pettersson G, Tegner Y, Tropp H. Function testing in patients with old rupture of the anterior cruciate ligament. *Int J Sports Med*. 1990;11(1):73-77.
41. Jerosch J, Thorwesten L, Bork H, Bischof M. Is prophylactic bracing of the ankle cost effective? *Orthopedics*. 1996;19(5):405-414.
42. Goldie PA, Bach TM, Evans OM. Force platform measures for evaluating postural control: reliability and validity. *Arch Phys Med Rehabil*. 1989;70:510-517.
43. Hasan SS, Lichtenstein MJ, Shiavi RG. Effect of loss of balance on biomechanics platform measures of sway: influence of stance and a method for adjustment. *J Biomech*. 1990;23(8):783-789.
44. Hayes KC. Biomechanics of postural control. *Exerc Sport Sci Rev*. 1982;10:363-391.
45. Reer R, Jerosch J. Proprioception of the Ankle Joint. *The Unstable Ankle: Human Kinetics*; 2002:36-51.
46. Cunningham D, Faulkner J. The effect of training on aerobic and anaerobic metabolism during a short exhaustive run. *Med Sci Sports Exerc*. 1969;1:65-69.
47. Margaria R, Aghemo P, Rovelli E. Measurement of muscular power (anaerobic) in man. *J Appl Physiol*. 1966;21(5):1662-1664.
48. Margaria R, Cerretelli P, Aghemo P, Sassi G. Energy cost of running. *J Appl Physiol*. 1963;18:367-370.
49. Kibele A, Behm D. A Laboratory Test for the Examination of Alactic Running Performance. *Journal of Sports Science and Medicine*. 2005;4:572-582.
50. Ayalon A, Inbar O, Bar-Or O. Relationships among measurements of explosive strength an anaerobic power. In: Nelson RC, Morehouse CA, eds. *International series on sports sciences. 1: Biomechanics IV*. Baltimore: University Park Press; 1974:527-532.
51. Bouchard C, Taylor AW, Simoneau J-A, Dulac S. Testing anaerobic power and capacity. In: MacDougall JD, Wegner HA, Green HJ, eds. *Physiological testing of the high-performance athlete*. Champaign, IL: Human Kinetics; 1991.
52. Zemková E, Hamar D. "All-Out" Tethered Running as an Alternative to Wingate Anaerobic Test. *Kinesiology*. 2004;36(2):165-172.
53. Fradkin AJ, Gabbe BJ, Cameron PA. Does warming up prevent injury in sport? The evidence from randomised controlled trials? *J Sci Med Sport*. 2006;9(3):214-220.
54. Woods K, Bishop P, Jones E. Warm-up and stretching in the prevention of muscular injury. *Sports Med*. 2007;37(12):1089-1099.

55. Bishop D. Warm up I: potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Med.* 2003;33(6):439-454.
56. Israel S. Das Erwärmen als Startvorbereitung. *Med. Sport.* 1977;12:386-391.
57. Wright V, Johns RJ. Quantitative and Qualitative Analysis of Joint Stiffness in Normal Subjects and in Patients with Connective Tissue Diseases. *Ann Rheum Dis.* 1961;20(1):30-46.
58. Barcroft J, King W. The effect of temperature on the dissociation curve of blood. *J Physiol.* 1909;39:374-384.
59. Grassi B, Gladden LB, Stary CM, Wagner PD, Hogan MC. Peripheral O₂ diffusion does not affect VO₂ on-kinetics in isolated in situ canine muscle. *J Appl Physiol.* 1998;85:1404-1412.
60. Bishop D. Warm up II: performance changes following active warm up and how to structure the warm up. *Sports Med.* 2003;33(7):483-498.
61. McCutcheon LJ, Geor RJ, Hinchcliff KW. Effects of prior exercise on muscle metabolism during sprint exercise in horses. *J Appl Physiol.* 1999;87(5):1914-1922.
62. Stewart IB, Sleivert GG. The effect of warm-up intensity on range of motion and anaerobic performance. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1998;27(2):154-161.
63. Gutin B, Stewart K, Lewis S. Oxygen Consumption in the First Stages of Strenuous Work as a Function of Prior Exercise. *Sports Med Phys Fitness.* 1976;16:60-65.
64. Gullich A, Schmidtbleicher D. MVC-induced short-term potentiation of explosive force. *New Stud Athletics.* 1996;11(4):67-81.
65. Young WB, Jenner A, Griffiths K. Acute enhancement of power performance from heavy load squats. *J Strength Cond Res.* 1998;12:82-84.
66. Allen DG, Lee JA, Westerblad H. Intracellular calcium and tension during fatigue in isolated single muscle fibres from *Xenopus laevis*. *J Physiol.* 1989;415:433-458.
67. Moore RL, Stull JT. Myosin light chain phosphorylation in fast and slow skeletal muscles in situ. *Am J Physiol.* 1984;247(5 Pt 1):C462-471.
68. Enoka RM, Duchateau J. Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *J Physiol.* 2008;586(1):11-23.
69. Sogaard K, Gandevia SC, Todd G, Petersen NT, Taylor JL. The effect of sustained low-intensity contractions on supraspinal fatigue in human elbow flexor muscles. *J Physiol.* 2006;573(Pt 2):511-523.
70. St Clair Gibson A, Baden DA, Lambert MI, Lambert EV, Harley YX, Hampson D, Russell VA, Noakes TD. The conscious perception of the sensation of fatigue. *Sports Med.* 2003;33(3):167-176.
71. Cook DB, O'Connor PJ, Lange G, Steffener J. Functional neuroimaging correlates of mental fatigue induced by cognition among chronic fatigue syndrome patients and controls. *Neuroimage.* 2007;36(1):108-122.
72. Marrées de H. *Sportphysiologie*. Köln-Mühlheim: Tropon Verlag; 1989.
73. Wilkie D. Human muscle fatigue: Physiological mechanisms. In: Porter R, Whelan, J., ed. *CIBA Foundation Symposium 82*. London; 1981.
74. Cairns SP, Knicker AJ, Thompson MW, Sjogaard G. Evaluation of models used to study neuromuscular fatigue. *Exerc Sport Sci Rev.* 2005;33(1):9-16.
75. Voellestad NK. Metabolic correlates of fatigue from different types of exercise in man. In: Gandevia S.C. ERM, McComas A.J., Stuart D.G., Thomas C.K., ed. *Fatigue. Neural and muscular mechanisms*. New York; 1995:185-194.
76. Kent-Braun JA. Central and peripheral contributions to muscle fatigue in humans during sustained maximal effort. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1999;80(1):57-63.
77. Gandevia SC, Allen GM, Butler JE, Taylor JL. Supraspinal factors in human muscle fatigue: evidence for suboptimal output from the motor cortex. *J Physiol.* 1996;490(Pt 2):529-536.
78. Babault N, Desbrosses K, Fabre MS, Michaut A, Pousson M. Neuromuscular fatigue development during maximal concentric and isometric knee extensions. *J Appl Physiol.* 2006;100(3):780-785.
79. Noakes TD, St Clair Gibson A. Logical limitations to the "catastrophe" models of fatigue during exercise in humans. *Br J Sports Med.* 2004;38(5):648-649.
80. Weir JP, Beck TW, Cramer JT, Housh TJ. Is fatigue all in your head? A critical review of the central governor model. *Br J Sports Med.* 2006;40(7):573-586; discussion 586.
81. Godwin MA, Schmidt, R.A. Muscular Fatigue and Discrete Motor Learning. *Research Quarterly of the American Association for Health, Physical Education, and Recreation.* 1971;42(4):374-382.
82. Carron AV. Physical fatigue and motor learning. *Res Q.* 1969;40(4):682-686.

83. Hahn A. Wechselbeziehung zwischen Ermüdungsprozessen und der Koordination von Teilbewegungen im Training und Wettkampf des Sportschwimmers. *Leistungssport*. 1992;22(3):38-40.
84. Pedersen J, Lonn J, Hellstrom F, Djupsjobacka M, Johansson H. Localized muscle fatigue decreases the acuity of the movement sense in the human shoulder. *Med Sci Sports Exerc*. 1999;31(7):1047-1052.
85. Schnabel G. Motorisches Lernen im Sport. In: Meinel K, Schnabel G, eds. *Bewegungslehre - Sportmotorik*. Berlin: Volk und Wissen; 1987:208-211.
86. Hebestreit C. Die Trainingseinheit. In: Harre D, ed. *Trainingslehre*. Berlin: Sportverlag; 1986:250-259.
87. Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med*. 1970;2(2):92-98.
88. Chen MJ, Fan X, Moe ST. Criterion-related validity of the Borg ratings of perceived exertion scale in healthy individuals: a meta-analysis. *J Sports Sci*. 2002;20(11):873-899.
89. Parizkova J. Particularities of lean body mass and fat development in growing boys as related to their motor activity. *Acta Paediatr Belg*. 1974;28 suppl:233-243.
90. Durnin JV, Womersley J. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *Br J Nutr*. 1974;32(1):77-97.
91. Schnabel A, Kindermann W. Assessment of anaerobic capacity in runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1983;52(1):42-46.
92. Belanger AY, McComas AJ. A comparison of contractile properties in human arm and leg muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1985;54(3):326-330.
93. Hunter JP, Marshall RN, McNair PJ. Interaction of step length and step rate during sprint running. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36(2):261-271.
94. Ae M, Ito A, Suzuki M. The men's 100 metres. *N. Stud. Athletics*. 1992;7(1):47.
95. Marzena P, Janusz I, Walaszczyk A. Stride length and stride frequency in three stages of preparation of high level sprinters. Paper presented at: Athens 2004: Pre-olympic Congress, 2004; Athens.
96. Hollmann W, Strüder HK, Tagarakis CVM, King G, Diehl J. Das Gehirn - der leistungsbegrenzende Faktor bei Ausdauerbelastungen? *Dtsch Z Spomed*. 2006;57(6):155.
97. Dick FW. Training at altitude in practice. *Int J Sports Med*. 1992;13 Suppl 1:S203-206.
98. Stegemann J, Ulmer HV, Heinrich KW. Die Beziehung zwischen Kraft und Kraftempfindung als Ursache für die Wahl energetisch ungünstiger Treffrequenzen beim Radsport. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie*. 1968;25:224-234.
99. Carnevale TJ, Gaesser GA. Effects of pedaling speed on the power-duration relationship for high-intensity exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23(2):242-246.
100. Gueli D, Shephard RJ. Pedal frequency in bicycle ergometry. *Can J Appl Sport Sci*. 1976;1:137-141.
101. Neumann G. Physiologische Grundlagen des Radsports. *Dtsch Z Spomed*. 2000;51(5):169-175.
102. Tropp H, Odenrick P. Postural control in single-limb stance. *J Orthop Res*. 1988;6(6):833-839.
103. Hebestreit H, Mimura K, Bar-Or O. Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: comparing boys and men. *J Appl Physiol*. 1993;74(6):2875-2880.
104. Ishizaki H, Pyykkö I, Aalto H, Starck J. Repeatability and effect of instruction of body sway. *Acta Otolaryngol*. 1991;Suppl. 481:598-592.
105. Levine D, Whittle M, Beach J, Ollard P. Test-retest reliability of Chattecx Balnce System in the patient with hemiplegia. *J Rehab Res Dev*. 1996;33:36-44.
106. Benvenuti F, Mecacci R, Gineprari I, Bandinelli S, Benvenuti E, Ferrucci L, Baroni A, Rabuffetti M. Kinematic characteristics of standing disequilibrium: reliability and validity of a posturographic protocol. *Arch Phys Med Rehabil*. 1999;80:278-287.
107. Hill K, Carroll S, Kalogeropoulos A, Schwarz J. Retest reliability of centre of pressure measures of standing balance in healthy older women. *Australian Journal on Ageing*. 1995;14:76-80.
108. Saltin B, Gagge AP, Stolwijk JA. Muscle temperature during submaximal exercise in man. *J Appl Physiol*. 1968;25(6):679-688.
109. Gray SR, De Vito G, Nimmo MA, Farina D, Ferguson RA. Skeletal muscle ATP turnover and muscle fiber conduction velocity are elevated at higher muscle temperatures during

- maximal power output development in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2006;290(2):R376-382.
110. Sargeant AJ. Effect of muscle temperature on leg extension force and short-term power output in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1987;56(6):693-698.
 111. Goodwin J. A comparison of massage and sub-maximal exercise as warm-up protocols combined with a stretch for vertical jump performance. *J Sports Sci.* 2002;20(1):48-49.
 112. Pacheco B. Improvement in jumping performance due to preliminary exercise. *Res Q Exerc Sport.* 1957;28:55-63.
 113. Ferguson RA, Ball D, Sargeant AJ. Effect of muscle temperature on rate of oxygen uptake during exercise in humans at different contraction frequencies. *J Exp Biol.* 2002;205(Pt 7):981-987.
 114. Ross S, Hussmann TA, Andrews TG. Effects of Fatigue and Anxiety on Certain Psychomotor and Visual Functions *The Journal of Applied Psychology.* 1954;38(2).
 115. Balsom PD, Seger JY, Sjodin B, Ekblom B. Maximal-intensity intermittent exercise: effect of recovery duration. *Int J Sports Med.* 1992;13(7):528-533.
 116. Glaister M. Multiple sprint work : physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Med.* 2005;35(9):757-777.
 117. Bishop D, Bonetti D, Dawson B. The effect of three different warm-up intensities on kayak ergometer performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(6):1026-1032.
 118. Karlsson J, Diamant B, Saltin B. Muscle metabolites during submaximal and maximal exercise in man. *Scand J Clin Lab Invest.* 1971;26:385-394.
 119. Sargeant AJ, Dolan P. Effect of prior exercise on maximal short-term power output in humans. *J Appl Physiol.* 1987;63(4):1475-1480.
 120. Dolan P, Sargeant AJ. Maximum short-term (anaerobic) power output following submaximal exercise. *Int J Sports Med.* 1984;Suppl. 5:133-134.
 121. Oliver N. Techniktraining unter konditioneller Belastung. *Schriftenreihe des Bundesinstituts für Sportwissenschaft.* 1996;83.
 122. Martin D. Ermüdung als Steuergrösse im Training. Eine theoretische Betrachtung des Phänomens und Untersuchungsergebnisse. *Sportwissenschaft.* 1987;17(4):378-393.
 123. Dawson B, Goodman C, Lawrence S, Preen D, Polglaze T, Fitzsimons M, Fournier P. Muscle phosphocreatine repletion following single and repeated short sprint efforts. *Scand J Med Sci Sports.* 1997;7(4):206-213.
 124. Harris C, Edwards RHT, Hultman E. The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflugers Arch.* 1976;367:137-142.
 125. Phillips WH. Influence of Fatigueing Warm-Up Exercises on Speed of Movement and Reaction Latency. *Research Quarterly for Exercise and Sport.* 1963;34(3):370-378.
 126. Ozyener F, Rossiter HB, Ward SA, Whipp BJ. Influence of exercise intensity on the on- and off-transient kinetics of pulmonary oxygen uptake in humans. *J Physiol.* 2001;533(Pt 3):891-902.
 127. Röcker K, Dickhuth HH. Laktatmessung - Standards der Sportmedizin. *Dtsch Z Spomed.* 2001;52(1):33-24.
 128. Mader A, Heck, H., Föhrenbach, R., Hollmann, W. Das statische und dynamische Verhalten des Lactats und des Säure-Basen-Status im Bereich niedriger bis maximaler Azidosen bei 400- und 800m Läufern bei beiden Geschlechtern nach Belastungsabbruch. *Dtsch Z Spomed.* 1979(7: 203, 8: 249).
 129. Badke G, Bittmann F, Böhmer D. *Lehrbuch der Sportmedizin.* 4 ed. Stuttgart: UTB; 1999.
 130. Hunter JP, Marshall RN, McNair PJ. Relationships between ground reaction force impulse and kinematics of sprint-running acceleration. *J Appl Biomech.* 2005;21(1):31-43.
 131. Hultman E, Sjöholm H, Jäderholm-Ek I, Krynicky J. Evaluation of methods for electrical stimulation of human skeletal muscle in situ. *Pflugers Arch.* 1983;398(2):139-141.
 132. Zafeiridis A, Saraslanidis P, Manou V, Ioakimidis P, Dipla K, Kellis S. The effects of resisted sled-pulling sprint training on acceleration and maximum speed performance. *J Sports Med Phys Fitness.* 2005;45(3):284-290.
 133. Giroid S, Calmels P, Maurin D, Milhau N, Chatard JC. Assisted and resisted sprint training in swimming. *J Strength Cond Res.* 2006;20(3):547-554.
 134. Mero A, Luhtanen P, Voitasalo J, Komi PV. Relationships between the maximal running velocity, muscle fiber characteristics, force production and force relaxation of sprinters. *Scand. J. Sports Sci.* 1981;3(16).
 135. Voss G, Witt M. Bewegungsgesteuerte neuromuskuläre Stimulation - BNS. *Leistungssport.* 1998(1/1998):43-47.

136. Szecsi J, Fornusek C, Krause P, Straube A. Low-frequency rectangular pulse is superior to middle frequency alternating current stimulation in cycling of people with spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil.* 2007;88(3):338-345.
137. Arsac LM, Locatelli E. Modeling the energetics of 100-m running by using speed curves of world champions. *J Appl Physiol.* 2002;92(5):1781-1788.

7 DANKSAGUNGEN

Ich möchte meinen Eltern danken, die meine schulische, universitäre und wissenschaftliche Ausbildung von Anfang an motivierend und liebevoll begleitet haben und gerade auch für diese Dissertation zu jedem Zeitpunkt einen moralischen und finanziellen Rückhalt boten. Weiter möchte ich mich bedanken bei meiner Freundin für viel Verständnis und Ihre Geduld sowie die uneingeschränkte liebevolle Unterstützung besonders in Zeiten, in denen Arbeit an der vorliegenden Dissertation die wenige Freizeit komplett vereinnahmte. Prof. Dr. Braumann und Prof. Dr. Rüdiger Reer danke ich für die wissenschaftliche Anleitung, Ausbildung und Begleitung der Arbeit sowie für die Vergabe des Themas. Meinem Co-Doktoranden Felix Raiser danke ich für sein Durchhaltevermögen und die vielen gemeinsamen späten Stunden. Meiner Großmutter danke ich für die großzügige finanzielle und aufmunternde Unterstützung, meinem Bruder für die motivierenden Worte und den notwendigen Druck zum richtigen Zeitpunkt. Ganz besonders bedanke ich mich bei den Probanden, ohne deren Einsatzwillen und Zeit die vorliegende Arbeit nicht hätte realisiert werden können. Schließlich bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Sportmedizin in Hamburg für die praktische Unterstützung bei der Umsetzung der Tests und bei vielen weiteren Freunden, die nicht alle namentlich genannt werden können, jedoch alle entscheidend zum Gelingen des Projektes Dissertation beigetragen haben.

8 LEBENS LAUF

T. Timothy Krauss

PERSÖNLICHE DATEN

Geboren am 17.06.1978 in Düsseldorf, ledig, Staatsangehörigkeit: Deutsch
 Vater: Thomas T. Krauss, Banker; Mutter: Heidemarie Krauss-Habel,
 Dolmetscherin; ein jüngerer Bruder

BERUFSERFAHRUNG

- Seit 08/2007 **Assistenzarzt**, Medizinische Klinik II, Kardiologie, Universitätsklinikum Schleswig
 Holstein, Campus Lübeck
- 11/05 – 10/06 **Praktisches Jahr**
- Chirurgie, Tygerberg Hospital, University of Stellenbosch, Südafrika
 - Orthopädie, Klinikum Neustadt
 - Innere Medizin, Elmhurst Hospital Center, New York, USA
- Sana Kliniken, Lübeck
 Medizinische Klinik II, Universitätsklinikum Lübeck

AUSBILDUNG

- 06/04 – 12/10 **Institut für Sport und Bewegungsmedizin, Universität Hamburg, Hamburg,**
Dissertation
- 10/99 – 10/06 **Universität zu Lübeck, Lübeck**
Studium der Humanmedizin
 Physikum September 2001,
 1. Staatsexamen September 2002,
 2. Staatsexamen März 2005,
 3. Staatsexamen Oktober 2006, Gesamtnote gut (2,0)
- 06/95 – 02/96 **Scotch College, Melbourne, Australia**
Auslandsaufenthalt
- 09/89 – 05/98 **Gymnasium Altkönigschule, Kronberg im Taunus**
Abitur im Juni 1998, Abiturnote: 1,6
- 09/85 – 08/89 **Grundschule Oberhöchstadt, Kronberg im Taunus**

VERÖFFENTLICHUNGEN

- Krauss TT et al.; Gender effects on novel time domain parameters of ventricular repolarization inhomogeneity; Pacing Clin Electrophysiol. 2009 Mar;32 Suppl 1:S167-72.
- Krauss T, Schunkert H; Management of hypertension (ESC Guideline 2007/DHL Guideline 2008); Herz. 2009 Feb;34(1):15-20.

- Barantke M, Krauss T, et al.; Effects of gender and aging on differential autonomic responses to orthostatic maneuvers; J Cardiovasc Electrophysiol. 2008 Dec;19(12):1296-303
- Krauss T, Raiser F, Ziegler M, Reer R, Braumann K-M; Der Foot-Tapping Test (FTT): Beeinflussbarkeit leistungsphysiologischer Parameter durch eine spezifische Vorbelastung; Kongressbeitrag, DGSP Köln 2007
- Raiser F, Krauss T, Ziegler M, Reer R, Braumann K-M; Der Foot-Tapping Test: Beeinflussbarkeit leistungsphysiologischer Parameter durch die Applikation einer Kniebandage; Kongressbeitrag, DGSP Köln 2007

9 EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Lübeck, den 15. Dezember 2010,

T. Timothy Krauss