

Physiologische Reaktionen auf Hochintensives Intervalltraining bei Nachwuchsleistungssportlern und erwachsenen Athleten

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Philosophie (Dr. phil.)
von der Fakultät für Geistes- und Sozialwissenschaften des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte Dissertation

Von: Dipl. Sportwiss. Florian Engel, geboren in Herdecke

Dekan: Prof. Dr. Andreas Böhn
Erster Gutachter: Prof. Dr. Klaus Bös
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Alexander Ferrauti
Tag der mündlichen Prüfung: 17.11.2014

Meiner Familie:

Jenny & Lili

Paul

Ella

Philipp

Leyla & Joshua

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während der Zeit als Promotionsstipendiat des Ernst Ludwig Ehrlich Studienwerkes e. V. (ELES) entstanden. ELES hat mir in dieser Zeit eine lange und intensive wissenschaftliche Beschäftigung mit der Leistungsphysiologie von Kindern und Jugendlichen im Zusammenhang mit Hochintensivem Intervalltraining ermöglicht. Damit hat ELES das Verfassen dieser Arbeit ermöglicht. Darüber hinaus durfte ich in dieser Zeit die ideelle Förderung und die Unterstützung von ELES genießen. Dafür bin ich sehr dankbar und ich wünsche mir, dass möglichst viele junge Studierende und Promovierende weiterhin von dieser einmaligen Unterstützung profitieren können! ELES – Jüdische Begabtenförderung - Eine Geschichte mit Zukunft!

Darüber hinaus gilt mein Dank vielen weiteren Personen die mich in dieser Zeit inhaltlich und emotional unterstütz haben, was ebenfalls unverzichtbar ist.

Ich danke meinen Betreuern. Prof. Dr. Alexander Ferrauti, der mein wissenschaftliches Interesse weckte und mir erstmals im Studium diesen Themenbereich aufzeigte und mir viele Anregungen lieferte. Prof Dr. Klaus Bös danke ich für die Möglichkeit am Forschungszentrum für den Schulsport und den Sport von Kindern und Jugendlichen (FoSS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zu promovieren und für die inhaltlichen Freiheiten die er mir gewährte. Darüber hinaus möchte ich dafür danken, dass er mir einen so tollen Betreuer in Gestalt von Dr. Sascha Härtel zur Seite stellte. Dr. Sascha Härtel danke ich von Herzen für den Einsatz, die Hilfsbereitschaft und die Unterstützung bei inhaltlichen Fragen rund um das Studiendesign, die Auswertung und bei der Veröffentlichung der Studien.

Prof. Dr. Billy Sperlich danke ich vielmals für die konstruktive und schnelle Hilfe bei der Veröffentlichung der Studien. Ohne dich wäre das nicht möglich gewesen!

Jun.-Prof. Dr. Matthias Wagner danke ich für die Beratungen in inhaltlichen und statistischen Fragen, den freundschaftlichen Rat und die Gespräche bei allen Fragen rund ums universitäre, vor, während und nach unseren Trainingseinheiten.

Das Realisieren der Studien wäre nicht ohne die aktive Unterstützung der Abteilung für Leistungsdiagnostik am Institut für Sport und Sportwissenschaft am KIT möglich gewesen. Ihr habt mir die sportmedizinische Ausrüstung und Expertise zur Verfügung gestellt und mich beraten und unterstützt! Mein Dank gilt hier insbesondere Dr. Rainer Neumann und Dr. Sascha Härtel.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen: Dr. Rainer Neumann, Lars Schlenker, Dr. Gerda Strutzenberger, Carolin Ingelmann, Carolin Braun, Dr. Anne Focke, Christian Kleppel, Dr. Sascha Härtel, Christian Stockinger, Claudia Karger und Sarah Baadte. Ihr habt die Zeit am Institut so angenehm gemacht und mich immer wieder motiviert.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei der Geschäftsführerin des FoSS Frau apl. Prof. Dr. Swantje Scharenberg die mich in meiner Zeit am FoSS stets unterstütze, immer wusste was zu tun war und immer ansprechbar war.

Mein Dank gilt auch den Studierenden Florian, Fatima und Andrea, die mir im Labor zur Seite standen.

Einen besonderen Dank richte ich an meine liebe Familie. Ich danke meinen Eltern die mich die ganze Zeit – von der Kindheit über das Studium bis heute – prägen und unterstützen. Meinem Bruder Philipp, mit dem ich stets sprechen und diskutieren konnte und der mich immer beraten konnte. Leyla und Joshua, es ist so schön bei euch anzukommen! Ich bin froh, dass es euch gibt. Der größte Dank gilt ebenfalls meiner Familie, Jenny und Lili, ihr seid das schönste Geschenk was ich mir vorstellen kann! Ich danke euch für eure Liebe und Unterstützung an jedem Tag und bin froh über jede Stunde die wir gemeinsam verbringen können. Ich bin stolz, dass wir das zusammen so gut geschafft haben!

Florian Azad Engel

Karlsruhe, Adar 5774

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Inhaltsverzeichnis	iii
1 Allgemeine Problemstellung	1
2 Aufbau der Arbeit, Untersuchungskonzept und allgemeine Untersuchungsmethoden	5
3 Hochintensives Intervalltraining	13
3.1 Trainingseffekte und Anpassungserscheinungen bei Kindern an Hochintensives Intervalltraining	16
3.2 Zelluläre und molekulare Anpassungserscheinungen an Hochintensives Intervalltraining	26
3.3 HIIT vs. HVT	35
3.4 Ermüdungsresistenz während Hochintensivem Intervalltraining bei Kindern und Erwachsenen.....	40
3.4.1 Physiologische, anatomische und psychologische Ursachen für Unterschiede in der Ermüdung zwischen Kindern und Erwachsenen während HIIT	44
3.4.2 Unmittelbare Regeneration.....	44
3.4.3 Ruhewerte	45
3.4.4 Peakwerte.....	45
3.4.5 Laktatbildung	45
3.4.6 Laktatelimination.....	47

3.4.7	Resynthese der energiereichen Substrate.....	49
3.4.8	Anatomische Unterschiede Kinder - Erwachsene.....	50
3.4.9	Muskelmasse.....	52
3.4.10	Sauerstoffkinetik.....	53
3.4.11	Motivation.....	54
3.5	Mittel- und langfristige Regeneration von Kindern.....	56
3.5.1	Regeneration der Muskulatur.....	56
3.5.2	Übertraining.....	58
3.6	Gesundheitliche Effekte von HIIT.....	63
4	Anaerobe Testverfahren.....	70
4.1	Wingate Anaerobic Test (WAnT).....	71
4.2	Force-Velocity Cycling Test.....	72
4.3	Quebec 10-Sekunden und 90-Sekunden Test.....	72
4.4	Margarita Step-Running Test.....	73
4.5	Vertical Jump—Sargent Test.....	74
4.6	Laufbandtests.....	74
5	Überblicksartikel: (Hoch-)intensives Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen im Nachwuchsleistungssport.....	79
5.1	Abstract.....	79
5.2	Einleitung.....	80
5.3	Methodik.....	81
5.4	Ergebnisse.....	83
5.5	Praktische Empfehlungen und Praxisbeispiele.....	99
5.6	Schlussfolgerung.....	100
6	Studie I: Hormonelle, metabolische und kardiorespirative Reaktionen von Nachwuchssportlern und erwachsenen Athleten auf eine hochintensive Intervallbelastung.....	102

6.1 Abstract.....	102
6.2 Einleitung	103
6.3 Methoden.....	106
6.4 Diskussion.....	114
6.5 Schlussfolgerungen	120
7 Studie II: Blutlaktatkinetik im Anschluss an einen 4x30-s Sprint und einen 1x30-s Sprint bei trainierten Kindern und Erwachsenen Athleten	121
7.1 Abstract.....	121
7.2 Einleitung	122
7.3 Methoden.....	124
7.4 Ergebnisse	132
7.5 Diskussion.....	137
7.6 Schlussfolgerungen	141
8 Zusammenfassende Schlussfolgerungen	143
8.1 Schlussfolgerungen und Konsequenzen für die Sportpraxis.....	148
8.2 Transferpotential von HIIT auf weitere Anwendungsfelder	152
9 Literaturverzeichnis.....	158
10 Eidesstattliche Erklärung	189
11 Curriculum Vitae	190
Veröffentlichungen	193

1 Allgemeine Problemstellung

Der Nachwuchssport in Deutschland, der Breitensport sowie der Leistungssport, sehen sich einer Vielzahl von Herausforderungen gegenüber: Zunehmend weisen Kinder und Jugendliche in Deutschland in der motorischen Leistungsfähigkeit eine negative Entwicklung auf und zeigen motorische Defizite (Bös, 2008). Dazu kommen Haltungsschwächen (Ludwig et al., 2003) und kardio-pulmonale Auffälligkeiten (Graf et al., 2006). Aus dieser Gesamtheit rekrutiert der Nachwuchsleistungssport seine Mitglieder, was nicht ohne Folgen bleibt, wie die flächendeckenden motorischen Tests und leistungsphysiologischen Analysen der Nachwuchsleistungssportler aus den deutschen Nachwuchskadern zeigen. Die deutschen Nachwuchsleistungssportler weisen im internationalen Vergleich in der Sprungkraft und der Ausdauerleistungsfähigkeit nur geringe Leistungen auf (Engelmeyer, 2012).

Ein Ansatz die dargestellten Probleme des Nachwuchssports zu lösen wäre einerseits die Verbesserung der motorischen Leistungsfähigkeit der Kinder und Jugendlichen in der Breite. Zum anderen müsste auf der leistungssportlichen Ebene ein schneller Wissenstransfer von wissenschaftlichen Erkenntnissen bezüglich des Kinder- und Jugendtrainings erfolgen. Wissenstransfer deswegen, um wissenschaftlich erarbeitete, erprobte und innovative Trainingsmethoden und Lösungsstrategien der beschriebenen Probleme zeitnah in der Praxisebene umzusetzen, um im Leistungssport international wettbewerbsfähig zu bleiben.

Anhand des Hochintensiven Intervalltrainings (HIIT) und dem Krafttraining im Breiten- sowie im Nachwuchsleistungssport, wird deutlich, dass der Wissenstransfer nicht zeitnah genug erfolgt. Das Hochintensive Training könnte wie Sperlich, de Marées, Koehler, Linville, Holmberg & Mester (2011) zeigen eine wichtige Leistungsreserve im Nachwuchsleistungssport darstellen da diese Trainingsmethode über ein gutes Verhältnis zwischen zeitlichem Aufwand und Nutzen, im Sinne von Leistungsverbesserungen, verfügt. Relevante Steigerun-

gen der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) von 7% bis 10% wurden nach Interventionen von Hochintensivem Intervalltraining bei Kindern erreicht (Sperlich et al., 2011; Sperlich, Zinner, Heilemann, Kjendlie, Holmberg & Mester, 2010; McMillan Helgerud, Macdonald & Hoff, 2005).

Das Krafttraining mit Kindern und Jugendlichen erwies sich ebenfalls als sehr effektiv, in Metaanalysen wurden Verbesserungen der Kraft von 30% bis 40% (Payne, Morrow, Johnson & Dalton, 1997) bzw. 13% bis 30% (Falk & Tennenbaum, 1996) beobachtet. Darüber hinaus könnte das Krafttraining eine Vorbereitung auf hohe Trainingsbelastungen im Übergang zum Hochleistungstraining, aber auch die Sicherung der Belastbarkeit und eine Verletzungsprophylaxe darstellen (Mester, vom Heede & Behringer 2009; Behringer, vom Heede & Mester, 2010).

Doch das Krafttraining mit Kindern und Jugendlichen war in der deutschsprachigen Literatur und in der Trainingspraxis lange verpönt. Erst allmählich erlebt es seine Rehabilitierung und findet den Weg in die Trainingspraxis, wie einige deutschsprachige Veröffentlichungen eindrucksvoll belegen (Granacher, Kriemler, Gollhofer & Zahner, 2009; Hartmann, Platen, Niessen, Mank, Marzin, Bartmus & Hawener, 2010; Behringer et al., 2010; Platen, 2010).

Doch von der Akzeptanz gegenüber dem Hochintensiven Intervalltraining sind wir in Deutschland noch ein Stück entfernt. In der deutschsprachigen trainingswissenschaftlichen Literatur, der anwenderbezogenen sowie in der wissenschaftlichen, werden Kinder als Spezialisten für aerobe Ausdauerbelastungen bezeichnet. Tenor ist, dass die aerobe Grundlagenausdauer bedenkenlos und gut trainiert werden kann, da sie von den Kindern gut toleriert wird (Weineck, 2007; Zintl & Eisenhut, 2013). In der trainingspraktischen Literatur und den Rahmentrainingsplänen verschiedener Sportarten spiegelt sich dieser Tenor deutlich wieder (Katzenbogner, 2010; Killing, 2010). Von anaerob-laktaziden Belastungen für Kinder, wie sie das Hochintensive Intervalltraining beinhaltet, wird in der Mehrheit der Quellen abgeraten. Als „unphysiologisch“ und „nicht kindgerecht“ wird diese Art des Ausdauertrainings mit Kindern nicht empfohlen (Weineck, 2007; Katzenbogner, 2010; Zintl & Eisenhut, 2013; Killing, 2010; Martin, 1999). Beobachten lässt sich hier, dass bei den angeführten aktuellen Auflagen deutschsprachiger Lehrbücher die aktuellen Erkenntnisse aus international publizierten Studien selten berücksichtigt werden und alte Studien nach

wie vor in den aktuellen Auflagen „erhalten“ bleiben. Zwei anschauliche Beispiele dafür sind finden sich in den Studien von Bohrmann, Pahlke & Peters (1981) und Lehmann (1980). Bohrmann et al. (1981) bescheinigen Kindern eine nur sehr eingeschränkte Fähigkeit das bei intensiven Belastungen gebildete Laktat nach Belastungsende wieder zu eliminieren. Nach Lehmann (1980) sei die anaerobe Glykolyse bei Kindern, aufgrund eines Mangels des an der anaeroben Glykolyse maßgeblich beteiligten Enzyms Phosphofruktokinase (PFK), stark eingeschränkt. Darüber hinaus wurden bei Kindern nach intensiven Belastungen stark erhöhte Katecholaminkonzentrationen gefunden, welche immunsuppressiv wirken könnten und einen Grund für die hohe „Drop-out-Quote“ in bestimmten Sportarten darstellen. Die Aussagen von Bohrmann et al. (1981) und Lehmann (1980) sind bis heute in relevanten Lehrbüchern vertreten und als Konsequenz wird dort von intensiven Ausdauerbelastungen im Sport mit Kindern und Jugendlichen abgeraten (Weineck, 2007; Martin, 1999; Zintl & Eisenhut, 2013).

Keine Berücksichtigung finden internationale Publikationen, sodass keine Diskussion um das intensive Ausdauertraining mit Kindern zustande kommt. Nur exemplarisch sollen hier einige Studien erwähnt werden die deutlich machen, dass das Thema Hochintensives Intervalltraining kritisch diskutiert werden sollte.

Beispielsweise besteht das selbstgewählte Spiel- und Bewegungsverhalten von Kindern aus kurzen und intervallartigen Zyklen mit hohen Intensitäten, welche partiell anaerob-laktazide Stoffwechselsituationen provozieren, lang andauernde Aktivitäten von aeroben Charakter wurden nur in geringem Umfang registriert (Baranowski, Hooks, Tsong, Cieslik & Nader, 1987; Bailey, Olson, Pepper, Porszasz, Barstow & Cooper, 1995). Bei intensiven Intervallbelastungen geben Kinder zwar geringere absolute und auch auf das Körpergewicht relativierte Leistung als Erwachsene ab, doch die Kinder ermüden langsamer im Verlauf der Intervalle und erholen sich nach Ende der Belastung schneller als die Erwachsenen (Ratel et al., 2002; Hebestreit et al., 1993; Zafeiridis et al., 2005). Darüber hinaus wurden bei Kindern nach intensiven und maximalen Belastungen geringere Laktatwerte als bei Erwachsenen gemessen (Ratel et al., 2002; Hebestreit et al., 1996; Buchheit et al., 2010; Falgairette et al., 1991). Die genauen Gründe für die verbesserte Erholung und die verringerten maximalen

Laktatwerte der Kinder können bisher nicht mit Sicherheit benannt werden und die Autoren betonen, dass bisher nur eine begrenzte Zahl von Studien existiert, in denen die möglichen physiologischen Mechanismen erörtert werden (Ratel et al., 2003; Ratel et al., 2006; Falk & Dotan, 2006). Gleiches gilt für die Stresshormonbelastung nach intensivem Training, hier reichen die Erkenntnisse nicht aus um abschließend urteilen zu können ob Kinder durch intensives Ausdauertraining zu hoch belastet werden (Benitez-Sillero et al., 2009; Capranica et al., 2012).

Natürlich müssen innovative Trainingsmethoden, besonders wenn es sich um Kinder und Jugendliche als Zielgruppe handelt, laufend kritisch und wissenschaftlich überprüft werden um die Trainingsmethoden stets an den neusten Forschungsstand anzupassen. Mögliche Überlastungsschäden können so vermieden und Leistungsverbesserungen optimiert werden.

So bleiben auch beim Hochintensiven Intervalltraining mit der Zielgruppe Kinder und Jugendliche eine Vielzahl Fragen offen. In der vorliegenden Arbeit geht es um dieses Anliegen, denn das Hochintensive Intervalltraining mit Kindern ist keinesfalls ausreichend behandelt, noch zu wenige Studien liegen vor um relevante Fragen beantworten zu können (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2003).

Ist das Hochintensive Intervalltraining überhaupt effektiv? Gibt es wissenschaftliche Studien zu Trainingseffekten des Hochintensiven Trainings? Ab welchem Alter kann ich Hochintensives Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen durchführen? Wie viele Einheiten Hochintensives Intervalltraining sollten pro Woche maximal absolviert werden? Ist das Hochintensive Intervalltraining nicht zu intensiv für Kinder und Jugendliche? Wie ist die metabolische und hormonelle Belastung von HIIT auf Kinder einzuschätzen? Wie lang benötigen Kinder um sich vom Hochintensiven Intervalltraining zu erholen?

Dies sollen nur einige exemplarische Fragestellung im Zusammenhang mit dem Hochintensiven Intervalltraining sein. Diese Fragestellungen werden in den Kapiteln 5 bis 7 zu Hypothesen verdichtet und mit Hilfe eines Übersichtsartikels (Kapitel 5) und zwei empirischen Studien (Kapitel 6 und 7) verifiziert bzw. falsifiziert.

2 Aufbau der Arbeit, Untersuchungskonzept und allgemeine Untersuchungsmethoden

Die vorliegende Arbeit weist folgende Strukturierung auf: In Kapitel eins wird die Problemstellung erläutert und die Forschungslücke aufgezeigt die im Bereich Hochintensives Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen besteht, was letztlich zum Erstellen der Arbeit führte. Im zweiten Kapitel werden Aufbau der Arbeit, das Untersuchungskonzept sowie die allgemeinen Untersuchungsmethoden erläutert. An dieses Kapitel schließt sich das Kapitel drei an, in dem die theoretischen Grundlagen des Hochintensiven Intervalltrainings sowie die Leistungsphysiologie von Kindern und Jugendlichen im Zusammenhang mit dem Hochintensiven Intervalltraining umfassend dargestellt werden. Besonders im Fokus stehen dabei die Unterschiede der Leistungsphysiologie zwischen Kindern und Erwachsenen und die möglichen physiologischen und biologischen Ursachen. In Kapitel vier werden die unterschiedlichen Testmethoden zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit behandelt sowie deren Reliabilität und Validität thematisiert. Im Zusammenhang mit der Leistungsphysiologie bei intensiven Belastungen werden zur Diagnose und oft auch zum Training in Interventionsstudien mit HIIT anaerobe Testverfahren eingesetzt. An die Theoretischen Grundlagen schließen sich die Kapitel fünf bis acht an. Diese Kapitel beinhalten einen Überblicksartikel und zwei selbst durchgeführte Studien. Der Überblicksartikel und die zwei einzelnen Studien sind als eigenständige Untersuchungen konzipiert und beinhalten jeweils eine spezielle Forschungsfrage. Diese drei Kapitel weisen eine besondere Stellung innerhalb der Arbeit auf, da es sich jeweils um eigenständige und in sich geschlossene Studien handelt. Diese Eigenständigkeit der drei Kapitel wird auch an der separaten Nummerierung der Tabellen und Abbildungen der Kapitel deutlich, die jeweils im Überblicksartikel und in jeder Studie von neuem Beginnen. Der Überblicksartikel und die zwei Studien werden parallel zur Arbeit separat in wissenschaftlichen Zeitschriften zur Veröffentlichung eingereicht. Aufgrund dessen weichen die Forma-

tierungen und Darstellungen in Tabellen und Abbildungen zwischen dem Überblicksartikel und den zwei Studien teilweise geringfügig voneinander ab. Da die Forschungsfragen und die angewendeten leistungsdiagnostischen Untersuchungsmethoden eng beieinander liegen kommt es in den Methodikteilen teilweise zu Überschneidungen, um die Eigenständigkeit und die Verständlichkeit Des Überblicksartikels und der einzelnen Studien zu gewährleisten.

Tab 1. Studien, Messmethoden und Parameter im Gesamtüberblick

Studie	Kapitel	Titel	Probanden	Testformen und Methoden	Parameter
Überblicksartikel	5	(Hoch)intensives Intervalltraining für Kinder und Jugendliche im Nachwuchsleistungssport	-	Übersichtsartikel, Literaturrecherche und –Auswertung	-
Studie I	6	Hormonelle, metabolische und kardiorespiratorische Reaktionen von Nachwuchsleistungssportlern und erwachsenen Athleten auf eine hochintensive Intervallbelastung	23 Jungen 25 Männer	4x30 s Sprint, 3 min aktive Pause, anschließend 27 Minuten passive Regeneration	Saliva Cortisol Blutlaktat Herzfrequenz O ₂ -Aufnahme Leistung Tanner-Stages
Studie II	7	Blutlaktatkinetik im Anschluss an einen 4x30-s Sprint und einen 1x30-s Sprint bei trainierten Kindern und Erwachsenen Athleten	21 Jungen 19 Männer	4x30 s Sprint, 3 min aktive Pause, anschließend 27 min passive Regeneration. 1x30 s Sprint, anschließend 30 min passive Regeneration.	Blutlaktat (Individuelle Blutlaktatwerte in biexponentielle Zeitfunktion gefittet) Herzfrequenz O ₂ -Aufnahme Leistung Tanner-Stages

WAnT—Wingate Anaerobic Test.

Überblicksartikel

Einen Überblick über das Hochintensive Intervalltraining als solches, die Anzahl von wissenschaftlich relevanten Studien, die Verbreitung und Anwendung im Sport mit Kindern und Jugendlichen sowie im Nachwuchsleistungssport gibt der erste Übersichtsartikel in der vorliegenden Arbeit (Kapitel 5). Mittels computerbasierter Literaturrecherche in den elektronischen Datenbanken PubMed, MEDLINE, SPORTDiscus und Web of Science wurde die Effektivität anhand der Trainingseffekte von (Hoch-)intensivem Intervalltraining (HIIT) im Nach-

wuchsleistungssport und bei untrainierten gesunden Kindern und Jugendlichen in der wissenschaftlichen Literatur eingeschätzt. Studien welche die Auswirkungen von HIIT-Interventionen auf die Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen (9-18 Jahre) anhand von Analysen der motorischen oder leistungsphysiologischen Kenngrößen der Probanden, vor und nach der Trainingsintervention, analysierten wurden berücksichtigt. Darüber hinaus werden die Informationen über Belastungsnormative des Hochintensiven Intervalltrainings, Vorschläge zu Belastungsprotokollen und zur Periodisierung von Hochintensivem Intervalltraining für den Nachwuchsleistungssport zusammengestellt.

Der Überblicksartikel „(Hoch-)intensives Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen im Nachwuchsleistungssport“ wurde am 15. April 2014 in der *Wiener Medizinischen Wochenschrift* veröffentlicht.

Engel, F., Sperlich, B. (2014). „(Hoch-)intensives Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen im Nachwuchsleistungssport. *Wiener Medizinische Wochenschrift*. 164(11-12):228-38. doi: 10.1007/s10354-014-0277-x.

An den Übersichtsartikel schließen sich die selbstständig durchgeführten und in sich geschlossenen empirischen Studien an, die zum jetzigen Zeitpunkt zur Veröffentlichung eingereicht sind und sich im Reviewprozess befinden.

Studie I

Die erste Studie analysiert die hormonelle Reaktion von trainierten Jungen auf Hochintensives Intervalltraining und Vergleicht diese mit der hormonellen Reaktion von Erwachsenen Sportlern auf HIIT. Die hormonelle Reaktion von Kindern auf typisches Hochintensives Intervalltraining ist bisher nicht dokumentiert. Keine Untersuchung beschreibt für die Zielgruppen Kinder und Jugendliche die Reaktion auf die typischen Belastungsmuster des Hochintensiven Intervalltrainings hinsichtlich kataboler Hormone um physischen Belastungen von einzelnen Trainingseinheiten des Hochintensiven Intervalltrainings quantifizieren zu können. In einem ersten Schritt soll diese Forschungslücke mit der Messung der Speichelcortisolkonzentration nach einer Einheit Hochintensivem Intervalltraining geschlossen werden. Die erste Fragestellung lautet:

- 1.) Wie wirkt sich Hochintensives Intervalltraining auf die Speichelcortisolkonzentrationen von trainierten 11-jährigen Jungen aus dem Nachwuchsleistungssport im Vergleich zu trainierten Männern aus? Da Kinder andere anthropometrische, biologische und physiologische Verhältnisse aufweisen als Erwachsenen lautete die Forschungshypothese für diese Studie: Eine einzelne Einheit Hochintensives Intervalltraining, bestehend aus vier aufeinanderfolgenden Wingate Anaerobic Tests (4x30 s), führt zu erhöhten Werten von Speicherlcortisol, Blutlaktat und Sauerstoffaufnahme bei trainierten Jungen und trainierten Männern. Aufgrund der unterschiedlichen anthropometrischen, biologischen und physiologischen Verhältnisse der Jungen im Vergleich zu den Erwachsenen fällt die hormonelle und physiologische Reaktion von trainierten Jungen geringer aus als die Reaktion der trainierten Männer.
- 2.) Zusätzlich werden weitere physiologische Parameter wie Blutlaktatkonzentration und Herzfrequenz erfasst um die Intensität der Belastung objektiv zu quantifizieren.

Die Studie I ist zum jetzigen Zeitpunkt im Journal *Pediatric Exercise Science* eingereicht und wurde am 16.05.2014 zur Veröffentlichung akzeptiert.

Engel, F., Härtel, S., Wagner, M., Strahler, J., Bös, K., Sperlich, B. (2014). Hormonal, metabolic and cardiorespiratory responses of young and adult athletes to a single session of high intensity cycle exercise. *Pediatric Exercise Science*. 26(4):485-94.

Studie II

Die maximalen Blut- und Muskellaktatwerte bei Kindern nach Hochintensivem Intervalltraining und einzelnen intensiven Belastungen sind geringer als die von Erwachsenen (Ratel et al., 2002; Hebestreit et al., 1996; Buchheit et al., 2010; Beneke et al., 2005). Die zugrunde liegenden Ursachen für die Unterschiede gehen auf eine Vielzahl von physiologischen und biologischen Faktoren zurück und reichen unter anderem von der Vermutung reduzierter anaerober Glykolyse

bei Kindern (Eriksson et al. 1971; Eriksson et al. 1974; Fournier et al. 1982; Gollnick et al. 1972) über den Einsatz von weniger Muskelmasse bei Kindern (Van Praagh, 2002; Falk & Dotan, 2006), zu einer schnelleren Regulierung der Sauerstoffaufnahme bei intensiven Intervallbelastungen (Ratel et al., 2002) bis zu einer schnelleren Elimination des Blutlaktats bei einzelnen intensiven Belastungen (Beneke et al., 2005). Die genauen Ursachen für die reduzierten Blutlaktatwerte sind nicht gänzlich geklärt (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2003). Falk & Dotan (2006) halten als Grund für die verringerten maximalen Laktatwerte eine schnellere Diffusion des Laktates aufgrund von kürzeren Diffusionsstrecken und geringerem Muskelfaserquerschnitt der Kinder für möglich. Eine einschlägige Studie zur Blutlaktatkinetik – die Geschwindigkeitskonstanten der Diffusion des Laktates vom Muskel in den Blutkreislauf und die Beseitigung des Laktates aus dem Blut – bei Hochintensiven Intervallbelastungen bei Kindern fehlt bisher. Die Studien zur Blutlaktatkinetik von Kindern und Erwachsenen während und nach einzelnen intensiven Belastungen sind bisher widersprüchlich (Dotan et al., 2003; Beneke et al., 2005), ebenso die Interpretation und Schlussfolgerungen der Ergebnisse dieser Studien (Falk & Dotan, 2006). Zu diesem Themenkomplex leitet sich die nächste Fragestellung der Arbeit ab:

- 1.) Wie verhält sich die Blutlaktatkinetik (Bildung und Elimination von Laktat) während und nach Hochintensivem Intervalltraining und bei einer intensiven Einzelbelastung bei trainierten Jungen und trainierten Erwachsenen? Die Geschwindigkeitskonstanten der Diffusion des Laktates vom Muskel in den Blutkreislauf und die Beseitigung des Laktates aus dem Blut werden zwischen trainierten Männern und trainierten Jungen verglichen. Die Fragestellung, ob die Blutlaktatkinetik eine Ursache für die niedrigeren Blutlaktatwerte bei Kindern während intensiven Belastungen sein kann, steht dabei im Zentrum. Die Forschungshypothese lautet daher: Die Blutlaktatkinetik (die Diffusion des Laktates vom Muskel in das Blut und die Elimination des Laktates aus dem Blut) ist bei einer Einheit Hochintensivem Intervalltraining (4x30 s) und bei einer intensiven Einzelbelastung bei trainierten Jungen schneller als bei trainierten Erwachsenen.

Die Studie II ist zum jetzigen Zeitpunkt im Journal *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism* eingereicht und befindet sich im Reviewprozess.

Engel, F., Sperlich, B., Stockinger, C., Härtel, S., Bös, K., Holmberg, HC. (2014). The kinetics of blood lactate during and following a single and repeated all-out sprints of cycling are more favorable in young than adult male athletes. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*. Im Reviewprozess.

Allgemeine Untersuchungsmethoden

Die geschilderten Fragestellungen werden in der vorliegenden Arbeit mithilfe von Messmethoden aus der physiologischen Leistungsdiagnostik empirisch bearbeitet um Lösungen zu finden. Das Ziel der Studienreihe ist die Leistungsphysiologie von Kindern während und nach Hochintensiver Belastungen zu analysieren und auf Basis dieser Erkenntnisse die Einsatzmöglichkeiten und Limitierungen des Hochintensiven Intervalltrainings, im Sinne eines Zeit- und Belastungsmanagements, für die Trainingspraxis mit Kindern im Nachwuchsleistungssport geben zu können.

Zur Überprüfung und Beantwortung der in Kapitel 2 formulierten Fragestellungen wurde ein Übersichtsartikel verfasst und zwei unterschiedliche und in sich geschlossene Studien durchgeführt.

In dem Übersichtsartikel wurde eine computerbasierte Literaturrecherche in den elektronischen Datenbanken PubMed, MEDLINE, SPORTDiscus und Web of Science durchgeführt um die Effektivität von (Hoch-)intensivem Intervalltraining (HIIT) im Nachwuchsleistungssport sowie bei untrainierten gesunden Kindern und Jugendlichen in der wissenschaftlichen Literatur einzuschätzen. Darüber hinaus wurden die angewendeten Belastungsmuster und Periodisierungen von HIIT-Protokollen für den Nachwuchsleistungssport ausführlich dargestellt und diskutiert.

Das grundsätzliche Prinzip in jeder der zwei Untersuchungen (Studien I & II) bestand darin, die zwei Probandengruppen „trainierte Jungen“ und „trainierte Männer“ miteinander zu vergleichen. Die trainierten Männer dienten in je-

der Studie jeweils als Kontrollgruppe. Die durchgeführten Studien werden in den Kapiteln 6 und 7 detailliert dargestellt und diskutiert.

In Studie I wurde die Belastung durch das katabole Stresshormon Cortisol nach einem typischen Hochintensiven Intervalltraining zwischen trainierten Jungen und trainierten Männern analysiert. Die Fragestellung dieser Studie war die Quantifizierung der hormonellen und physiologischen Belastung einer einzelnen Einheit des Hochintensiven Intervalltrainings bei trainierten Jungen und trainierten Erwachsenen. Beide Probandengruppen absolvierten dazu den 30-sekündigen Wingate Anaerobic Test (Inbar et al., 1996) viermal hintereinander. Als Baselinewert wurde die Cortisolkonzentration im Speichel vor Beginn des Wingate Anaerobic Test und 30 Minuten nach Beendigung des vierfachen Wingate Anaerobic Test gemessen (Siehe Kapitel 5).

In Studie II wurde die Diffusion von Laktat vom Muskel in den Blutkreislauf und die Beseitigung des Laktates aus dem Blut – die Blutlaktatkinetik –während und nach einem Hochintensiven Intervalltraining und während und nach einer einzelnen Hochintensiven Belastung bei trainierten Jungen und trainierten Männern analysiert. Dazu wurden die Geschwindigkeitskonstanten der Diffusion und der Elimination des Laktates bei den zwei intensiven Belastungen jeweils bei Jungen und bei Männern berechnet.

Intention dieser Studie war eine mögliche Ursache der verringerten Blutlaktatwerte von Kindern zu identifizieren. Als Hochintensives Intervalltraining wurde der 30-sekündige Wingate Anaerobic Test viermal hintereinander absolviert und als einzelne intensive Belastung wurde der Wingate Anaerobic Test einmal durchgeführt. Beide Belastungen wurden in randomisierter Reihenfolge durchgeführt und hatten einen Abstand von 48 Stunden zueinander. Die Laktatelimination wurde in beiden Tests während einer passiven Erholungsphase (Sitzen), bis 30 Minuten nach Ende der Belastungen erfasst. Die individuellen Blutlaktatkonzentrationen der Nachbelastungsphase wurden in folgende biexponentielle Zeitfunktion gefittet: $LA_{(t)} = LA_{(0)} + A_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + A_2(1 - e^{-\gamma_2 t})$ (Freund & Zouloumian, 1981). Die positiven Geschwindigkeitskonstanten γ_1 und γ_2 (1/min) der gefitteten exponentiellen Funktion geben Information über die Fähigkeiten des Organismus zum Austausch des Laktates zwischen der vorher aktiven Muskulatur und dem Blut, bzw. die Fähigkeit das Laktat aus dem Organismus

zu eliminieren (Freund & Zouloumian, 1981; Freund et al. 1986; Messonnier et al. 2006; Rimaud et al., 2010) (Siehe Kapitel 7).

Die einzelnen Studien sind als eigenständige Untersuchungen konzipiert und beinhalten jeweils eine spezielle Forschungsfrage. Der Überblicksartikel und die zwei Studien wurden gesondert in unterschiedlichen wissenschaftlichen (internationalen) Zeitschriften zur Veröffentlichung eingereicht, daher weichen die Formatierungen und Darstellungen in Tabellen und Abbildungen zwischen den einzelnen Studien geringfügig voneinander ab. Da die Forschungsfragen und die angewendeten leistungsdiagnostischen Untersuchungsmethoden eng beieinander liegen kommt es in den Methodikteilen teilweise zu Überschneidungen, um die Eigenständigkeit und die Verständlichkeit der einzelnen Studien zu gewährleisten.

3 Hochintensives Intervalltraining

Das Hochintensive Intervalltraining (HIIT) ist genau genommen keine neue Trainingsmethode, die intensive Intervallmethode und die Wiederholungsmethode sind zwei Trainingsmethoden in denen mit hohen Intensitäten gearbeitet wird und diese Trainingsmethoden sind in der trainingswissenschaftlichen Literatur lange bekannt und detailliert beschrieben (Harre, 1976). In den Ausdauersportarten Laufen, Schwimmen und Radfahren wird ebenfalls schon länger mit ähnlichen Trainingsmethoden gearbeitet, lediglich die Terminologie variiert zwischen den einzelnen Sportarten (Martin & Coe, 1992; Counsilman, 1977; Lindner, 1993).

Jedoch hat das HIIT in den letzten zehn Jahren ein sehr großes wissenschaftliches Interesse erfahren. Eine hohe Anzahl von wissenschaftlichen Studien, mit immer detaillierteren Fragestellungen wurde im Zusammenhang mit HIIT durchgeführt. Mittlerweile ist das HIIT relevant für die unterschiedlichsten Sportfelder wie beispielsweise den Rehabilitationssport (Wahl, Hägele, Zinner, Bloch & Mester, 2010b), den Freizeitsport und den Leistungssport für Kinder und Erwachsene (Sperlich et al., 2010; Laursen & Jenkins, 2002; Helgerud, Rodas, Kemi & Hoff, 2011; Wahl, Hägele, Zinner, Bloch & Mester, 2010a). Begründet ist die Aktualität von HIIT unter anderem im guten Verhältnis von zeitlichem Aufwand und dem Nutzen im Sinne von physiologischen Anpassungen und Verbesserungen der motorischen Leistungsfähigkeit (Gibala & McGee, 2008; Sperlich, et al., 2010; Ratel, 2011).

Charakteristisch für HIIT sind die wesentlich kürzere Dauer einer Trainingseinheit als beim traditionellen volumenorientierten Grundlagenausdauertraining (VOT) und natürlich die höheren Intensitäten. In HIIT-Protokollen wird im Intervallprinzip über eine Dauer von 10 Sekunden bis zu 5 Minuten pro Intervall bei Intensitäten oberhalb der anaeroben Schwelle, in etwa bei 90-100% der maximalen Sauerstoffaufnahme, Herzfrequenz oder Laufgeschwindigkeit gear-

beitet. Teilweise wird HIIT sogar mit supramaximaler Intensität (>100%) absolviert, sogenannte „all out“ Belastungen. Die Dauer der Pausen zwischen den Intervallen liegt zwischen 45 Sekunden und etwa 8 Minuten und die Pausen werden meistens aktiv mit niedrigen Intensitäten absolviert (Laursen & Jenkins, 2002). Anzahl und Dauer der Intervalle und die Pausendauer sind von der jeweiligen Zielgruppe abhängig (siehe Tabelle 2). Für untrainierte Probanden sind vier bis sechs Intervalle von 30 Sekunden Dauer mit aktiver Pause von drei bis vier Minuten oft zu finden (Gibala & Little, 2010; Richards et al., 2010; Burgomaster et al., 2008). Trainierte Probanden absolvieren häufig 15 bis 20 Intervalle von 15 Sekunden Dauer, unterbrochen von jeweils 15 Sekunden aktiver Pause (Helgerud et al., 2007). Etwas längere HIIT Trainingsprogramme für die Zielgruppe trainierte Probanden erstrecken sich von 10 bis 12 Intervallen über 30 Sekunden Dauer mit einer Pausendauer von 30 Sekunden bis etwa 4 Minuten (Sperlich et al., 2011) bis hin zu Intervallen über 4 Mal vier Minuten mit etwa drei Minuten Pause (McMillan et al., 2005; Helgerud et al., 2007).

Die Intention von HIIT lässt sich zusammenfassend damit beschreiben: Ziel ist ein wiederholtes Provozieren von starken Stresssituationen für die involvierten physiologischen Systeme, die von höherer Intensität sind als die durchschnittliche Intensität im Zielwettkampf (Laursen & Jenkins, 2002).

HIIT findet Anwendung im Nachwuchssport (Sperlich et al., 2010; Sperlich et al., 2011; Ratel, 2011; McMillan et al., 2005), bei freizeitsportlich aktiven Erwachsenen (Little et al., 2010; Burgomaster et al., 2006) und sogar im Gesundheits- und Rehabilitationssport mit Kindern (Corte de Araujo et al., 2012; Tjonna et al., 2009) und untrainierten Senioren (Wisloff et al., 2007; Amundsen et al., 2008).

Die Zeitspanne in der sich evidente Leistungsverbesserungen und Anpassungserscheinungen durch HIIT erzielen lassen ist ebenfalls kürzer im Vergleich zum klassischen Grundlagenausdauertraining (Gibala & McGee, 2008). In Interventionsstudien werden in durchschnittlich zwei bis neun Wochen zum einen zelluläre und molekulare Anpassungserscheinungen (Vergrößerung der Muskelglykogenspeicher, Verbesserung der Insulinsensitivität und Erhöhung der Aktivität oxidativer Enzyme) beobachtet und zum anderen signifikante Verbesserungen im aeroben Bereich (Verbesserung Sauerstoffaufnahme) als auch im anaeroben Bereich (Verbesserung der Sprint- und Sprungleistung) erzielt.

Jedoch gibt es bisher keine Langzeitstudien, welche Hinweise auf Nachhaltigkeit und Langzeiteffekte von HIIT geben (Sperlich, Hoppe & Hägele, 2013).

Das Argument der Zeitökonomie betonen die Befürworter von HIIT im Nachwuchsleistungssport. So kann die Zeitersparnis durch HIIT für die im Nachwuchssport wichtigen Trainingsinhalte Taktik, Technik und Koordination verwendet werden (Sperlich et al., 2010; Sperlich et al., 2011; Faude et al., 2008; Ratel, 2011).

Doch ist die Anzahl der Interventionsstudien mit Kindern und Jugendlichen im (leistungs)sportlichen Setting noch gering und bisher auf bestimmte Sportarten beschränkt (siehe Tab. 2).

Fazit: HIIT zeichnet sich durch kurze Belastungsdauer, hohe Intensitäten und den Intervallcharakter aus. Gegenüber dem klassischen umfangsorientierten Training weist HIIT ein gutes Verhältnis von zeitlichem Aufwand und Nutzen durch Trainingseffekte und Leistungsverbesserungen auf.

Typische Belastungsmuster im HIIT sind:

15 x 15 sec (90-95%) mit 15 sec Pause (70%)

4-6 x 30-60 sec (100-110%) mit 4 min aktiver Pause

4 x 4 min (90-95%) mit 3 min Pause (70%)

3.1 Trainingseffekte und Anpassungserscheinungen bei Kindern an Hochintensives Intervalltraining

Die Vorbehalte gegenüber Hochintensivem Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen waren lange Zeit groß. Begründet lag das unter anderem auch darin, dass man lange Zeit davon ausging Kinder wären anaerob gar nicht trainierbar. Die „Trigger-Hypothese“ von Katch (1983) wurde lange Zeit angeführt um von intensivem anaerob laktaziden Ausdauertraining mit Kindern abzuraten. Die „Trigger-Hypothese“ besagt, dass hormonbedingt erst ab einem bestimmten Zeitpunkt, in diesem Fall die Pubertät, das intensive Ausdauertraining zu Anpassungseffekten führt. Ein Training mit intensiver Ausdauer vor dem Zeitpunkt der Pubertät führe zu keinen oder nur zu geringen Leistungsverbesserungen (Katch, 1983). Gerade in deutschsprachigen Lehrbüchern sind die Vorbehalte gegenüber intensivem Ausdauertraining für Kinder bis heute groß und es wird eher niedrigintensives Ausdauertraining für Kinder empfohlen (Weineck, 2007; Zintl & Eisenhut, 2009). Die in Tabelle 2 dargestellten Interventionsstudien konnten jedoch zweifelsfrei Anpassungserscheinungen und Leistungsverbesserungen, und damit die Trainierbarkeit von untrainierten und bereits trainierten Kindern und Jugendlichen, nachweisen und leisten damit einen Beitrag zur Diskussion des HIIT.

Ein weiteres Argument für HIIT im Nachwuchsleistungssport ist die Tatsache, dass es bei gut bis sehr gut trainierten Athleten prinzipiell schwer ist weitere kardiorespirative Anpassungen durch niedrig intensives Grundlagenausdauertraining zu erzielen, um eine weitere Leistungsverbesserung zu bewirken. Um dennoch weitere Verbesserungen zu erzielen muss mit hohen und sehr hohen Intensitäten im Ausdauertraining gearbeitet werden (Laursen & Jenkins, 2002). Auch Swain & Franklin (2002) zeigten, dass gut trainierte Athleten mit höheren Intensitäten trainieren müssen als weniger gut trainierte um die maximale Sauerstoffaufnahme noch weiter zu verbessern. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass ab einem bestimmten Leistungsniveau ein gewisser Anteil an HIIT im Training notwendig ist um eine Stagnation der Leistung zu verhindern. Da im Nachwuchsleistungssport bei Jugendlichen teilweise eine hohe aerobe Leistungsfähigkeit vorliegt, bzw. gefordert ist (Engelmeyer, 2012) wäre die Berücksichtigung von HIIT sinnvoll. Doch Befragungen von Trainern und Athleten im

Leistungssport (Hewson & Hopkins, 1995) sowie Analysen der Trainingseinheiten über die Herzfrequenzen zeigten eine eher geringe Anwendung von Hochintensivem Training mit Erwachsenen (Esteve-Lanao, San Juan, Earnest, Foster & Lucia, 2005) und Jugendlichen (Seiler & Kjerland, 2006) in der leistungssportlichen Praxis.

Ein weiteres Argument für die partielle oder phasenweise Anwendung von HIIT ist, neben der Wirksamkeit, der Ökonomieaspekt. Im Nachwuchsleistungssport ist es schwer die Ansprüche von Schule, Freizeit und einem leistungsorientierten Training, welches alle motorischen Hauptbeanspruchungsformen und zusätzlich Technik und Taktik ausreichend berücksichtigt, zeitlich zu vereinbaren (Sperlich et al., 2010; Faude et al. 2008). Das HIIT könnte, gezielt als Ergänzung zum Grundlagenausdauertraining angewendet, bei dieser Zielgruppe die Leistungsreserven, die durch genannte Gründe schwer zu erschließen aber notwendig sind, mobilisieren. Die in Tabelle 2 aufgeführten Studien zeigen Interventionsstudien mit Hochintensivem Intervalltraining und der Probandengruppe Kinder und Jugendliche. Es wurden Studien mit jungen Probanden aus dem Freizeitsport und Nachwuchsleistungssport sowie Studien mit untrainierten Kindern und Jugendlichen mit einbezogen. Studien mit Kindern und Jugendlichen aus dem Bereich Prävention und Rehabilitation durch HIIT sind in Tabelle 2 bewusst nicht aufgeführt, da dieses Setting einen Bereich darstellt welcher im weiteren Verlauf dieser Arbeit kurz behandelt wird.

3.1 Trainingseffekte von HIIT

Tab 2. Literaturübersicht zu Interventionsstudien mit Hochintensivem Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen.

Autoren	Kontrollgruppe	Anzahl Probanden /Sportart/Alter [Jahre]	Initiale VO_{2max} [$ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ oder l/min^{-1}]	Intensität	Anzahl & Dauer Intervalle	Dauer & Intensität Erholung	Anzahl Einheiten [n]	Interventionsdauer	$VO_{2peak/max}$ posttest [$ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ oder l/min^{-1}]	Prozentuale Veränderung $VO_{2peak/max}$ [%]	HIIT Resultate
Baquet et al. (2002)	ja	53/untrainiert/10	43,9 ± 6,2	100-130% MAS	5-40 x 10-20 s	10 s, 20 s, 3 min, passiv	14 (à 30 min)	7 Wochen	↑ 47,5 ± 7,2	+ 8,2	↑ MS
			46,2 ± 8,5	Kein Training	-	-			↔ 45,3 ± 7,2	- 1,9	↔ VO_{2peak}
Breil et al. (2010)	ja	22/Ski-Alpin/17	53,0 ± 4,6	90-95% HF_{max}	4 x 4 min	3 min, aktiv	15	11 Tage	↑ 56,2 ± 5,1	+ 6,0	↑ PP ↑ VT
			52,9 ± 6,3	normales Training	-	-			↔ 54,4 ± 7,0	+ 2,8	↑ High Box Jump
Buchheit et al. (2009)	ja	32/Handball/15	-	95% V_{IFT}	12-24 x 15 s	15 s, passiv	20	10 Wochen	-	-	↔ CMJ ↔ 10m Sprint
			-	SSG	-	-	20	10 Wochen	-	-	↑ RSA ↑ V_{IFT}
Chamari et al. (2005)	nein	18/Fußball/14	65,3 ± 5,0	90-95% HF_{max}	4 x 4 min	3 min, 60-70% HF_{max} , aktiv	16	8 Wochen	↑ 70,7 ± 4,3	+ 8,3	↑ Hoff-Test (9,6%) ↑ RE (14%)
Delextrat et al. (2013)	ja	18/Basketball/16	k. A.	90% HF_{peak} V_{IFT}	8-13 x 15 s	15 s Jogging	12	6 Wochen	k. A.	-	↑ V_{IFT} ↔ RSA
			k. A.	2v2 SSG (90% HF_{peak})	2x(2-3 x 3-4 min)	passiv	12	6 Wochen	k. A.	-	↔ Defensivagilität ↑ Offensivagilität
Faude et al. (2008)	ja	10/Schwimmen/16	-	HIT: 30,8% oberhalb IAT	variabel	passiv & aktiv	24	4 Wochen	-	-	↑ IAT ↔ T_{100m} ↔ T_{400m}
			-	HVT: 23,3% oberhalb IAT	variabel	passiv & aktiv			-	-	↑ IAT ↔ T_{100m} ↔ T_{400m}
Helgerud et al.	nein	19/Fußball/18	58,1 ± 4,5	90-95% HF_{max}	4 x 4 min	3 min, 50-60%,	16	8 Wochen	↑ 64,3 ± 3,9	+ 10,7	↑ LT ↑ RE

3.1 Trainingseffekte von HIIT

(2001)						HF _{max} , aktiv						↑ Laufstrecke im Spiel
Impellizzeri et al. (2006)	nein	29/Fußball/17	55,6 ± 3,4	90-95% HF _{max}	4 x 4 min	3 min, 60-70% HF _{max}	16	8 Wochen	↑ 60,2 ± 3,9	+ 8,3		↑ LT ↑ RE ↑ Laufstrecke im Spiel
McManus et al. (1997)	ja	30/untrainiert/10	1,54 ± 0,2	Maximal	3-6 x 10 s 3-6 x 30 s	30 s, 90 s, passiv	23	8 Wochen	↑ 1,67 ± 0,2	+ 8,4		↑ PP ↔ MP
			1,30 ± 0,1	80-85% HF _{max}	DM	-			↑ 1,43 ± 0,2	+ 10,0		↑ PP ↔ MP
			1,49 ± 0,1	Kein Training	-	-			↔ 1,46 ± 0,1	+ 2,0		↔ PP ↔ MP
McManus et al. (2005)	ja	35/untrainierte Jungen/10	45,5 ± 3,4	All out	7 x 30 s	2:45 min, aktiv	24	8 Wochen	50,7 ± 3,7	+ 11,4		↑ VO _{2peak} ↑ Sauerstoffpuls
			47,0 ± 6,5	85% HF _{max} /75-85% VO _{2peak}	20 min DM	-	24	8 Wochen	50,7 ± 6,9	+ 7,9		↑ VO _{2peak} ↔ Sauerstoffpuls
			44,7 ± 6,5	Kein Training	-	-	-	8 Wochen	45,4 ± 6,4	+ 1,6		↔ VO _{2peak} ↔ Sauerstoffpuls
McMillan et al. (2005)	nein	11/Fußball/17	63,4 ± 5,6	90-95% HF _{max}	4 x 4 min	3 min, 70% HF _{max} , aktiv	20	10 Wochen	↑ 69,8 ± 6,6	+ 10,1		↑ SJ ↑ CMJ
Siegler et al. (2003)	ja	34/Fußball/16	-	100%	3-5 x 4-6 Sprints/Sprünge	k. A.	30	10 Wochen	-	-		↑ SRT ↑ T _{20 m} ↑ FFM ↓ FM
			-	VOT	k. A.	k. A.			-	-		↔ SRT ↔ T _{20 m}
Sperlich et al. (2010)	ja	26/Schwimmen/10	39,9 ± 9,1	92% PB	variabel	variabel	24	5 Wochen	↑ 44,5 ± 7,4	+ 11,5		↑ Lac _{max} ↑ LEN ↑ T _{2000 m} ↔ T _{100 m} ↔ VT
			39,4 ± 9,7	85% PB	variabel	variabel	24		↑ 43,1 ± 6,7	+ 9,4		↓ Lac _{max} ↔ LEN ↔ T _{2000 m} ↔ T _{100 m}

3.1 Trainingseffekte von HIIT

												↔ VT
Sperlich et al. (2011)	ja	19/Fußball/13	55,1 ± 4,9	90-95% HF _{max}	variabel (4-15 x 30 s - 4 min)	1-3 min, 50-60% HF _{max}	13	5 Wochen	↑ 58,9 ± 4,7*	+ 6,9	↔ DJ, SJ, CMJ	↑ T _{1000m} ↑ Sprint
			55,3 ± 4,3	50-70% HF _{max}	DM variabel (6-30 min)				↔ 56,4 ± 3,7			↔ T _{1000m} ↑ Sprint
Wahl et al. (2013)	nein	16/Triathlon/15	57,3 ± 8,5	90-95% HF _{max}	4 x 4 min	3 min, 60% HF _{max} , aktiv oder komplett passiv	15	2 Wochen	57,9 ± 8,6	+ 1,0	↔ VO _{2max} ↔ PP ↔ MP ↑ PPO ↑ Zeitfahrleistung	

↑—signifikante Verbesserung. ↓—signifikante Verschlechterung. ↔—keine signifikante Veränderung. k. A. – keine Angabe. VO_{2max}—Maximale Sauerstoffaufnahme. VO_{2peak}—höchste gemessene Sauerstoffaufnahme. V_{I_{FT}}—Geschwindigkeit der maximalen aeroben Kapazität (ermittelt im Intermittent Fitness Test). SSG—Small-Sided Game (Spiel auf Kleinfeld). 2v2—zwei gegen zwei. RSA—Repeated Sprint Ability (6x20 m Sprinttest). MAS—Maximal aerobe Geschwindigkeit (2,4 x Laufgeschwindigkeit in der letzten Stufe des Shuttle Run Test). MS—Laufgeschwindigkeit in der letzten Stufe des Shuttle Run Test. HF—Herzfrequenz. SRT—Shuttle Run Test. VT—Ventilatorische Schwelle. LT—Laktatschwelle. RE—Laufökonomie. PB—Persönliche Bestzeit. LEN—Punktesystem zur Beurteilung der Schwimmleistung, orientiert am aktuellen Weltrekord. PP—Peak Power im Wingate Anaerobic Test. MP—Mean Power im Wingate Anaerobic Test. PPO—Peak Power Output im Radergometer-Stufentest. DM—Dauermethode. SJ—Squat Jump. CMJ—Counter Movement Jump. DJ—Drop Jump. MB5—Multiple 5 Bounds Test. RRJ15—Wiederholter Rebound Jump für 15 Sekunden. Lac_{max}—Maximale Laktatbildungsrate. IAT—Individuelle anaerobe Schwelle. T₂₀₀₀—Benötigte Zeit über 2000 m. T₄₀₀—Benötigte Zeit über 400 m. T₁₀₀—Benötigte Zeit über 100 m. T₂₀—Benötigte Zeit über 20 m. P_{max}—Peak Power im Force Velocity Test. VOT—Volumenorientiertes Training (Training mit hohem Umfang und geringer Intensität).

Die Autoren der in Tabelle 2 aufgeführten Studien betonen, dass die Trainingsmethode HIIT in relativ kurzer Zeit zu signifikanten Leistungsverbesserungen bei den Kindern und Jugendlichen führt. Die Dauer der Interventionen variiert zwischen 11 Tagen und 10 Wochen. Insgesamt konnte in der Literaturrecherche keine Mittel- oder Langzeitstudie zum HIIT gefunden werden, die maximale Studiendauer betrug 10 Wochen, sodass es sich bei den geschilderten Anpassungserscheinungen um kurz- und mittelfristige Effekte handelt. Studien zu Langzeitwirkungen von HIIT sind bisher nicht veröffentlicht (Sperlich, Hoppe & Hägele, 2013).

Die Mehrzahl der Studien aus Tabelle 2 ist so gestaltet, dass die Teilnehmer zwei bis drei HIIT Einheiten pro Woche, entweder zusätzlich zum normalen Training oder ausschließlich ohne weiteres Training, absolvierten. Wobei die HIIT Studien von Breil et al. (2010) und Wahl et al. (2013), im Unterschied zu den anderen Studien, so konzipiert sind, dass ein konzentrierter Block von 15 HIIT-Trainingseinheiten in nur 11 bzw. 12 Tagen stattfand. Die Reizdichte der hochintensiven Trainingseinheiten war bei Breil et al. (2010) und Wahl et al. (2013) also deutlich höher als bei den anderen Studien. Die Probanden trainierten drei Mal drei Tage lang ausschließlich HIIT-Trainingseinheiten, gefolgt von je einem Ruhetag. Die signifikanten Verbesserungen der Leistungsfähigkeit bei den jugendlichen Probanden betragen unter anderem +6 % bei der relativen VO_{2max} , +5,5% für den Peak Power Output im Stufentest auf dem Radergometer und eine um 10,8% verbesserte Fähigkeit hohe Laktatwerte zu bilden (Breil et al., 2010).

Die wesentlichste Veränderung nach dem Training in der Mehrzahl der in Tabelle 2 dargestellten Studien war eine signifikante Verbesserung der absoluten bzw. relativen VO_{2max} bzw. der VO_{2peak} von durchschnittlich 7,9% (Range: 1,0% - 11,5%). Die VO_{2max} wird als Bruttokriterium der Ausdauerleistungsfähigkeit angesehen (Astrand & Rodahl, 1986) und wirkt sich in Ausdauersportarten (Weineck, 2007) sowie in Spielsportarten (Helgerud et al., 2001; Hoff et al., 2004), aber auch im Schwimmsport (Sperlich et al., 2010) positiv auf die sport-spezifische Leistungsfähigkeit aus.

In der Studie von Sperlich et al. (2010) absolvierten in einem Crossover Studiendesign 26 junge Schwimmer und Schwimmerinnen ($10,5 \pm 1,4$ Jahre) ein 5-wöchiges Hochintensives Intervalltraining bzw. ein volumenorientiertes Training

(VOT) bei niedriger Intensität. Die VO_{2peak} erhöhte sich jeweils in beiden Gruppen (HIIT: +10,2%; VOT: +8,5%) und in Abhängigkeit der verbesserten VO_{2peak} verbesserte sich auch die Schwimmleistungen über 100 m (HIIT: 2,2%; VOT: 2,0%) und 2000 m (HIIT: 2,8%; VOT: 1,8%) in beiden Gruppen. Die LEN Punkte, (internationales Punktesystem, orientiert am jeweiligen Weltrekord, zur Beurteilung der Schwimmleistung) verbesserte sich in beiden Gruppen (HIIT: 14,8%; VOT: 5,8%). Bemerkenswert ist die große Verbesserung der maximalen Laktatbildungsrate nach dem HIIT um 20,1% und die große Verschlechterung der maximalen Laktatbildungsrate nach dem VOT um 30,1%. Eine hohe maximale Laktatbildungsrate stellt einen Hinweis auf eine gute anaerobe Glykolyse dar, was prinzipiell ein Vorteil bei anaerob laktaziden Belastungen darstellt (Heck & Schulz, 2002). Sperlich et al. (2010) führen als Argument für ein Hochintensives Intervalltraining im Nachwuchsleistungssport an, dass die Verbesserungen in den Schwimmzeiten über 100 m und 2000 m zwar mit beiden Trainingsmethoden gleich war, doch in der HIIT Gruppe wurden die Verbesserungen durch eine kürzere Trainingsdauer erreicht. So betrug die durchschnittliche Dauer einer kompletten Trainingseinheit in der HIIT Gruppe 60 Minuten und in der VOT Gruppe 90 Minuten (Sperlich et al., 2010).

Die überwiegende Zahl der Studien in Tabelle 2 wurde im Fußball durchgeführt. Auch im Fußball wurde das HIIT erfolgreich als Trainingsintervention zusätzlich zum normalen Training durchgeführt. Wie schon zuvor mit den jungen Schwimmerinnen und Schwimmern basiert die nächste Interventionsstudie von Sperlich et al. (2011) auf der Analyse des Unterschiedes zwischen den Trainingsmethoden HIIT und VOT, diesmal jedoch bei 14-jährigen Fußballspielern. Auch in dieser Studie zeigten die Probanden, trotz der wesentlich geringeren Trainingszeit nach fünf Wochen mit HIIT eine um 7% gestiegene VO_{2max} . Mit dem HVT konnte keine Veränderung der VO_{2max} erzielt werden. Eine Verbesserung der Laufzeit über 1000 Meter wurde für die HIIT Gruppe erreicht sowie eine verbesserte Sprintleistung in beiden Trainingsgruppen. Die Sprungleistung veränderten sich in keiner der beiden Gruppen (Sperlich et al., 2011). In Kapitel 3.4 werden HIIT und das volumenorientierte Training bei unterschiedlichen Zielgruppen ausführlich verglichen.

Die dargestellten Ergebnisse untermauern zum einen die These, dass sich bei Athleten die VO_{2max} nur durch intensive Belastungen verbessern lässt, und zum

anderen, dass keine Verschlechterungen der Sprint- und Sprungleistungen aufgrund von zusätzlichem HIIT zu befürchten sind.

Die Befürchtung von Trainern (und Spielern) aus Spielsportarten, dass sich ein zusätzliches Ausdauertraining negativ auf die sportartspezifische Sprint- und Sprungleistung und somit auf die Gesamtleistung im Wettbewerb auswirkt wurde bereits geäußert (Meyer, 2006; Föhrenbach, Frick, Göbel, Nagel, Stutz, Schmidbleicher & Böhmer, 1991). Diese Problematik untersuchte ein deutsches Autorenkollektiv bereits 1991 (Föhrenbach et al., 1991). Die Autoren führten mit Landesliga Fußballern über sechs Wochen parallelisiert ein zusätzliches Training durch, entweder aerobes Dauerlauftraining oder Schnellkeitsausdauertraining. In den Posttests fand man keine Unterschiede hinsichtlich der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit zwischen den zwei Gruppen, jedoch ergaben die Sprint- und Sprungkraftwerte tendenziell Verschlechterungen gegenüber dem Eingangstest für die Gruppe die mit dem aeroben Dauerlauf trainierte. Daraufhin schlussfolgerten die Autoren, dass ein zusätzliches Schnellkeitsausdauertraining im Fußball keinesfalls überflüssig ist, ein stark aerob und niedrigintensiv orientiertes Ausdauertraining jedoch kann fußballspezifisch kontraproduktiv wirken.

Eine Verschlechterung der im Fußball und anderen Spielsportarten wichtigen Laufschnelligkeit und Sprungkraft ist durch zusätzliches HIIT nicht zu erwarten, wie aufwendige Studien belegen. Helgerud et al. (2001) zeigte, dass sich die Leistungsverbesserungen durch das zusätzliche HIIT (u. a. Zunahme der VO_{2max}) mit norwegischen Fußballprofis positiv auf die komplexe Leistung im Fußballwettbewerb auswirkte. Per Videoanalyse wies das Autorenkollektiv nach, dass die Fußballprofis nach der Interventionsphase mit HIIT im Spiel signifikant mehr Laufstrecke (+20%), mehr Ballbesitz, eine höhere Anzahl von Sprints (+100%) und Pässen aufwiesen als vor der Trainingsphase mit HIIT. Diese Effekte konnten auch in HIIT Interventionsstudien mit jungen Fußballspielern nachgewiesen werden. Nach einer achtwöchigen Interventionsphase mit HIIT in dem Belastungsschema 4 x 4 Minuten bei 90-95% der HF_{max} zeigten die jungen Fußballspieler eine bessere Leistung im fußballspezifischen Ausdauerstest (Ekblom Circuit) (Balsom, 1994) und eine größere zurückgelegte Distanz im Fußballwettbewerb.

Die in Tabelle 2 dargestellten Studien erfassen in den Pre- und Posttests jeweils neben den aeroben Leistungsparametern auch anaerobe Parameter wie Sprint- und Sprungleistung, Peak Power und Mean Power im Wingate Anaerobic Test. In den Ergebnissen lassen sich keine Verschlechterungen der genannten anaeroben Parameter durch HIIT in den Posttests gegenüber den Eingangstest feststellen. Zu erwarten ist, dass im Kinder- und Jugendtraining keine negativen Einflüsse von HIIT auf die anaeroben Leistungen wie Schnelligkeit, Sprungkraft sowie Peak Power und Mean Power zu erwarten sind und somit keine negativen Einflüsse auf die sportartspezifische Leistungsfähigkeit eintreten.

Einer der Gründe für die bisher relativ geringe Anwendung und Verbreitung von HIIT im Nachwuchssport kann nach wie vor in der negativen Interpretation der Trigger Hypothese (Katch, 1983) vermutet werden. Darüber hinaus könnte es eine Rolle spielen, dass bisher wenige deutschsprachige Publikationen über das HIIT existieren und daher die Belastungsprotokolle noch relativ unbekannt sind. Mester et al. (2009) vermuten, dass ein veraltetes Trainingswissen und daraus resultierende falsche Auffassungen der leistungsphysiologie von Kindern eine weitere Ursache sein kann. Darüber hinaus geben Mester et al. (2009) zu bedenken, dass die Qualität und Quantität deutschsprachiger Publikationen zum Thema HIIT weit hinter den englischsprachigen Publikationen zurückbleibt. Zusätzlich kritisieren die Autoren, dass neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu Trainingsmethoden und Leistungsphysiologie im Kinder- und Jugendtraining zu langsam den Weg in deutschsprachige Lehrbücher, Lehrpläne und Rahmentrainingspläne finden (Mester et al., 2009).

Den Auswirkungen von HIIT auf die Zielgruppe untrainierte Kinder wurden bisher nur wenige Studien gewidmet. Doch auch mit untrainierten Kindern wurden Leistungsverbesserungen im aeroben und anaeroben Bereich nach HIIT-Interventionen beobachtet (Baquet et al., 2002; McManus et al., 1997). Bemerkenswert ist das junge Alter der Probanden beider Studien (10 Jahre) und die Tatsache dass die hochintensiven Trainingseinheiten von den Probanden jeweils gut toleriert wurden.

Es bleibt anzumerken das Interventionsstudien mit HIIT für Kinder und Jugendliche bisher auf wenige Sportarten beschränkt sind (Fußball, Handball, Basketball, Schwimmen, Ski-Alpin und Triathlon). Eine Ausweitung der HIIT-

Interventionsstudien auf weitere Sportarten in denen die aerobe und anaerobe Ausdauer relevant ist wie die Laufdisziplinen der Leichtathletik, Rudern, Radsport, Skilanglauf und Eisschnelllauf wäre sinnvoll um die Wirkung von HIIT auf die sportartspezifische Leistung genauer analysieren zu können.

Fazit: Bei trainierten und untrainierten Kindern konnten nach Trainingsphasen mit HIIT von vier bis 10 Wochen Dauer Leistungsverbesserungen dokumentiert werden. Selbst bei gut trainierten Kindern und Jugendlichen erzielte das HIIT eine Steigerung der VO_{2max}/VO_{2peak} von durchschnittlich 7,9% (Range: 1,0% - 11,5%). Parallel erfolgt keine Verschlechterung von anaeroben Leistungsparametern und der sportartspezifischen Leistung durch HIIT. Der zeitliche Umfang der einzelnen Trainingseinheiten mit HIIT ist dabei um ca. 30% geringer als das klassische umfangsorientierte Training. Jedoch ist die Anzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum HIIT im Kinder- und Jugendtraining bisher noch relativ gering. Gleiches gilt für die Anwendung und Verbreitung vom HIIT.

3.2 Zelluläre und molekulare Anpassungserscheinungen an Hochintensives Intervalltraining

Neben den Verbesserungen der motorischen Leistungsfähigkeit als Folge des HIIT gibt es noch die Anpassungserscheinungen als Reaktion auf HIIT auf zellulärer und molekularer Ebene. Darunter fallen beispielsweise die Insulinsensitivität von Muskeln und Leber, die oxidative Kapazität, der Glykogengehalt und die Pufferkapazität der Skelettmuskulatur. Aktuelle Studien zeigten, dass mit Hochintensivem Intervalltraining in kurzer Zeit viele zelluläre Anpassungserscheinungen, die gleichwertig zu den Anpassungen mit traditionellem Ausdauertraining sind, erreicht wurden. Infolge dessen betonen die Autoren, dass es sich bei HIIT, auch in Bezug auf die zellulären Anpassungserscheinungen, um eine sehr zeiteffiziente Trainingsmethode im Verhältnis zu den Anpassungen handelt (Gibala et al., 2006; Burgomaster et al., 2005, 2006, 2007, 2008; Rakobowchuk et al., 2008; Babraj et al., 2009, siehe Tabelle 3).

Eine der ersten Forschungsgruppen die systematisch die zellulären Anpassungserscheinungen der beiden Trainingsmethoden Hochintensives Intervalltraining und traditionelles volumenorientiertes Ausdauertraining mit niedrigen Intensitäten (VOT) untersuchten waren Gibala und Mitarbeiter (2006). Die Wissenschaftler trainierten eine Gruppe von sportlich aktiven Männern über 14 Tage mit HIIT und eine zweite Gruppe mit VOT. Die gemessenen Parameter ergaben jeweils signifikante Zunahmen nach den beiden Trainingsphasen, doch keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Die Muskelbiopsien des vastus lateralis nach dem 14-tägigen Training zeigten keine Unterschiede in der oxidativen Kapazität (Aktivität des Enzyms Cytochrom-c-Oxidase) zwischen den beiden Gruppen. Darüber hinaus unterschieden sich die durch das Training induzierte Pufferkapazität und der Glykogengehalt des Muskels in beiden Gruppen ebenfalls nicht. Jedoch betrug die Netto Trainingszeit der HIIT-Gruppe lediglich ~2,5 Stunden, wohingegen sich die Trainingsdauer der VOT-Gruppe auf ~10,5 Stunden belief. Dieser Unterschied in der Trainingsdauer macht das HIIT zu einem sehr effizienten Trainingsmittel um schnelle Anpassungserscheinungen im Muskel zu erreichen, welche gleichwertig zu den Anpassungen nach klassischem Ausdauertraining sind (Gibala et al., 2006).

Tab 3. Literaturübersicht zu molekularen und zellulären Anpassungserscheinungen nach Interventionsstudien mit Hochintensivem Intervalltraining mit Erwachsenen.

Autoren	Kontrollgruppe	Anzahl Probanden /Sportart/Alter [Jahre]	Initiale $\dot{V}O_{2max}$ [$ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ oder l/min]	Intensität	Anzahl & Dauer Intervalle	Dauer & Intensität Erholung	Anzahl Einheiten [n]	Interventionsdauer	$\dot{V}O_{2max}$ nach HIIT [$ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ oder l/min]	Resultate
Babraj et al. (2009)	ja	16/untrainiert/21	48 ± 9	100%	4-6 x 30 s	4 min/30 W	6	2 Wochen	k. A.	↑ Insulinsensitivität ↑ Zeitfahrleistung
		9/untrainiert/23	47 ± 11	Kein Training	-	-	-	2 Wochen	k. A.	↔ Zeitfahrleistung ↔ Insulinsensitivität
Burgomaster et al. (2005)	ja	8/sportl. aktiv/22	44,6 ± 3,2	100%	4-7 x 30 s	4 min/30 W	6	2 Wochen	k. A.	↑ Ausdauerleistung ↑ PP ↔ $\dot{V}O_{2peak}$ ↑ CS ↑ Muskelglykogen
		8/sportl. aktiv/25	46,4 ± 1,4	Kein Training	-	-	-	2 Wochen	k. A.	↔ Ausdauerleistung ↔ PP ↔ $\dot{V}O_{2peak}$ ↔ CS ↑ Muskelglykogen
Burgomaster et al. (2006)	ja	8/sportl. aktiv/21	3,8 ± 0,2	100%	4-7 x 30 s	4 min/30 W	6	2 Wochen	3,70 ± 0,2	↑ Muskelglykogen ↑ CS ↑ β-HAD ↓ La-Akkumulation ↓ Glykogenabbau ↑ Pyruvatoxidation ↑ Zeitfahrleistung ↑ PP, MP
		8/sportl. aktiv/25	3,9 ± 0,2	Kein Training	-	-	0	2 Wochen	k. A.	Keine Veränderungen
Burgomaster et al. (2007)		8/sportl. aktiv/22	50 ± 2	100%	4-6 x 30 s	4 min/30 W	18	6 Wochen	k. A.	↑ Zeitfahrleistung ↑ Oxidative Leistungsfähigkeit Muskel
		8/sportl. aktiv/26	k. A.	Kein Training	-	-	-	6 Wochen	k. A.	↔ Zeitfahrleistung ↔ Oxidative Leistungsfähigkeit Muskel

3.2 Zelluläre und molekulare Anpassungen an HIIT

Bur-gomaster et al. (2008)	ja	10/sportl. Aktiv/24	41 ± 2	100%	4-6 x 30 s	4,5 min/30 W	18	6 Wochen	44 ± 2	↑ VO _{2peak} ↑ PP ↓ RQ ↑ CS ↑ β-HAD ↑ Muskelglykogen ↓ Glykogenabbau
		10/sportl. Aktiv/23	41 ± 2	65% VO _{2peak}	40-60 min DM	-	30	6 Wochen	45 ± 2	↑ VO _{2peak} ↑ PP ↓ RQ ↑ CS ↑ β-HAD ↑ Muskelglykogen ↓ Glykogenabbau
Gibala et al. (2006)	ja	8/sportl. Aktiv/22	4,1 ± 0,2	100%	4-6 x 30 s	4 min/30 W	6	14 Tage	-	↑ Zeitfahrleistung ↑ Oxidative Leistungsfähigkeit Muskel ↑ Pufferkapazität Muskel ↑ Muskelglykogen
		8/sportl. Aktiv/21	4,0 ± 0,3	65% VO _{2peak}	90-120 min DM	-	6	14 Tage	-	↑ Zeitfahrleistung ↑ Oxidative Leistungsfähigkeit Muskel ↑ Pufferkapazität Muskel ↑ Muskelglykogen
Rakobow-chuk et al. (2008)	ja	10/nicht aktiv/23	41 ± 2	100%	4-6 x 30 s	4,5 min/30 W	18	6 Wochen	44 ± 2	↑ PP ↑ HF während Belastung ↑ Periphäre Gefäßstrukturen & -Funktion
		10/nicht aktiv/23	41 ± 2	65% VO _{2peak}	40-60 min DM	-	30	6 Wochen	45 ± 2	↑ PP ↑ HF während Belastung ↑ Periphäre Gefäßstrukturen & -Funktion
Richards et al. (2010)	ja	12/nicht aktiv/29	32,7 ± 2,1	100%	4-7 x 30 s	4 min/30 W	6	2 Wochen	k. A.	↑ Insulinsensitivität
		9/nicht aktiv/24	38,0 ± 3,9	100%	4 x 30 s	4 min/30 W	1	2 Wochen	k. A.	↔ Insulinsensitivität
		10/nicht aktiv/23	35,1 ± 3,0	Kein Training	-	-	0	2 Wochen	k. A.	↔ Insulinsensitivität

↑—signifikante Verbesserung. ↓—signifikante Verschlechterung. ↔—keine signifikante Veränderung. CS—Citrat-Synthase. β -HAD—3-hydroxyacyl CoA dehydrogenase. RQ—Respiratorischer Quotient. DM—Dauermethode. PP—Peak Power im Wingate Anaerobic Test. MP—Mean Power im Wingate Anaerobic Test. HF—Herzfrequenz. RQ—Respiratorischer Quotient. VO_{2peak} —Höchste gemessene Sauerstoffaufnahme. La—Laktat.

Ein weiterer Parameter der molekularen Anpassung auf Training ist die Insulinsensitivität. Die Insulinsensitivität beschreibt die Empfindlichkeit eines Gewebes, wie beispielsweise Muskeln, Leber oder Fettgewebe, gegenüber dem Hormon Insulin. Je höher die Insulinsensitivität des Gewebes ist, desto weniger Insulin benötigt der Organismus um eine entsprechende Wirkung zu erzielen. Eine hohe Insulinsensitivität ist ein wichtiger Faktor in der Adipositas- und Diabetesprophylaxe (van Baak, 2001). Durch regelmäßiges sportliches Training verbessert sich die Insulinsensitivität des menschlichen Körpers (Mikines, Sonne, Farrell, Tronier & Galbo, 1989). Bereits eine 14tägige HIIT-Intervention (sechs Trainingseinheiten HIIT) konnte die Insulinsensitivität bei Erwachsenen signifikant steigern (Richards, Johnson, Kuzma, Lonac, Schweder, Voyles & Bell, 2010). Die Autoren vermuten die verbesserte Insulinsensitivität aufgrund von Anpassungen im Skelettmuskel, da anthropometrische Ursachen als Gründe ausschieden. In Anbetracht der kurzen Zeitdauer der Intervention und der einzelnen Trainingseinheiten im Verhältnis zu den erreichten Anpassungen befinden die Autoren HIIT als sehr lohnenswerte Trainingsmethode (Richards et al., 2010).

Auch die oxidative Kapazität der Skelettmuskulatur, welche eine Ökonomisierung des aeroben Stoffwechsels bewirkt, konnte innerhalb einer 6-wöchigen Intervention, mit 3 Trainingseinheiten pro Woche, gesteigert werden (Burgomaster, Cermak, Phillips, Benton, Bonen & Gibala, 2007). Schon nach einer Woche Training erhöhte sich die oxidative Kapazität des vastus lateralis um 35% und blieb bis sechs Wochen nach Ende der Trainingsphase über dem Ausgangsniveau. Auch hier verweisen die Autoren auf das günstige Verhältnis von zeitlichem Aufwand und zellulären Anpassungserscheinungen (Burgomaster et al., 2007).

Die vorangehend dargestellten Studien untersuchten lediglich einzelne Marker der oxidativen Kapazität der Muskulatur in Ruhebedingungen (Muskelbiopsie unter Ruhebedingungen) im Anschluss an HIIT- und/oder VOT-Trainingsinterventionen und konnten damit nur einen begrenzten Einblick in die Anpassungserscheinungen nach HIIT- und/oder VOT-Trainingsphasen leisten. Aufgrund dessen untersuchte dasselbe Autorenkollektiv (Burgomaster, Howarth, Phillips, Rakobowchuk, MacDonald, McGee & Gibala, 2008) Veränderungen im Anteil des Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsels während einer aeroben

Belastung ($\sim 65\% \text{VO}_{2\text{peak}}$), im Anschluss einer parallelisierten 6-wöchigen Intervention mit HIIT beziehungsweise VOT. Ziel der Studie war Aufschluss über den Einfluss von HIIT- und VOT-Trainingsphasen auf die Energiebereitstellung während körperlicher Belastungen bei Männern und Frauen zu erhalten. Darüber hinaus wurde die Skelettmuskulatur auf die Aktivität und den Gehalt bestimmter Enzyme und Proteine analysiert welche die oxidative Kapazität des Muskels beeinflussen. Die Studie war so konzipiert, dass alle Probanden vor Beginn der jeweiligen 6-wöchigen Trainingsintervention einen Eingangstest absolvierten (60 Minuten auf dem Fahrradergometer, Intensität: $\sim 65\% \text{VO}_{2\text{peak}}$). Unmittelbar vor und nach dem Eingangstest wurden jeweils Muskelbiopsien aus dem vastus lateralis entnommen um den Muskelglykogengehalt und die Menge und Aktivität der oxidativen Enzyme zu bestimmen. Darüber hinaus wurden während dem Eingangstest mittels Spirometrie die Atemgase analysiert um den Anteil des Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsels an der Energiebereitstellung auf Basis der „metabolic chart“ (Peronnet & Massicotte, 1991) während der Belastung zu bestimmen. In den 6 Wochen nach dem Eingangstest erfolgte die Trainingsintervention mit HIIT bzw. VOT und dann erneut die 60 Minuten auf dem Fahrradergometer bei $\sim 65\%$ der $\text{VO}_{2\text{peak}}$. Die Probanden aus der HIIT-Gruppe trainierten über 6 Wochen auf dem Fahrradergometer lediglich 3 Mal pro Woche 3-6 Intervalle von 30 Sekunden Dauer mit maximaler Intensität. Im Gegensatz dazu trainierte die VOT-Gruppe, ebenfalls auf dem Fahrradergometer, 5 Trainingseinheiten pro Woche zwischen 40 und 60 Minuten Dauer mit der Dauer- und einer Intensität von $\sim 65\%$ der $\text{VO}_{2\text{peak}}$. Der Trainingsumfang in der HIIT-Gruppe war um 90% geringer als der Trainingsumfang der VOT-Gruppe (HIIT-Gruppe: ca. 225 kJ pro Woche; Trainingsdauer: $\sim 1,5$ Stunden pro Woche; VOT-Gruppe: ca. 2250 kJ pro Woche; Trainingsdauer: $\sim 4,5$ Stunden pro Woche). Die Ergebnisse aus der Studie von Burgomaster et al. (2008) zeigen deutlich, dass die molekularen und zellulären Anpassungserscheinungen der ausgewählten Parameter des Muskelstoffwechsels (Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel) nach den Trainingsinterventionen mit HIIT bzw. VOT gleichwertige Steigerungen in beiden Trainingsgruppen aufwiesen. So war der Muskelglykogengehalt des vastus lateralis unmittelbar nach dem Ausgangstest in beiden Trainingsgruppen im Vergleich zum Eingangstest erhöht. Die Vergrößerung des Muskelglykogengehaltes hat eine verbesserte Ausdauerleistungsfä-

higkeit zur Folge und wurde bisher nur nach klassischem Ausdauertraining beobachtet (Gollnick, Armstrong, Saltin, Saubert, Sembrowich & Shepherd, 1973; Saltin, Nazar, Costill, Stein, Jansson, Essén & Gollnick, 1976). Neben dem Muskelglykogengehalt war die maximale Aktivität der Enzyme im Skelettmuskel Citrat-Synthase (CS: Befindet sich in den Mitochondrien und katalysiert den aeroben Stoffwechsel) und 3-hydroxyacyl CoA dehydrogenase (β -HAD: Katalysiert die zweite Oxidationsreaktion beim Fettsäureabbau) sowie die Proteinmenge des Enzyms Pyruvat-Dehydrogenase (PDH) nach den Interventionen in den beiden Gruppen erhöht, ohne signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. Die dargestellten Ergebnisse der Muskelbiopsien lassen eindeutig auf verbesserte Voraussetzungen für den aeroben Stoffwechsel schließen. Die Ergebnisse der Atemgasanalysen während des 60-minütigen Eingangs- und Ausgangstest ergaben eine reduzierte respiratorische Austauschrate im Ausgangstest gegenüber dem Eingangstest, ohne signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Die reduzierte respiratorische Austauschrate in beiden Gruppen ist ein eindeutiger Hinweis auf einen erhöhten Anteil der Energiebereitstellung über Fettsäuren und im Umkehrschluss zeigt sie einen verringerten Anteil an Kohlenhydraten an der Energiebereitstellung an, was auf eine verbesserte aerobe Kapazität hinweist. Die Autoren schlussfolgern aus der Studie, dass die beobachteten Anpassungserscheinungen in den ausgewählten Parametern, welche den Energie- und Muskelstoffwechsel in Ruhe und unter Belastung repräsentieren nach 6 Wochen HIIT mit den Anpassungen nach dem VOT vergleichbar sind. Der Vorteil des HIIT liegt den Autoren zufolge in dem reduzierten Trainingsumfang und der damit einhergehenden geringeren Zeitdauer des Trainings.

Neben der kurzen Dauer der einzelnen Trainingseinheit konnten Anpassungen an HIIT bereits kurze Zeit nach dem Trainingsbeginn nachgewiesen werden. Schon nach sechs Trainingseinheiten HIIT innerhalb von zwei Wochen wurde bei sportlich aktiven jungen Männern eine Verbesserung der oxidativen Kapazität der Skelettmuskulatur konstatiert (Burgomaster et al., 2006). Mittels Muskelbiopsie wurde analysiert, dass die Rate des muskulären Glykogenabbaus und die Laktatakkumulation innerhalb der Muskelzelle nach der zweiwöchigen HIIT Trainingsphase gegenüber dem Ausgangstest verringert und die Pyruvatoxida-

tion erhöht waren, was auf eine verbesserte oxidative Kapazität der Probanden hinweist (Burgomaster et al., 2006).

Leider sind bisher keine vergleichenden Studien zu zellulären Anpassungserscheinungen von HIIT und VOT mit der Probandengruppe Kinder und Jugendliche existent. Dies liegt zum einen daran, dass dieses Thema erst seit relativ kurzer Zeit in der Wissenschaft und der Sportpraxis relevant ist, hauptsächlich aber an den vorwiegend invasiven Analysemethoden, wie beispielsweise der Muskelbiopsie, mit denen zelluläre Veränderungen sichtbar gemacht werden. Aus forschungsethischer Sicht sind solche invasive Prozeduren mit jungen Kindern in Anbetracht der zu erwartenden Ergebnisse und dem Erkenntnisgewinn kaum vertretbar (Van Praagh, 2007). Alternative und nicht invasive Methoden wie zum Beispiel die Magnetresonanztomographie können hier gute Alternativen darstellen, um beispielsweise die Menge der glykolytischen oder oxidativen Enzyme sowohl in Ruhebedingungen, als auch während und nach Belastungen nicht invasiv zu messen (Cooper & Barstow, 1996; Van Praagh, 2007). Doch auch über die Spiroergometrie und die respiratorische Austauschrate oder den respiratorischen Quotienten könnte der Anteil an aerober und anaerober Energiebereitstellung bei Kindern nach HIIT- und VOT-Interventionen problemlos und nicht invasiv ermittelt werden, so wie es Burgomaster et al. (2008) in ihrer Studie bei erwachsenen Probanden demonstrierten.

Fazit: Auch auf molekularer und zellulärer Ebene gibt es lohnenswerte Anpassungserscheinungen nach Interventionen mit HIIT. Beispielsweise erhöhen sich der Glykogengehalt und die oxidativen Enzyme der Skelettmuskulatur und der Energiestoffwechsel ist während Ausdauerbelastungen in der Lage vermehrt Fettsäuren zu oxidieren. Die Anpassungen nach HIIT sind gleichwertig mit den Anpassungserscheinungen nach klassischem moderatem Ausdauertraining (~65% der VO_{2peak}), der Vorteil des HIIT ist die wesentlich kürzere Zeitdauer der jeweiligen Trainingseinheit und ein geringeres Trainingsvolumen (bis zu 90% kürzere Trainingszeit bei HIIT (Burgomaster et al., 2008)). Studien zu den

geschilderten Anpassungserscheinungen mit Kindern und Jugendlichen existieren bisher leider nicht, würden aber Aufschluss darüber geben ob Kindern dieselben molekularen und zellulären Anpassungserscheinungen nach HIIT-Interventionen wie erwachsene Probanden zeigen.

3.3 HIIT vs. HVT

Die Frage nach dem Vergleich der Effektivität der beiden Trainingsmethoden Hochintensives Intervalltraining gegenüber dem Volumenorientierten Training (VOT) wird in den meisten Interventionsstudien mit HIIT, und auch in der vorliegenden Arbeit, immer wieder thematisiert. Wahrscheinlich aufgrund des hohen Aufwandes wird nur in wenigen Interventionsstudien die mit HIIT arbeiten in der Kontrollgruppe das VOT durchgeführt. Durch die Integration beider Trainingsmethoden in einer Studie können Unterschiede und Gemeinsamkeiten sowie Vor- und Nachteile beider Trainingsmethoden gut sichtbar gemacht werden. Wichtige Voraussetzung für eine objektive Vergleichbarkeit der beiden Trainingsprotokolle ist allerdings, dass beide Trainingsprotokolle mit dem gleichen Gesamtenergieumsatz absolviert werden. Eine Voraussetzung die in allen Studien der Tabelle 4 gewährleistet ist. Bei der Analyse des zeitlichen Aufwandes und dem Trainingseffekt der Studien in Tabelle 4 weisen die HIIT Interventionen durchschnittlich eine größere Verbesserung der VO_{2max} (HIIT: 24,7% \pm 13,1 Steigerung von Pre zu Post; VOT: 13,5% \pm 2,9 Steigerung von Pre zu Post) und einen geringeren Zeitaufwand pro Trainingseinheit auf (HIIT: 35,2 \pm 4 Minuten; VOT: 41,2 \pm 7 Minuten).

Tab 4. Chronologische Literaturübersicht zu Interventionsstudien mit Hochintensivem Intervalltraining und Volumenorientierten Training mit gleichem Kalorienverbrauch in verschiedenen Probandengruppen (modifiziert nach Wahl et al., 2010, S. 628 ff.).

Autoren	Anzahl Probanden /Sportart bzw. Krankheitsbild/Alter [Jahre]	Intensität	Anzahl & Dauer Intervalle	Dauer & Intensität Erholung	Energieverbrauch	Dauer Trainingseinheit	Einheiten [n]	Interventionsdauer	VO _{2max} pre [ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ oder l/min]	VO _{2max} post [ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ oder l/min]	Prozentuale Veränderung VO _{2max} [%]	Resultate
Tjonna et al. (2008)	12/Metabolisches Syndrom/55	90% HF _{max}	4 x 4 min	3 min, 70% HF _{max}	gleich	40 min	48	16 Wochen	33,6 ± 2,5	45,3 ± 3,3	+35	↑ Endothelfunktion ↑ Insulinsensitivität ↓ Risikofaktoren ↑ SR Ca ²⁺ Aufnahme ↓ LDL ↓ HDL
	10/Metabolisches Syndrom /52	70% HF _{max}	47 min DM	-		47 min			36,0 ± 3,2	41,6 ± 3,6	+16	↑ Endothelfunktion ↔ Insulinsensitivität ↔ Risikofaktoren ↔ SR Ca ²⁺ Aufnahme ↔ LDL ↔ HDL
Wisloff et al. (2007)	9/KHK/76	90% HF _{peak}	4 x 4 min	3 min, 50-70% HF _{max}	gleich	38 min	36	12 Wochen	13,0 ± 1,6	19,0 ± 2,1	+46	↑ SV ↑ EF ↑ mitochondriale Funktion
	9/KHK/74	70-75% HF _{peak}	47 min DM	-		47 min			13,0 ± 1,1	14,9 ± 0,9	+14	↔ SV ↔ EF ↔ mitochondriale Funktion
Edge et al. (2006)	8/aktiv/20	120-140% LT	6-10 x 2 min	1 min	gleich	27-30 min	15	5 Wochen	43	50	+14	↑ LT ↑ T _{lim} ↑ PK
	8/aktiv/19	80-95% LT	DM	-		27-30 min			42	47	+13	↑ LT ↑ T _{lim} ↔ BC
O'Donovan et al.	13/inaktiv/41	80% VO _{2max}	DM (400 kcal)	-	gleich	k. A.	72	24 Wochen	31,8 ± 6,0	38,9 ± 8,1	+22	↓ LDL ↓ Cholesterol

3.3 HIIT vs. HVT

(2005)	14/inaktiv/41	60% VO _{2max}		-		k. A.			31,0 ± 5,7	35,8 ± 6,3	+15	↔ LDL ↔ Cholesterol
Amundsen et al. (2004)	8/KHK/63	80-90% VO _{2max}	4 x 4 min	3 min, 50- 60% VO _{2max}	gleich	35 min	k. A.	10 Wo- chen	32	37	+17	↑ LV diastolische Deh- nungsgeschwindigkeit
	9/KHK/61	50-60% VO _{2max}	41 min DM	-		41 min	k. A.		31	35	+8	↔ LV diastolische Deh- nungsgeschwindigkeit
Rognmo et al. (2004)	8/KHK/63	80-90% VO _{2max}	4 x 4 min	3 min, 50- 60% VO _{2max}	gleich	33 min	30	10 Wo- chen	31,8 ± 9,3	37,8 ± 12,4	+17,9	-
	8/KHK/61	50-60% VO _{2max}	41 min DM	-		41 min			32,1 ± 5,3	34,8 ± 5,7	+7,9	
Eddy et al. (1977)	7/aktiv/20	100% VO _{2max}	1 min	1 min, pas- siv	gleich	k. A.	28	7 Wo- chen	41 ± 5	47 ± 5	+14	↑ LT ↓ HF ↑ Leistung
	7/aktiv/21	70% VO _{2max}	DM	-		k. A.			42 ± 5	48 ± 6	+15	↑ LT ↓ HF ↑ Leistung

↑—signifikante Verbesserung. ↓—signifikante Verschlechterung. ↔—keine signifikante Veränderung. DM—Dauermethode. HF—Herzfrequenz. VO_{2peak}—Höchste gemessene Sauerstoffaufnahme. VO_{2max}—Maximale Sauerstoffaufnahme. HF_{max}—Maximale Herzfrequenz. HF_{peak}—Höchste gemessene Herzfrequenz. KHK—Stabile Koronare Herzkrankheit. LV—Linksventrikulär. LDL—Low Density Lipoprotein. T_{lim}—Zeit bis zur Erschöpfung auf dem Laufband bei 90% der Herzfrequenzreserve. LT—Laktatthreshold. HF—Herzfrequenz. PK—Pufferkapazität des Skelettmuskels. SV—Schlagvolumen. EF—Endothelfunktion.

Es zeigt sich, dass die Intensität der Belastung und nicht die Dauer ausschlaggebend für Anpassungserscheinungen in der aeroben Leistungsfähigkeit ist (Skinner, 2001). Die beobachteten Vorteile des geringeren Zeitaufwandes und der größeren Steigerung der VO_{2max} sind in den Bereichen Leistungs- und Freizeitsport sowie in der Prävention und Rehabilitation durch Sport relevant. Neben der Steigerung der VO_{2max} zeigen sich bei den Studien aus Tabelle 4 auch zelluläre Anpassungserscheinungen des Energiestoffwechsels wie die Verbesserung der Insulinsensitivität (Tjonna et al., 2008) und der mitochondrialen Funktion (Wisloff et al., 2007). Darüber hinaus zeigte das HIIT eine positivere Wirkung auf die Risikofaktoren und das gesamte Krankheitsbild bei der koronaren Herzkrankheit und dem Metabolischen Syndrom (Wisloff et al., 2007; Tjonna et al., 2008; Amundsen, Rognmo, Hatlen-Rebhan & Slørdahl, 2004; O'Donovan et al., 2005; Rognmo, Hetland, Helgerud, Hoff & Slørdahl, 2004). Die Toleranz gegenüber hohen Intensitäten ist sogar in den Studien welche mit Patienten im fortgeschrittenen Alter und klinisch pathologischen Krankheitsbildern arbeiten gegeben (Amundsen et al., 2004; Rognmo et al., 2004). In den Bereichen Prävention und Rehabilitation wird oft mit niedrigen Intensitäten gearbeitet um eine Überlastung und eventuelle daraus resultierende Schäden zu vermeiden (Swain & Franklin, 2002; Wahl et al., 2010). Darüber hinaus weisen Wahl et al. (2010) darauf hin, dass im Bereich der Prävention und Rehabilitation, trotz der dargestellten positiven Effekte, in diesem Bereich eine kritische Überprüfung der Praktikabilität und Durchführbarkeit vor der Anwendung von HIIT-Protokollen erfolgen sollte.

Kritisch Anzumerken ist allerdings, dass das VOT in den Studien aus Tabelle 4 mit relativ geringen Intensitäten absolviert wurde (z.B. 70% HF_{peak} , bzw. 50-60% VO_{2max}). Die teilweise sehr niedrigen Belastungsintensitäten könnten die nur geringen Effekte verursacht haben. Der Bereich des aeroben Grundlagenausdauertrainings ist etwa bei 70-85% der VO_{2max} definiert (Engelhardt & Neumann, 1994).

Allerdings konnten trotz intensiver Literaturrecherche keine vergleichenden Studien, HIIT vs. VOT, identifiziert werden, die dem Setting (Nachwuchs-)Leistungssport zugeordnet werden konnten. Hier wäre ein Vergleich der Trainingseffekte der beiden Trainingsmethoden HIIT und VOT bei gleichem Gesam-

tenergieumsatz natürlich sehr interessant. Erste Hinweise auf den Vorteil der Trainingsmethode HIIT liefern die beiden Studien von Sperlich et al. (2010; 2011) (*Kapitel 3.1 Trainingseffekte und Anpassungserscheinungen bei Kindern an Hochintensives Intervalltraining; Tabelle 2*). Allerdings wurde in diesen zwei Studien nicht darauf geachtet, dass die beiden Trainingsmethoden mit dem gleichen Gesamtenergieumsatz absolviert wurden.

Fazit: Wahrscheinlich aufgrund des hohen Aufwandes liegen nur wenige Studien zum Vergleich HIIT vs. VOT vor, in denen HIIT und VOT exakt denselben Gesamtenergieverbrauch aufweisen. Im Vergleich zum VOT weisen die HIIT Interventionen, bei gleichem Gesamtenergieverbrauch, durchschnittlich eine größere Verbesserung der VO_{2max} (HIIT: $24,7\% \pm 13,1$; VOT: $13,5\% \pm 2,9$) und einen geringeren Zeitaufwand pro Trainingseinheit (HIIT: $35,2 \pm 4$ Minuten; VOT: $41,2 \pm 7$ Minuten) auf. Daneben zeigen sich bei den HIIT-Interventionen auch zelluläre und molekulare Anpassungserscheinungen. Der Vorteil des geringeren Zeitaufwandes und der größeren Steigerung der VO_{2max} sind in den Bereichen Leistungs- und Freizeitsport sowie in der Prävention und Rehabilitation durch Sport relevant.

3.4 Ermüdungsresistenz während Hochintensivem Intervalltraining bei Kindern und Erwachsenen

Kinder weisen nach intensiven Einzelbelastungen und Hochintensiven Intervallbelastungen eine schnellere unmittelbare Regeneration auf als Erwachsene (Hebestreit, Meyer, Htay, Heigenhauser & Bar-Or, 1996; Hebestreit, Mimura & Bar-Or, 1993; Ratel, Bedu, Hennegrave, Dore & Duche, 2002; Zafeiridis, Dalamitros, Dipla, Manou, Galanis & Kellis, 2005; Ratel, Duche, Hennegrave, Van Praagh & Bedu, 2002; für Reviews siehe: Ratel, Duché & Williams 2006; Falk & Dotan, 2006). Die genauen physiologischen und anatomischen Ursachen für die schnellere Regeneration, beziehungsweise die langsamere Ermüdung, die sogenannte Fatigue Resistance, der Kinder sind bisher nicht gänzlich geklärt und wahrscheinlich auf eine Vielzahl von physiologischen Faktoren zurück zu führen (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006). Darüber hinaus sind die Erklärungsansätze in der Literatur dazu nur spärlich vorhanden und es besteht weiterer Forschungsbedarf (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006).

Faktisch konnte in zahlreichen Untersuchungen gezeigt werden, dass Kinder gegenüber Jugendlichen und Erwachsenen einen geringeren Rückgang der absoluten sowie auf das Körpergewicht relativierten Leistung im Verlauf von intensiven Intervallbelastungen aufweisen (siehe Tab. 2).

Tab. 5. Literaturübersicht zu Studien über altersabhängige Ermüdung (Muscle Fatigue) während Hochintensivem Training (Einzelbelastungen) und Hochintensivem Intervalltraining (Intervallbelastungen) bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen (modifiziert nach: Ratel et al., 2006, S. 1036).

Autoren	Probanden/Alter/Geschlecht	Sportart	Protokoll	Indices	Regenerationsverhalten
Buchheit et al. (2010)	Kinder: 9,6/♂ Jugendliche: 15,2/♂ Erwachsene: 20,4/♂	Fahrradergometer	10 x 10 s; P: 5 min	STMP	Kinder = Jugendliche = Erwachsene
Chia et al. (2001)	Jugendliche: 13,6/♀ Erwachsene: 25,1/♀	Fahrradergometer	3 x 15 s; P: 45 s	STMP	Jugendliche > Frauen
Dipla et al. (2009)	Kinder: 11,3/♂ Jugendliche: 14,7/♂ Erwachsene: 24,0/♂ Kinder: 10,9/♀ Jugendliche: 14,4/♀ Erwachsene: 25,2/♀	Isokinetischer Dynamometer	4 x 18 Knieextensionen und Knieflexionen; P: 1 min	FR	Jungen > Jugendliche > Männer Mädchen > Jugendliche Mädchen > Frauen Jugendliche = Frauen

Dupont et al. (2000)	Kinder: 11,6/♂ Erwachsene: 18,4/♂	Laufen	6 x 20 s; P: 1 min	Zurück gelegte Strecke	Jungen > Männer
Gaul et al. (1995)	Kinder: 11,4/♂ Erwachsene: 22,6/♂	Fahrradergometer	1 x 90 s Sprint	FR	Jungen > Männer
Halin et al. (2003)	Kinder: 10,5/♂ Erwachsene: 21,5/♂	Armergometer	1 x 30 s maximale isometrische Ellbogenflexion	FR	Jungen > Männer
Hebestreit et al. (1993)	Kinder: 10,3/♂ Erwachsene: 21,6/♂	Fahrradergometer	2 x 30 s; P: 1-, 2- und 10 min	STMP	Jungen > Männer
Kanehisa al. (1995)	Kinder: 14/♂ Erwachsene: 18-25/♂	Isokinetischer Dynamometer	50 x Knieextensionen	Höchste aufgezeichnete Kraft	Jungen > Männer
Lazaar et al. (2002)	Kinder: 11,0/♂ Erwachsene: 21,3/♂	Laufen	10 x 10 s; P: 30 s; 1- und 5 min	Zurück gelegte Strecke	Jungen > Männer
Paraschos et al. (2007)	Kinder: 10,5/♂ Erwachsene: 24,3/♂	Isokinetischer Dynamometer	25 x maximale isokinetische Knieextensionen	STMP	Jungen > Männer
Ratel et al. (2002)	Kinder: 9,6/15,0/♂ Erwachsene: 20,4/♂	Fahrradergometer	10 x 10 s; P: 30 s	STMP	Jungen > Männer
Ratel et al. (2004)	Kinder: 11,7/♂ Erwachsene: 22,1/♂	Nicht motorisiertes Laufband & Fahrradergometer	10 x 10 s; P: 15 s	PP Total Work	Jungen > Männer
Soares et al. (1996)	Kinder: 12,1/♂ Erwachsene: 28,3/♂	Bankdrücken (Arm- und Brustmuskulatur)	5 x 80% des ORM bis zur Erschöpfung; P: 90 s	Anzahl der Wiederholungen	Jungen = Männer
Zafeiridis et al. (2005)	Kinder: 11,4/♂ Erwachsene: 24,1/♂	Isokinetischer Dynamometer	4 x 30 s; P: 1 min 2 x 60 s; P: 2 min	STMP	Jungen > Männer

♂—männlich. ♀—weiblich. P—Pause. STMP—Short Term Muscle Power (Kurzzeitmuskelkraft). ORM—One Repetition Maximum (Maximales Gewicht welches einmal gestemmt werden kann). FR—Fatigue Resistance (Ermüdungswiderstandsfähigkeit). FI—Fatigue Index (Ermüdungsindex im Wingate Anaerobic Test). PP—Peak Power (Höchste mechanische Kraft im Sprint auf dem Fahrradergometer).

So zeigten Zafeiridis et al. (2005), dass der Rückgang der dynamischen Muskelkraft während intensiven Intervallbelastungen von vier Mal 30 Sekunden und zwei Mal 60 Sekunden (Maximal ausgeführte Knieextensionen auf dem Isokineten) bei Jungen (11,4 ± 0,5 Jahre) geringer war als bei Jugendlichen (14,7 ± 0,4 Jahre) und Männern (24,1 ± 2,0 Jahre). Ähnliche altersbezogene Unterschiede zeigten Ratel et al. (2002) bei zehn aufeinanderfolgenden zehnssekündigen Sprints auf dem Fahrradergometer. Hier blieb die höchste mechanische Kraft (Peak Power) vom ersten bis zum zehnten Sprint bei den Jungen (9,6 ± 0,7 Jahre) unverändert, bei den Erwachsenen Probanden fiel die Peak Power im

Verlauf vom ersten bis zum zehnten Intervall um 28,5% ab (Ratel et al., 2002). Als eine der ersten Arbeitsgruppen beobachteten Hebestreit et al. (1993) das beschriebene Phänomen. Sie zeigten, dass die Dauer der Erholung in der die Leistung aus dem initialen Wingate Anaerobic Test reproduziert werden konnte bei Jungen ($10,3 \pm 1,4$ Jahre) wesentlich kürzer war als bei Männern ($21,6 \pm 1,6$ Jahre). Die Jungen konnten bereits nach zwei Minuten Pause 100% der Leistung aus dem ersten Wingate Anaerobic Test reproduzieren, den Männern gelang dies erst nach zehn Minuten Pause (Hebestreit et al., 1993). Derselbe Trend wurde ebenfalls bei Intervallsprints im Laufen beobachtet (Lazaar et al., 2002; Dupont et al., 2000).

In der Untersuchung von Soares et al. (1996) absolvierten jeweils zehn Jungen (12,1 Jahre) und zehn Männer (28,3 Jahre) fünf Serien Bankdrücken jeweils bis zur Erschöpfung, die Serienpause betrug 90 Sekunden. Das Gewicht betrug 80% des individuellen One Repetition Maximums. Das subjektive Schmerzempfinden im Muskel und die isometrische Maximalkraft (im Bankdrücken) wurden vor und sofort nach dem Bankdrücken sowie 48 und 72 Stunden und 1 Woche nach dem Bankdrücken gemessen. Die Creatinkinase im Serum wurde vorher, sowie 48 und 72 Stunden und 1 Woche nach dem Bankdrücken gemessen. Die Männer zeigten starke Ermüdungssymptome, wie reduzierte Muskelkraft, Muskelschmerzen und einen stark erhöhten Creatinkinasespiegel in allen Messzeitpunkten bis 3 Tage nach dem Bankdrücken. Im Gegensatz zu den Erwachsenen zeigten die Jungen nur leichten Muskelschmerz, aber keine reduzierte Maximalkraft und keine erhöhten Creatinkinasespiegel. Zusätzlich zeigten die Jungen im Verlauf der Serien im Bankdrücken eine geringere Ermüdung als die Männer. Diese Studie lässt gut erkennen, dass nicht nur die Ermüdung während der Intervallbelastung, sondern auch die mittelfristigen subjektiven und objektiven Ermüdungserscheinungen nach dem Belastungsende bei den Kindern geringer ausgeprägt sind als bei Erwachsenen. Die Autoren schließen aus den Ergebnissen, dass die Muskulatur der Kinder weniger anfällig gegenüber physischem Stress ist.

Auffällig ist, dass aus fast allen Studien aus Tabelle 2 hervorgeht, dass Kinder absolut und auch auf das Körpergewicht relativiert signifikant weniger Leistung als Erwachsene im HIIT produzieren. Und auch bei einzelnen intensiven anaeroben Belastungen weisen Kinder eine geringere absolute und relative Leistung

als Erwachsene auf (Inbar, Bar-Or & Skinner, 1996). Doch auch der Leistungsabfall, unabhängig von der Art und Weise wie er berechnet bzw. definiert wurde, ist bei den Kindern fast ausnahmslos geringer als bei den Erwachsenen Probanden. Darüber hinaus ist die Erholungsfähigkeit nach intensiven Belastungen bei Kindern schneller als bei Erwachsenen (Hebestreit et al., 1993). Die verbesserte Widerstandsfähigkeit gegenüber Ermüdung bei intensiven Belastungen (Fatigue Resistance [FR]) ist durchgängig bei allen Belastungsprotokollen zu beobachten und ist unabhängig ob die Protokolle auf dem Fahrradergometer, auf dem Laufband oder auf dem Isokineten durchgeführt wurden.

Die ursächlichen physiologischen und anatomischen Gründe dafür werden von verschiedenen Autoren diskutiert und sind Gegenstand des folgenden Kapitels.

Fazit: Die absolute und relative Leistungsabgabe bei intensiven einzelnen Belastungen und beim HIIT ist bei Kindern geringer als bei Erwachsenen. Jedoch ist bei Kindern eine verbesserte Widerstandsfähigkeit gegenüber Ermüdung, die sogenannte Fatigue Resistance (FR) während HIIT zu beobachten. Die verbesserte FR ist unabhängig von der Belastungsart (Fahrradergometer, Laufband, etc.) und dem Belastungsprotokoll bei den Kindern zu beobachten.

Die genauen physiologischen und anatomischen Ursachen für die schnellere Regeneration und die bessere Fatigue Resistance der Kinder sind bisher nicht gänzlich geklärt und wahrscheinlich auf eine Vielzahl von physiologischen, biologischen und anthropometrischen Faktoren zurück zu führen (siehe Kapitel 3.6) (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006).

3.4.1 Physiologische, anatomische und psychologische Ursachen für Unterschiede in der Ermüdung zwischen Kindern und Erwachsenen während HIIT

Wie in Kapitel 3.4 dargestellt unterscheidet sich das Ermüdungs- bzw. Erholungsverhalten während intensiver Einzelbelastungen und HIIT zwischen Kindern und Erwachsenen zugunsten der Kinder. Die diskutierten Ursachen und Gründe werden hier erörtert.

3.4.2 Unmittelbare Regeneration

Intensive körperliche Belastung hat akute physiologische Reaktionen des metabolischen, kardiovaskulären, respiratorischen, endokrinen, immunologischen und neuromuskulären Systems zur Folge. Unmittelbar nach intensiven Belastungen ist der Körper bestrebt das Gleichgewicht aller beanspruchten Systeme, die Homöostase, wieder herzustellen – der Vorgang der Regeneration. Diese Prozesse verlaufen nicht linear und unterscheiden sich zwischen Kindern und Erwachsenen, doch sind bisher nur wenige Studien vorhanden welche die unmittelbare Regeneration physiologischer Parameter von Kindern analysieren (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006). Der Grad der Regeneration der physiologischen Parameter unmittelbar nach der Belastung beeinflusst zweifelsfrei zu einem großen Teil die Leistung während Intervallbelastungen. Daher können gröÙe- und reifebedingte Unterschiede in den physiologischen Parametern zwischen Kindern und Erwachsenen die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit während Intervallbelastungen zumindest teilweise erklären (Hebestreit et al., 1993; Ratel et al., 2002b; Zafeiridis et al., 2005). Allerdings nicht vollständig da eine komplette Rückkehr der physiologischen Parameter zur „Vorstart- Homöostase“, sprich eine 100%-ige Regeneration der physiologischen Parameter, nicht notwendig ist um eine vollständige Leistungsfähigkeit zu gewährleisten. Eine bis zu einem gewissen Grad erhöhte Herzfrequenz, ein erhöhter Blutlaktat Spiegel oder eine erhöhte Körperkerntemperatur beeinflussen die Leistung nicht negativ (Falk & Dotan, 2006).

3.4.3 Ruhewerte

Die Ruhewerte der meisten physiologischen Parameter (Herzfrequenz, Atemfrequenz, Sauerstoffaufnahme) sind bei Kindern höher als bei Erwachsenen. Aufgrund dieser Tatsache ist die Differenz zwischen Ruhewerten und den Werten bei maximaler Anstrengung bei Kindern meist geringer als bei den Erwachsenen. Kinder können somit nach der Belastung meist schneller zu den Ruhewerten gelangen als Erwachsene (Falk & Dotan, 2006), was die Regenerationsdauer unter Umständen beeinflussen kann.

3.4.4 Peakwerte

Wie die Ruhewerte, so unterscheiden sich auch die Peakwerte (Die höchsten gemessenen Werte der Probanden während oder nach einer körperlichen Belastung) von Kindern und Erwachsenen. So ist die Höhe des Blutlaktatspiegels von Kindern nach intensiven Belastungen bei Kindern niedriger als bei Erwachsenen (Beneke et al., 2005; Ratel et al., 2002a; Hebestreit et al., 1993; Buchheit et al., 2010). Die Herzfrequenz nach maximalen Belastungen ist bei Kindern hingegen höher (Buchheit et al., 2010; Rowland, 2005). Dies verdeutlicht, dass Kinder und Erwachsene die Regeneration ebenfalls nicht vom selben Nachbelastungs-Niveau aus beginnen. Im Prinzip wäre eine Vergleichbarkeit deswegen eigentlich nur schwer möglich. Aus sportpraktischer Sicht jedoch, wenn es um Fragen geht wie *„Wie soll ich ein Hochintensives Intervalltraining für Kinder und Jugendliche gestalten?“*, *„Welche Pausenlängen soll ich im HIIT verwenden?“* oder *„Kann ich mit Kindern überhaupt HIIT trainieren, oder vertragen Kinder ein solches Training gar nicht?“*, kann man die unterschiedlichen Ausgangsniveaus als gegeben hinnehmen. Primär wichtig ist dann zu welchem Zeitpunkt welcher Parameter auf welchem Niveau ist und man mit den Kindern oder Jugendlichen das nächste Intervall beginnen kann.

3.4.5 Laktatbildung

Die Produktion von Laktat ist von vielen Faktoren abhängig. Unter anderem beeinflussen Intensität und Dauer der körperlichen Belastung die Menge der Laktatbildung, doch auch die Individualität des Athleten hat Einfluss auf die Hö-

he des Laktates. So wirken der Trainingszustand, die Muskelfaserzusammensetzung, die absolute und relative Muskelmasse und die Muskelfaserrekrutierung während der sportlichen Aktivität direkt auf die Höhe der Laktatbildung.

Während hochintensiver Belastungen steigt der ATP-Bedarf und kann ab einer bestimmten Intensität nicht mehr aerob gedeckt werden da die Transport- und Bereitstellungskapazität des Körpers für Sauerstoff nicht mehr ausreicht. Um weiterhin Energie bereit zu stellen erfolgt die anaerobe Glykolyse. Als Endprodukte der anaeroben Energiebereitstellung entstehen Laktat und NAD^+ (de Marées, 2006).

Bei submaximalen und maximalen Belastungen ist eine Abhängigkeit des Laktatspiegels vom Größenwachstum zu beobachten (Armstrong & Welsmann, 2007; Falgairette et al., 1991; Eriksson et al., 1971). Eine Abhängigkeit des geschlechtlichen Reifegrades auf die Laktatbildung konnte bisher nicht nachgewiesen werden (Armstrong & Welsmann, 2007; Van Praagh & Doré, 2002). Mittlerweile liegt eine Vielzahl von Studien vor, welche bei intensiven Einzel- und Intervallbelastungen wesentlich geringere Blut- und Muskellaktatwerte bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen konstatieren (Beneke et al., 2005; Hebestreit et al., 1996; Falgairette et al., 1991; Ratel et al., 2002a; Buchheit et al., 2010). Beispielsweise steigt der Blutlaktatkonzentration nach zehn aufeinanderfolgenden Sprints auf dem Fahrradergometer bei Jungen nur um das 4fache an wohingegen die Blutlaktatkonzentration bei Männern um das 11fache ansteigt (Ratel et al., 2002a).

Doch ist die Höhe des Laktatspiegels nach intensiver anaerober Belastung kein direkter Anhaltspunkt für die Quantität der Glykolyse, da viele unterschiedliche physiologische und anatomische Faktoren die parallel stattfindende Laktatbildung und Laktatelimination beeinflussen. Die Höhe des im Muskel oder im Blut gemessenen Laktatspiegels ist somit kein Anhaltspunkt um auf eine niedrigere intramuskuläre Laktatbildung bei Kindern zu schlussfolgern (Van Praagh, 2007). Van Praagh (2007) gibt ebenfalls zu bedenken, dass die geringeren Laktatwerte bei Kindern eventuell auch durch die geringere Muskelmasse bedingt sein könnten und, dass eine Angabe der Laktatwerte relativ zur reinen Muskelmasse den Unterschied zwischen Kindern und Erwachsenen minimieren könnte.

Ursprünglich wurde als Ursache für die verringerten Laktatwerte von Kindern eine reduzierte Fähigkeit eine hohe Azidose zu tolerieren vermutet (Matejkova

et al., 1980). Auf die unterschiedliche Säure-Basen Regulation von Jungen im Vergleich zu Erwachsenen weist van Praagh (2007) ebenfalls hin. Nach dem Wingate Anaerobic Test wurden bei vorpubertären Jungen höhere Blut-pH Konzentrationen (basischerer Zustand) im Vergleich zu Männern gemessen. Die absoluten Laktatwerte nach dieser maximalen Beanspruchung waren bei den Männern natürlich höher als bei den Jungen (Hebestreit et al., 1993). Darüber hinaus wurde in der Studie von Ratel et al. (2002) im Anschluss an zehn Sprints bei vorpubertären Jungen niedrigere Laktatwerte und ebenfalls höhere venöse pH-Werte (basischerer Zustand) als bei Erwachsenen gemessen. Zudem zeigte sich das bei den Männern bei denselben Blutlaktatkonzentrationen der Blut-H⁺-Wert signifikant höher war. Anscheinend können Jungen die H⁺-Ionenkonzentration im Blut besser regulieren als Männer, was auf eine bessere Regulation des Säure-Basen Haushalt hinweist. Die Ursache für die geringere H⁺-Ionenkonzentration wird in der ebenfalls beobachteten erhöhten Ventilation (Atemfrequenz) der Kinder vermutet.

3.4.6 Laktatelimination

Ein hoher Muskel- und Blutlaktatspiegel beeinflusst die Leistung negativ, da ein hoher Laktatspiegel mit einem Absinken des pH Spiegels und einer verringerten ATP-Produktion einhergehen (Booth & Thomason, 1991). Ein hoher Muskel- und Blutlaktatspiegel während einer Intervallbelastung führt folglich zu einer geringeren Leistung im weiteren Verlauf der Intervallarbeit (Bangsbo et al., 1996; Hägele et al., 2009). Die Fähigkeit das gebildete Laktat schnell zu eliminieren ist also von Vorteil in der intensiven Intervallarbeit.

Wie in Kapitel 3.6.4 geschildert weisen Kinder bei intensiven Belastungen geringere Laktatwerte als Erwachsene auf, jedoch ist die absolute und auf das Körpergewicht bezogene Leistung bei Kindern ebenfalls geringer. Das wirft die Frage auf, ob Kinder ein schnelleres Regenerationsverhalten entweder aufgrund von geringerer Leistungsabgabe, oder wegen der geringeren Laktatbildung und dem damit verbundenen niedrigeren Laktatspiegeln oder wegen einer schnelleren Laktateliminationsrate aufweisen. Dieser Frage gingen Dotan, Ohana, Bediz und Falk (2003) nach. Die Autoren beobachteten den Blutlaktatspiegel bei Männern und bei vorpubertären Jungen nach einem 30 sekundigen

Wingate Anaerobic Test über eine Zeitspanne von 60 Minuten passiver Re-
generation. Die Blutlaktatkonzentrationen der Männer nach dem Wingate Anaero-
bic Test waren signifikant höher als die der Jungen. An einem weiteren Ver-
suchstag wurde die Blutlaktatkonzentration der Männer durch einen verkürzten
Test auf die gleiche Höhe wie die Blutlaktatkonzentration der Jungen nach dem
30sekündigen Test gebracht. Die Elimination der Blutlaktatkonzentrationen der
Jungen aus dem 30sekündigen Test und die Elimination der Blutlaktatkonzent-
rationen der Männer aus dem kurzen Test wiesen daraufhin denselben Verlauf
auf. Zu keinem Messzeitpunkt gab es signifikante Unterschiede in der Blut-
laktatkonzentration zwischen den Männern und den Jungen. Die Autoren
schlussfolgern daraus, dass zwar die Höhe und die Akkumulation des Laktates
bei maximalen Belastungen bei Männern höher sind als bei Jungen, doch die
Laktatelimination unterscheidet sich prinzipiell nicht zwischen Männern und
Jungen. Dieser Aussage widerspricht die Studie von Beneke et al. (2005). Die
Autoren verglichen in der Studie die Laktatkinetik von Jungen, Jugendlichen
und Männern nach einem Wingate Anaerobic Test mittels einem biexponentiel-
len Modell. Die Arbeitsgruppe stellte niedrigere Laktatkonzentrationen sowie ein
schnelleres auftreten der Peak- Laktatkonzentrationen bei den Jungen fest. Das
wichtigste Ergebnis aber war eine schnellere Elimination des Laktates aus dem
Blutkreislauf der Jungen gegenüber den Jugendlichen und den Männer (Bene-
ke et al., 2005).

Weitere Studien über den Verlauf der Blutlaktatkinetik bei intensiven Belastun-
gen von Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen liegen trotz umfangreicher Li-
teraturrecherche bisher nicht vor. Doch gerade die gegensätzlichen Aussagen
von Beneke et al. (2005) und Dotan et al. (2003) zeigen den dringenden For-
schungsbedarf über Laktatbildung und Laktatelimination während und nach in-
tensiven Belastungen.

Andere Autoren spekulieren aufgrund von Erkenntnissen zum Muskelfaser-
spektrum von Kindern und Erwachsenen über eine verbesserte Fähigkeit der
Kinder das akkumulierte Laktat abzubauen. So äußern sich Ratel et al. (2006)
in ihrem umfassenden Review über die *Muscle Fatigue* während HIIT bei Kin-
dern zu den niedrigeren Laktatwerten bei Kindern wie folgt. Die niedrigeren
Laktatwerte und die geringe Menge an H^+ -Ionen nach intensiven Einzel- und In-
tervallbelastungen bei Kindern könnten wahrscheinlich auf eine verbesserte

Laktatelimination zurück zu führen sein, da Kinder über einen höheren Anteil an Typ I Muskelfasern verfügen als Erwachsene (Bell et al., 1980; Jansson, 1996; Lexell et al., 1992; Oertel, 1988). Typ I Muskelfasern diffundieren und oxidieren das Laktat besser und schneller da die Typ I Muskelfasern eine hohe Dichte an Monocarboxylat-Transporter 1 (MCT1: Protein in der Zellmembran des Menschen, welches die Diffusion von Laktat und H^+ aus der Muskelzelle katalysiert und ein Übersäuern der Muskelzelle vermeidet) aufweisen (Pilegaard et al., 1999; Juel, 2001).

Es bleibt anzumerken, dass die Typ I Muskelfasern nicht nur mehr Laktat oxidieren, sondern auch weniger Energie (im Sinne von Kraft) und Laktat produzieren. Die Muskelfaserzusammensetzung der Kinder könnte also sowohl für die niedrigeren anaeroben Leistungen als auch für die niedrigeren Laktatwerte und für die schnellere Laktatelimination verantwortlich sein.

Allerdings weisen Ratel et al. (2006) ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den Vermutungen noch um Spekulationen handelt und weitere Studien dazu unbedingt notwendig sind um die Theorie empirisch zu belegen.

Fazit: Die Aussagen zur Laktatelimination bei Kindern und Jugendlichen sind widersprüchlich. Es finden sich Aussagen welche Kindern eine schnellere Laktatelimination bescheinigen (Beneke et al., 2005) und Aussagen welche die Laktateliminationsfähigkeit von Kindern und Erwachsenen als gleichwertig ansehen (Dotan et al., 2003). Weitere Aussagen spekulieren anhand von Daten zum Muskelfaserspektrum auf eine bessere Laktateliminationsfähigkeit von Kindern (Ratel, et al., 2006).

Festzuhalten bleibt, dass es nur wenige konkrete Studien zur Laktatelimination von Kindern vorhanden sind und dringend weiterer Forschungsbedarf besteht!

3.4.7 Resynthese der energiereichen Substrate

Das wiederherstellen der Leistungsfähigkeit bei intensiven Kurzzeitbelastungen mit Intervallcharakter ist unter anderem bestimmt von der Resynthese der ener-

giereichen Substrate, da diese eine wichtige Energiequelle darstellen. Doch lediglich zur Resynthese von Kreatinphosphat (CrP) nach intensiven Belastungen sind Vergleiche zwischen Kindern (6-12 Jahre) und Erwachsenen (20-29 Jahre) vorhanden. Mittels ³¹P-Magnetresonanzspektroskopie wurde bei Jungen nach stufenförmiger intensiver Belastung eine schnellere Auffüllung der CrP Speicher im Wadenmuskel als bei den Erwachsenen festgestellt (Taylor et al., 1997). Die schnellere Resynthese des CrP bei den Kindern lag den Autoren zufolge daran, dass Kinder in einem höheren Maße auf den oxidativen Stoffwechsel zurückgreifen und weniger Abhängig vom glykolytischen Stoffwechsel sind (Taylor et al., 1997). Da der Stoffwechsel nicht willentlich gesteuert werden kann begründen Falk und Dotan (2006) die hohe Beteiligung des oxidativen Stoffwechsels an der Energiebereitstellung bei Kindern in der Studie von Taylor et al. (1997) damit, dass Kinder bei intensiven Belastungen wenige motorische Einheiten der Muskelfasern rekrutieren. Dadurch, dass Kinder weniger motorische Einheiten als Erwachsene rekrutieren herrscht in der Muskulatur ein mildes Milieu (hoher pH-Wert) was den oxidativen Stoffwechsel begünstigt und dies wiederum begünstigt eine schnelle Resynthese des CrP.

3.4.8 Anatomische Unterschiede Kinder - Erwachsene

Nicht nur die bessere Ermüdungswiderstandsfähigkeit während HIIT, sondern auch zahlreiche andere Unterschiede die beim HIIT zwischen Kindern und Erwachsenen beobachtet werden (z.B. niedrigere Laktatwerte und geringere Leistung) könnten durch anatomische Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen bedingt sein (siehe Abb. 1).

So weisen Kinder einen kleineren Durchmesser der Muskelfasern als Erwachsene auf (Lexell et al., 1992; Brooke & Engel, 1969). Der kleinere Muskelfaserdurchmesser hat kürzere Diffusionsstrecken zwischen Muskel und Blut zur Folge (Brooke & Engel, 1969) was wiederum eine schnellere Diffusion von Laktat, H⁺ sowie CO₂ zwischen Muskeln und Blut ermöglicht. Darüber hinaus ermöglicht die geringere Körpergröße von Kindern kürzere kardiovaskuläre Kreislaufzeiten (Cumming, 1978; Falk & Dotan, 2006). Das heißt die Zeit in der das Blut den gesamten Blutkreislauf durchläuft ist bei Kindern kürzer als bei Erwachsenen, was zusätzlich einen schnelleren Austausch von Metaboliten sowie O₂ und

CO₂ ermöglicht. Diese anatomischen Unterschiede könnten in erster Linie das frühere Auftreten von „peak-Laktatwerten“ nach intensiven Belastungen verursachen, wie es von Beneke et al. (2005) und Dotan et al. (2003) gemessen wurde. Darüber hinaus ist es ebenfalls möglich, dass auch die schnellere Herzfrequenz- und Sauerstoffkinetik der Kinder durch die anatomischen Unterschiede verursacht werden. Als Schlussfolgerung weisen Falk und Dotan (2006) in ihrem Review darauf hin, dass die Unterschiede im Laktatverhalten zwischen Kindern und Erwachsenen auf den unterschiedlichen anatomischen Größenverhältnissen von Kindern und Erwachsenen beruhen und nicht auf einem qualitativ unterschiedlichen Metabolismus.

Abbildung 1 verdeutlicht, wie sich die verschiedenen Faktoren, die letztlich zur schnelleren Regeneration der Kinder führen, gegenseitig bedingen und beeinflussen. Das verbesserte Regenerationsverhalten der Kinder ist wahrscheinlich das Ergebnis einer Summe von physiologischen und anatomischen Besonderheiten des kindlichen Organismus, sodass sich die verbesserte Fatigue Resistance nicht auf den einen Grund reduzieren lässt.

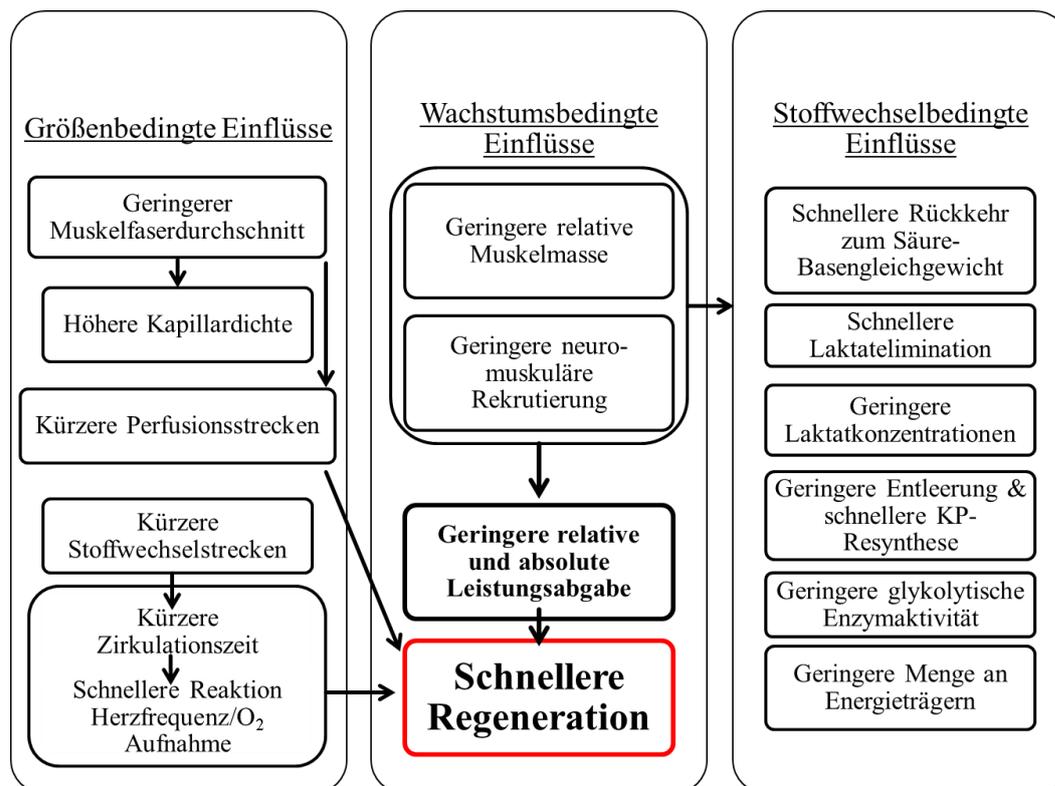


Abb. 1. Schematische Abbildung der Gründe für die schnellere Regeneration von Kindern während Hochintensivem Intervalltraining (modifiziert nach Falk & Dotan, 2006, S. 111)

3.4.9 Muskelmasse

Die bessere Ermüdungsresistenz der Kinder während HIIT korreliert mit der geringeren Leistung welche die Kinder im Vergleich zu den Erwachsenen erbringen (Dotan et al., 2003). In dem Review über Ermüdungswiderstandsfähigkeit bei HIIT bringen Ratel et al. (2006) die Muskelmasse mit der geringere Leistung und der besseren Ermüdungsresistenz der Kinder in Zusammenhang. Die Autoren zeigten bei einer von ihnen durchgeführten Studie, dass Erwachsene gegenüber Kindern eine höhere Leistung relativ zur reinen Muskelmasse der Beine erbringen, aber aufgrund der höheren Leistung auch schneller ermüden (Ratel et al., 2004). Dasselbe Phänomen beobachteten Ratel et al. (2006) in den bereits erläuterten Studien von Zafeiridis et al. (2005) und Kanehisa et al. (1995). Ratel et al. (2006) schlussfolgern, dass die bessere Ermüdungsresistenz in einer qualitativ unterlegenen Muskelfunktion der Kinder, beispielsweise eine unterlegene neuromuskuläre Aktivierung motorischer Einheiten, begründet liegt. Konkrete Belege führen die Autoren aber nicht an. Denselben Argumentationsansatz verfolgen auch Falk & Dotan (2006). Sie argumentieren, dass Kinder sich schneller erholen da Kinder sich „von weniger erholen müssten“. In anderen Worten heißt das, weniger Leistung – schnellere Erholung. Folgende Abbildung von Falk und Dotan (2006) verdeutlicht dieses theoretische Konstrukt anschaulich.

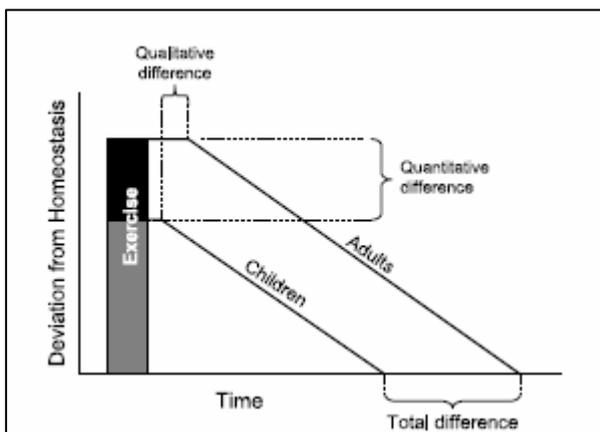


Abb. 2. Schematische Darstellung der quantitativen und qualitativen Komponenten in der unterschiedlichen Regeneration von Kindern und Erwachsenen nach Hochintensivem Intervalltraining. Die größeren quantitativen Unterschiede spiegeln die geringere Leistung der Kinder im Hochintensiven Intervalltraining wieder, von denen sie sich erholen müssen. Der qualitative Unterschied repräsentiert die kürzeren Perfusionsstrecken und kürzeren Kreislaufzeiten, welche durch die anatomischen Gegebenheiten der Kinder bedingt sind (Falk & Dotan, 2006, S. 111).

3.4.10 Sauerstoffkinetik

Die Sauerstoffaufnahme steigt während niedriger bis moderater körperlicher Beanspruchung in den ersten ein bis zwei Minuten an und erreicht dann ein Plateau (Steady-State). Da der Körper schon ab Sekunde „0“ Energie benötigt, deckt er diesen Energiebedarf durch die verzögerte Sauerstoffaufnahme bis zu dem Zeitpunkt an dem die Sauerstoffaufnahme angestiegen ist, anaerob (Rowland, 2005). Die Geschwindigkeit des Anstiegs der Sauerstoffaufnahme und die Höhe des anfänglichen Sauerstoffdefizits, welches durch die verzögerte Sauerstoffaufnahme entstanden ist, werden als Maßstab für die relative aerobe und anaerobe Kapazität angesehen (Rowland, 2005).

Zu Beginn von intensiven Belastungen zeigten Kinder wiederholt eine schnelle Aktivierung der Sauerstoffaufnahme als Erwachsene (Williams, Carter, Jones & Doust, 2001; Armon, Cooper, Flores, Zanconato & Barstow, 1991; Armon, Cooper & Zanconato, 1991; Freedson, Gilliam, Sady & Katch, 1981). Während sich die initiale Sauerstoffaufnahme bei geringen Intensitäten zwischen Kindern und Erwachsenen nicht unterscheidet, reagiert die Sauerstoffaufnahme bei intensiven Belastungen bei Kindern schneller (Armon et al., 1991; Williams et al., 2001). Die schnellere Anpassung der Sauerstoffaufnahme an einen erhöhten Bedarf, wie er bei intensiven Belastungen gegeben ist, ermöglicht den Kindern länger im aeroben Stoffwechsel zu arbeiten als Erwachsene und erst zu einem späteren Zeitpunkt die anaerobe Energiebereitstellung zu beanspruchen (Williams et al., 2001). Die schnelle Steigerung der Sauerstoffaufnahme bei den Kindern ist den Autoren zufolge vermutlich dadurch bedingt, dass Kinder über eine große aerobe Kapazität und über eine begrenzte Fähigkeit ATP auf anaeroben Weg bereit zu stellen verfügen (Williams et al., 2001).

Außerdem zeigten Ratel et al. (2002), dass Jungen bei Hochintensiven Intervallbelastungen bei gleicher Atemfrequenz in der ersten Hälfte der Intervallbelastung, genauer gesagt in den 30-sekündigen Pausen zwischen den Intervallen, mehr CO₂ abatmeten als Männer. In der zweiten Hälfte der Intervallbelastung atmeten die Männer dann mehr CO₂ aus als die Jungen. Die Autoren schlussfolgern, ebenfalls wie die oben genannten Autoren, dass bei Jungen eine schnellere Atemregulation als bei Männern stattfindet und die Jungen während HIIT somit länger aerob Energie bereitstellen können als Männer.

3.4.11 Motivation

Die verbesserte Regeneration von Kindern nach HIIT wurde umfassend dargestellt. Doch wie stellt man sicher ob die Probanden, Kinder, Jugendliche oder Erwachsene, während der Hochintensiven Belastungen sich auch tatsächlich maximal belasten? Es existieren keine objektiven Kriterien um die maximale Anstrengung für Kinder bei hochintensiven Kurzzeitbelastungen zu überprüfen (Ratel et al., 2006). Feste objektive Ausbelastungskriterien wie beispielsweise eine bestimmte Herzfrequenz oder die maximale Sauerstoffaufnahme (bzw. eine Plateaubildung oder das „leveling off“ der Sauerstoffaufnahme) wie sie bei Stufentests auf dem Laufband oder dem Fahrradergometer definiert sind können nicht angewendet werden da es sich bei HIIT um kurze Maximaltests handelt (Midgley, Carroll, Marchant, McNaughton & Siegler, 2009). Um eine maximale Anstrengung sicher zu stellen müssen Untersuchungsleiter zunächst auf die Compliance und Anstrengungsbereitschaft der Probanden vertrauen. Darüber hinaus können indirekte Indexe helfen. Darunter fallen die Test-Retest-Reliabilität der Leistungsindices, die Validität des Testverfahrens oder das subjektive Belastungsempfinden. Die Test-Retest-Reliabilität beim Wingate Anaerobic Test beträgt $r = 0.95-0.97$ für Kinder und Erwachsene. Die Validität des Wingate Anaerobic Test, bezogen auf das Merkmal anaerobe Leistung von Kindern und Erwachsenen, ist ebenfalls belegt (Inbar, Bar-Or & Skinner, 1996). Der Anteil an anaerob-alaktazider und anaerob-laktazider Energiebereitstellung während des Wingate Anaerobic Test beträgt 81,4% (Beneke, Pollmann, Leithäuser, Hütler, 2002).

Es ist unwahrscheinlich, dass die schnellere Regeneration von Kindern nach HIIT, wie sie in den dargestellten Studien beobachtet worden ist, auf einer niedrigen Motivation der Kinder während den intensiven Belastungen basiert. In den meisten Studien wurden die Probanden mit den Testverfahren vertraut gemacht bevor die tatsächlichen Studien durchgeführt wurden, so auch in den Testverfahren der vorliegenden Studie. Darüber hinaus waren alle Probanden der vorliegenden Studie, Kinder wie Erwachsene, trainierte Athleten die regelmäßig intensives Training absolvieren und an Wettkämpfen teilnehmen. Diese Sportler sind folglich mit maximalen Anstrengungen vertraut und potentiell motiviert für intensive Belastungen. Darüber hinaus beschreiben Autoren in ihren subjektivi-

ven Eindrücken Kinder in Testsituationen von HIIT als sehr kooperativ und motiviert (Ratel et al., 2006). Eine Beobachtung die der Autor der vorliegenden Arbeit mit den Probanden in den Studien II, III und IV auch machte. Zusätzlich besteht das selbstgewählte Spielverhalten von Kindern (6 bis 10 Jahre) aus kurzen und intensiven Bewegungen die einem intensiven Intervalltraining ähneln (Bailey et al., 1995). Insofern müssten Kinder schon natürlicherweise das HIIT interessant finden und es im Labor in Testsituationen mit großer Motivation absolvieren.

Fazit: Die schnellere Regeneration und die bessere Fatigue Resistance der Kinder bei einzelnen und intervallartigen (hoch)intensiven Belastungen sind auf eine Vielzahl von physiologischen, biologischen und anthropometrischen Faktoren zurück zu führen (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006). Unter anderem begünstigen folgende Faktoren die Regeneration bzw. die Fatigue Resistance der Kinder positiv: Geringere Blut- und Muskellaktatwerte sowie die schnellere Elimination des Laktates, ein höherer Anteil an Typ I Muskelfasern, eine schnellere Auffüllung der Kreatinphosphat Speicher, einen kleineren Durchmesser der Muskelfasern, kürzere Diffusionsstrecken zwischen Muskel und Blut, kürzere kardiovaskuläre Kreislaufzeiten, eine schnelle Aktivierung der Sauerstoffaufnahme bei intensiven Belastungen.

3.5 Mittel- und langfristige Regeneration von Kindern

Die kurzfristige Regeneration von Kindern und Jugendlichen während und im Anschluss an HIIT sowie die physiologischen und biologischen Ursachen hierfür wurden in den Kapiteln 3.5 und 3.6 dargestellt. In diesem Kapitel wird die mittel- und langfristige Regeneration von Kindern und Jugendlichen im Zusammenhang mit HIIT thematisiert.

3.5.1 Regeneration der Muskulatur

Intensive physische Belastungen, beispielsweise durch Krafttraining oder durch Hochintensives Intervalltraining im Laufen, üben hohe exzentrische Belastungen auf die beteiligten Skelettmuskeln aus, wodurch mikroskopische Muskelverletzungen entstehen können. Der Muskelschaden wird durch eine Reduzierung der isometrischen Muskelkraft und durch eine Erhöhung des Creatinkinase-Wert (CK-Wert) im Blutplasma sichtbar, daher sind CK-Wert und die isometrische Kraft geeignete Parameter um Aufschluss über die Belastungssituationen der Muskulatur zu erlangen (Hollmann & Hettinger, 2000, S. 46; S. 239).

Ob es Unterschiede in der Widerstandsfähigkeit der Muskulatur gegenüber intensiven Belastungen von Kindern und Jugendlichen zu Erwachsenen gibt ist, durch eine uneinheitliche Literaturlage, bisher unklar. Lediglich wenige Studien widmen sich diesem Thema. Die Studie von Soares et al. (1996) untersucht die Belastbarkeit der Skelettmuskulatur von Kindern und Erwachsenen nach intensivem Krafttraining. Nach dem Krafttraining, 48 und 72 Stunden sowie nach einer Woche, wiesen die Kinder im Gegensatz zu den Erwachsenen keine Erhöhung der CK-Werte, keine Reduzierung der isometrischen Kraft und nur geringe Muskelschmerzen auf (siehe Kapitel 3.5). Nach einem stark exzentrischen Bergablaufen (30 Minuten bei 10% Gefälle) wiesen Kinder (10,4 ± 0,3 Jahre) ebenfalls einen signifikant geringeren Anstieg des CK-Wertes als Erwachsene (27,1 ± 0,8 Jahre) auf. Keine Unterschiede wurden in dem subjektiven Empfinden des Muskelschmerzes 24 Stunden nach dem Bergablaufen festgestellt (Webber, Byrnes, Rowland & Foster, 1989). Auch nach intensiven konzentrischen und exzentrischen Kontraktionen wurde bei 13-jährigen Jungen ebenfalls

ein geringerer Anstieg der CK-Konzentrationen als typischerweise bei Erwachsenen gemessen (Duarte et al., 1999). Die Studien von Soares et al. (1996), Webber et al. (1989) und Duarte et al. (1999) fanden bei Belastungen von gleichen relativen Intensitäten bei Kindern einen geringeren Anstieg des CK-Wertes, was entweder auf eine schnellere Regeneration der Muskulatur der Kinder oder auf eine geringere Belastung durch Mikrotraumata der Skelettmuskulatur schließen lässt.

Doch könnten auch andere Ursachen für die geringeren CK-Werte der Kinder nach den Belastungen vorliegen. Ähnlich wie beim Blutlaktat könnten das Auftreten und die Elimination der Creatinkinase, aufgrund von schnellerer Perfusion bedingt durch die kürzeren Perfusionsstrecken, im kindlichen Organismus schneller ablaufen als bei Erwachsenen (Webber et al., 1989). Als Einschränkung muss angemerkt werden, dass nach der Relation der CK-Konzentrationen auf das Körpergewicht die Unterschiede in den CK-Werten nach dem Bergablaufen zwischen Kindern und Erwachsenen nicht mehr signifikant waren (Webber et al., 1989).

Aufgrund der dargestellten Befunde kann man schlussfolgern, dass die Beschädigung und die Regeneration der Muskulatur nach intensiven Belastungen bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen günstiger ausfällt, im schlechtesten Fall vergleichbar ist, aber keinesfalls ungünstiger ist als bei Erwachsenen.

In Bezug auf die Regenerationsfähigkeit der Muskulatur von Kindern findet sich eine These welche im Widerspruch zu den oben genannten Befunden steht. Da sich die kindliche Muskulatur im Wachstum befindet liegt ein erhöhter Baustoffwechsel und somit ein höherer Energieverbrauch vor, was eine längere Wiederherstellungszeit im Vergleich zu Erwachsenen notwendig macht (Weineck, 2007; Faigenbaum & Schram, 2004; Faigenbaum, 2007). Jedoch ist diese These eine kausale Vermutung und wurde noch nicht in empirischen Studien objektiv nachgewiesen. Die in Kapitel 3.5 dargestellte bessere Ermüdungsresistenz von Kindern (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006) und die niedrigeren CK-Werte stehen im Widerspruch zu der These von Faigenbaum et al. (2004, 2007) und Weineck (2007). Doch sollte zwischen unmittelbarer und mittel- und langfristiger Regeneration unterschieden werden. Aufgrund der vermutlich langsameren Regeneration der Kinder empfiehlt Faigenbaum et al. (2007) in seinem umfassenden Übersichtsartikel zum Krafttraining für Kinder nicht mehr als 2-3

Einheiten Krafttraining pro Woche. Die Anzahl von 2-3 Trainingseinheiten pro Woche findet sich in den meisten Trainingsstudien zum HIIT mit Kindern und Jugendlichen und wird praktisch nicht überschritten, mit Ausnahme der Studien von Breil et al. (2010) und Wahl et al. (2013), die jeweils konzentrierte HIIT Mikrozyklen mit ausschließlich HIIT durchführten. Auch die American Academy of Pediatrics (Brenner et al., 2007) empfiehlt mindestens ein bis zwei trainingsfreie Tage pro Woche, um ausreichend Regeneration für junge Sportler zu gewährleisten. Bisher fehlen jedoch gezielte Interventionsstudien, welche die mittel- und langfristige Regeneration von Kindern und Jugendlichen nach HIIT genau analysieren.

3.5.2 Übertraining

Viele der mittels Literaturrecherche identifizierten Interventionsstudien mit HIIT im Kinder- und Jugendbereich (Tabelle 2) wendeten das HIIT zusätzlich zum normalen Vereinstraining an. Entweder als Verlängerung der sportartspezifischen Trainingseinheiten oder als zusätzliche isolierte Trainingseinheit. Zwar wurde die Häufigkeit von 2-3 Trainingseinheiten HIIT pro Woche nicht überschritten, mit Ausnahme der Studien von Wahl et al. (2013) und Breil et al. (2010), doch ergeben 2-3 Einheiten HIIT zusätzlich zu 3-4 Trainingseinheiten des „regulären Trainings“ einen relativ hohen Trainingsumfang, inklusive den hohen Intensitäten die im HIIT vorgesehen sind. Dauerhaft hohe und intensive Trainingsbelastungen können zu Verletzungen, oder zu Overreaching und dann im weiteren Verlauf zu Übertraining und letztlich zum Burnout führen (Brenner et al., 2007; American Academy of Pediatrics, 2000). Overreaching bezeichnet das beabsichtigte herbeiführen eines Ermüdungszustandes („Funktionelles Overreaching“) durch Training, welcher dann durch adäquate Regeneration zu einer Anpassungsreaktion führt, bei der die Leistungsfähigkeit dann über das Ausgangsniveau steigt (Matos & Winsley, 2007; Meeusen et al., 2006; Weineck, 2007). Das „nicht funktionelle“ Overreaching ist ein ungewollter Zustand der Ermüdung durch Trainingsbelastungen, welcher zu Leistungseinbußen führt, die Wochen oder Monate der Regeneration erfordern. Der Übertrainingszustand ist eine gesteigerte Form des nicht funktionellen Overreachings, welcher zu Leistungseinbußen und Depressionssymptomen führen kann, die meh-

rere Monate oder Jahre der Wiederherstellung erfordert (Matos & Winsley, 2007; Meeusen et al., 2006; Kelmann, 2002, Weineck, 2007). Hauptursachen für ein Übertrainingssyndrom sind das Ungleichgewicht zwischen Training und Erholung, eine Einseitigkeit der Trainingsmethoden, Ballung von Wettkämpfen ohne ausreichende Erholung, zu schnelle Steigerung der Trainingsquantität und –intensität, aber auch ein zu stark forciertes Techniktraining mit besonders schwierigen Bewegungsabläufen (Weineck, 2007). Besonders bei Kindern und Jugendlichen können psychische und soziale Faktoren wie die Trennung von der Familie, durch die Unterbringung in einem Sportinternat, der Erwartungsdruck und das Setzen von unrealistischen Zielen durch die Eltern (Gould & Ek-lund, 1991) oder Schwierigkeiten im Aufbauen von Freundschaften (Matos & Winsley, 2007) Übertrainingszustände ebenfalls begünstigen.

Es existiert eine Vielzahl von verschiedensten Symptomen für das Übertraining, die jeweils eine hohe intraindividuelle Varianz aufweisen (Kenttä et al., 2001). Über 90 verschiedene Symptome für ein Übertrainingssymptom wurden von Fry et al. (1991) benannt. In der Trainingspraxis stellt diese hohe Anzahl von Symptomen ein Problem dar ein Übertrainingssyndrom zu identifizieren. Zentrale Merkmale für das Übertrainingssyndrom sind jedoch die stark reduzierte sportartspezifische Leistungsfähigkeit (Budgett, 1998) sowie eine chronische Müdigkeit, Abgeschlagenheit und Apathie (Armstrong & VanHeest, 2002), einhergehend mit Stimmungsschwankungen und einer subjektiv erhöhten Wahrnehmung des Anstrengungsempfinden (Kenttä & Hassmén, 1998; Raglin, Sawamura, Alexiou, Hassmén & Kenttä, 2000).

Während das Übertraining bei Erwachsenen intensiv erforscht ist, gibt es nur wenige Untersuchungen mit jungen Athleten im Nachwuchsleistungssport die das Auftreten von Überlastungssymptomen analysieren (Matos & Winsley, 2007). Einige wenige Untersuchungen konnten zeigen, dass Übertrainings-symptome auch im Nachwuchsleistungssport relevant sind. Von jugendlichen Schwimmerinnen und Schwimmern (13-18 Jahre) aus verschiedenen Ländern (Japan, USA, Schweden und Griechenland) berichteten 34,6% der Nachwuchsschwimmer bisher mindestens eine Episode Übertraining erlebt zu haben (Raglin et al., 2000). Die Studie von Kenttä et al. (2001) berichtet eine teilweise noch höhere Prävalenz von Übertraining im Nachwuchsleistungssport. Die Autoren befragten 272 männliche und weibliche schwedische Nachwuchsathleten im Al-

ter von 16 bis 20 Jahren, die in Sportinternaten untergebracht waren, und fanden bei 48% der Athleten aus Individualsportarten und bei 30% der Athleten in Mannschaftssportarten Übertrainingszustände. Die Studien von Raglin et al. (2000) und Kenttä et al. (2001) zeigen die hohe Prävalenz von Übertraining im Nachwuchsleistungssport auf und betonen die Relevanz dieses Problems im System Nachwuchsleistungssport.

Momentan ist es noch sehr schwer ein nicht funktionelles Overreaching oder ein Übertrainingszustand nicht nur Retrospektiv zu diagnostizieren, sondern einem Übertrainingsyndrom im Nachwuchsleistungssport vorzubeugen. Als diagnostische Möglichkeiten für Übertraining sind sensitive Marker vorhanden (subjektive Beschwerden), jedoch nicht ein einzelner valider physiologischer Marker welcher in der Trainingspraxis gut anwendbar ist und frühzeitig zuverlässige Hinweise auf einen Übertrainingszustand gibt (Urhausen & Kindermann, 2002). Auch die verschiedenen sportpsychologischen Inventare, wie Profile of Mood State oder Recovery Cue, werden teilweise angezweifelt (Hohmann, 2005). Dagegen ist Kellmann (2000) überzeugt, dass mittels standardisierten psychologischen Methoden wie dem Erholungs-Belastungs-Fragebogen (Kellmann & Kallus, 2000) oder dem Profile of Mood States (McNair, Lorr & Dropplemann, 1992; Mc Nair, Lorr, Dropplemann, Biehl & Dangel, 1981) eine „...relativ stabile, zuverlässige, sensitive und ökonomische Erfassung von Anzeichen eines Übertrainingszustandes“ (Kellmann, 2000, S. 253) möglich ist. Die fragebogenbasierte Erfassung der Belastungs- bzw. Erholungssituation mittels Erholungs-Belastungs-Fragebogen wurde bereits in der deutschen Rudernationalmannschaft erfolgreich mit Athletinnen und Athleten im Junioren- und U-23 Bereich angewendet, genaue Altersangaben der Teilnehmer fehlen allerdings (Kellmann, 2004). Darüber hinaus zeigten auch die Studien von Raglin et al. (2000) und Kenttä et al. (2001) die Anwendbarkeit von Fragebögen zur Erfassung von Übertrainingssymptomen. Im Gegensatz zum Erholungs-Belastungs-Fragebogen diagnostizierten die Fragebögen von Raglin et al. (2000) und Kenttä et al. (2001) die Übertrainingszustände nur Retrospektiv. Die Anwendung des Erholungs-Belastungs-Fragebogen scheint damit auch für Kinder und Jugendliche in Trainingsphasen mit HIIT möglich und sinnvoll, bedenkt man die hohe Prävalenz von Übertrainingssymptomen im Nachwuchsleistungssport.

Zur Diagnose von Übertrainingssyndromen werden neben den psychologischen folgende physiologische und biomedizinische Parameter verwendet: Ein reduzierter Wert von Immunglobulin A (IgA) (Gleeson et al., 1999), ein reduziertes Verhältnis von Speicheltestosteron zu Cortisol (Passelergue & Lac, 1999), erhöhte Speichelcortisolwerte (O'Connor et al., 1989), eine reduzierte Herzratenvariabilität (Hedelin et al., 2000; Pichot et al., 2002) sowie erhöhte Katecholaminkonzentrationen (Hooper et al., 1995). Allerdings ist die aufwändige und kostenintensive Bestimmung der genannten Parameter im Labor für den Nachwuchsleistungssport eher nachteilig und in der Trainingspraxis kaum zu realisieren.

Für ein mögliches Auslösen von Überlastungssituationen durch die Anwendung von HIIT über mehrere Wochen gibt es bisher keine Anhaltspunkte. Überlastungszustände durch intensives Training sind für einen Großteil an Verletzungen im Nachwuchssport verantwortlich (Dalton, 1992). Doch die analysierten Interventionsstudien (Tabelle 2) berichteten keinerlei Überlastungserscheinungen, Verletzungen oder Dropouts aus der Studie aufgrund von zu intensiven Belastungen durch das HIIT oder wegen zu umfangreichen Trainingsbelastungen. Leider erfasste keine der Studien Überlastungsparameter systematisch. Ein weiteres Indiz dafür, dass keine unfunktionellen Overreachings und Überlastungssituationen in den untersuchten HIIT-Interventionsstudien auftraten ist die Leistung in den Ausgangstests nach Ende der Trainingsphasen mit dem HIIT. Ein wesentliches Kennzeichen des Übertrainings ist die reduzierte Leistungsfähigkeit in Ausbelastungstests oder in anaerob laktaziden Tests (Urhausen & Kindermann, 2002). In den analysierten Studien wurden in den Ausgangstests fast ausschließlich bessere Leistungen als in den Eingangstest erzielt. In einigen Studien wurden in einem Teil der Tests keine Veränderung der Leistungen vom Eingangs- zum Ausgangstest gemessen, eine reduzierte Leistungsfähigkeit in den Ausgangstest lag in diesen Studien jedoch nicht vor (Delextrat et al., 2013; Wahl et al., 2013; Sperlich et al., 2010; Faude et al., 2008). Ein wichtiges Kriterium zur Diagnose eines Overreachings (funktionalen oder nicht funktional) oder gar eines Übertrainingssyndrom ist damit nicht erreicht.

Doch die Frage nach der Belastungsgrenze für HIIT im Training mit Kindern und Jugendlichen bleibt leider weiterhin unbeantwortet. Daher sollte die systematische Erfassung von psychischen und physischen Überlastungsparametern

dringend in zukünftigen HIIT-Interventionsstudien mit Kindern und Jugendlichen integriert werden.

Da die Diagnose von Überlastungszuständen nicht ohne weiteres möglich ist, sollte die Gesamtbelastung im Training mit Kindern und Jugendlichen stets an das individuelle Leistungsniveau der Teilnehmer angepasst sein und bei einer zusätzlichen Anwendung von HIIT sollte der Gesamttrainingsumfang berücksichtigt werden. Darüber hinaus sind in diesem Zusammenhang die Leitlinien der American Academy Of Pediatrics zur allgemeinen Prävention von Schäden durch Überlastung sowie Übertrainingszuständen im Nachwuchstraining (American Academy of Pediatrics, 2000; Brenner et al., 2007) zu berücksichtigen, die auch auf das HIIT im Nachwuchstraining anwendbar sind. Für eine detaillierte Auflistung der Leitlinien der American Academy Of Pediatrics siehe Kapitel 4.

Fazit: Die Muskulatur von Kindern scheint insgesamt weniger anfällig gegenüber intensiven Belastungen zu sein. So zeigten Kinder nach intensiven exzentrischen Belastungen (Bergablaufen, Krafttraining) geringere CK-Werte und weniger Ermüdungserscheinungen in den Tagen nach den Belastungen als Erwachsene.

Allerdings weist der Nachwuchsleistungssport eine hohe Prävalenz von Übertraining auf. Daher sollte die systematische Erfassung von psychischen und physischen Be- und Überlastungsparametern dringend in zukünftigen HIIT-Interventionsstudien mit Kindern und Jugendlichen integriert werden. Darüber hinaus sollte die Gesamtbelastung im Training mit Kindern und Jugendlichen stets an das individuelle Leistungsniveau der Teilnehmer angepasst sein und die Leitlinien der American Academy Of Pediatrics zur allgemeinen Prävention von Schäden durch Überlastung sowie Übertrainingszuständen im Nachwuchstraining (American Academy of Pediatrics, 2000; Brenner et al., 2007) sollten berücksichtigt werden.

3.6 Gesundheitliche Effekte von HIIT

Die Effekte von HIIT auf gesunde Kinder und Jugendliche (Nachwuchsleistungssportler sowie untrainierte Kinder und Jugendliche) wurde in dem Kapitel 3.2 ausführlich dargestellt. Die hohen Intensitäten mit denen im HIIT gearbeitet wird, lassen eine primäre Anwendung von HIIT mit Athleten und untrainierten aber gesunden Individuen erwarten. Doch auch im Bereich der Prävention und Rehabilitation durch Sport ist HIIT mittlerweile relevant (Wahl et al., 2010). In zahlreichen Studien im Erwachsenenbereich konnte mit Patienten unterschiedlicher Krankheitsbilder mittels HIIT-Interventionen Verbesserungen der körperlichen Leistungsfähigkeit (Verbesserung der maximalen Sauerstoffaufnahme) und eine Verbesserung der Krankheitsbilder erreicht werden (Tjonna et al., 2008; Amundsen et al., 2008; O'Donovan et al., 2005; für ausführliches Review siehe Wahl et al., 2010). Neben den positiven gesundheitlichen Effekten betonen die Autoren, ähnlich wie beim HIIT mit anderen Zielgruppen, den Zeitaspekt der HIIT Interventionen (Wahl et al., 2013; Gibala & Little, 2010; Gibala & McGee, 2008). Die HIIT-Interventionen erreichen mit geringerem zeitlichen Trainingsaufwand vergleichbare und teilweise größere Trainingseffekte als das bisher primär in der Rehabilitation verwendete klassische Ausdauertraining bei moderaten Intensitäten (Wahl et al., 2010; Gibala & Little, 2010; Gibala & McGee, 2008). Aufgrund des geringen zeitlichen Aufwandes von HIIT empfehlen Wahl et al. (2010) das HIIT auch für die Prävention und die Rehabilitation durch Sport, da als eine der Hauptursachen für mangelhafte körperliche Aktivität das „Fehlen von Zeit“ angegeben wird (Booth, Baumann, Owen & Gore, 1997). Allerdings weisen Wahl et al. (2010) darauf hin, dass das HIIT noch mit gängigen Richtlinien und Empfehlungen zum Umfang und zur Intensität von Sport zur Prävention und Rehabilitation in Konflikt steht, bzw. dort keine Empfehlungen zum HIIT vermerkt sind. In der Rehabilitation mit Sport wurde bisher mehrheitlich aufgrund von befürchteten Überlastungsschäden mit niedrigen Intensitäten zwischen 50% und 60% der VO_{2max} trainiert (Swain & Franklin, 2002). Das American College of Sports Medicine und die American Heart Association empfehlen moderate bis mittelintensive aerobe Belastungen von 20 bis 30 Minuten Dauer (Haskell, Lee, Pate, Powell, Blair, Franklin et al., 2007).

Auch die European Society of Cardiology und die European Association for the Study of Diabetes empfehlen Krafttraining und aerobes Ausdauertraining im Umfang von ≥ 150 Minuten pro Woche zur Prävention und Behandlung von Diabetes und kardiovaskulären Risikofaktoren (Ryden, Grant, Anker, Berne, Cosentino, Danchin, et al., 2013). Angaben zur Wirksamkeit von intensiven Belastungen werden nicht gemacht.

Eine Ausnahme ist der aktuelle Reviewartikel von Gloeckl, Marinov & Pitta (2013) zur Sporttherapie von Asthmapatienten. In den praktischen Empfehlungen für die Sporttherapie mit Patienten der Chronisch Obstruktiven Lungenerkrankung (COPD) ist das (intensive) Intervalltraining empfohlen, da es muskulär starke Reize setzen kann, das kardiorespirative System aber aufgrund der im Intervalltraining vorgesehenen Pausen nicht überfordert (Gloeckl et al., 2013). Darüber hinaus ergibt die Metaanalyse von Bauchamp, Nonoyama, Goldstein, Hill, Dolmage, Mathur & Brooks (2010) beim Vergleich von intensivem Intervalltraining und aerobem Ausdauertraining in der Sporttherapie mit COPD Patienten für beide Trainingsmethoden ähnlich gute Anpassungserscheinungen. Beide Trainingsmethoden resultieren in einer Reduzierung der Symptome und es erfolgt eine damit verbundene Steigerung der Lebensqualität.

In der Sporttherapie mit Kindern und Jugendlichen wird das HIIT ebenfalls noch relativ wenig angewendet und die Literaturlage ist noch sehr übersichtlich und auf die Krankheitsbilder Übergewicht und Asthma beschränkt. Einige wenige Forschungsergebnisse geben Hinweise, dass das HIIT eine positive Wirkung auf die Gesundheit und die Reduzierung von kardiovaskulären Risikofaktoren bei übergewichtigen Kindern hat (Tjønnå et al., 2009; Corte de Araujo et al., 2012; siehe Tabelle 5).

Tab 6. Literaturübersicht zu Interventionsstudien mit Hochintensivem Intervalltraining mit jungen Patienten unterschiedlicher Krankheitsbilder.

Autoren	Kontrollgruppe	n/Krankheitsbild/ Alter [Jahre]	Initiale $VO_{2peak/max}$ [$ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$]	Intensität	Anzahl & Dauer Inter- valle	Dauer & In- tensität Erholung	An- zahl Ein- hei- ten [n]	Interventi- onsdauer	Post $VO_{2peak/max}$ [$ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$]	Prozentu- ale Ver- änderung $VO_{2peak/max}$ [%]	Resultate
Tjønnå et al., (2009)	ja	54/Übergewicht/14	32,3 ± 5,8	90% HF_{max}	4 x 4 min	3 min 70%, HF_{max}	24	12 Wochen	35,3 ± 0,8	9,6	↑ VO_{2max} ↓ KV- Risikofaktoren, ↑ Endothelfunktion (6%)
			32,3 ± 4,8	Multidisziplinärer Ansatz (Sport, Diät, Beratung)	k. A.	k. A.	24	12 Wochen	31,9 ± 1,0	-1,2	↔ VO_{2max} ↔ KV- Risikofaktoren, ↑ Endothelfunktion (1%)
Gutin et al. (2002)	ja	80/Übergewicht/14	k. A.	Beratung und Sport (75-85% VO_{2peak})	k. A.	k. A.	160	8 Monate	k. A.	k. A.	↑ VO_{2max} ↔ Körperfett ↔ Viszeralfett
			k. A.	Beratung und Sport (55-60% VO_{2peak})	k. A.	k. A.	160	8 Monate	k. A.	k. A.	↔ VO_{2max} ↔ Körperfett ↔ Viszeralfett
			k. A.	Nur Beratung	-	-	k. A.	8 Monate	k. A.	k. A.	↔ VO_{2max} ↔ Körperfett ↔ Viszeralfett
Buchan et al. (2013)	ja	89/Übergewicht/17	-	100%	4-6 x 30 s	30 s	21	7 Wochen	-	-	↑ KRL ↑ Sprungleistung ↑ 10 m Sprint ↓ RR ↑ LDL ↔ Risikofaktoren

3.6 Gesundheitliche Effekte von HIIT

			-	Nur Beratung	-	-	7	7 Wochen	-	-	↔ KRL ↑ KG ↑ LDL ↑ Cholesterin ↔ Risikofaktoren ↓ Sprungleistung
Corte de Araujo et al. (2012)	ja	30/Übergewicht /10	k. A.	100% vStufentest _{max}	3-6 x 60 s	3 min, 50% vStufentest _{max}	24	12 Wochen	k. A.	14,6	↑ abs./rel. VO ₂ _{peak} ↑ vStufentest _{max} ↓ KG ↓ BMI ↓ RR ↑ Glukosemetabolismus
			k. A.	80% HF _{peak}	30-60 min DM		24	12 Woche	k. A.	13,1	↑ abs./rel. VO ₂ _{peak} ↑ vStufentest _{max} ↔ KG ↓ BMI ↔ RR ↑ Glukosemetabolismus
Counil et al. (2003)	ja	14/Asthma/13	51,9 ± 1,6	MAP	10-11 x 1 min	3 min, aktiv	18	6 Wochen	61,4 ± 1,1	18%	↑ VO ₂ _{max} ↔ Lungenfunktion ↑ HF _{max} ↑ MAP (+32%) ↑ PP (+21%)
			50,8 ± 1,8	Kein Training	-	-	-	6 Wochen	55,4 ± 2,3	9%	↔ VO ₂ _{max} ↔ Lungenfunktion ↔ HF _{max} ↔ MAP (+12%) ↔ PP (+8%)

3.6 Gesundheitliche Effekte von HIIT

Varray et al. (1991)	ja	14/Asthma/11	ca. 48	100% (± 5%) HF _{max}	2 x 6 x 25 m Kraulschwimmen	vollständige Erholung nach 6. 25er, passiv; sonst immer 1 min, passiv	24	12 Wochen	ca. 47	-2,1	↔ VO _{2max} ↔ VT ↑ HF _{max} ↓ Atemfrequenz ↔ Anzahl der Asthmaattacken ↓ Stärke der Asthmaattacken ↓ Ängstlichkeit
			ca. 40	vVT 1	1 Std DM	-	24	12 Wochen	ca. 48	20	↑ VO _{2max} ↑ Kardiovaskuläre Fitness ↑ VT ↑ HF _{max} ↓ Atemfrequenz ↔ Anzahl der Asthmaattacken ↓ Stärke der Asthmaattacken ↓ Ängstlichkeit
			ca. 37,5	Kein Training	-	-	-	12 Wochen	ca. 41	9,3	k. A.

↑—signifikanter Anstieg. ↓—signifikante Abfall. ↔—keine signifikante Veränderung. VO_{2max}—maximale Sauerstoffaufnahme.

KRL—Kardiorespiratorische Leistung. KV-Risikofaktoren—Kardiovaskuläre Risikofaktoren. RR—Blutdruck. LDL—Low Density Lipoprotein. KG—Körpergewicht. DM—Dauermethode. vStufentest_{max}—höchste im Stufentest erreichte Geschwindigkeit. MAP—Maximal Aerobic Power. vVT 1—Geschwindigkeit der ersten ventilatorischen Schwelle.

Die in Tabelle 5 dargestellten Studien die HIIT mit niedrigintensivem Training vergleichen, zeigten bessere Anpassungserscheinungen durch das HIIT. Das HIIT hatte bei den übergewichtigen Kindern eine höhere Steigerung der maximalen Sauerstoffaufnahme, bzw. der kardiovaskulären Leistungsfähigkeit (Tjønnå et al., 2009; Gutin et al., 2002; Buchan et al., 2013) und eine bessere Reduzierung der kardiovaskulären Risikofaktoren (Tjønnå et al., 2009; Corte de Araujo et al., 2012) zur Folge. Eine Reduzierung des Körperfettgehaltes und des Körpergewichtes der übergewichtigen Kinder mittels HIIT konnte nur die HIIT-Interventionsstudie von Corte de Araujo et al. (2012) erreichen.

Bei asthmakranken Kindern konnte das HIIT ebenfalls erfolgreich angewendet werden (Counil et al., 2003; Varray et al., 1991). In der Studie von Counil et al. (2003) konnte mittels HIIT die maximale Sauerstoffaufnahme und die anaerobe Leistungsfähigkeit effektiv verbessert werden. Die Studie von Varray et al. (1991) mit asthmakranken Kindern konnten mittels HIIT, im Gegensatz zum aeroben Ausdauertraining, zwar positive Effekte auf die Stärke der Asthmaanfälle der jungen Patienten erreichen, jedoch wurden keine signifikanten kardiopulmonalen Effekte nach der HIIT Intervention gemessen. Sicherlich ist dies im Studiendesign begründet, da die Probanden erst drei Monate mit aerobem Ausdauertraining trainierten und dann unmittelbar im Anschluss an diese drei Monate noch weitere drei Monate HIIT trainierten. Nach der dreimonatigen Trainingsphase mit dem Ausdauertraining war die Leistungsfähigkeit der Probanden bereits so hoch, dass keine weiteren kardiopulmonalen Anpassungen durch das HIIT mehr erreicht wurden.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass das HIIT auch in der Prävention und Rehabilitation mit Kindern eingesetzt werden kann und das HIIT einen positiven gesundheitlichen Effekt aufweist. Doch bisher konnten nur Studien identifiziert werden die HIIT bei übergewichtigen Kindern und bei jungen Asthmapatienten durchführten. Die beobachteten Parameter beschränkten sich bisher auf die Sauerstoffaufnahme, Risikofaktoren für Herz-Kreislaufkrankungen, die anaerobe Leistungsfähigkeit, das Körpergewicht und die Körperzusammensetzung sowie auf die Stärke und Häufigkeit von Asthmaattacken. Hinweise auf die Wirkung von HIIT auf weitere Krankheitsbilder und auf Knochendichte oder auf die Psyche sind bisher nicht vorhanden und würden weitere wertvolle Anhaltspunkte für den Einsatz von HIIT in der Sporttherapie mit Kindern liefern.

Fazit: Im Bereich der Prävention und Rehabilitation durch Sport ist HIIT mittlerweile relevant (Wahl et al., 2010). In einigen Studien konnte mit Patienten im Alter von 10 bis 17 Jahren unterschiedlicher Krankheitsbilder mittels HIIT-Interventionen Verbesserungen der körperlichen Leistungsfähigkeit und eine Verbesserung der Krankheitsbilder erreicht werden (siehe Tabelle 5). Neben den positiven gesundheitlichen Effekten betonen die Autoren, ähnlich wie beim HIIT mit anderen Zielgruppen, den Zeitaspekt der HIIT Interventionen (Wahl et al., 2013; Gibala & Little, 2010; Gibala & McGee, 2008). Die HIIT-Interventionen erreichen mit geringerem zeitlichen Trainingsaufwand vergleichbare und teilweise größere Trainingseffekte als das bisher primär in der Rehabilitation verwendete klassische Ausdauertraining bei moderaten Intensitäten (Wahl et al., 2010; Gibala & Little, 2010; Gibala & McGee, 2008).

4 Anaerobe Testverfahren

Die aerobe Leistungsfähigkeit und das Verhalten physiologischer Parameter von Kindern und Jugendlichen während aerober Ausdauerbelastungen sind gut erforscht. Im Gegensatz dazu ist die anaerobe Ausdauer von Kindern und Jugendlichen in der Wissenschaft wesentlich weniger präsent, sodass viele Fragen um diesen Themenkomplex unbeantwortet bleiben (Van Praagh & Doré, 2002; Van Praagh, 2007, Heck & Schulz, 2002). Dieser Sachverhalt ist erstaunlich, da das Bewegungsverhalten in der Kindheit eher von intensivem anaeroben als aeroben Charakter ist (Bailey et al., 1995) und Kinder sich eher zu Sportarten mit intensivem Intervallcharakter hingezogen fühlen wie Fußball oder Basketball als zu Langzeitausdauerdisziplinen (Van Praagh, 2007). Doch die seltene wissenschaftliche Auseinandersetzung mit anaerober Ausdauer in der Kindheit („selten“ soll hier im Gegensatz zur Häufigkeit der Auseinandersetzung mit der aeroben Ausdauer verstanden werden) hat wahrscheinlich folgende Gründe: Zum einen wird die anaerobe Ausdauer als weniger relevant für Entwicklung und Gesundheit von Kindern und Jugendlichen angesehen (Van Praagh, 2007). Bewegungsempfehlungen zur Gesundheitsförderung und Prävention lebensstilbedingter Erkrankungen im Kindes- und Jugendalter beinhalten primär aerobe Aktivität und Sport von hohem Umfang bei mittlerer bis hoher Intensität, Hochintensive Belastungen werden nicht thematisiert (Graf, Beneke, Bloch, Bucksch, Dordel, Elsner et al., 2013; Ministry of Education, 2011; WHO, 2010). Die anaerobe Ausdauer wird eher als relevant für leistungssportliche als für gesundheitliche Aspekte angesehen (Van Praagh, 2007). Zum anderen ist die direkte Analyse der anaeroben Kapazität und der anaeroben Stoffwechselprozesse bei Kindern ethisch und methodologisch schwierig. Alle für die Stoffwechselprozesse benötigten Substrate befinden sich direkt in der Muskelzelle und sind dort nur entweder durch invasive oder aufwendige Verfahren (Muskelbiopsie oder Magnetresonanztomographie) analysierbar (Heck & Schulz, 2002). Das Messen von Zwischen- und Endprodukten des Stoffwechsels wie Laktat im peripheren Blut oder das Messen von Output (mechanische Kraft oder zurückgelegte Strecke) bei anaeroben Testverfahren ist eine indirekte An-

näherung an die komplexe Dynamik der anaeroben Akkumulations-, Diffusions- und Eliminationsprozesse (Heck & Schulz, 2002).

Die genauen Stoffwechselprozesse und die Gründe für die geringere anaerobe Leistung von Kindern gegenüber Erwachsenen ist somit direkt nur schwer zu erörtern (Van Praagh & Doré, 2002). Dadurch haben sich Wissenschaftler bisher anstatt auf das „*warum*“ eher auf das „*wie viel*“ konzentriert, soll heißen auf das Messen der Muskelkraft im Kurzzeitausdauerbereich (STMP: Short-term muscle power) mit Hilfe von standardisierten Tests. Verschiedene Protokolle wie beispielsweise kurze Tests auf dem Fahrradergometer, Vertikale Sprungtests oder Lauffests werden eingesetzt um die anaerobe Leistungsfähigkeit von Kindern und Erwachsenen standardisiert zu messen, wobei die Tests auf dem Fahrradergometer die am meisten verbreiteten sind (Van Praagh & Doré, 2002). Im Folgenden findet sich eine Übersicht über gängige anaerobe Testverfahren.

4.1 Wingate Anaerobic Test (WAnT)

Der WAnT ist ein 30-sekündiger Maximaltest auf dem Fahrradergometer und misst die maximal geleistete mechanische Kraft (Peak Power), die durchschnittliche mechanische Kraft (Mean Power) sowie die Ermüdung (Rückgang der Kraft = Fatigue Index) während des 30-sekündigen Maximaltests. Der WAnT weist eine hohe Standardisierung auf, Testmanual, umfangreiche Normwerte für verschiedene Populationen (Im Alter von 8 bis 45 Jahren), Testgütekriterien und weitergehende Informationen siehe Inbar, Bar-Or & Skinner (1996). Der WAnT wurde in den 1970er Jahre am Wingate Institut in Israel entwickelt und ist das am besten untersuchte und am weitesten verbreitete anaerobe Testverfahren (Van Praagh, 2007). Der WAnT ist sehr reliabel bei Kindern ab fünf Jahren sowie für Jugendliche, Erwachsene und Senioren (Test-Retest Relibilität zwischen $r = 0.89$ und $r = 0.99$) (Inbar, Bar-Or & Skinner, 1996). Darüber hinaus verfügt der WAnT über eine hohe Validität, die Leistungen in intensiven anaeroben Feldtests und dem WAnT weisen hohe bis sehr hohe Korrelationen auf (Inbar, Bar-Or & Skinner, 1996). Die Energiebereitstellung im WAnT auf dem Fahrradergometer erfolgt zu 81,4% anaerob und zu 18,6% aerob (Beneke et al., 2002) und auf dem Handkurbelergometer zu 88,6% anaerob und zu 11,4% ae-

rob (Lovell, Kerr, Wiegand, Solomon, Harvey & McLellan, 2013). Die gute Praktikabilität und Testökonomie des WAnT spiegeln sich in der hohen Anwendung des WAnT in der wissenschaftlichen Literatur wieder. Der WAnT wird in der Mehrzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen die sich mit HIIT und/oder mit der anaeroben Leistungsfähigkeit befassen entweder als Trainingsmethode oder zur Eingangs- und Ausgangsdiagnostik eingesetzt. Ein Nachteil des WAnT ist der hohe apparative Aufwand, da ein Fahrradergometer benötigt wird. Der WAnT wird heute zumeist im Isokinetikmodus durchgeführt (d. h. die Kraft wird mit Kraftaufnehmern je nach System direkt an den Pedalen, Kurbeln oder im Tretlager gemessen) und ist somit unabhängig vom optimalen Bremswiderstand und der Trittfrequenz bzw. den Pedalumdrehungen.

4.2 Force-Velocity Cycling Test

Der Force-Velocity Cycling Test besteht aus fünf bis acht kurzen Sprints auf dem Fahrradergometer von jeweils 5 bis 7 Sekunden Dauer. Jeder Sprint wird gegen einen anderen Bremswiderstand durchgeführt, da die mechanische Kraft die beim Treten gegen den Widerstand erzeugt wird vom Bremswiderstand abhängt. Da der Bremswiderstand bei dem die tatsächliche höchste mechanische Kraft (Peak Power) erzeugt werden kann individuell unterschiedlich sein kann, wird der Test mit verschiedenen Widerständen absolviert. Gerade bei Kindern kann der optimale Widerstand stark variieren. Der größte Vorteil ist, dass der Test mit großer Wahrscheinlichkeit die tatsächliche Peak Power von jedem Probanden ermitteln kann und sich somit gut für Kinder eignet. Der größte Nachteil des Force-Velocity Cycling Tests ist die lange Zeitdauer, ca. 45 Minuten, die der Test durch die erforderlichen Pausen zwischen den einzelnen Sprints dauert (Malina et al., 2004) und wie beim WAnT der hohe apparative Aufwand und die Abhängigkeit von einem Labor.

4.3 Quebec 10-Sekunden und 90-Sekunden Test

Der Quebec 10-Second Test ist ein Maximaltest auf dem Fahrradergometer über 10 Sekunden. Wie beim WAnT wird hier die gesamte Leistung in den zehn Sekunden in Watt gemessen. Der Test ist geeignet für Kinder ab neun

Jahren aufwärts. Die Bremskraft des Fahrradergometers ist auf 0,09 kp/kg Körpergewicht festgelegt. Die Test-Retest Reliabilität für Männer und Frauen beträgt $r = 0,95$ (Simoneau, Lortie, Boulay & Bouchard, 1983). Ähnlich wie der 10-Sekunden Test besteht der Quebec 90-Sekunden Test aus einem 90-sekündigen Testversuch welcher ebenfalls mit maximaler Intensität absolviert werden muss. Der Test eignet sich für Kinder ab zehn Jahren aufwärts und die Bremskraft des Fahrradergometers ist auf nur 0,05 kp/kg Körpergewicht festgelegt. Die Reproduzierbarkeit der Testergebnisse innerhalb von sieben Tagen ist mit einem Intraklassen-Korrelationskoeffizient von $r = 0,96$ sehr hoch (Simoneau et al., 1983). Die beiden Quebec Tests haben den Vorteil, dass sie die anaerobe Leistung über kurzzeitige und langzeitige Belastungen testen (Malina et al., 2004). Ein Nachteil hier ist der hohe materielle Testaufwand.

4.4 Margaria Step-Running Test

Der Treppenlaufstest von Margaria et al. (1966) ist einer der ältesten standardisierten anaeroben Testverfahren und erfasst die benötigte Zeit beim Treppenlaufen über 12 Stufen und einer vor den Treppenstufen zu absolvierenden Beschleunigungsstrecke von 6 Metern im Flachen. Über eine Formel wird die anaerob erbrachte mechanische Leistung in Watt berechnet (Margaria et al., 1966). Der Margaria Treppenlaufstest eignet sich laut Margaria et al. (1966) für Kinder wie für Erwachsene, ein weiterer Vorteil ist die gute Testökonomie durch den geringen Materialaufwand. Der Test kann als Feldtest unabhängig von einem Leistungsdiagnostiklabor durchgeführt werden und ist somit auch in der Schule oder im Verein einsetzbar. Nachteile des Tests sind die Tatsachen, dass es sich beim Treppenlaufen um eine komplexe Fertigkeit handelt und nicht nur um eine Fähigkeit. Darüber hinaus muss, aufgrund des komplexen Ablaufs des Margaria Treppenlaufstests, die Testpersonen die Testprozedur mehrere Male trainieren bis der Ablauf einwandfrei funktioniert. Nachteilig ist auch, dass beim Treppenlaufen viele Muskelgruppen beteiligt sind, denn die anaerobe Leistungsfähigkeit ist die lokale Fähigkeit eines Muskels oder einer Muskelgruppe und das Treppenlaufen ist eher eine Fertigkeit (Malina et al., 2004).

4.5 Vertical Jump—Sargent Test

Der Sargent Test wurde 1921 entwickelt und war der erste standardisierte Test der reliable und valide Informationen zur Maximalkraft bei Kindern und Erwachsenen lieferte (Malina et al., 2004). Der Sargent Test ist vom Ablauf her identisch mit dem Jump and Reach Test, mit dem Unterschied, dass die erreichte Netto Sprunghöhe (Sprunghöhe minus Reichhöhe) mit dem Körpergewicht multipliziert wird, was die Kraft ergibt die beim Absprung erzeugt wurde. Die Testperson springt aus dem Stand mit Ausholbewegung des Oberkörpers und der Arme so hoch wie möglich und berührt an der höchsten Stelle des Sprunges mit den Fingerspitzen des ausgestreckten Arms die Wand. Die Reichhöhe, die Körpergröße bei nach oben ausgestreckten Armen und Fingern, wird von der Sprunghöhe abgezogen. Durch den geringen Material- und Zeitbedarf weist der Test eine gute Testökonomie auf (Malina et al., 2004).

4.6 Laufbandtests

Als Test für die anaerob-laktazide Ausdauer wurden Sprintleistungen auf dem Laufband verwendet (Paterson, Cunningham & Bumstead, 1986). Die mechanische Leistung wurde dabei basierend auf dem Körpergewicht, der Laufgeschwindigkeit und der Steigung des Laufbands berechnet (Paterson et al., 1986). Allerdings wird diese Art von Test nur selten verwendet und ist bisher noch nicht validiert (Malina et al., 2004). Der Test wurde mit Kindern und Erwachsenen durchgeführt und die anaerobe Leistung aus diesem Sprinttest wird als anaerobe „Ganzkörperkapazität“ verstanden (Paterson et al., 1986). Hier zeigt sich wie beim Margaria Treppenlaufstest das Problem das bei dem Laufbandsprintest viele Muskelgruppen beteiligt sind und keine Rückschlüsse auf die lokale anaerobe Leistungsfähigkeit erlaubt. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Test-Retest-Reliabilität (trainierte 10-jährige Jungen: $r = 0,76$; trainierte 15-jährige Jungen: $r = 0,84$). Die hauptsächliche Einschränkung für Sprintests auf dem Laufband ist die Tatsache das oft keine Ausbelastung auf dem Laufband erfolgt aus Angst zu stürzen oder die Geschwindigkeit des Laufbandes nicht halten zu können, was wahrscheinlich auch die geringe Test-Retest-Reliabilität erklärt (Malina et al., 2004). Darüber hinaus macht die geringere Laufökonomie und die höhere Co-Kontraktion von unbeteiligten Muskeln und

Antagonisten während des Laufens bei Kindern gegenüber Jugendliche und Erwachsenen (Frost, Dowling, Dyson & Bar-Or, 1997) einen Vergleich der Testergebnisse mit Erwachsenen nur schwer möglich. Die Testökonomie ist diesem Test als gering einzustufen, da ein Laufband benötigt wird.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der WAnT als ein wesentlicher Test verwendet. Die Gründe für die Verwendung des WAnT waren vor allem die hohe Test-Retest Reliabilität und die hohe Validität sowie die akzeptable Testökonomie. Ein weiterer entscheidender Vorteil in der Verwendung des WAnT ist die gute Dokumentation des Verlaufes der Leistung im WAnT. So kann die höchste, die niedrigste und die durchschnittliche Leistung sowie die Ermüdung in dem 30-sekündigen Test problemlos ermittelt bzw. berechnet werden. Darüber hinaus ist es auch Vorteilhaft, da es in der vorliegenden Arbeit hauptsächlich um den Vergleich von Kindern und Erwachsenen geht, dass der WAnT das Problem der unterschiedlichen Laufökonomie von Kindern und Erwachsenen (Frost et al., 1997) umgeht.

Fazit: Die dargestellten Testverfahren der anaeroben Ausdauer unterscheiden sich vor allem in der Testökonomie und der Test-Retest-Reliabilität. Die Feldtests Margaria-Stepptest und der Sargent Test verfügen über eine gute Testökonomie, doch ist die anaerobe Leistung in den beiden Tests zu sehr von der motorischen Fähigkeit Koordination beeinflusst und es sind zu vielen Muskelgruppen involviert, sodass er die lokale anaerobe Ausdauer analysieren könnte. WAnT, Force-Velocity-Test und die beiden Quebec Tests haben durch den hohen apparativen Aufwand, eine geringe Testökonomie, erzielen aber valide und reliable Ergebnisse. Durch die gute Validität und Reliabilität und die bessere Testökonomie gegenüber den anderen Fahrradergometertests und dem Laufbandtest ist der WAnT den übrigen Tests vorzuziehen. Darüber hinaus verfügt

der WAnT über umfangreiche Normwerte. Daher ist der WAnT der am häufigsten verwendete anaerobe Test.

Fazit Teil I

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wurden die theoretischen Grundlagen des Hochintensiven Intervalltrainings dargestellt. Demnach entstand das Hochintensive Intervalltraining (HIIT) aus dem Intensiven Intervalltraining, welches bereits in der 1950er Jahren Anwendung fand (Reindell & Roskamm, 1959). Das HIIT zeichnet sich durch sehr hohe Intensitäten (ca. 90-100% der maximalen Laufgeschwindigkeit oder Leistung, Herzfrequenz sowie Sauerstoffaufnahme), den Intervallcharakter und die relativ kurzen Belastungszeiten (6 s bis 8 min) aus (Buchheit, Laursen & Paul, 2013). Das HIIT weist gute Anpassungsercheinungen, auf zellulärer und molekularer Ebene, Leistungsverbesserungen aerober (z. B. Sauerstoffaufnahme) und anaerober (z.B. Sprint und Sprungleistung) Leistungskomponenten sowie eine Verbesserungen der sportartspezifischen Leistung (z. B. Fußballwettbewerb) bei Kindern und Jugendlichen (10 bis 18 Jahre) auf. Besonders vorteilhaft ist der geringe zeitliche Aufwand des HIIT und die effektiven Leistungsverbesserungen die erreicht werden können.

Die Toleranz von Kindern gegenüber Belastungen im HIIT ist allgemein als gut zu beurteilen. Zwar erbringen Kinder relativ und absolut weniger Leistung im HIIT als Erwachsene, dafür ermüden sie langsamer und erholen sich schneller. Die Gründe für die langsamere Ermüdung und schnellere Regeneration der Kinder sind in der unterschiedlichen Anthropometrie sowie in speziellen physiologischen und biologischen Faktoren des kindlichen Organismus begründet (siehe Kapitel 3.4 bis 3.4.11).

An die theoretischen Grundlagen schließen sich die Kapitel fünf bis sieben an. Diese Kapitel beinhalten einen Überblicksartikel und zwei selbst durchgeführte Studien (Studie I & II). Der Überblicksartikel und die zwei einzelnen Studien sind als eigenständige Untersuchungen konzipiert und beinhalten jeweils eine spezielle Forschungsfrage. Der Überblicksartikel beinhaltet eine computerbasierte Literaturrecherche in verschiedenen elektronischen Datenbanken um die Effektivität von (Hoch-)intensivem Intervalltraining im Nachwuchsleistungssport und bei untrainierten gesunden Kindern und Jugendlichen in der wissenschaftlichen Literatur zu analysieren.

Die Studie I analysiert die Speichelcortisolkonzentration und die physiologische Reaktion von trainierten Jungen und trainierten Erwachsenen auf eine Einheit HIIT (4x30 s Sprint) um die hormonelle Reaktion von Kindern mit der von Erwachsenen zu vergleichen. Die Hypothese lautete: Da Kinder andere anthropometrische, biologische und physiologische Verhältnisse aufweisen als Erwachsenen führt eine einzelne Einheit HIIT zu erhöhten Speichelcortisolwerten in beiden Probandengruppen. Aufgrund der unterschiedlichen anthropometrischen, biologischen und physiologischen Verhältnisse der Jungen im Vergleich zu den Männern fällt die hormonelle und physiologische Reaktion der Jungen geringer aus als die Reaktion der trainierten Männer.

Studie II analysiert die Blutlaktatkinetik – die Geschwindigkeitskonstanten der Diffusion des Laktates vom Muskel in den Blutkreislauf und die Beseitigung des Laktates aus dem Blut – nach einer Einheit HIIT (4x30 s Sprints) und einer einzelnen intensiven Belastung (1x30 s) bei trainierten Jungen und trainierten Männern. Die Forschungshypothese der Studie II lautete: Die Blutlaktatkinetik ist bei einer Einheit HIIT und bei einer intensiven Einzelbelastung bei trainierten Jungen schneller als bei trainierten Erwachsenen.

5 Überblicksartikel: (Hoch-)intensives Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen im Nachwuchsleistungssport

5.1 Abstract

Um die Effektivität von (Hoch-)intensivem Intervalltraining (HIIT) im Nachwuchsleistungssport und bei untrainierten gesunden Kindern und Jugendlichen in der wissenschaftlichen Literatur einzuschätzen, wurde eine computerbasierte Literaturrecherche in den elektronischen Datenbanken PubMed, MEDLINE, SPORTDiscus und Web of Science durchgeführt. Studien welche die Auswirkungen von HIIT-Interventionen auf die Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen (9-18 Jahre) anhand von Analysen der motorischen oder leistungsphysiologischen Kenngrößen der Probanden, vor und nach der Trainingsintervention, analysierten wurden berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigten eine Verbesserung aerober und anaerober Leistungsparameter bei einer Anwendung von zwei bis drei Einheiten HIIT pro Woche über einen Zeitraum von fünf bis zehn Wochen, zusätzlich zum normalen Training. Langzeitstudien zu HIIT welche auf langfristige Trainingseffekte hinweisen fehlen. Darüber hinaus wurde aufgrund von physiologischen Besonderheiten während HIIT Protokollen eine verbesserte Ermüdungsresistenz bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen belegt, was als gute Voraussetzung für die Anwendbarkeit von HIIT bei Kindern interpretiert werden kann.

Schlüsselwörter: Hoch intensives Training, Ausdauer, Anpassungserscheinungen, Kinder und Jugendliche, Trainingseffekte

5.2 Einleitung

(Hoch-)intensive Intervalltraining (HIIT) wird in der wissenschaftlichen Literatur seit geraumer Zeit als „neue“ Trainingsmethode zur Verbesserung der submaximalen und maximalen Ausdauerleistungsfähigkeit von erwachsenen Athleten (Laursen, 2010; Sperlich, Hoppe & Hägele, 2013; Laursen & Jenkins, 2002; Buchheit, Laursen & Paul, 2013 Part I, Part II) wie auch im klinischen Setting (Wahl et al., 2010) angewendet. Arbeiten aus den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts (Reindell und Roskamm, 1959) dokumentierten bereits wesentliche Anpassungserscheinungen des Herz-Kreislaufsystems im Zuge von intensivem Intervalltraining, welches zuerst in der Leichtathletik seine Anwendung fand.

Das Spektrum der Intensität, Dauer und Häufigkeit von HIIT ist in der Literatur uneinheitlich und wird meist mit maximalen (ca. 90-100% der maximalen Laufgeschwindigkeit oder Leistung, Herzfrequenz sowie Sauerstoffaufnahme (VO_2)) und supramaximalen (>100%) Intensitäten oder sogenannten „all out“ Belastungen im Intervallprinzip definiert (Buchheit, Laursen & Paul, 2013 Part I, Part II). Die Dauer der einzelnen Intervalle variiert zwischen 6 s und 8 min mit Pausenlängen von 45 Sekunden bis 8 Minuten.

HIIT-Interventionen sind im Nachwuchsleistungssport bei weitem nicht so intensiv erforscht wie bei erwachsenen Athleten oder im klinischen Setting. Neuere HIIT-Studien bei Kindern und Jugendlichen deuten darauf hin, dass die „Grundfitness“, sowie spezielle aerobe und anaerobe Fähigkeiten, insbesondere zeitsparend verbessert werden können und daher HIIT als sinnvolle Trainingsmethode in dieser Altersspanne Anwendung findet (Chamari et al., 2005; Faude et al., 2008; Helgerud et al., 2001; Impellizzeri et al., 2006; McMillan et al., 2005; Sperlich et al., 2010; Sperlich et al., 2011, Breil et al., 2010; Wahl et al. 2013). Lange Zeit ging man davon aus, dass die anaerobe Leistungsfähigkeit im Kindesalter kaum oder gar nicht trainierbar sei (Katch, 1983; Weineck, 2007; Zintl & Eisenhut, 2009). Ursache dafür war u.a. die „Trigger-Hypothese“ von Katch (1983) die besagt, dass vor Beginn der Pubertät intensives Ausdauertraining zu keinen oder keinen lohnenswerten Verbesserungen der anaeroben Kapazität führen würde (Katch, 1983). Als Folge dieser Theorie wurden kontinuierliche, niedrig-intensive Belastungsfor-

men als Ausdauertrainingsmethoden für Kinder und Jugendliche in deutschsprachigen Lehrbüchern zur Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit favorisiert (Weineck, 2007; Zintl & Eisenhut, 2009).

Ziel dieses Übersichtsartikels ist es: 1.) die aktuellen Ergebnisse von HIIT-Studien im Nachwuchsleistungssport zusammen zu fassen, 2.) die Effektivität von HIIT für Kinder und Jugendliche zu analysieren und 3.) anhand der Ergebnisse Kriterien zur Gestaltung von HIIT-Protokollen für den Nachwuchsleistungssport zu erstellen und 4.) Vorschläge zur Periodisierung von HIIT im Nachwuchsleistungssport zu erarbeiten.

5.3 Methodik

Im Juli 2013 wurde eine Literaturrecherche in den elektronischen Datenbanken PubMed, MEDLINE, SPORTDiscus und Web of Science durchgeführt. Die folgenden Schlüsselwörter wurden für die Suche nach relevanten Artikeln verwendet: "High intensity (interval) training", "high intensive (interval) training", "sprint interval training", "interval training", "exercise", "children", "adolescents", "block periodization", "endurance performance", "training". Zusätzlich wurden die Literaturlisten der verwendeten Artikel und von bereits vorher identifizierten Artikeln nach weiteren relevanten Studien durchsucht. Ausgeschlossen wurden Studien mit erkrankten sowie ältere (> 18 Jahre) Probanden (Abbildung 1).

Originalstudien mit "peer-review" Verfahren wurden berücksichtigt, welche HIIT-Interventionen und die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von männlichen oder weiblichen Kindern und Jugendlichen (9-18 Jahre) jeweils vor und nach einer HIIT-Intervention analysierten. Zur Analyse der Trainingseffekte von HIIT auf motorische oder leistungsphysiologische Kenngrößen, wie die aerobe und anaerobe Ausdauerleistungsfähigkeit, Kraftfähigkeiten und die sportartspezifische Leistungsfähigkeit sowie Studien mit und ohne Kontrollgruppen wurden akzeptiert. Studien mit gesunden, nicht übergewichtigen oder adipösen, trainierten und untrainierten Kindern und Jugendlichen wurden ausschließlich einbezogen.

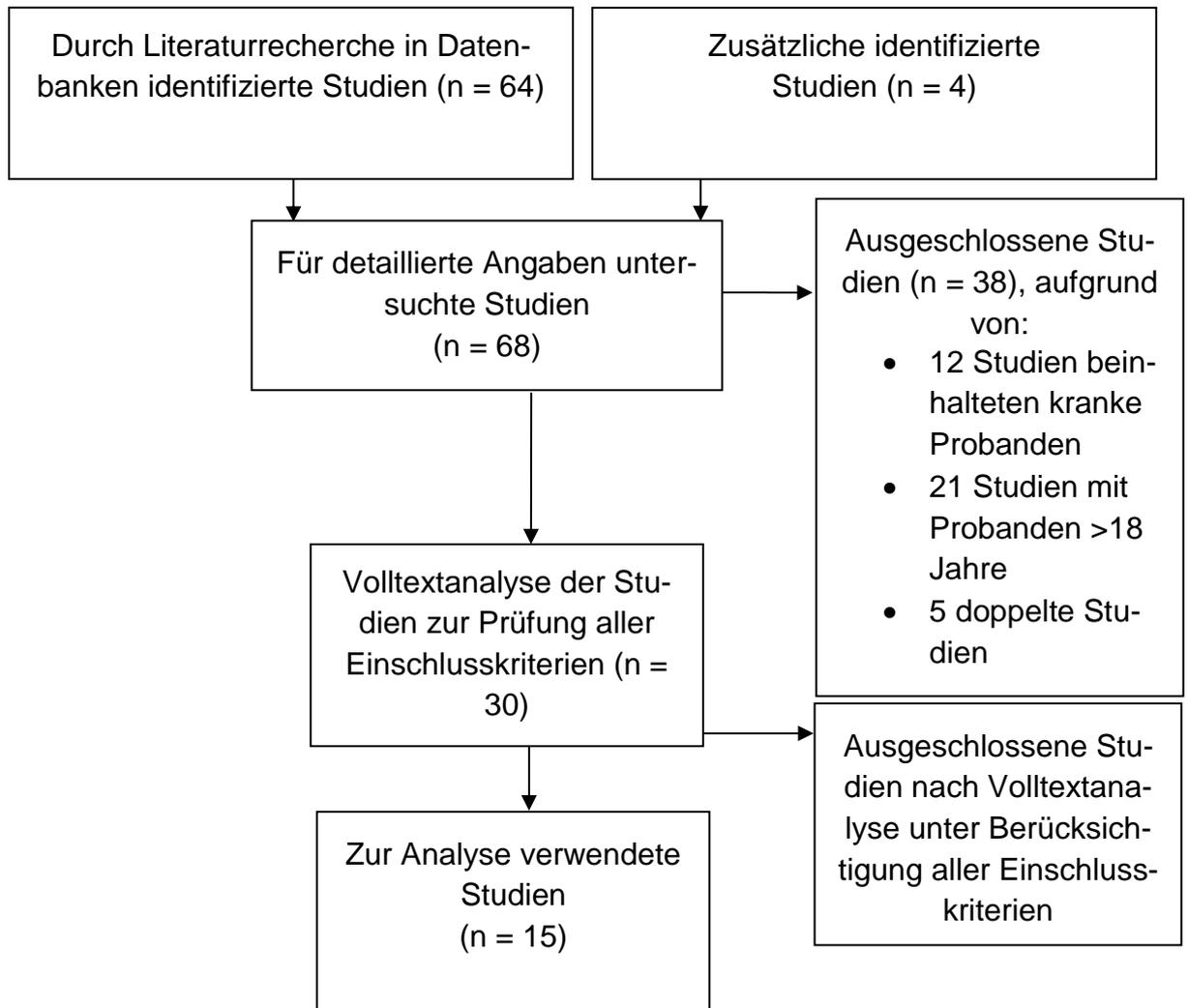


Abb. 1. Flow Diagramm des Auswahlprozesses relevanter Studien.

5.4 Ergebnisse

Von den ursprünglich n=64 identifizierten Studien in den Datenbanken wurden, basierend auf den Ein- und Ausschlusskriterien, letztlich n=15 Studien in diesem Übersichtsartikel analysiert (Abbildung 1).

Charakterisierung der HIIT-Interventionen

Die in Tabelle 1 dargestellten HIIT-Studien analysierten Jungen und Mädchen im Alter von 10 bis 18 Jahren der Sportarten Fußball, Basketball, Handball, Triathlon, Schwimmen und Ski-Alpin (VO_{2max} bzw. VO_{2peak} 39,9 – 65,3 $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) sowie untrainierte (VO_{2max} bzw. VO_{2peak} 43,9 – 46,2 $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) männliche und weibliche Kinder und Jugendliche.

Die Intervalldauer betrug je nach Protokoll zwischen 10 s und 4 min mit jeweils drei bis 40 Wiederholungen. Die Trainingsinterventionen umfassten eine Zeitspanne von vier bis zehn Wochen, mit durchschnittlich zwei bis drei HIIT Trainingseinheiten pro Woche. In zwei Studien absolvierten die Athleten einen Trainingsblock von 11 bzw. 14 Tagen mit jeweils 15 HIIT Trainingseinheiten (Breil et al., 2010; Wahl et al., 2013). Langzeitstudien welche Hinweise auf die Nachhaltigkeit oder auf Langzeiteffekte von HIIT hindeuten sind bisher nicht vorhanden.

Als Trainingsintensitäten wurden in der Literatur hohe bis sehr hohe Belastungsintensitäten gewählt. Am häufigsten wurde die Belastungsintensität von 90-95% der maximalen Herzfrequenz (Wahl et al., 2013; Breil et al., 2010; Chamari et al., 2005; Helgerud et al., 2001; Impellizzeri et al., 2006; McMillan et al., 2005; Sperlich et al., 2011) angegeben. Weitere Studien definieren die Intensität der Intervalle als „all out“ Belastungen (McManus et al., 1997), anhand 90% der persönlichen Bestzeit (Sperlich et al., 2010), 90% der Geschwindigkeit der aeroben Kapazität (Buchheit et al., 2009; Delextrat et al., 2013), sowie mit Intensitäten von 30% oberhalb der individuellen anaeroben Schwelle (Faude et al., 2008) (Tabelle 1). Die Pausengestaltung erfolgt überwiegend aktiv (50-70% HF_{max}) (Sperlich et al., 2011; Breil et al., 2010; Impellizzeri et al., 2006; Chamari et al., 2005; McMillan et al., 2005; Helgerud et al. 2001) und in einigen Studien passiv (Wahl et al., 2013; Baquet et al., 2002; Manus et al., 1997). Die Pausendauer reicht von 10 s bis 3 min. Die Durchführung von HIIT erfolgt teilweise sportartspezifisch, beispielsweise als 4 x 4 min Dribbelparcours mit Ball für

Fußballspieler (McMillan et al., 2005; Chamari et al., 2005) oder als Schwimmtraining für Schwimmer (Sperlich et al., 2010; Faude et al., 2008) und als Schwimm- und Radtraining für Triathleten (Wahl et al., 2013). In einigen Studien erfolgte das HIIT teilweise in einer von der Zielsportart weitgehend unabhängigen Form, wie beispielsweise HIIT auf dem Fahrradergometer für Skifahrer (Breil et al., 2010) oder als Intervallläufe ohne Ball für Fußballer (Sperlich et al., 2011; Helgerud et al., 2001) bzw. Basketballer (Delextrat et al., 2013) und Handballer (Buchheit et al. 2009).

Als Kontrollintervention wurde meist ein submaximales Ausdauertraining (50-85% der HF_{max} oder 85% der Geschwindigkeit der Bestleistung) mit längerer Dauer pro Trainingseinheit (Sperlich et al., 2010; Sperlich et al., 2011; Faude et al., 2008; McManus et al., 1997) oder das normale sportartspezifische Vereinstraining (Breil et al., 2010) durchgeführt. In zwei Studien wurde keinerlei Training mit der Kontrollgruppe absolviert (Baquet et al., 2002; McManus et al., 1997).

Effekte von HIIT auf aerobe und anaerobe Leistungskomponenten

Die meisten Studien zeigen, als wesentlichste Anpassung infolge von HIIT (Tabelle 1), eine signifikante Verbesserung der absoluten und relativen VO_{2max} bzw. VO_{2peak} von durchschnittlich $7,9\% \pm 3,9$ (Range: 1,0% - 11,5%) in 2-10 Wochen (Durchschnitt 6,3 Wochen).

Zwei Studien demonstrierten Leistungsverbesserungen anaerober Komponenten im High Box Jump (Breil et al., 2010) und im Wingate Anaerobic Test (McManus et al., 1997), sowie die Verbesserung von Sprint- und Sprungleistungen (Breil et al., 2010; McMillan et al., 2005; Sperlich et al., 2011). Die komplexe sportartspezifische Leistungsfähigkeit der jungen Sportler verbesserte sich ebenfalls in Folge der HIIT Interventionen. Nach der HIIT Trainingsphase wiesen jugendliche Fußballer im Fußballspiel eine erhöhte absolvierte Distanz, eine höhere Anzahl von Sprints und Ballbesitzen auf und das Fußballspiel konnte in höheren Intensitätsbereichen absolviert werden (Helgerud et al., 2001). Die Fußballer in der Studie von Impellizzeri et al. (2006) wiesen nach dem HIIT im Fußballspiel ebenfalls eine höhere absolvierte Laufstrecke auf, ab-

solvierten mehr hochintensive Aktionen (+18%) während sich die Gehstrecken reduzierten. In der Studie mit jungen Schwimmern bewirkte das HIIT eine signifikante Verbesserung der Schwimmleistung (2000 Meter Test und verbesserte Punktzahl in der Bewertung der 100 Meter Schwimmleistung nach LEN Punktesystem) (Sperlich et al., 2010).

Tab 1. Chronologische Übersicht der Interventionsstudien zu hochintensivem Intervall Training mit Kindern und Jugendlichen.

Autoren	Kontrollgruppe	Anzahl Probanden /Sportart/Alter [Jahre]	Initiale $VO_{2peak/max}$ x $[ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}]$ oder l/min^{-1}	Intensität	Anzahl & Dauer Intervalle	Dauer & Intensität Erholung	Anzahl Einheiten [n]	Interventionsdauer	Post $VO_{2peak/max}$ $[ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}]$ oder l/min^{-1}	Prozentuale Veränderung $VO_{2peak/max}$ [%]	HIIT Resultate
Delextrat et al., (2013)	ja	18/Basketball/16	k. A.	90% $HF_{peak}/95\% V_{IFT}$	8-13 x 15 s	15 s Jogging	12	6 Wochen	-	-	↑ V_{IFT} ↔ RSA
			k. A.	2v2 SSG (90% HF_{peak})	2x(2-3 x 3-4 min)	passiv	12	6 Wochen	-	-	↔ Defensivagilität ↑ Offensivagilität
Wahl et al. (2013)	nein	16/Triathlon/15	57,3 ± 8,5	90-95% HF_{max}	4 x 4 min	3 min, 60% HF_{max} , aktiv oder komplett passiv	15	2 Wochen	57,9 ± 8,6	+ 1,0	↔ VO_{2max}
Sperlich et al. (2011)	ja	19/Fußball/13	55,1 ± 4,9	90-95% HF_{max}	variabel (4-15 x 30 s - 4 min)	1-3 min, 50-60% HF_{max}	13	5 Wochen	58,9 ± 4,7	+ 6,9	↑ T_{1000m} ↑ Sprint ↔ DJ, SJ, CMJ
			55,3 ± 4,3	50-70% HF_{max}	Fahrtspiel und DM (6-30 min)	-			56,4 ± 3,7	+ 2,0	↔ T_{1000m} ↑ Sprint

5 HIIT im Nachwuchsleistungssport

											↔ DJ, SJ, CMJ
Sperlich et al. (2010)	ja	26/Schwimmen/10	39,9 ± 9,1	92% PB	variabel	variabel	24	5 Wochen	44,5 ± 7,4	+ 11,5	↑ Lac _{max} ↑ LEN ↑ T _{2000 m} ↔ T _{100 m} ↔ VT
			39,4 ± 9,7	85% PB	variabel	variabel	24		43,1 ± 6,7	+ 9,4	↓ Lac _{max} ↔ LEN ↔ T _{2000 m} ↔ T _{100 m} ↔ VT
Breil et al. (2010)	ja	22/Ski-Alpin/17	53,0 ± 4,6	90-95% HF _{max}	4 x 4 min	3 min, aktiv	15	11 Tage	56,2 ± 5,1	+ 6,0	↑ VO _{2max} ↑ PPO
			52,9 ± 6,3	normales Training	-	-			54,4 ± 7,0	+ 2,8	↑ VT ↑ High Box Jump
Buchheit et al. (2009)	ja	32/Handball/15	-	95% V _{IFT}	12-24 x 15 s	15 s, passiv	20	10 Wochen	-	-	↔ CMJ ↔ 10m Sprint
			-	SSG	-	-	20	10 Wochen	-	-	↑ RSA ↑ V _{IFT}

Faude et al. (2008)	Ja	10/Schwimmen/16	-	HIT: 30,8% oberhalb IAT	variabel	passiv & aktiv	24	4 Wochen	-	-	↑ IAT ↔ T _{100m} ↔ T _{400m}
			-	VOT: 23,3% oberhalb IAT	variabel	passiv & aktiv			-	-	↑ IAT ↔ T _{100m} ↔ T _{400m}
Impellizzeri et al. (2006)	nein	29/Fußball/17	55,6 ± 3,4	90-95% HF _{max}	4 x 4 min	3 min, 60-70% HF _{max} , aktiv	16	8 Wochen	60,2 ± 3,9	+ 8,3	↑ LT ↑ RE ↑ Laufstrecke im Spiel
Chamari et al. (2005)	nein	18/Fußball/14	65,3 ± 5,0	90-95% HF _{max}	4 x 4 min	3 min, 60-70% HF _{max} , aktiv	16	8 Wochen	70,7 ± 4,3	+ 8,3	↑ Hoff-Test (9,6%) ↑ RE (14%)
McMillan et al. (2005)	nein	11/Fußball/17	63,4 ± 5,6	90-95% HF _{max}	4 x 4 min	3 min, 70% HF _{max} , aktiv	20	10 Wochen	69,8 ± 6,6	+ 10,1	↑ SJ ↑ CMJ
Mc Manus et al. (2005)	ja	35/untrainierte Jungen/10	45,5 ± 3,4	All out	7 x 30 s	2:45 min, aktiv	24	8 Wochen	50,7 ± 3,7	+ 11,4	↑ VO _{2peak} ↑ Sauerstoffpuls
			47,0 ± 6,5	85% HF _{max} /75- 85% VO _{2peak}	20 min DM	-	24	8 Wochen	50,7 ± 6,9	+ 7,9	↑ VO _{2peak} ↔ Sauerstoffpuls

5 HIIT im Nachwuchsleistungssport

			44,7 ± 6,5	Kein Training	-	-	-	8 Wochen	45,4 ± 6,4	+ 1,6	↔ VO _{2peak} ↔ Sauerstoffpuls
Siegler et al. (2003)	ja	34/Fußball/16	-	100%	3-5 x 4-6 Sprints/Sprünge	k. A.	30	10 Wochen	-	-	↑ SRT ↑ T _{20 m} ↑ fettfreie Masse ↓ Körperfett
			-	VOT	k. A.	k. A.	30	10	-	-	↔ SRT ↔ T _{20 m}
Baquet et al. (2002)	ja	53/untrainiert/10	43,9 ± 6,2	100-130% MAS	5-40 x 10-20 s	10 s, 20 s, 3 min, passiv	14 (à 30 min)	7 Wochen	47,5 ± 7,2	+ 8,2	↑ MS
			46,2 ± 8,5	Kein Training	-	-	-		45,3 ± 7,2	- 1,9	↔ VO _{2peak}
Helgerud et al. (2001)	ja	19/Fußball/18	58,1 ± 4,5	90-95% HF _{max}	4 x 4 min	3 min, 50-60%, HF _{max} , aktiv	16	8 Wochen	64,3 ± 3,9	+ 10,7	↑ VO _{2max} ↑ LT ↑ RE ↑ Leistung im Fußballspiel
			58,4 ± 4,3	Techniktraining mit Ball	-	-	16	8 Wochen	59,5 ± 4,4	+ 1,9	↔ VO _{2max} ↔ LT

											↔ RE ↔ Leistung im Fußballspiel
McManus et al. (1997)	ja	30/untrainierte Mädchen/10	1,54 ± 0,2	Maximal	3-6 x 10 s 3-6 x 30 s	30 s, 90 s, passiv	23	8 Wochen	1,67 ± 0,2	+ 8,4	↑ VO _{2max} ↑ PP ↔ MP
			1,30 ± 0,1	80-85% HF _{max}	DM	-			1,43 ± 0,2	+ 10,0	↑ VO _{2max} ↑ PP ↔ MP
			1,49 ± 0,1	Kein Training	-	-			1,46 ± 0,1	+ 2,0	↔ PP ↔ MP

↑—signifikante Verbesserung. ↓—signifikante Verschlechterung. ↔—keine signifikante Veränderung. k. A. – keine Angabe. VO_{2max}—Maximale Sauerstoffaufnahme. VO_{2peak}—höchste gemessene Sauerstoffaufnahme. V_{IFT}—Geschwindigkeit der maximalen aeroben Kapazität (ermittelt im Intermittent Fitness Test). SSG—Small-Sided Game (Spiel auf Kleinfeld). 2v2—zwei gegen zwei. RSA—Repeated Sprint Ability (6x20 m Sprinttest). MAS—Maximal aerobe Geschwindigkeit (2,4 x Laufgeschwindigkeit in der letzten Stufe des Shuttle Run Test). MS—Laufgeschwindigkeit in der letzten Stufe des Shuttle Run Test. HF—Herzfrequenz. SRT—Shuttle Run Test. VT—Ventilatorische Schwelle. LT—Laktatschwelle. RE—Laufökonomie. PB—Persönliche Bestzeit. LEN—Punktesystem zur Beurteilung der Schwimmleistung, orientiert am aktuellen Weltrekord. PP—Peak Power im Wingate Anaerobic Test. MP—Mean Power im Wingate Anaerobic Test. PPO—Peak Power Output im Radergometer-Stufentest. DM—Dauermethode. SJ—Squat Jump. CMJ—Counter Movement Jump. DJ—Drop Jump. MB5—Multiple 5 Bounds Test. RRJ15—Wiederholter Rebound Jump für 15 Sekunden. Lac_{max}—Maximale Laktatbildungsrate. IAT—Individuelle anaerobe Schwelle. T₂₀₀₀—Benötigte Zeit über 2000 m. T₄₀₀—Benötigte Zeit über 400 m. T₁₀₀—Benötigte Zeit über 100 m. T₂₀—Benötigte Zeit über 20 m. P_{max}—Peak Power im Force Velocity Test. VOT—Volumenorientiertes Training (Training mit hohem Umfang und geringer Intensität).

Die zentrale und periphere Ermüdungsresistenz ("Fatigue Resistance") während HIIT bei Kindern und Erwachsenen

Detaillierte Übersichtsarbeiten (Ratel, Duché & Williams 2006; Falk & Dotan, 2006) dokumentieren, dass die körperliche Ermüdung während HIIT bei Kinder- und Jugendlichen im Vergleich zu Erwachsenen verlangsamt ist und gleichzeitig die Regeneration nach HIIT schneller erfolgt (siehe Tabelle 2). Die biologischen Mechanismen erhöhter Ermüdungsresistenz (im internationalen Sprachgebrauch als "Fatigue Resistance" bezeichnet) während HIIT bei Kindern und Jugendlichen sind bisher nicht gänzlich geklärt und wahrscheinlich auf eine Vielzahl von physiologischen, anatomischen und psychologischen Faktoren zurück zu führen.

Zahlreiche Untersuchungen zeigten, dass Kinder gegenüber Jugendlichen und Erwachsenen einen geringeren Rückgang der absoluten sowie auf das Körpergewicht relativierten Leistung im Verlauf von HIIT aufweisen (siehe Tabelle 2). Die Abnahme der dynamischen Muskelkraft während maximal ausgeführter isokinetischer Knieextension ist bei 11 bis 14-jährigen Kindern geringer als bei Jugendlichen und Erwachsenen (Zaferidis et al., 2005; Dipla et al., 2009; Kanehisa et al., 1995; Paraschos et al., 2007) (siehe Tabelle 2). Auch Studien mit sportartspezifischen Testprotokollen auf dem Fahrrad (10 x 10 s Sprint, 2 x 30 s Sprint, 1 x 90 s Sprint)- und mit dem Armkurbelergometer (1 x 30 s) sowie auf dem Laufband (10 x 10 s Sprint) und bei Feldtests im Laufen (10 x 10 s Sprint; 6 x 20 s Sprint) zeigten weniger starke Abnahmen der dynamischen Muskelkraft, bei Kindern gegenüber Jugendlichen und Erwachsenen (siehe Tabelle 2).

Hebestreit et al. (1993) untersuchten die Regeneration von Kindern im Vergleich zu Erwachsenen nach einem Wingate Anaerobic Test. Die 10-jährige Jungen waren in der Lage bereits nach 2 min Regeneration 96,4% ihrer Leistung aus dem ersten 30-sekündigen Maximaltest auf dem Fahrradergometer zu reproduzieren, die erwachsenen Männer benötigten 10 min Regenerationszeit um 94,0% der Leistung aus dem ersten Wingate Anaerobic Test zu erreichen.

Tab. 2. Literaturübersicht zu Studien über altersabhängige Ermüdung (Muscle Fatigue) während Hochintensivem Training (Einzelbelastungen) und Hochintensivem Intervall Training (Intervallbelastungen) bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen (modifiziert nach: Ratel et al., 2006, S. 1036).

Autoren	Probanden/Alter/Geschlecht	Sportart	Protokoll	Indizes	Regenerationsverhalten
Buchheit et al. (2010)	Kinder: 9,6/♂ Jugendliche: 15,2/♂ Erwachsene: 20,4/♂	Fahrradergometer	10 x 10 s; Pause: 5 min	STMP	Kinder = Jugendliche = Erwachsene
Dipla et al. (2009)	Kinder: 11,3/♂ Jugendliche: 14,7/♂ Erwachsene: 24,0/♂ Kinder: 10,9/♀ Jugendliche: 14,4/♀ Erwachsene: 25,2/♀	Isokinetischer Dynamometer	4 x 18 Knieextensionen und Knieflexionen; Pause: 1 min	FR	Jungen > Jugendliche > Männer Mädchen > Jugendliche Mädchen > Frauen Jugendliche = Frauen
Paraschos et al. (2007)	Kinder: 10,5/♂ Erwachsene: 24,3/♂	Isokinetischer Dynamometer	25 x maximale isokinetische Knieextensionen	STMP	Jungen > Männer
Zafeiridis et al. (2005)	Kinder: 11,4/♂ Erwachsene: 24,1/♂	Isokinetischer Dynamometer	4 x 30 s; Pause: 1 min 2 x 60 s; Pause: 2 min	STMP	Jungen > Männer
Ratel et al. (2004)	Kinder: 11,7/♂ Erwachsene: 22,1/♂	Nicht motorisiertes Laufband & Fahrradergometer	10 x 10 s; Pause: 15 s	PP Total Work	Jungen > Männer
Halin et al. (2003)	Kinder: 10,5/♂ Erwachsene: 21,5/♂	Armergometer	1 x 30 s maximale isometrische Ellbogenflexion	FR	Jungen > Männer
Lazaar et al. (2002)	Kinder: 11,0/♂ Erwachsene: 21,3/♂	Laufen	10 x 10 s; Pause: 30 s; 1- und 5 min	Zurück gelegte Strecke	Jungen > Männer
Ratel et al. (2002)	Kinder: 9,6/15,0/♂ Erwachsene: 20,4/♂	Fahrradergometer	10 x 10 s; Pause: 30 s	STMP	Jungen > Männer
Dupont et al. (2000)	Kinder: 11,6/♂ Erwachsene: 18,4/♂	Laufen	6 x 20 s; Pause: 1 min	Zurück gelegte	Jungen > Männer

				Strecke	
Soares et al. (1996)	Kinder: 12,1/♂ Erwachsene: 28,3/♂	Bankdrücken (Arm- und Brustmuskula- tur)	5 x 80% des ORM bis zur Erschöpfung; Pause: 90 s	Anzahl der Wie- derho- lungen	Jungen = Männer
Gaul et al. (1995)	Kinder: 11,4/♂ Erwachsene: 22,6/♂	Fahrradergo- meter	1 x 90 s Sprint	FR	Jungen > Männer
Kanehisa et al. (1995)	Kinder: 14/♂ Erwachsene: 18-25/♂	Isokinetischer Dynamometer	50 x Knieex- tensionen	Höchste aufge- zeichne- te Kraft	Jungen > Männer
Hebestreit et al. (1993)	Kinder: 10,3/♂ Erwachsene: 21,6/♂	Fahrradergo- meter	2 x 30 s; Pau- se: 1-, 2- und 10 min	STMP	Jungen > Männer

♂—männlich. ♀—weiblich. P—Pause. STMP—Short Term Muscle Power (Kurzzeitmuskelkraft).
ORM—One Repetition Maximum (Maximales Gewicht welches einmal gestemmt werden kann).
FR—Fatigue Resistance (Ermüdungswiderstandsfähigkeit). FI—Fatigue Index (Ermüdungsindex im Wingate Anaerobic Test). PP—Peak Power (Höchste mechanische Kraft im Sprint auf dem Fahrradergometer).

Biologische Ursachen der besseren Ermüdungsresistenz von Kindern gegenüber Erwachsenen

Blutlaktatkonzentration: Kinder weisen im Vergleich zu erwachsenen Sportlern geringere absolute Blutlaktatwerte während und nach intensiven Einzel- und Intervallbelastungen auf (Beneke et al., 2005; Falgairette et al., 1991; Ratel et al., 2002; Buchheit et al., 2010). Die geringeren Laktatwerte bei Kindern können durch a) eine geringere Produktion, b) bessere Verteilung innerhalb und zwischen unterschiedlichen Gewebskompartimenten (v.a. Blut, Muskulatur) sowie c) höhere Elimination oder einer Kombination aus a), b), c) zurückzuführen sein.

Eine geringere Laktatproduktion kann auf die insgesamt geringere kindliche Muskelmasse zurückzuführen sein (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006). Hinsichtlich der Laktatelimination von Kindern und Jugendlichen ist die Literaturlage uneinheitlich. Während Beneke et al. (2005) bei präpubertären Jungen eine schnellere Elimination von Blutlaktat nach einer einzelnen intensiven Belastung (Wingate Anaerobic Test) gegenüber Jugendlichen und Erwachsenen

feststellte, konnte Dotan et al. (2003) keine unterschiedlichen Eliminationsraten von Jungen und Männern nachweisen.

Kürzere Kreislaufzeiten aufgrund kürzerer Perfusionsstrecken zwischen Muskelgewebe und Kapillargefäßen bei Kindern (Brooke & Engel, 1969) bedingen prinzipiell einen schnelleren Austausch und Verteilung von Metaboliten und führen insgesamt zu einer geringeren maximalen Laktatkonzentration (Beneke et al., 2005; Hebestreit et al., 1996; Dotan et al., 2003) nach HIIT.

Während HIIT weisen Kinder bei gleichen Laktatkonzentrationen niedrigere und kaum veränderte H^+ -Ionenkonzentrationen als Erwachsene auf (Ratel et al., 2002). Kinder können im Vergleich zu Erwachsenen die Ratio von Blutlaktat zu H^+ über eine höhere Atemfrequenz besser regulieren und somit mehr CO_2 zu Beginn der Belastung abatmen (Ratel et al., 2002). Zudem weist der kindliche Säure-Basen Haushalt im Vergleich zu dem eines Erwachsenen womöglich eine bessere Diffusion von H^+ Ionen zwischen Sarkolemm und Kapillarwänden auf (Hebestreit et al., 1996).

Muskelfaserspektrum, Muskelmasse und Muskelfaserrekrutierung:

Die geringere absolute Laktatkonzentration und Leistungsabgabe mit erhöhter Ermüdungsresistenz bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen kann auf ein unterschiedliches Muskelfaserspektrum zurückzuführen sein. Kinder verfügen über einen höheren Anteil an Typ I Muskelfasern als Erwachsene (Bell et al., 1980; Jansson, 1996; Lexell et al., 1992; Oertel, 1988). Typ I Muskelfasern oxidieren Laktat aufgrund einer hohen Dichte an Monocarboxylat-Transporter 1 (MCT_1 : Protein in der Zellmembran, welches die Diffusion von Laktat und H^+ aus der Muskelzelle katalysiert und ein Übersäuern der Muskelzelle vermeidet), wodurch Laktattransport und -elimination beschleunigt sind (Pilegaard et al., 1999; Juel, 2001). Der hohe Anteil an Type II Muskelfasern im Muskelfaserspektrum bei männlichen Erwachsenen führt zwar zu höheren Spitzenwerten der mechanischen Leistung, aber auch zu einer erhöhten Ermüdung während HIIT (Colliander et al., 1988; Hamada et al., 2003).

Resynthese von Kreatinphosphat: Zur Minimierung des ermüdungsbedingten Abfalls der Leistung während intensiver Muskelarbeit kommt der Biosynthese energieliefernder Prozesse, insbesondere die Resynthese von Krea-

tinphosphat (KP), in den Intervallpausen eine besondere Bedeutung zuteil. Die Wiederauffüllung von KP-Speicher bei Erwachsenen ist eng mit der oxidativen Kapazität verknüpft (Bogdanis, Nevill, Boobis et al., 1996). Je höher die oxidative Kapazität, desto schneller wird KP resynthetisiert was eine erhöhte Ermüdungsresistenz während HIIT erklärt (Bogdanis et al., 1996). Erwachsene weisen im ersten von zehn intensiven Intervallen eine stärkere Entleerung der KP-Speicher auf als neunjährige Kinder (Kappenstein et al., 2013). Kinder (6-12 Jahre) füllen ihre intramuskulären KP-Speicher in der Wade nach einer stufenweise ansteigenden Belastung schneller auf als Erwachsene (Taylor et al., 1997). Als Grund für die schnellere Auffüllung bzw. die langsamere Entleerung der kindlichen KP-Speicher wird vermutet, dass Kinder während HIIT vermehrt oxidative als glykolytische Stoffwechselwege beanspruchen (Falk & Dotan, 2006; Kappenstein et al., 2013, Ratel, 2006).

Sauerstoffaufnahme- und Sauerstoffkinetik: Die meisten Studien zeigen eine signifikante Verbesserung der absoluten und relativen VO_{2max} von durchschnittlich $7,9\% \pm 3,9$ (Range: 1,0% - 11,5%) nach 2-10 Wochen HIIT. Eine gesteigerte VO_{2max} wirkt sich in Ausdauersportarten (Astrand & Rodahl, 1986) sowie in Spisportarten (Helgerud et al., 2001; Hoff et al., 2004) positiv auf die sportspezifische Leistungsfähigkeit aus.

Zu Beginn von HIIT zeigen Kinder ein schnelleres Ansteigen der Sauerstoffaufnahme als Erwachsene (Williams, Carter, Jones & Doust, 2001; Armon, Cooper, Flores, Zanconato & Barstow, 1991; Armon, Cooper & Zanconato, 1991, Freedson, Gilliam, Sady & Katch, 1981). Während sich die initiale Sauerstoffaufnahme bei submaximaler körperlicher Arbeit zwischen Kindern und Erwachsenen nicht unterscheidet, reagiert die Sauerstoffaufnahme bei intensiven Belastungen bei Kindern schneller (Armon et al., 1991; Williams et al., 2001). Die schnellere Anpassung der Sauerstoffaufnahme an einen erhöhten Bedarf bei intensiver körperlicher Arbeit ermöglicht es Kindern im Vergleich zu Erwachsenen länger aerobe Stoffwechselvorgänge zu nutzen und erst zu einem späteren Zeitpunkt die anaerobe Energiebereitstellung vermehrt zu beanspruchen (Williams et al., 2001). Darüber hinaus zeigt sich nach intensiven Belastungen bei Kindern ein schnelleres Regenerationsverhalten in der Sauerstoffaufnahme (Hebestreit et al., 1993; Zanconato, Cooper & Armon, 1991) sowie in

der CO₂ Abgabe und der Atemfrequenz als bei Erwachsenen (Hebestreit et al., 1993; Armon, Cooper & Zanconato, 1991). Die Ursachen für die schnellere Regeneration der Sauerstoffaufnahme liegen wohl in kürzeren Kreislaufzeiten (Cumming, 1978; Ratel, 2006; Falk & Dotan, 2006) und Perfusionsstrecken zwischen Muskelgewebe und Kapillargefäßen (Brooke & Engel, 1969) begründet. Eine weiterer Grund für die schnellere Regeneration der Sauerstoffaufnahme könnte das kleinere Sauerstoffdefizit der Kinder zu Beginn der intensiven Belastung sein, welches eine kleinere Sauerstoffschuld zur Folge hat und somit nach Ende der Belastung die schnellere Rückkehr zu Ruhewerten ermöglicht (Armon, Cooper, Flores, Zanconato, Barstow, 1991).

Basierend auf früheren Arbeiten (Falk und Dothan, 2006) fasst Abbildung 2 eine Vielzahl von potentiellen Faktoren zusammen, die die erhöhte Ermüdungsresistenz von Kindern erklären.

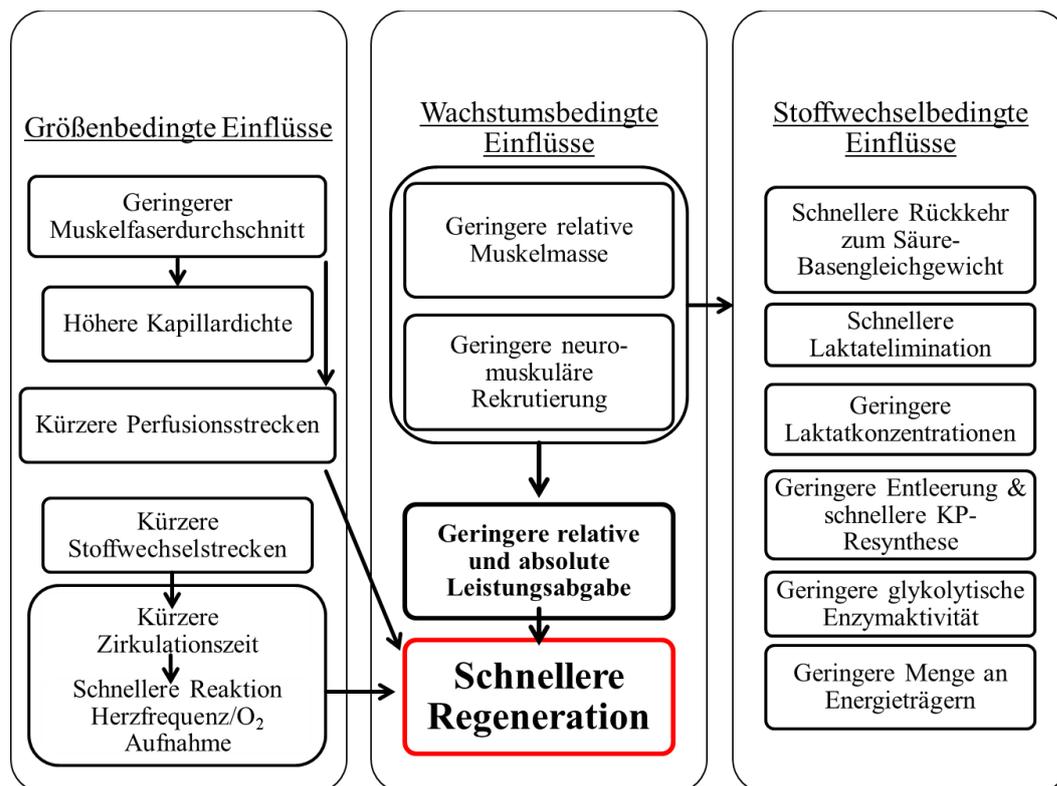


Abb. 2. Schematische Abbildung der Gründe für die schnellere Regeneration von Kindern während hochintensivem Intervall Training (modifiziert nach Falk & Dotan, 2006, S. 111).

Gesundheitliche Aspekte zum HIIT mit Kindern

Um ein dauerhaftes "Overreaching", oder gar ein Übertrainingszustand durch HIIT bei Kindern und Jugendlichen zu vermeiden müssen generelle Strategien zur Periodisierung von HIIT im Nachwuchsleistungssport erarbeitet werden. Das HIIT weist naturgemäß eine hohe kardiopulmonale und metabolische Beanspruchung auf und eine, je nach Sportart (Laufen vs. Fahrradergometer), erhöhte Belastung für den passiven Bewegungsapparat. Sprunghaft gesteigerte und dauerhaft hohe körperliche Beanspruchungen können negativ auf das Immunsystem wirken (Niemann, 1995) und ein sogenanntes „Overreaching“ auslösen was einen Leistungsrückgang sowie Bournoutsymptome bewirken kann (Baquet et al., 2002; Smith, 2003). Zudem können hohe Umfänge (> 18 Std/Woche) von starken Stoß- und Sprungbelastungen vor und während der Pubertät negativ auf das Längenwachstum der Knochen von jungen Athletinnen wirken (Theintz et al. 1993; Caine et al., 2001).

Zu betonen ist natürlich, dass HIIT einen sehr unterschiedlichen Intensitätsgrad aufweisen kann, der bekanntlich von anaerob-alaktaziden Belastungen bis hin zu hoch laktaziden Belastungen reichen kann.

Bei der Diskussion um intensive Belastungen im Nachwuchsleistungssport muss zwischen chronisch-einseitiger Frühspezialisierung im Hochleistungssport und Intensivierung von Belastungen im Training differenziert werden. Beeinträchtigungen im Längenwachstum des passiven Bewegungsapparates wurden bisher nur bei exzessiv und andauernd wiederholten Sprüngen und Stoßbelastungen bei Wettkampfturnerinnen im frühen Kindesalter beobachtet, wobei die Turnerinnen extrem hohe Trainingsumfänge absolvierten (Theintz et al. 1993; Caine, 1990; Caine et al., 2001). In einem geringeren Umfang durchgeführte intensive Sprungbelastungen (über 7 Monate 3x/Woche 100 beidbeinige Sprünge von einer 61 cm hohen Kiste) hingegen haben einen positiven Effekt auf die Mineraldichte in Hüftgelenk und Wirbelsäule von vorpubertären Jungen und Mädchen (7,5 Jahre) (Fuchs et al. 2001).

Da die Interventionsdauer der vorgestellten HIIT-Studien den Zeitraum von 10 Wochen nicht überschreitet und das jährliche Wachstum von vorpubertären Kindern in etwa 5 cm pro Jahr beträgt, ist es unwahrscheinlich, dass diese relativ kurzen Interventionen von HIIT sich negativ auf das Wachstum von Kin-

dem auswirken (Ratel, 2011; Falk & Eliakim, 2003). Interventionsstudien zu Krafttraining mit hoher Muskelspannung und anaeroben Komponenten mit vorpubertären Kindern (<20 Wochen) zeigten keinen negativen Einfluss auf das Wachstum von vorpubertären Kindern (Falk & Eliakim, 2003; Behringer et al., 2011). In wieweit für den Aspekt Wachstum eine Übertragbarkeit vom Krafttraining auf das HIIT vorliegt kann nur mit HIIT Langzeitstudien empirisch überprüft werden. Jedoch existieren bisher keine empirischen Hinweise, dass HIIT sich auf Größenwachstum oder Geschlechtsreife von Kindern auswirkt (Ratel, 2011).

Entgegen der teilweise vertretenen älteren Lehrbuchmeinung belegen wissenschaftliche Trainingsstudien anschaulich die positive Wirkung von intensiven Trainingsmethoden auf die Ausdauerleistungsfähigkeit von Erwachsenen, aber auch von Kindern und Jugendlichen. Diese Effekte sind in vergleichsweise kurzer Zeit erreichbar. Einer Überforderung des kindlichen Organismus muss durch eine gezielte Beobachtung der chronischen Belastungsantwort gegengesteuert werden. Übertrainingsphänomene können natürlich auch bei Kindern auftreten.

Von der American Academy of Pediatrics (Brenner et al., 2007) liegen hier klare Empfehlungen vor:

1. Pro Woche sind mindestens ein bis zwei wettkampffreie Tage einzuhalten, an denen auch sportartspezifisches Training zu vermeiden ist, um der psychophysischen Erholung genügend Zeit zu geben.
2. Die Steigerung des Trainingsumfanges, der Wiederholungszahl oder die Gesamtdistanz sollte innerhalb einer Woche nicht mehr als um 10% gesteigert werden.
3. Es wird empfohlen, über zwei bis drei Monate im Jahr kein sportartspezifisches Training durchzuführen.
4. Wettkampfmäßig sollte gleichzeitig nur eine Sportart betrieben werden. Zusätzliche Belastungsumfänge in Spilsportarten sind bei der Trainingsgestaltung zu beachten.
5. Bei Muskel- oder Gelenkproblemen, Abgeschlagenheit oder nachlassender Schulleistungen ist ein Überlastungssyndrom zu prüfen. Der

motivationale Hintergrund der Kinder ist in solchen Fällen sorgfältig zu prüfen.

6. Die Athleten sollten über Hitze-/Kälteschädigungen, Übertraining und den damit verbundenen Verletzungen aufgeklärt werden.
7. Den Athleten, Eltern und Trainern sollte die Möglichkeit gegeben werden sich über Themen wie Sporternährung, Flüssigkeitszufuhr und Übertrainingssymptome zu informieren um eine hohe Leistungsfähigkeit gewährleisten und Gesundheitsbeeinträchtigungen vermeiden zu können.
8. Trainer sollten besonders darauf achten, dass die Kinder von ihren Eltern nicht zu einer exzessiven Wettkampfteilnahme gedrängt werden.

5.5 Praktische Empfehlungen und Praxisbeispiele

HIIT ist aufgrund seines relativ geringen Zeitbedarfs und seiner Effizienz, die sich in den Trainingseffekten widerspiegelt, dazu geeignet variabel im Training von Nachwuchsleistungssportlern berücksichtigt zu werden. Prinzipiell liegen dem HIIT vor allem drei Protokolle zu Grunde, die individuell in die jeweilige Trainingseinheit bzw. Sportart transferiert werden können:

- 1) Protokolle mit sehr kurzer Belastungs- und Entlastungsdauer: ≤ 15 s; z. B. 8-10 x 15 s Belastung (100-120 % vVO_{2max}) mit ca. 15 s passiver Pause (Buchheit & Laursen, 2013 Part II)
- 2) Protokolle mit mittlerer Belastungs- und Entlastungsdauer: < 45 s (Buchheit & Laursen, 2013 Part II); z. B. 12 x 30 s Belastung (90-95 % HR_{max}) mit 30 s Pause (50-60 % HR_{max}) (Sperlich et al., 2011)
- 3) Protokolle mit langer Belastungs- und Entlastungsdauer: 2-4 min; z. B. 4-6 x 4 min ($\geq 95\%$ vVO_{2max} oder 90-95% HF_{max}) mit ca. 4-5 min aktiver Pause ($\leq 60-70\%$ vVO_{2max}) (Buchheit & Laursen, 2013 Part II; Helgerud et al. 2001; McMillan et al., 2005; Impellizzeri et al., 2006; Wahl et al., 2013; Sperlich et al., 2011; Breil et al., 2010; Chamari et al., 2005).

Die Prozentzahlen entsprechen der Intensität ausgehend von der maximalen Leistungsfähigkeit, z.B. der maximalen Herzfrequenz (Hf_{max}) oder der Geschwindigkeit bei der maximalen Sauerstoffaufnahme (vVO_{2max}). Damit ist eine individuelle Differenzierung nach den Fähigkeiten der jungen Athleten möglich, was einem hohen Maß an Binnendifferenzierung entspricht.

Die Frage nach der optimalen Anzahl von HIIT Trainingseinheiten pro Mikrozyklus im Nachwuchsleistungssport bleibt weiterhin bestehen und ist sicherlich von der Sportart, Vorerfahrung und aktuellen Trainingszielen abhängig. Die Mehrzahl der erfolgreich durchgeführten HIIT-Interventionsstudien absolvierte zwei HIIT Trainingseinheiten pro Woche über fünf bis zehn Wochen, zusätzlich zum normalen Training, und konnten damit effektive Leistungsverbesserungen erreichen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Durchführung eines konzentrierten HIIT-Mikrozyklus, welcher aus ca. zehn bis vierzehn Tagen besteht an denen ausschließlich HIIT ohne zusätzliches Training absolviert wird. Breil et al. (2010) konnten dies erfolgreich bei jungen Skirennläuferinnen und Skirennläufern (17 Jahre) durchführen und Wahl et al. (2013) bei jungen Triathletinnen und Triathleten (15 Jahre).

Grundsätzlich jedoch geht es beim Einsatz von HIIT keinesfalls um den Verzicht von Trainingsphasen mit aerobem Training, sondern um das Verbessern der Trainingsqualität zum Erschließen von Leistungsreserven durch das Durchführen gezielter Blöcke hoher bis höchster Intensitäten (Breil et al. 2010; Seiler & Tonessen, 2009).

5.6 Schlussfolgerung

Die Literaturrecherche des vorliegenden Übersichtsartikels zeigte, dass HIIT zur Verbesserung aerober und anaerober Leistungskomponenten erfolgreich mit Kindern und Jugendlichen im Alter von 10 bis 18 Jahren, sowohl mit Nachwuchsleistungssportler/Innen der Sportarten, Fußball, Basketball, Handball, Triathlon, Schwimmen und Ski-Alpin als auch mit untrainierten Jungen und Mädchen, angewendet wird. Bei zwei bis drei HIIT Einheiten pro Woche ist, mit relativ geringem zeitlichem Aufwand, über eine Dauer von zwei bis zehn Wo-

chen mit einer Steigerung der VO_{2max} von durchschnittlich 7,9% (1,0-11,5%) zu rechnen. Zusätzlich wurden nach den Trainingsphasen mit HIIT Verbesserungen der Sprint- und Sprungleistungen sowie verbesserte anaerobe Leistungen und Verbesserungen der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit beobachtet. Unabhängig des HIIT Belastungsprotokolls ist die Regenerationsfähigkeit während HIIT bei Kindern größer als bei Erwachsenen. Keine der hier vorgestellten Studien dokumentierte eine Überforderung des kindlichen Organismus. Ferner besteht ein dringender Forschungsbedarf zur Wirkung von intensivem Training auf den kindlichen Organismus um die teilweise herrschende Lehrmeinungen der 70-80er Jahre kritisch zu hinterfragen.

6 Studie I: Hormonelle, metabolische und kardiorespirative Reaktionen von Nachwuchssportlern und erwachsenen Athleten auf eine hochintensive Intervallbelastung

6.1 Abstract

Ziel der vorliegenden Studie war die Analyse der Speichelcortisolkonzentrationen (SC), der physiologischen Reaktionen und der Leistung als akute Reaktion auf eine einzelne Trainingseinheit Hochintensives Intervalltraining bei trainierten Jungen und erwachsenen Athleten. Dreiundzwanzig Jungen ($11,5 \pm 0,8$ Jahre) und 25 Männer ($27,7 \pm 4,6$ Jahre) absolvierten das Hochintensive Intervalltraining (HIIT), bestehend aus vier aufeinanderfolgende Wingate Anaerobic Tests (4×30 s). Aufgrund des geringeren physiologischen Stresses von Kindern beim Hochintensiven Intervalltraining (HIIT) wurde eine geringere Auswirkung des HIIT auf die SC bei den Kindern erwartet. Die SC der Jungen erhöhten sich nach dem HIIT von $5,55 \pm 3,3$ nmol/l auf $15,3 \pm 9,7$ nmol/l (+173%), bei den Männern stiegen die SC von $7,07 \pm 4,7$ nmol/l auf $19,19 \pm 12,7$ nmol/l (+171%) ($p < 0,01$). Die Höhe der SC im Pre- und im Posttest wiesen keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen auf ($p < 0,01$) und zeigte eine vergleichbare Veränderung vom Pre- zum Posttest. Die höchsten Blutlaktatkonzentrationen der Jungen ($12,6 \pm 3,5$ mmol/l) waren signifikant geringer als die der Männer ($16,3 \pm 3,1$ mmol/l; $p < 0,01$). Während dem HIIT waren die durchschnittlichen Herzfrequenzen der Jungen höher ($p < 0,001$), die höchste relative Sauerstoffaufnahme ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; $p < 0,05$) und die erbrachte Leistung der Jungen war geringer ($p < 0,001$) als bei den Männern. Die vorliegende Studie analysiert erstmals die Reaktion von SC auf HIIT bei Nachwuchsathleten und identifiziert durch den hohen Anstieg der SC das HIIT als starken physiologischen Stressor. HIIT bewirkt bei Nachwuchssportlern eine höhere Aktivität der hormonellen Stressach-

se als andere physische Belastungen, wie der Vergleich zu anderen Studien zeigte. Daher repräsentiert HIIT einen intensiven Stressfaktor für Nachwuchssportler, welche nachteilige Konsequenzen für Gesundheit und Leistung haben könnten.

Schlüsselwörter: Hochintensives Intervalltraining; Speichelcortisol; Kinder; katabole Hormone

6.2 Einleitung

In der letzten Dekade hat das Hochintensive Intervalltraining (HIIT) große wissenschaftliche Aufmerksamkeit erfahren. Mittlerweile wird HIIT als effektive Trainingsmethode für metabolische Adaptionen (Burgomaster et al., 2008; Gibala et al., 2010; Little et al., 2010) und zur Verbesserung der sportartspezifischen Leistung in verschiedenen leistungssportlichen Settings betrachtet (Helgerud et al., 2011). Mittels HIIT konnte die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}), die Maximalkraft, die 10-Meter Sprintleistung sowie die Sprunghöhe bei erwachsenen Profisportlern verbessert werden (Helgerud et al., 2011). Bei jugendlichen Fußballspielern wurde mit HIIT die VO_{2max} , die Laktatschwelle sowie die Leistung im Fußballwettspiel verbessert (Helgerud et al., 2001; McMillan et al., 2005). Darüber hinaus konnte bei sehr jungen Athleten mittels HIIT Interventionen die VO_{2max} , die Sprintleistung, die Leistung im 1000-Meter-Lauf verbessert werden (Sperlich et al., 2011), sowie die höchste Sauerstoffaufnahme (VO_{2peak}), die maximale Laktatbildungsrate und die Wettkampfleistung (Rattel, 2011; Sperlich et al., 2010).

Neben den positiven Effekten gibt es Hinweise, dass HIIT vermutlich nachteilige Effekte auslösen könnte: Wenn Belastungen mit hohen Intensitäten (wie das HIIT) über einen längeren Zeitraum absolviert werden, kann dies zu immunsuppressiven Wirkungen aufgrund der Hemmung von T-Zell Funktionen mit veränderten Konzentrationen der Lymphozytenzahl im Blut führen (Niemann, 1995). Durch HIIT verursachte erhöhte Werte von Stresshormonen wie Adrenalin und Cortisol stehen im Verdacht Katalysatoren für diesen Effekt zu sein (Niemann, 1995; Riddell, 2008). Aktuelle Ergebnisse zeigen einen Anstieg

von anabolen und katabolen Hormonen nach einem intensiven Volleyballtraining bei jugendlichen Athleten (Eliakim et al., 2009). Allerdings sind keine Studien zur Reaktion von Stresshormonen auf HIIT von Kindern vorhanden. Das kürzlich vorgestellte „Allostatic Load Modell“ (Modell der Allostatistischen Last) (McEwen, 1998) könnte als theoretisches Bezugssystem dienen um die potenziell negativen Konsequenzen von HIIT auf die Gesundheit der Kinder zu erklären. Nach dem „Allostatic Load Modell“ ist ein regelmäßig absolviertes HIIT im Nachwuchstraining der Zustand der allostatistischen Last. Die allostatistische Last repräsentiert die Einwirkung von wiederholten Stressreizen auf allostatistische Systeme, wie zum Beispiel auf die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennieren-Achse (HPA-Achse) oder auf das Autonome Nervensystem (ANS), was von diesen Systemen eine Anpassung auf die Stressreize verlangt. Kinder die regelmäßig hochintensives Training absolvieren könnten damit einem chronisch katabolen hormonellen Stress ausgesetzt sein dem sie sich nicht anpassen können. Regelmäßig absolviertes HIIT könnte „wiederholte Angriffe“ darstellen und falls darauf ein „Mangel an Anpassung“ erfolgt, wie es das Allostatic Load Modell beschreibt, kann der chronische Stress zu negativen Langzeitfolgen für die Gesundheit führen. Um die hormonelle Reaktion von Kindern auf HIIT zu verstehen und mögliche durch HIIT ausgelöste Risiken für die Gesundheit von Kindern zu evaluieren, ist es wichtig die akute kurzfristige Reaktion des Allostatistischen Systems, in diesem Fall der HPA-Achse, auf HIIT zu analysieren. Bisher wurden keine Studien zur hormonellen Reaktion von Kindern auf HIIT publiziert. Da die Kindheit eine sensitive Phase der Entwicklung ist, stellt das Verständnis für die zugrunde liegenden metabolischen und hormonellen Reaktionen auf HIIT einen wichtigen Gegenstand dar.

Seit einiger Zeit stellt das Speichelcortisol, das hauptsächliche Endprodukt der HPA-Achse, einen wichtigen Biomarker für die psycho-physiologische Stressreaktion (Kirschbaum et al., 1994), sowohl nach längeren (Virus et al., 1992) als auch nach intensiven Belastungen (Leite et al., 2011; Wahl et al., 2013) bei Erwachsenen, Jugendlichen (Hackney et al., 2011) und jungen Kindern (Benitez-Sillero et al., 2009; Boisseau & Delamarche, 2000; Budde et al., 2010) dar. Mittlerweile ist Speichelcortisol ein allgemein anerkannter valider und reliabler Indikator der biologisch aktiven freien Fraktion des Cortisols (Kirschbaum et al., 1994). Darüber hinaus weist das Speichelcortisol eine hohe Korre-

lation zum Serumcortisol in Ruhe und nach körperlichen Belastungen auf (O'Connor & Corrigan, 1987). Beispielsweise steigen die Salivacortisolkonzentrationen nach dem Radfahren mit 70% der VO_{2peak} bei Männern (O'Connor & Corrigan, 1987), nach Laufbelastungen mit 70% der höchsten Herzfrequenz (HF_{peak}) bei 14-jährigen Jungen und Mädchen (Budde et al., 2010) und während eines Stufentest auf dem Radergometer bei 17-jährigen Jungen (Hackney et al., 2011). Jedoch gibt es bis heute kaum Informationen zur Hormonreaktion auf körperliche Belastungen bei Kindern und keine Informationen zur Hormonreaktion auf HIIT (Benitez-Sillero et al., 2009; Boisseau & Delamarche, 2000; Capranica et al., 2012; Riddell, 2008).

Die durch Belastung induzierte hormonelle Reaktion unterscheidet sich zwischen sehr fitten und durchschnittlich fitten Kindern (Benitez-Sillero et al., 2009): Die Speichelcortisolkonzentrationen sind bei sehr fitten Kindern nach einem 20-m Shuttle Run Test höher als bei durchschnittlich fitten Kindern (Benitez-Sillero et al., 2009). Bei untrainierten 9- bis 10-jährigen Jungen und Mädchen veränderten sich die Speichelcortisolkonzentrationen nach einem intensiven 12-Minuten-Lauf nicht (Budde et al., 2010).

Bei Erwachsenen verursacht eine Einheit HIIT akut erhöhte Werte von Plasmacortisol (Wahl et al., 2013) und chronisch erhöhte Saliva- und Plasmacortisolspiegel sind assoziiert mit reduzierter Immunfunktion (Chrousos, 2009; Niemann et al., 2005). Zusätzlich könnten HIIT-induzierte Veränderungen der Adrenalin- und Cortisolspiegel diesen Effekt verstärken (Niemann, 1995). Doch bisher gibt es keine Erkenntnisse zu der Akutreaktion von Plasma- oder Speichelcortisol von Kindern auf HIIT. Gerade da die anthropometrischen, hormonellen und metabolischen Verhältnisse der Kinder sich deutlich von denen der Erwachsenen unterscheiden, können Unterschiede in der hormonellen und metabolischen Reaktion auf HIIT vermutet werden. Die Analyse der akuten hormonellen und physiologischen Reaktionen auf HIIT bei Kindern soll helfen die kurzzeitige Reaktion der HPA-Achse auf den physischen Stressor HIIT zu verstehen. Unter Umständen könnte HIIT negative Auswirkungen auf das Immunsystem der Kinder in dieser Altersgruppe haben.

Aufgrund dessen ist das Ziel der vorliegenden Studie die Analyse der physiologischen Reaktion auf eine einzelne Einheit HIIT bei trainierten Jungen und der Vergleich der akuten Reaktion zu trainierten Männern. Wie bereits ge-

zeigt wurde, reagieren Erwachsene Athleten auf HIIT mit erhöhten Cortisolkonzentrationen (Wahl, Mathes, Köhler, et al., 2013) und Kinder mit niedrigeren Blutlaktatkonzentrationen (Beneke et al., 2005; Ratel et al., 2002) und einer geringeren Muskelermüdung (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006) im Vergleich zu Erwachsenen. Daher lauten die Hypothesen:

Die einzelne Einheit HIIT (vier aufeinanderfolgenden Wingate Anaerobic Tests) verursacht erhöhte Salivacortisolkonzentrationen bei den trainierten Jungen und den erwachsenen Athleten.

Aufgrund des geringeren physiologischen Stresses der Jungen beim HIIT (geringere Blutlaktatkonzentrationen und geringere Muskelermüdung) sind die Salivacortisolkonzentrationen der Jungen im Anschluss an das HIIT geringer als bei den Männern.

6.3 Methoden

Teilnehmer

Dreiundzwanzig gesunde Jungen (MW \pm STABW, 11,5 \pm 0,8 Jahre) des Talentteams eines lokalen Fußballvereins (U 12) und 25 gesunde und trainierte Männer (29,7 \pm 4,6 Jahre) eines anderen lokalen Sportvereins nahmen an der Studie teil. Alter und ausgewählte anthropometrische Daten sowie die VO_{2peak} und Angaben zum Trainingsumfang und -alter sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die vorliegende Studie wurde in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Alle Teilnehmer, bzw. bei minderjährigen Teilnehmern deren Erziehungsberechtigte, unterzeichneten eine Einverständniserklärung nachdem sie über den Zweck und mögliche Risiken der Studie informiert wurden. Die Einschlusskriterien für die Jungen und die Männer für die Teilnahme lauteten: Drei Trainingseinheiten systematisches und spezialisiertes Training (mindestens 1 Stunde pro Trainingseinheit) pro Woche, um einen vergleichbaren Trainings- und Fitnessstand zu gewährleisten sowie eine regelmäßige Teilnahme an Wettkämpfen während den letzten zwei Jahren. Ausschlusskriterien waren jegliche chronische oder akute mentale oder körperliche Erkrankungen oder Einschränkungen sowie die Einnahme jeglicher pharmazeutischen Substanzen

(z.B. Ritalin®). Die Ein- und Ausschlusskriterien wurden per Fragebogen abgefragt.

Tabelle 1. MW \pm STABW der anthropometrischen Daten, VO_{2max} und Trainingsumfang der Jungen und Männer.

	Jungen	Männer	Effektstärke d
N	23	25	
Alter [Jahre]	11,5 \pm 0,8*	29,7 \pm 4,6	5.51
Größe [cm]	149,3 \pm 6,6*	179,5 \pm 6,1	4.75
Gewicht [kg]	38,5 \pm 6,7*	76,1 \pm 6,5	5.69
Tannerstadium	2,3 \pm 0,4	n.a.	n.a.
Magermasse [kg]	33,2 \pm 5,0*	64,7 \pm 6,1	5.64
Körperfett [%]	9,5 \pm 2,9	8,2 \pm 4,6	0.82
VO_{2peak} [ml/min/kg]	42,3 \pm 5,6†	47,3 \pm 8,2	0.71
Trainingsumfang [h/Woche]	5,1 \pm 1,2*	9,4 \pm 5,3	1.12
Trainingshäufigkeit [Einheiten/Woche]	3,4 \pm 0,8*	5,5 \pm 2,9	0.98
Trainingsalter [Jahre]	4,6 \pm 2,7	5,3 \pm 1,6	0.31

*—signifikanter Unterschied zu Männern ($p < 0.01$). †— signifikanter Unterschied zu Männern ($p < 0.05$). n.a.—nicht angewendet.

Experimentelles Design

Alle Teilnehmer waren mit dem HIIT Protokoll sowie dem Ablauf der Testprozedur vertraut, da alle Teilnehmer bereits in vorangegangenen Studien im selben Labor involviert waren.

Um den Effekt von vorangegangenen Stress zu minimieren, ruhten alle Teilnehmer nach Ankunft im Labor in einem ruhigen Raum und unter Beobachtung in sitzender Position für 30 Minuten. Das generelle Studiendesign beinhaltete vier aufeinanderfolgende 30-sekündige Sprints auf dem Fahrradergometer [Wingate Anaerobic Test (WAnT) (Inbar et al., 1996)], welche mit maximaler In-

tensität absolviert wurden. Nach jedem 30-sekündigen Sprint folgte eine 2-minütige aktive Regeneration. Die vier Sprints wurden auf einem elektrodynamisch gebremsten Fahrradergometer (Schoberer Rad Meßtechnik GmbH, Jülich, Deutschland) durchgeführt. Der WAnT ist sehr reliabel (Test-Retest Reliabilität (Intraclass Coefficient): 0.95–0.97) und valide zur Messung der anaeroben Leistung bei Kindern und Erwachsenen (Inbar et al., 1996). Der WAnT weist einen Anteil von 81,4% an anaerober Energiebereitstellung auf (Beneke et al., 2002). Der Mittelwert des im Labor gemessenen Technischen Messfehler (%TEM) der Peak Power (PP) und der Mean Power im WAnT an zwei Messzeitpunkten betrug $3,1 \pm 1,2\%$ und $1,8 \pm 0,8\%$.

Die Tanner Stadien wurden bestimmt um die geschlechtliche Reife (Tanner & Whitehouse, 1978) der teilnehmenden Jungen zu analysieren. Dazu wurde den Erziehungsberechtigten Zeichnungen mit schriftlichen Erklärungen der Entwicklungsstadien ausgehändigt. Ein Studienleiter war für Fragen zu den Tanner Stadien anwesend. Bei den minderjährigen Probanden fanden sämtliche Prozeduren im Labor in Anwesenheit eines Elternteils, aber ohne Anwesenheit anderer Mannschaftsmitglieder oder Trainer statt.

Die Körpergröße wurde auf 0,1 cm genau mittels Stadiometer (Seca 214, Hamburg, Deutschland) gemessen. Das Körpergewicht wurde auf 0,1 kg genau mittels kalibrierter Personenwaage (Seca 769, Hamburg, Deutschland) gemessen und der Body Mass Index (BMI) wurde berechnet (kg/m^2). Die Magermasse und der prozentuale Anteil Körperfett (%Körperfett) wurden mittels Ganzkörper Bioimpedanzanalyse (Nutrigard-S, Data Input, Darmstadt, Deutschland) ermittelt. Alle Messungen der Bioimpedanzanalyse wurden mit Vierflächenelektroden (tetra polar) an der rechten Hand und dem rechtem Fuß der Probanden durchgeführt.

Alle Test wurden in einem sportphysiologischen Labor (Umgebungstemperatur: $23 \pm 1^\circ\text{C}$; relative Luftfeuchtigkeit, $44 \pm 3\%$) durchgeführt. Um circadiane Einflüsse insbesondere auf Speichelcortisol (Kirschbaum & Hellhammer, 1994) zu minimieren wurden alle Tests zwischen 17:00 und 19:00 Uhr durchgeführt. Die Teilnehmer wurden instruiert in den letzten zwei Stunden vor dem Test nur Wasser zu trinken und nicht zu essen. Darüber hinaus durften die Teilnehmer

24 Stunden vor dem Test keine anstrengenden (sportlichen) Aktivitäten durchführen und kein Koffein, Alkohol oder Tabak konsumieren.

In Übereinstimmung mit den standardisierten Instruktionen des WAnT (Inbar et al., 1996) absolvierten die Teilnehmer vor den Sprints ein zehninütiges Aufwärmen mit 2,0 W/kg und 60-90 Umdrehungen pro Minute (UpM) mit anschließender dreiminütiger Erholung. Im Anschluss daran absolvierten die Teilnehmer die vier 30-sekündigen Sprints mit einer zweiminütigen aktiven Pause zwischen den Sprints. Alle Teilnehmer wurden instruiert jeden der Sprints mit maximaler Intensität durchzuführen (Inbar et al., 1996). Die Trittfrequenz wurde elektronisch auf 120 UpM begrenzt (Isokinetikmodus). Die aktive Erholung zwischen den Sprints wurde bei 1,5 W/kg Körpergewicht und 60-90 UpM absolviert. Nach dem letzten Sprint fuhren die Teilnehmer für drei Minuten bei 1,5 W/kg Körpergewicht um Kreislaufproblemen vorzubeugen. Im Anschluss daran absolvierten alle Teilnehmer unter Beobachtung und in sitzender Position die 27-minütige passive Regeneration.

Testparameter

Die Speichelproben wurden mittels Salivetten (Sarstedt®, Nümbrecht, Deutschland) vor dem Aufwärmen und 30 Minuten nach dem letzten Sprint entnommen um die höchste durch das HIIT Protokoll induzierte Cortisolkonzentration zu erfassen (Leite et al., 2011; VanBruggen et al., 2011; Wahl et al., 2013). Die Teilnehmer wurden instruiert für drei Minuten auf den Salivetten zu kauen um die Speichelproduktion anzuregen. Nach dem kauen wurden die Salivetten in der dazugehörigen Plastikröhre bis zur Analyse bei -20°C gelagert. Die Cortisolkonzentration im Speichel (nmol/l) wurde mit dem antikörperbasierten Nachweisverfahren (enzyme linked immunosorbent assay (ELISA) (IBL Diagnostics, Hamburg, Deutschland)) in einem vollautomatischen Analysegerät (NEXGen, Adaltis, Freiburg, Deutschland) mit niedrigen Varianzkoeffizienten innerhalb und zwischen den Proben (<5% und <7%) analysiert. Der Varianzkoeffizient der Messwiederholung für die Speichelcortisolkonzentration betrug 2,2%. Alle Proben wurden zweifach analysiert, der Mittelwert der zwei Ergebnisse wurde jeweils für die weiteren Analysen verwendet.

Die Blutabnahmen zur Bestimmung der Laktatkonzentrationen, Entnahme von 20 µl Kapillarblut aus dem hyperämisierten rechten Ohrläppchen, fan-

den vor und nach dem Aufwärmen statt, nach jedem Sprint und zwei und fünf Minuten nach Ende des letzten Sprints. Ab der fünften Nachbelastungsminute wurde alle fünf Minuten, bis zur 30. Nachbelastungsminute, eine Blutprobe entnommen. Alle Blutproben wurden in 2 ml Mikrotest Behältern hämolysiert und mittels amperometrisch-enzymatischen Verfahren mit dem EKF BIOSEN C-Line (EKF Diagnostics GmbH, Barleben, Deutschland) auf die Laktatkonzentration analysiert. Der Variationskoeffizient der Messwiederholung für Blutlaktat beträgt 1,3% bei 12 mmol/l.

Die Herzfrequenz wurde während den vier Sprints kontinuierlich in 0,5 Sekunden Intervallen mittels Polar® RS 800 Pulsmesser (Polar, Kempele, Finnland) telemetrisch gemessen. Die individuell höchste Herzfrequenz von jedem Teilnehmer (HF_{peak}) wurde definiert als die höchste gemessene Herzfrequenz in einem der 0,5-sekündigen Intervalle während der vier Sprints.

Die Sauerstoffaufnahme und Kohlendioxidabgabe wurden im breath-by-breath Verfahren mittels Spirometrie Meta Max 3B® (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Deutschland) während allen Sprints, inklusive des Aufwärmens und während der 30-minütigen Regeneration aufgezeichnet. Vor jedem Test wurden die Gas- und Volumensensoren entsprechend den Angaben des Herstellers und unter Verwendung von Hochpräzisionsgas (15% O₂; 5% CO₂ in N; Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Deutschland) und 3L Syringe (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany) kalibriert. Alle Respirationsdaten wurden anschließend in 30-Sekunden Intervallen gemittelt und der höchste Wert der Sauerstoffaufnahme wurde als $VO_{2\text{peak}}$ betrachtet.

Peak Power (PP) und Mean Power (MP) in den vier Sprints wurden alle 0,5 Sekunden aufgezeichnet. PP ist definiert als höchste Mechanische Kraft die im WAnT geleistet wird und MP ist die durchschnittliche mechanische Kraft die während den 30 Sekunden des WAnT geleistet wird. Der Fatigue Index (FI) ist definiert als Grad des Rückgangs der mechanischen Kraft während des WAnT und wird wie folgt berechnet:

$$FI = (PP - \text{geringste Power}) / PP \cdot 100 \text{ (Inbar et al., 1996).}$$

PP und MP sind auf die Magermasse relativiert (P_{rel}).

Statistische Analysen

Alle statistischen Auswertungen und Tests wurden mittels SPSS Statistics 18 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) durchgeführt. Alle Daten sind als Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (STABW) angegeben. Die physiologischen Daten wurden auf Normalverteilung überprüft. Die anthropometrischen Daten beider Teilnehmergruppen wurden mittels T-Test für unabhängige Stichproben auf Unterschiede analysiert. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (RM-ANOVA) wurde durchgeführt um auf Unterschiede im Effekt des HIIT auf die Parameter Speichelcortisol, Herzfrequenz, Blutlaktat und Leistung zwischen den Altersgruppen (Jungen versus Männer) und auf Unterschiede zwischen Teilnehmer und Zeit (Pre- versus Posttest) zu überprüfen. Die Effektstärke, Cohens d , ist definiert als (Unterschied zwischen dem Mittelwert)/Standardabweichung) und wurde für alle Variablen berechnet. Die Grenzen für kleine, mittlere bzw. große Effekte waren 0.20, 0.50 bzw. 0.80 (Cohen, 1988). Das Signifikanzniveau wurde a priori bei $\alpha=0.05$ festgelegt.

6.4 Ergebnisse

Speichelcortisol und Blutlaktat

Nach der 30-minütigen Regeneration waren die Speichelcortisolkonzentrationen in beiden Gruppen gegenüber den Baselinewerten erhöht ($p<0.01$) (Abbildung 1). Die Speichelcortisolkonzentration der Jungen stieg von $5,55\pm 3,3$ nmol/l auf $15,13\pm 9,7$ nmol/l (+173%) und bei den Männern von $7,07\pm 4,7$ nmol/l auf $19,19\pm 12,7$ nmol/l (+171%). Der Baselinewert und der Speichelcortisolwert nach der Regeneration wiesen zu jedem Zeitpunkt ($p=0.41$; $F=.69$; $df=1$; Abbildung 1) keine Unterschiede zwischen den Jungen und den Erwachsenen Athleten auf (Baseline: $d=0.37$; nach Regeneration: $d=0.36$; $p=0.21$; $F=1.62$; $df=1$). Die höchste individuelle Blutlaktatkonzentration (LA_{peak}) und die weiteren Blutlaktatwerte während des HIIT waren in der Gruppe der Jungen signifikant geringer als bei den Männern, mit Ausnahme der Werte pre Warm Up und nach dem ersten Sprint (LA_{peak} : $p<0.01$; $d=1.12$; HIIT: $p<0.01$; pre: $d=0$; post Warm Up: $d=0.986$; Sprint 1: $d=0.45$; Sprint 2: $d=0.78$; Sprint 3: $d=1.07$; Sprint 4: $d=1.18$; 2-Minuten post-Test: $d=1.36$; 5-Minuten post-Test: $d=1.44$; 10-Minuten post-Test: $d=1.44$).

ten post-Test: $d=1.63$; 15- Minuten post-Test: $d=1.60$; 20- Minuten post-Test: $d=1.41$; 25- Minuten post-Test: $d=1.32$; 30- Minuten post-Test: $d=1.20$; Abbildung 2). Während des HIIT wurde kein Unterschied im Zeitpunkt des Auftretens der LA_{peak} (TLA_{peak}) zwischen Jungen und Männern beobachtet (Jungen: $01:04 \pm 01:19$ Minuten Post-Test; Männer: $01:31 \pm 01:24$ Minuten Post-Test; $p > 0.05$).

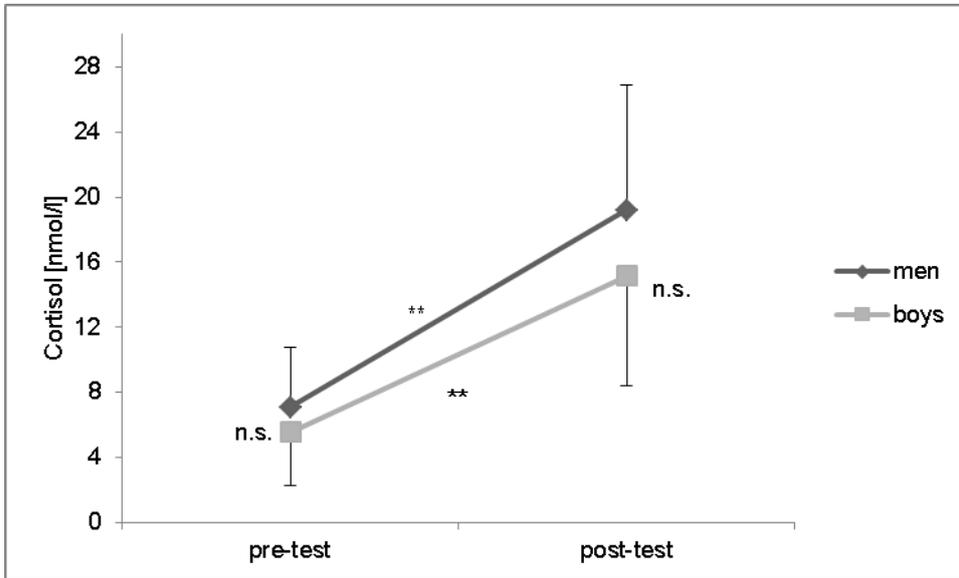


Abbildung 1. MW (\pm STABW) Speichelcortisolkonzentrationen der Jungen und der Männer vor dem Aufwärmen (pre-test) und 30 Minuten nach dem letzten Sprint (post-test). ** Signifikante Veränderung von pre- zu post-test in beiden Gruppen ($p < 0.01$). n. s. nicht signifikant ($p > 0.05$).

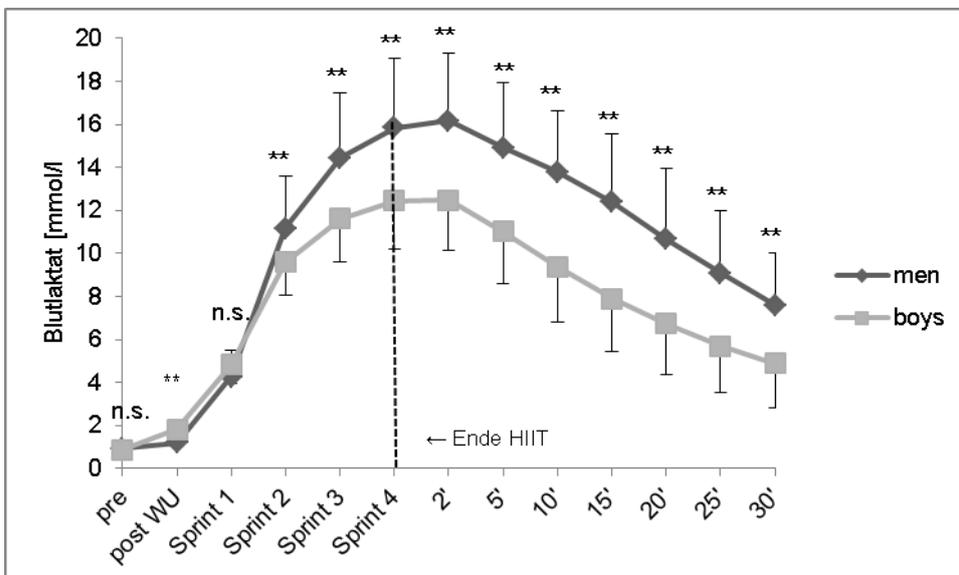


Abbildung 2. MW (\pm STABW) der Blutlaktatkonzentration im Zeitverlauf von pre-test bis 30 Minuten nach dem letzten Sprint der Jungen und der Männer. WU—Warm Up. ** Signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen ($p < 0.01$). n. s. nicht Signifikant ($p > 0.05$).

Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme

Die mittlere Herzfrequenz der Jungen während den vier Sprints war höher als die der Männer ($p < 0.01$; Tabelle 2). Keine Unterschiede zwischen Jungen und Männern zeigte die $\%HR_{\text{peak}}$ ($p < 0.001$; Tabelle 2). Vom ersten zum zweiten Sprint wies die mittlere Herzfrequenz in beiden Altersgruppen eine Steigerung auf ($p < 0.001$). Die relative und die absolute $VO_{2\text{peak}}$ der Jungen war niedriger als die der Männer (relative $VO_{2\text{peak}}$: $p < 0.05$; $d = 0.71$; absolute $VO_{2\text{peak}}$: $p < 0.01$; $d = 4.18$; Tabelle 1).

Tabelle 2. MW \pm STABW der mittleren absoluten Herzfrequenz und der mittleren relativen Herzfrequenz ($\%HR_{\text{peak}}$ —höchste erreichte Herzfrequenz) für Sprint 1 bis 4 der Jungen und der Männer.

	Sprint 1	Sprint 2	Sprint 3	Sprint 4
Jungen [s/min]	167 \pm 14*	175 \pm 10*	175 \pm 10*	178 \pm 10*
Männer [s/min]	155 \pm 15	164 \pm 13	163 \pm 13	164 \pm 19
Effektstärke d	0.857	0.995	1.034	0.922
Jungen [%]	84,9 \pm 4,7	89,1 \pm 3,7	89,3 \pm 4,2	90,4 \pm 3,7
Männer [%]	85,6 \pm 3,8	90,5 \pm 2,8	90,1 \pm 4,3	91,3 \pm 3,0
Effektstärke d	0.16	0.42	0.18	0.26

*—signifikanter Unterschied zu Männern ($p < 0.01$).

Leistungsindices

Die relative PP (W/kg Magermasse) der Jungen war in allen vier Sprints 16,7% geringer als bei den Männern ($p < 0.001$; Tabelle 3). Von Sprint 1 zu Sprint 4 nahm die PP in der Gruppe der Jungen um $9,9 \pm 13,7\%$ ab. Der Rückgang der PP von Sprint 1 zu Sprint 4 bei den Männern betrug $20,5 \pm 11,5\%$, die Differenz im Rückgang der PP zwischen Jungen und Männern erreicht ein signifikantes Niveau ($p < 0.01$).

Die relative MP (W/kg Magermasse) der Jungen war in allen vier Sprints mehr als 10,6% geringer als die der Männer ($p < 0.001$; Tabelle 3). Der Rückgang der MP von Sprint 1 zu Sprint 4 war in den beiden Altersgruppen unterschiedlich hoch, doch der Unterschied erreichte nicht das Signifikanzniveau (Jungen: $-21,2 \pm 11,7\%$; Männer: $-25,3 \pm 11,6\%$; $p > 0.05$).

Der FI in allen vier Sprints wies keine Unterschiede zwischen Jungen und Männern auf ($p > 0.05$; Tabelle 3).

Tabelle 3. MW \pm STABW der Leistungsindices Peak Power, Mean Power und Fatigue Index für Sprint 1 bis 4 der Jungen und der Männer.

	Sprint 1	Sprint 2	Sprint 3	Sprint 4
<i>Peak Power</i>				
Jungen [W/kg Magermasse]	11,1 \pm 1,4	10,6 \pm 1,2	10,0 \pm 1,2	10,0 \pm 1,5
Männer [W/kg Magermasse]	15,1 \pm 1,7*	13,4 \pm 1,4*	12,4 \pm 1,9*	12,0 \pm 1,7*
Effektstärke d	2.56	2.14	1.51	1.24
<i>Mean Power</i>				
Jungen [W/kg Magermasse]	8,5 \pm 0,7	7,6 \pm 0,6	6,8 \pm 0,7	6,7 \pm 0,8
Männer [W/kg Magermasse]	9,9 \pm 0,8*	8,5 \pm 0,6*	7,7 \pm 1,0*	7,4 \pm 0,9*
Effektstärke d	1.86	1.50	1.04	0.82
<i>Fatigue Index</i>				
Jungen [%]	50,8 \pm 13,8	59,0 \pm 10,7	59,4 \pm 11,6	59,0 \pm 9,8
Männer [%]	55,1 \pm 10,5	57,1 \pm 8,1	57,8 \pm 9,4	56,8 \pm 8,1
Effektstärke d	0.35	0.20	0.15	0.24

*—signifikanter Unterschied zu Männern ($p < 0.001$).

6.5 Diskussion

Ziel dieser Studie war die Analyse des Effekts einer einzelnen Einheit HIIT auf die Parameter Speichelcortisol, Blutlaktat, Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme und Leistung bei trainierten 11-jährigen Jungen im Vergleich zu trainierten Männern, um den hormonellen und physiologischen Stress von HIIT zu analysieren. Erwartet wurde, dass eine Einheit HIIT zu erhöhten Speichelcortisol- und Blutlaktatkonzentrationen sowie zu einer erhöhten Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme in beiden Probandengruppen führt. Darüber hinaus geht die Forschungshypothese dahin, dass aufgrund des zu erwartenden geringeren physiologischen Stress (geringere Blutlaktatkonzentrationen und geringere

Muscle Fatigue) der Jungen bei hochintensiven Intervallbelastungen die Reaktion HPA-Achse geringer ausfällt als bei den erwachsenen Probanden.

Obwohl das HIIT im Nachwuchsleistungssport zunehmend Anwendung findet ist die vorliegende Studie bisher die erste Studie welche die hormonelle Reaktion von trainierten Kindern auf HIIT darstellt. Die Konzentration der physiologischen Stressmarker war nach dem HIIT in beiden Altersgruppen signifikant erhöht, was die hohe physiologische Belastung durch HIIT betont. Im Vergleich zu Ergebnissen in der Literatur (Benitez-Sillero et al., 2009; Di Luigi et al., 2006; O'Connor & Corrigan, 1987; Pilz-Burstein et al., 2010; Viru et al., 1992), war der Anstieg des Cortisols nach dem HIIT in der vorliegenden Studie mit einem mehr als zweifachen Anstieg des Speichelcortisols in beiden Gruppen (Jungen: +173 %; Männer: +171 %) von Pretest zu Posttest vergleichsweise hoch. Die mittleren Blutlaktatkonzentrationen sowie die Peak Laktatwerte, Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme, Leistung und Rückgang der Peak Power während des HIIT unterschieden sich ebenfalls zwischen den Jungen und den Männern, während der Fatigue Index keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen aufzeigte. Entgegen der Forschungshypothese war die Speichelcortisolkonzentration der Jungen nicht geringer als bei den Männern, obwohl der physiologische Stress nach dem HIIT bei den Jungen signifikant geringer ausfiel.

Andere Arten von physischer Belastung verursachen bei Kindern und Erwachsenen weitaus geringere Anstiege von Cortisol in der Nachbelastungsphase. Beispielsweise stieg der Serumcortisolspiegel nach Langzeit-Ausdauerbelastungen mit moderater Intensität bei trainierten Männern um 62% (Viru et al., 1992). Benitez-Sillero et al. (2009) beobachteten nach einem 20-Meter Shuttle Run Test einen Anstieg der Speichelcortisolkonzentrationen um 70% bei vorpubertären Jungen und einen Anstieg um 105% bei pubertären Jungen. Nach einem 90-minütigen Fußballtraining mit mittleren und hohen Intensitäten stieg die Speichelcortisolkonzentration bei 13-jährigen Fußballspielern um 12,4% (Di Luigi et al., 2006). Nach einem VO_{2max} Test stieg die Speichelcortisolkonzentration bei Männern um 50% (O'Connor & Corrigan, 1987). Sogar nach einem intensiven Taekwondo-Kampf verzeichnete der Anstieg der Serumcortisolkonzentrationen bei jugendlichen Taekwondo-Kämpfern nur 30% bei den männlichen Athleten und 11% bei den weiblichen Athletinnen (Pilz-Burstein et al., 2010). Die einzige Übereinstimmung im Anstieg des Speichel-

cortisols in der vorliegenden Studie wurde mit dem Ergebnis von Capranica et al. (2012) gefunden, welche die hormonelle Reaktion (Speichelcortisol) von Jungen ($10,4 \pm 0,2$ Jahre) nach einem Taekwondokampf im Rahmen eines Turniers analysierten. Jedoch erscheint fast ausnahmslos der Effekt von HIIT auf die hormonelle Reaktion bei jungen Athleten intensiver auszufallen als andere physische Stressoren, wie der Vergleich mit anderen Studienergebnissen zeigt.

Unsere Ergebnisse betonen, dass HIIT einen intensiven physischen Stressfaktor für trainierte Jungen und Männer repräsentiert und eine primär katabole Reaktion verursacht. Mehrere Studien haben bisher den Zusammenhang zwischen HPA-Achse, dem ANS und dem Immunsystem dargestellt (Irwin & Cole, 2011). Neuste Erkenntnisse weisen auf eine komplizierte Beziehung zwischen endokriner und sympathischer Aktivität und der Immunantwort nach Stress hin (für Review siehe Dhabhar, Malarkey, Neri & McEwen, 2012; Nance & Sanders, 2007). Dem zufolge können die HPA-Achse als auch eine autonome Deregulation eine inflammatorische Diathese verursachen (Heim et al., 2000, Raison & Miller, 2003), die beispielsweise in einem vermehrten Auftreten von akuten Erkältungssymptomen und reduzierter Leistungsfähigkeit resultieren.

Zusätzlich waren die Baselinewerte des Speichelcortisols in unserer Studie zwischen Jungen und Männern nicht signifikant verschieden, was ein Beleg für die Unabhängigkeit der Cortisolkonzentration von der Geschlechtsreife belegt. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu den Ergebnissen von Di Luigi et al. (2006a, 2006b) welche eine positive Korrelation zwischen den Speichelcortisolwerten in Ruhe und dem Alter in der Pubertät zeigte.

Die höchsten gemessenen Blutlaktatkonzentrationen (LA_{peak}) in beiden Altersgruppen sind als sehr hoch einzuschätzen, dadurch wird deutlich, dass es sich bei dem gewählten Protokoll dieser Studie tatsächlich um Hochintensives Intervalltraining handelt. Signifikante Unterschiede in den Blutlaktatkonzentrationen zwischen den beiden Gruppen traten nach dem zweiten Sprint auf und blieben bis zum Ende der Messungen, 30 Minuten nach Ende des letzten Sprints, bestehen. Die Jungen wiesen beträchtlich niedrigere Blutlaktatwerte auf als die Männer, jedoch keine Unterschiede im Zeitpunkt des Auftretens der LA_{peak} . Ein schnelleres Auftreten der LA_{peak} nach einzelnen intensiven Belas-

tungen wurde in vorherigen Studien beobachtet (Beneke et al., 2005, Dotan et al., 2003) und ist unter anderem durch die unterschiedlichen Größenverhältnisse bedingt, die in kürzeren intramuskulären Perfusionsstrecken und kürzeren Kreislaufzeiten der Kinder resultieren (Falk & Dotan, 2006; Dotan et al., 2003). Im Anschluss an intensive Intervallbelastungen konnten bisher keine Unterschiede im zeitlichen Auftreten der LA_{peak} zwischen Kindern und Erwachsenen nachgewiesen werden (Ratel et al., 2002). Die niedrigeren Blutlaktatwerte von Kindern im Vergleich zu Erwachsenen im Anschluss an intensive Belastungen sind in zahlreichen Studien beobachtet worden. Ratel et al. (2002) konnte niedrigere Blutlaktatwerte bei Jungen ($8,5 \pm 2,1$ mmol/l) im Vergleich zu Männern ($15,4 \pm 2,0$ mmol/l) nach Intervallsprints auf dem Fahrradergometer nachweisen. Andere Studien berichten übereinstimmend ähnliche Ergebnisse der Nachbelastungslaktatwerte (Beneke et al., 2005, Dotan et al., 2003; Falgairette et al., 1991; Hebestreit et al., 1996). Verschiedene Gründe für die niedrigeren maximalen Laktatkonzentrationen der Kinder werden diskutiert. Mögliche Erklärungen beinhalten eine verbesserte Elimination des Laktates aus dem Blut (Beneke et al., 2005), eine verbesserte Regulation der Wasserstoffionenkonzentration (H^+ -Ionen) sowie eine schnelle Atemregulation unmittelbar zu Beginn intensiver Belastungen bei Kindern gegenüber Erwachsenen (Ratel et al., 2002; Ratel et al., 2006). Darüber hinaus kann die Verteilung der Muskelfasertypen die Laktatkonzentrationen der Kinder beeinflussen, denn Kinder weisen einen höheren Anteil an Typ I Muskelfasern im Vergleich zu Erwachsenen auf (Lexell et al., 1992). Typ I Muskelfasern weisen eine höhere Dichte an Monocarboxylat-Transporter 1 (MCT1: Protein in der Zellmembran des Menschen, welches die Diffusion von Laktat und H^+ aus der Muskelzelle katalysiert und ein Übersäuern der Muskelzelle vermeidet) auf (Pilegaard et al., 1999; Juel, 2001). Daher ist der Transport von Laktat und H^+ -Ionen aufgrund der MCT 1 durch die Membran der Typ I Muskelfasern bei Kindern höher als bei Erwachsenen (Ratel et al., 2006). Ein weiterer Aspekt ist die Vermutung, dass Kinder bei intensiven Belastungen eine geringere Rekrutierung von motorischen Einheiten des Typ II aufweisen als Erwachsene und dadurch den Effekt der durch die unterschiedliche Muskelfaserstruktur auftritt noch verstärken (Dotan et al., 2012).

Trotz der Unterschiede in den Laktatkonzentrationen zwischen Jungen und Männern, betonen die Laktatwerte die hohe Belastung durch das HIIT in

der vorliegenden Studie. Die Höhe der Laktatkonzentrationen nach HIIT variiert in der Literatur zwischen 7,0 mmol/l und 8,6 mmol/l (Ratel, 2011; Sperlich et al., 2010), was ein niedrigeres Niveau als das in dieser Studie repräsentiert. Nur eine Studie zeigte bisher vergleichbar hohe Blutlaktatwerte (10,7 mmol/l) bei vorpubertären Kindern im Anschluss an einen einzelnen WAnT (Dotan et al., 2003). Jedoch sind die Laktatkonzentrationen der Jungen in der vorliegenden Studie mit 12,5 mmol/l höher als die Werte von Dotan et al. 2003. Diese Diskrepanz ist möglicherweise im hohen Fitnesslevel der Jungen und dem intensiveren HIIT Protokoll in der vorliegenden Studie begründet. Zusätzlich könnten das biologische Alter und die Geschlechtsreife der Jungen ebenfalls für die hohen Blutlaktatwerte verantwortlich sein. Jedoch weist die Gruppe der Jungen ein durchschnittliches Tannerstadium von $2,3 \pm 0,4$ auf und keiner der Jungen zeigte Anzeichen einer Frühreife. Doch ist es wahrscheinlich, dass Jungen im Tannerstadium I niedrigere Laktatwerte nach derselben Belastung aufgewiesen hätten und daher die Differenz der Blutlaktatkonzentrationen zwischen jüngeren oder weniger reifen Jungen und Männern größer wäre als die Differenz in der vorliegenden Studie. Die Höhe der Blutlaktatkonzentrationen der Männer in der vorliegenden Studie ist mit Werten aus der Literatur von trainierten Männern nach ähnlichen Protokollen von HIIT ($12,8 \pm 2,4$ mmol/l) vergleichbar (Wahl et al., 2013).

Die Jungen in der vorliegenden Studie waren $11,5 \pm 0,8$ Jahre alt und zeigten, wie bereits erwähnt, Tanner Stage $2,3 \pm 0,4$. Daher waren einige der Jungen, im Vergleich zu Tannerstadium I, in der Geschlechtsreife fortgeschritten, was eventuell ebenfalls in einer geringeren Differenz zwischen Kindern und Erwachsenen resultiert als es bei jüngeren Jungen vorgelegen hätte. Darüber hinaus handelte es sich bei den Jungen um gut trainierte und bereits selektierte Athleten, was bedeuten könnte, dass die anaerobe Kapazität und die glykolytische Reaktion zusätzlich durch Trainingszustand, Reife und Selektion beeinflusst worden ist. Daher könnten die dargestellten Ergebnisse die wirkliche Differenz zwischen Jungen und Erwachsenen hinsichtlich der Reaktionen des Speichelkortisols und des Blutlaktats unterschätzen.

Die hohe relative HR_{peak} betont ebenfalls die hohe Intensität während des HIIT in beiden Altersgruppen. Die höheren Herzfrequenzen der Jungen in den vier Sprints steht in Übereinstimmung mit der Literatur, die Kindern wäh-

rend intensiven Belastungen generell höhere Herzfrequenzen attestiert als Erwachsenen (Rowland, 2005). Die Gruppe der Erwachsenen bestand aus trainierten Sportlern und diese weisen generell und insbesondere bei Belastung niedrigere Herzfrequenzen auf als untrainierte Individuen (Astrand & Rodahl, 1986).

In allen vier Sprints war die PP und die MP der Jungen geringer als bei den Männern. Es konnte jedoch ein geringerer Rückgang der PP von Sprint 1 zu Sprint 4 für die Gruppe der Jungen nachgewiesen werden, was einer besseren Fatigue Resistance (Ermüdungswiderstandsfähigkeit) der Jungen entspricht, wie sie bereits in der Literatur mehrfach nachgewiesen werden konnte (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2002; Ratel et al., 2006). Die niedrigeren Leistungsindices (Beneke et al., 2005; Falgairette et al., 1991) und die bessere Fatigue Resistance der Jungen (Ratel et al., 2002; Ratel et al., 2006) ist in Übereinstimmung mit der Literatur und reflektiert die mit Wachstum und der Entwicklung (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006) steigende anaerobe Kraft und anaerobe Kapazität (Falgairette et al., 1991) sowie die abnehmende Fatigue Resistance (Falk & Dotan, 2006). Jedoch konnten die genauen Ursachen für die reduzierte anaerobe Kapazität und die verbesserte Fatigue Resistance der Kinder bisher nicht gänzlich erklärt werden. Falk & Dotan (2006) vermuten, dass Kinder über eine mangelnde Fähigkeit verfügen Typ II Muskelfasern zu rekrutieren und daher vermehrt Typ I Muskelfasern rekrutieren, was neben den reduzierten Laktatwerten (siehe oben) zu einer verringerten Leistung in Kurzzeitbelastungen und einer verbesserten Fatigue Resistance führt.

Eine methodische Betrachtung bezüglich der vier 30-sekündigen Sprints sollte abschließend noch diskutiert werden: Obwohl alle Teilnehmer mit Hochintensivem Training vertraut waren, bewerteten alle Teilnehmer die vier Sprints als „sehr intensiv“, sowohl physisch als auch mental. Daher könnten einige der erfahrenen erwachsenen Athleten eine „Pacingstrategie“ während der vier „all-out“ Tests angewendet haben, was am niedrigeren Fatigue Index der Männer sichtbar wird (Tabelle 3). Jedoch ist der Unterschied im Fatigue Index zwischen den Jungen und den Männern nicht signifikant und alle Teilnehmer starteten den Test mit maximaler Intensität, was eine Voraussetzung für das Testprotokoll darstellte.

6.6 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie ist die erste experimentelle Studie die den durch HIIT (vier aufeinanderfolgende „all-out“ Sprints auf dem Fahrradergometer) induzierten metabolischen und hormonellen Stress bei jungen Athleten analysiert. Der signifikante Anstieg von Speichelcortisol, Blutlaktat und Herzfrequenz macht die hohe kardio-respirative, metabolische und hormonelle Reaktion auf HIIT bei 11-jährigen Jungen deutlich. Wie erwartet fiel der physiologische Stress (Blutlaktat, Muscle Fatigue) in der Gruppe der Jungen geringer aus als in der Gruppe der Männer. Ebenfalls der Forschungshypothese entsprechend verursachte das HIIT eine signifikante Erhöhung des Speichelcortisols in beiden Probandengruppen. Entgegen der Forschungshypothese ist die Reaktion der HPA-Achse auf das HIIT in beiden Probandengruppen gleich hoch.

Da diese Studie lediglich die akute Reaktion auf eine einzelne HIIT Einheit analysiert sind zukünftig Studien nötig welche neben der kurzzeitigen Regeneration auch die längerfristige Reaktion, 12-48 Stunden nach Belastungsende, von hormonellen und physiologischen Parametern analysieren.

Die Anwendung von Langzeitinterventionen mit wiederholtem und exzessivem HIIT könnte zu einer dauerhaft hohen Aktivität der HPA-Achse führen. Längerfristig könnte eine solche Hyperaktivität des stresssensiblen Systems HPA-Achse in einer Dysregulation von anderen Systemen, z. B. des Immunsystems, resultieren. Besonders chronischer Stress und die Deregulation der HPA-Achse könnte zu einer inflammatorischen Diathese beitragen (Heim et al., 2000; Raison & Miller, 2003), was in immunologischen Problemen und reduzierter Leistungsfähigkeit resultieren kann. Daher sind weitere Studien notwendig um die hormonelle Reaktion von Kindern auf HIIT, als auch die Konsequenzen von Langzeitinterventionen mit HIIT zu untersuchen.

7 Studie II: Blutlaktatkinetik im Anschluss an einen 4x30-s Sprint und einen 1x30-s Sprint bei trainierten Kindern und Erwachsenen Athleten

7.1 Abstract

Kinder sind gegenüber Ermüdung während Hochintensivem Intervalltraining (HIIT) widerstandsfähiger und regenerieren nach HIIT schneller als Erwachsene, doch sind die genauen Gründe dafür unklar. Die vorliegende Studie analysiert die Blutlaktatkinetik (BLK) und die Leistung bei 21 trainierten Jungen (11,4±0,8 Jahre) und 19 erwachsenen Sportlern (29,4±5,0 Jahre) während und nach HIIT (4x30-s Sprint) und einem einzelnen Sprint (1x30-s Sprint) um Ursachen der unterschiedlichen Regeneration zu identifizieren. Die Blutlaktatkonzentrationen (LA) wurden jeweils unmittelbar nach jedem Sprint und während der 30-minütigen Erholung gemessen. Die individuellen Blutlaktatkurven der zwei Sprintprotokolle wurden jeweils in folgende biexponentielle Zeitfunktion gefittet: $LA(t) = LA(0) + A_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + A_2(1 - e^{-\gamma_2 t})$, wobei γ_1 und γ_2 die Fähigkeit zum Austausch von Laktat zwischen der vorher aktiven Muskulatur und dem Blut beschreibt, bzw. die Fähigkeit Laktat aus dem Organismus zu eliminieren. Die Leistung wurde in allen Sprints aufgezeichnet. Die höchsten LA der Jungen (4x30-s Sprint: 12,2±3,6 mmol·L⁻¹; 1x30-s Sprint: 8,7±1,8 mmol·L⁻¹) waren in beiden Tests geringer als bei den erwachsenen Sportlern (4x30-s Sprint: 16,1±3,3 mmol·L⁻¹; 1x30-s Sprint: 11,5±2,1 mmol·L⁻¹; p<0.01) und traten nach dem 1x30-s Sprint früher auf (p<0.01). Bei den Jungen lagen höhere γ_1 Werte nach dem 1x30-s Sprint und höhere γ_2 Werte nach beiden Sprintprotokollen vor (p<0.05). Der prozentuale Rückgang der Maximalleistung vom ersten zum vierten Sprint im 4x30-s Sprint und die Ermüdung im 1x30-s Sprint war bei den Jungen geringer als bei den erwachsenen Sportlern (p<0.05). Die Schlussfolgerungen ergeben dass ein schnellerer Austausch von Laktat, niedrigere LA_{peak} und die geringere

Muskelermüdung günstige Faktoren für die Anwendung von HIIT im Nachwuchsleistungssport darstellen. Die analysierten Unterschiede in den Parametern werden durch Unterschiede in kardio-respirativen und neuro-motorischen Funktionen während der Belastung und in anthropometrischen Unterschieden zwischen Kindern und Erwachsenen verursacht, wie in der Literatur gezeigt werden konnte.

Schlüsselwörter: Hochintensives Intervalltraining; Kinder; Laktat; Eliminierung, Abbau

7.2 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich das Hochintensive Intervalltraining (HIIT) im leistungssportlichen Setting zur populären Trainingsmethode entwickelt um die Leistungsfähigkeit von Erwachsenen (Laursen & Jenkins, 2002; Helgerud et al., 2011), Jugendlichen (Breil et al., 2010) und Kindern (Sperlich et al., 2010; Sperlich et al., 2011) zu verbessern. Während den dynamischen Intervallen in sehr hohen Intensitätsbereichen sind Kinder für muskuläre Ermüdung weniger anfällig (Ratel et al., 2002; Ratel et al., 2006; Dipla et al. 2009) und regenerieren schneller als männliche Erwachsene im Anschluss an HIIT (Hebestreit et al., 1993; Buchheit et al., 2010).-

Die genauen Ursachen für die Unterschiede in Ermüdung und Regeneration zwischen Kindern und Erwachsenen beim HIIT sind bisher nicht eindeutig geklärt (Ratel et al. 2006; Falk & Dotan, 2006). Verschiedene Gründe werden als Ursachen für die genannten Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen bei hochintensiven Intervallbelastungen diskutiert: a) eine geringere Abhängigkeit von der Glykolyse während HIIT (Boisseau & Delamarche, 2000; Ratel, et al., 2002; Ratel, et al., 2008); b) eine verbesserte Beseitigung von Metaboliten in der Nachbelastungsphase (Beneke et al., 2005); c) weniger Muskelmasse und eine differentielle Aktivierung und Rekrutierung von motorischen Einheiten (Ratel et al., 2006; Dotan et al., 2012); d) eine bessere Säure-Basen Regulation (Ratel et al., 2002); oder eine Kombination aus a) b) und c).

Aus der wissenschaftlichen Perspektive ist die Analyse der Blutlaktatkinetik während HIIT von Interesse um die Bildung von Laktat im Muskel und die Diffusion in den Blutkreislauf sowie die Elimination aus dem Organismus zu quantifizieren. Während und nach dem HIIT steigen die Blutlaktat- und H^+ -Ionenkonzentration signifikant an und die hohen Werte des Blutlaktat und der damit einhergehende Anstieg der pH-Werte bewirken eine Verringerung der ATP Produktion und induzieren eine Muskelermüdung (Booth & Thomason, 1991). Es konnte gezeigt werden, dass erhöhte Muskellaktatkonzentrationen bei Männern ein früheres Einsetzen der Ermüdung während HIIT verursachen (Bangsbo et al., 1996). Auch bei gut trainierten Männern konnte gezeigt werden, dass erhöhte Konzentrationen von Blutlaktat signifikant geringere Leistungen im Verlauf von hochintensiven Intervallen verursachen (Hägele et al., 2009). Daher scheint es wichtig in welcher Zeitspanne die Diffusion des Laktat vom Muskel in das Blut und die Elimination des Laktat aus dem Organismus während und nach dem HIIT erfolgt. Zahlreiche Untersuchungen bestätigten, dass die Blutlaktatkonzentrationen bei Jungen, trainierte wie untrainierte, im Anschluss an HIIT geringer sind als bei männlichen Jugendlichen und Erwachsenen (Buchheit, et al., 2010; Mujika, et al., 2009; Ratel, et al, 2002). In diesem Zusammenhang konnte Beneke et al. (2005) nach einem 30-sekündigen Wingate Anaerobic Test eine verbesserte Elimination der Laktatkonzentrationen im Blut bei Jungen im Vergleich zu Jugendlichen und Erwachsenen nachweisen. Falls Kinder nach einem einmaligen intensiven Sprint eine verbesserte Laktatelimination aufweisen ist es wahrscheinlich, dass Kinder auch im Anschluss an HIIT über eine verbesserte Laktatelimination verfügen als Erwachsene.

Bisher wurde mittels biexponentiellem vier-parameter Kinetikmodell auf der Grundlage der Blutlaktatkonzentrationen vom Ruhezustand bis 30 bzw. 60 Minuten nach Belastungsende die Blutlaktatkinetik berechnet (Freund & Zouloumian, Part I-IV, 1981; Messione et al., 2006; Rimaud et al., 2010). Die Berechnung der Blutlaktatkinetik analysiert Indikatoren für die Bildung und Elimination von Blutlaktatkonzentrationen während HIIT. Wobei die Bildung von Laktat im Muskel erfolgt und dann in den Blutkreislauf diffundiert. Die Elimination der Laktatkonzentrationen wird definiert als die Reduzierung der

Laktatkonzentrationen im Blut. Die Indikatoren der Bildung und der Elimination von Laktat werden anschließend zwischen trainierten Jungen und trainierten Männern verglichen. Darüber hinaus können in diesem Zusammenhang die höchsten Laktatwerte in der Nachbelastungsphase sowie die Dynamik der anschließenden Reduzierung der Blutlaktatkonzentrationen identifiziert werden.

Bisher gibt es lediglich Daten zur Bildung und Elimination von Laktat nach einer einzelnen intensiven Belastung bei Kindern und Jugendlichen (Beneke et al., 2005; Dotan et al., 2003). Für die Blutlaktatkinetik von trainierten Kindern während und nach HIIT liegen keine Erkenntnisse vor.

Die Raten der Bildung und Elimination des Blutlaktat könnten weitere Hinweise zu den Ursachen der verbesserten Ermüdungsresistenz und der unmittelbaren Regeneration bei Kindern im Zusammenhang mit HIIT liefern. Es ist wahrscheinlich, dass ein schneller Laktatmetabolismus (Eine schnellere Diffusion und Elimination von Laktatkonzentrationen) während und nach HIIT ein Faktor ist welcher zur beobachteten besseren Ermüdungsresistenz (Ratel et al., 2002; Dipla et al. 2009) und unmittelbaren Regeneration (Hebestreit et al., 1993) der Kinder beiträgt.

Daher ist das Ziel dieser Studie die Analyse der Blutlaktatkinetik und der Muskelermüdung auf (a) eine Serie von vier aufeinanderfolgend absolvierten 30-sekündigen Sprints (4x30-s Sprints) und (b) ein einzelner 30-sekündiger Sprint (1x30-s Sprint) bei trainierten Jungen und trainierten Männern. Aufgrund der beobachteten schnelleren Elimination der Laktatkonzentrationen der Jungen nach einem einzelnen Wingate Anaerobic Test (Beneke et al., 2005) lautet die Hypothese: Während und nach einer einzelnen Einheit Hochintensivem Intervalltraining (4x30-s Sprint) und einer einzelnen hochintensiven Belastung (1x30-s Sprint) erfolgt die Diffusion von Laktat aus dem Muskel in das Blut und die Elimination von Laktat aus dem Blut bei trainierten Jungen jeweils schneller als bei trainierten Erwachsenen.

7.3 Methoden

Teilnehmer

Einundzwanzig gesunde Jungen (MW \pm STABW, 11,4 \pm 0,8 Jahre) des Talentteams eines lokalen Fußballvereins (U 12) und 19 gesunde und trainierte

Männer (29,4 ± 5,0 Jahre) eines weiteren lokalen Sportvereins nahmen an der Studie teil. Alter und ausgewählte anthropometrische Daten sowie die VO_{2peak} und Angaben zu Trainingsumfang und Trainingsalter sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die vorliegende Studie wurde in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Alle Teilnehmer, bzw. bei minderjährigen Teilnehmern deren Erziehungsberechtigte, unterzeichneten eine Einverständniserklärung nachdem sie über den Zweck und mögliche Risiken der Studie informiert wurden. Die Einschlusskriterien für die Teilnahme der Jungen und der Männer lauteten: Drei Trainingseinheiten systematisches und spezialisiertes Training (mindestens 1 Stunde pro Trainingseinheit) pro Woche, um einen vergleichbaren Trainings- und Fitnessstand zu gewährleisten sowie eine regelmäßige Teilnahme an Wettkämpfen während den letzten zwei Jahren. Ausschlusskriterien waren jegliche chronische oder akute mentale oder körperliche Erkrankungen oder Einschränkungen sowie die Einnahme jeglicher pharmazeutischer Substanzen (z.B. Ritalin®). Die Ein- und Ausschlusskriterien wurden per Fragebogen ermittelt.

Tabelle 1. MW ± STABW der anthropometrischen Daten, VO_{2max} und Trainingsumfang der Jungen und Männer.

	Jungen	Männer
N	21	19
Alter [Jahre]	11,4 ± 0,8*	29,4 ± 5,0
Größe [cm]	148,7 ± 6,1*	178,9 ± 6,5
Gewicht [kg]	37,4 ± 4,7*	75,8 ± 6,7
Tannerstadium	2,3 ± 0,3	n.a.
Magermasse [kg]	32,5 ± 4,4*	64,5 ± 6,3
Körperfett [%]	9,5 ± 2,9	8,2 ± 4,6
VO_{2peak} [ml/min/kg]	42,3 ± 5,6†	47,3 ± 8,2
Trainings- umfang [h/Woche]	4,9 ± 1,0*	10,1 ± 5,4
Trainingshäufigkeit [Einheiten/Woche]	3,2 ± 0,6*	5,9 ± 3,1
Trainingsalter [Jahre]	5,1 ± 1,6	4,4 ± 2,7

*—signifikanter Unterschied zu Männern ($p < 0.01$). †—signifikanter Unterschied zu Männern ($p < 0.05$). n.a.—nicht angewendet.

Experimentelles Design

Alle Teilnehmer waren mit dem Testprotokoll sowie dem Ablauf der Testprozedur vertraut, da alle Teilnehmer bereits in vorangegangenen Studien im selben Labor involviert waren.

Das generelle Studiendesign beinhaltete (a) vier aufeinanderfolgende 30-sekündige Sprints (4x30-s Sprint) [Wingate Anaerobic Test (Inbar, Bar-Or & Skinner, 1996)], gefolgt von einer 2-minütigen aktiven Regeneration nach jedem Sprint und (b) einem einzelnen 30-sekündigen Sprint (1x30-s Sprint). Alle Sprints der beiden Protokolle wurden jeweils mit maximaler Intensität absolviert und die zwei Protokolle wurden in randomisierter Reihenfolge an zwei verschiedenen Tagen, mit mindestens 48 Stunden Pause, durchgeführt. Alle Teilnehmer absolvierten die 4x30-s Sprints und den 1x30-s Sprint auf einem elektrodynamisch gebremsten Fahrradergometer (Schoberer Rad Meßtechnik GmbH, Jülich, Deutschland). Der Mittelwert des im Labor gemessenen Technischen Messfehler (%TEM) der Peak Power (P_{peak}) und der Mean Power (P_{mean}) in den 4x30-s Sprints an zwei Messzeitpunkten betrug $3,2\pm 1,2\%$ und $1,9\pm 0,8\%$. Der %TEM der P_{peak} und der P_{mean} im 1x30-s Sprint an zwei Messzeitpunkte betrug $1,9\pm 0,6\%$ und $1,4\pm 0,3\%$.

Die Tanner Stadien wurden bestimmt um die geschlechtliche Reife (Tanner & Whitehouse, 1976) der teilnehmenden Jungen zu analysieren. Dazu wurde den Erziehungsberechtigten Zeichnungen mit schriftlichen Erklärungen der Entwicklungsstadien ausgehändigt. Ein Studienleiter war für Fragen zu den Tanner Stadien anwesend. Bei den minderjährigen Probanden fanden sämtliche Prozeduren im Labor in Anwesenheit eines Elternteils statt.

Die Körpergröße wurde auf 0,1 cm genau mittels Stadiometer (Seca 214, Hamburg, Deutschland) gemessen. Das Körpergewicht wurde auf 0,1 kg genau mittels kalibrierter Personenwaage (Seca 769, Hamburg, Deutschland) gemessen. Die Magermasse und der prozentuale Anteil Körperfett (%Körperfett) wurden mittels Ganzkörper Bioimpedanzanalyse (Nutrigard-S, Data Input, Darmstadt, Deutschland) ermittelt. Alle Messungen der Bioimpedanzanalyse wurden mit Vierflächenelektroden (tetra polar) an der rechten Hand und dem rechtem Fuß der Probanden durchgeführt.

Alle Test wurden in einem sportphysiologischen Labor (Umgebungstemperatur: $23\pm 1^{\circ}\text{C}$; relative Luftfeuchtigkeit, $44\pm 3\%$)

durchgeführt. Um circadiane Einflüsse zu minimieren wurden alle Tests zwischen 17:00 und 19:00 Uhr durchgeführt. Die Teilnehmer wurden instruiert in den letzten zwei Stunden vor dem Test nur Wasser zu trinken und nicht zu essen. Darüber hinaus durften die Teilnehmer 24 Stunden vor dem Test keine anstrengenden (sportlichen) Aktivitäten durchführen und kein Koffein, Alkohol oder Tabak konsumieren.

4x30-s Sprints: In Übereinstimmung mit den standardisierten Instruktionen des Wingate Anaerobic Test (Inbar et al., 1996) absolvierten die Teilnehmer vor den vier Sprints ein zehnminütiges Aufwärmen mit 2,0 W/kg und 60-90 Umdrehungen pro Minute (UpM) mit anschließender dreiminütiger Erholung. Im Anschluss daran absolvierten die Teilnehmer die vier 30-sekündigen Sprints mit einer zweiminütigen aktiven Pause zwischen den Sprints. Alle Teilnehmer wurden instruiert jeden der Sprints mit maximaler Intensität durchzuführen (Inbar et al., 1996). Die Trittfrequenz wurde elektronisch auf 120 UpM begrenzt (Isokinetikmodus). Die aktive Erholung zwischen den Sprints wurde bei 1,5 W/kg Körpergewicht und 60-90 UpM absolviert. Nach dem letzten Sprint fuhren die Teilnehmer für drei Minuten bei 1,5 W/kg Körpergewicht, um Kreislaufproblemen vorzubeugen. Im Anschluss daran absolvierten alle Teilnehmer unter Beobachtung und in sitzender Position die 27-minütige passive Regeneration.

1x30-s Sprint: An einem anderen Tag absolvierten die Teilnehmer einen einzelnen 30-sekündigen Sprint. Das Testprotokoll entsprach den 4x30-s Sprints, mit dem Unterschied, dass nur ein einzelner 30-sekündiger Sprint absolviert wurde.

Testparameter

Die Blutabnahmen zur Bestimmung der Laktatkonzentrationen, Entnahme von 20 µl Kapillarblut aus dem hyperämisierten rechten Ohrfläppchen, fanden vor und nach dem Aufwärmen, sowie nach dem ersten Sprint in den 4x30-s Sprints und dem 1x30-s Sprint statt. Während den 4x30-s Sprints wurden zusätzliche Blutproben nach dem zweiten und dritten Sprint entnommen (Abbildung 1). In der Nachbelastungsphase wurden nach den 4x30-s Sprints und dem 1x30-s Sprint die Blutproben in folgenden Abständen

entnommen: In den Minuten zwei und fünf und ab Minute fünf alle fünf Minuten bis zur 30. Nachbelastungsminute (Abbildung 1). Die individuell höchste gemessene Blutlaktatkonzentration im 4x30-s Sprint sowie im 1x30-s Sprint wurde jeweils als LA_{peak} definiert. Alle Blutproben wurden in 2 ml Mikrotest Behältern hämolysiert und mittels amperometrisch-enzymatischer Verfahren mit dem EKF BIOSEN C-Line (EKF Diagnostics GmbH, Barleben, Deutschland) auf die Laktatkonzentration analysiert. Der Variationskoeffizient der Messwiederholung für Blutlaktat beträgt 1,3% bei $12 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Die Herzfrequenz wurde während den vier Sprints und während des einzelnen Sprints kontinuierlich in 0,5 Sekunden Intervallen mittels Polar® RS 800 Pulsmesser (Polar, Kempele, Finnland) telemetrisch gemessen. Die individuell höchste Herzfrequenz von jedem Teilnehmer (HF_{peak}) wurde definiert als die höchste gemessene Herzfrequenz in einem der 0,5-sekündigen Intervalle während der vier Sprints.

Die Sauerstoffaufnahme und Kohlendioxidabgabe während den 4x30-s Sprints wurde im breath-by-breath Verfahren mittels Spirometrie Meta Max 3B® (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Deutschland) während allen Sprints, inklusive des Aufwärmens und während der 30-minütigen Regeneration aufgezeichnet. Vor jedem Test wurden die Gas- und Volumensensoren entsprechend den Angaben des Herstellers und unter Verwendung von Hochpräzisionsgas ($15\% \text{ O}_2$; $5\% \text{ CO}_2$ in N; Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Deutschland) und 3L Syringe (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany) kalibriert. Alle Respirationsdaten wurden anschließend in 30-Sekunden Intervallen gemittelt und der höchste Wert der Sauerstoffaufnahme wurde als VO_{2peak} betrachtet.

Peak Power (P_{peak}) und Mean Power (P_{mean}) in den vier Sprints und im einzelnen Sprint wurden alle 0,5 Sekunden aufgezeichnet. P_{peak} ist definiert als höchste Mechanische Kraft die im 30-sekündigen Sprint geleistet wird und P_{mean} ist die durchschnittliche mechanische Kraft die in den 30 Sekunden geleistet wird. Der Fatigue Index (FI) ist definiert als Grad des Rückgangs der mechanischen Kraft während des Sprints und wurde in allen vier Sprints und im einzelnen Sprint wie folgt berechnet:

$$FI = (P_{peak} - \text{geringste Power}) / P_{peak} \cdot 100 \text{ (Inbar et al., 1996).}$$

P_{peak} und P_{mean} sind auf die Magermasse relativiert (P_{rel}).

Der Rückgang der P_{peak} vom ersten zum vierten Sprint in den 4x30-s Sprints wurde wie folgt berechnet:

$$\text{Abnahme der } P_{\text{peak}} = 100 - (100 \cdot (P_{\text{peak 4. Sprint}} / P_{\text{peak 1. Sprint}}))$$

Höhere Prozentwerte repräsentieren eine größere Ermüdung im Verlauf der vier Sprints.

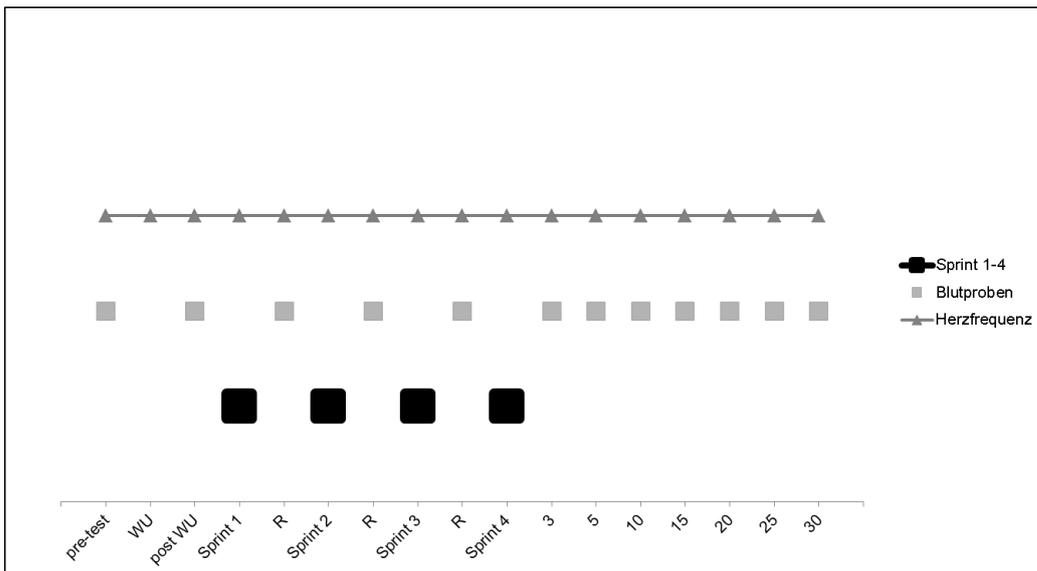


Abbildung 1. Schematische Darstellung des Testprotokolls der vier aufeinanderfolgenden Sprints. WU—Aufwärmen. R—zweiminütige aktive Regeneration im Anschluss an den 30-sekündigen Sprint.

Mathematische Analysen

An die individuellen Blutlaktatwerte der Nachbelastungsphase jedes Teilnehmers wurden eine biexponentielle Zeitfunktion folgender Form gefittet (Messonnier et al., 2006; Rimaud et al., 2010):

$$LA(t) = LA(0) + A_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + A_2(1 - e^{-\gamma_2 t})$$

(1)

Die zu bestimmenden Parameter wurden mittels nichtlinearer Regressionsanalyse ermittelt (Methode der kleinsten Fehlerquadrate). In Gleichung (1) repräsentiert $LA(t)$ die Laktatkonzentration im arteriellen Blut ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) als eine Funktion der Zeit t (min) während der Regenerationsphase. $LA(0)$ repräsentiert die Laktatkonzentration zu Beginn der Regeneration.

Die Parameter A_1 und A_2 ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) beschreiben die Variationsamplituden der Blutlaktatkonzentration im arteriellen Blut, wobei A_1 positiv und A_2 negativ ist. Die positiven Geschwindigkeitskonstanten γ_1 und γ_2 ($1/\text{min}$) beschreiben die Fähigkeit des Organismus das Laktat zwischen der während der Belastung aktiven Muskulatur und dem Blut auszutauschen (γ_1), bzw. die Fähigkeit des Körpers während der Regenerationsphase das Laktat aus dem Blut zu eliminieren (γ_2) (Freund & Zouloumian, 1981; Freund et al. 1986; Messonnier et al. 2006; Rimaud et al., 2010). Für den Zeitpunkt vollständiger Regeneration wurde zudem folgende Randbedingung formuliert:

$$LA(\infty) \approx LA(0) + A_1 + A_2$$

(2)

Die Güte der gefitteten Funktionen wurde mittels Korrelationskoeffizienten analysiert. Die ermittelten r^2 -Werte lagen jeweils bei mindestens 0.98.

Unter Verwendung der in Gleichung (1) berechneten Parameter, wurde ein Zweikomponentenmodell des Laktatverteilungsraumes bestimmt. Dieses Modell erlaubt die Beschreibung der Entwicklung der Laktatnettofreisetzungsrates (Netto Lactate Release Rate (NLRR, mmol/min)) während der Regeneration:

$$NLRR(t) = (\gamma_1 - d_2) \cdot V_S \cdot A_1 \cdot e^{-\gamma_1 t} + (\gamma_2 - d_2) \cdot V_S \cdot A_2 \cdot e^{-\gamma_2 t} + \mu$$

(3)

Hierbei bezeichnet V_S das Volumen des Verteilungsraumes, welcher durch die Differenz des gesamten Verteilungsraum des Laktates (V_{TLS}) und des Volumens der Muskulatur, die in der vorherigen Belastung involviert sind (V_M),

repräsentiert, d. h. $V_S = V_{TLS} - V_M = 250$ ml/kg Körpergewicht. Durch μ wird die basale Laktatabgaberate in das Blut beschrieben, d.h. 0,12 mmol/min. Das Modell ermöglicht realistische Vorhersagen wenn d_2 nahe bei γ_2 liegt. Daher setzten wir $d_2 = \gamma_2 - 0,005$, um die NLRR abzuschätzen. Integration der Gleichung (3) über die Zeit schätzt die Menge der Laktatausschüttung ($NALR$, mmol) von der in der vorherigen Belastung aktiven Muskulatur in das Blut als eine Funktion der Regenerationszeit in der Nachbelastungsphase (Freund & Zouloumian, 1981; Messonier et al., 2006; Rimaud et al., 2010). Mit Hilfe dieser Funktion wurde die NALR für die Zeitpunkte 15 Minuten und 30 Minuten nach Belastung bestimmt.

Alle mathematischen Analysen wurden mittels MathWorks MATLAB V7.12 (R2011a) durchgeführt.

Statistische Analysen

Alle statistischen Auswertungen und Tests wurden mittels SPSS Statistics 18 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) durchgeführt. Alle Daten sind als Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (STABW) angegeben. Die physiologischen Daten wurden auf Normalverteilung überprüft. Die anthropometrischen Daten und die VO_{2peak} beider Teilnehmergruppen wurden mittels T-Test für unabhängige Stichproben auf Unterschiede analysiert. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) wurde durchgeführt, um auf signifikante Unterschiede zwischen Jungen und Erwachsenen in den Parametern Blutlaktat und den Parametern der Blutlaktatkinetik, Herzfrequenz, und Leistungsindices in den Pre- und Posttests zu testen. Das Signifikanzniveau wurde a priori bei $\alpha=0.05$ festgelegt.

7.4 Ergebnisse

Blutlaktat

Die höchsten Laktatkonzentrationen (LA_{peak}) der Jungen waren geringer als in der Gruppe der Männer während und nach dem 4x30-s Sprint und dem 1x30-s Sprint (4x30-s Sprints Jungen: $12,2 \pm 2,3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; 4x30-s Sprints Männer: $16,1 \pm 3,3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; $p < 0.01$; Tabelle 2; 1x30-s Sprint Jungen: $8,7 \pm 1,8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; 1x30-s Sprint Männer: $11,5 \pm 2,1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; $p < 0.01$; Tabelle 2). Keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen gab es in im Zeitpunkt des Auftretens der LA_{peak} im 4x30-s Sprint (Jungen: $01:06 \pm 01:20$ Minuten post-test; Männer: $01:30 \pm 01:20$ Minuten post-test; $p > 0.05$; Tabelle 2). Die LA_{peak} im 1x30-s Sprint trat bei den Jungen signifikant früher auf als bei den Männern (Jungen: $02:20 \pm 1:00$ Minuten post-test; Männer $05:06 \pm 3:00$ Minuten post-test; $p < 0.01$; Tabelle 2). Die Blutlaktatkonzentrationen der Jungen während den 4x30-s Sprints und der anschließenden 30-minütigen Regeneration waren geringer als bei den Männern ($p < 0.01$), mit Ausnahme der Werte Baseline und nach dem ersten Sprint (Abbildung 2A). Im 1x30-s Sprint und der anschließenden 30-minütigen Regenerationsphase wiesen die Jungen ebenfalls geringere Blutlaktatkonzentrationen auf als die Männer ($p < 0.01$), mit der Ausnahme der Werte zu den Zeitpunkten Baseline und nach dem Warm-up (Abbildung 2B).

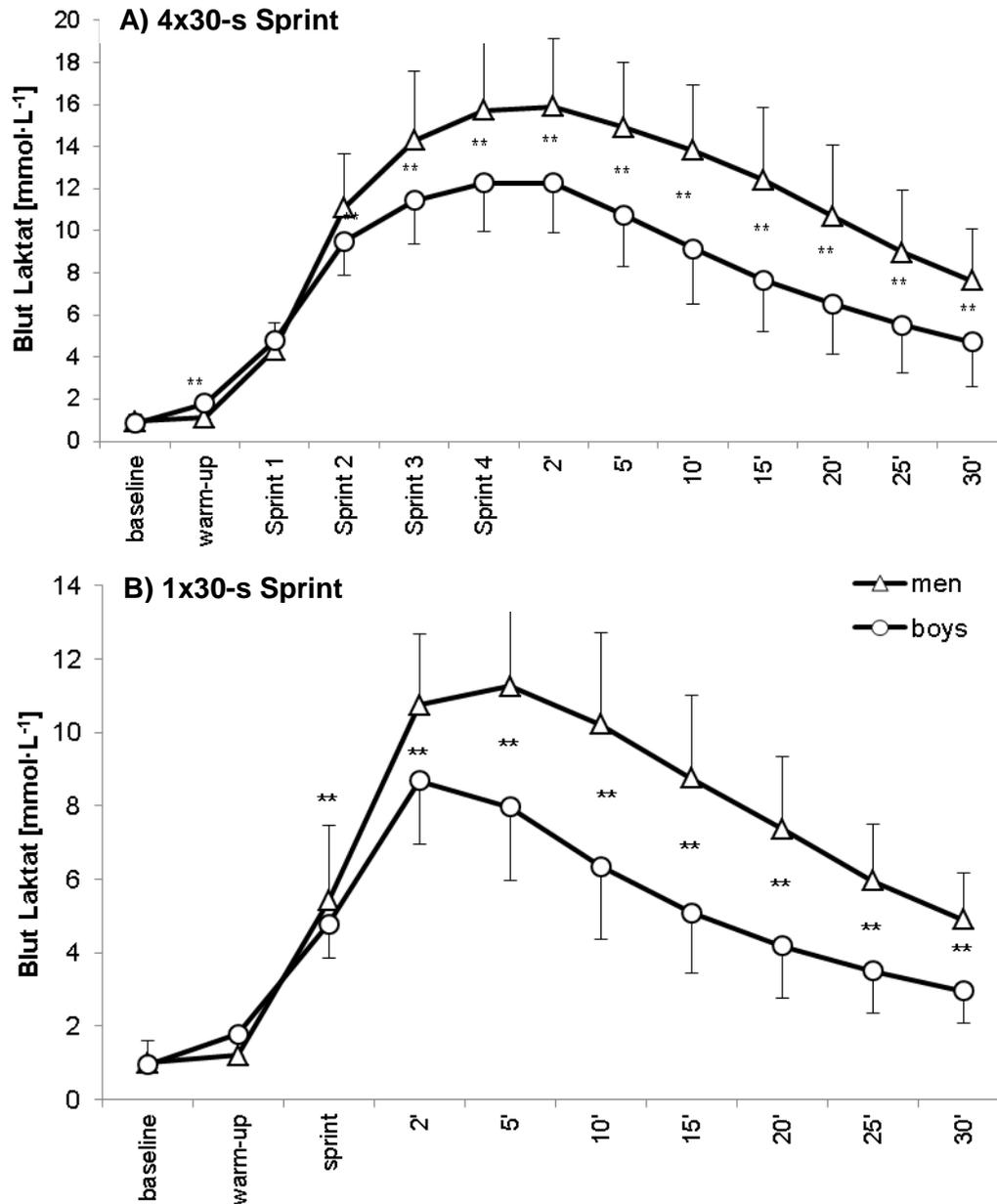


Abbildung 2A. Mittelwert (± 1 Stabw.) der Blutlaktatkonzentrationen im Zeitverlauf von Pretest bis 30 Minuten nach Ende des vierten Sprints bei Jungen (Kreis) und Männern (Dreieck). ** Signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen ($p < 0.01$).

Abbildung 2B. Mittelwert (± 1 Stabw.) der Blutlaktatkonzentrationen im Zeitverlauf von Pretest bis 30 Minuten nach Ende des Sprints bei Jungen (Kreis) und Männern (Dreieck). ** Signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen ($p < 0.01$).

Parameter der Bildung und Elimination des Laktat

Die durchschnittlichen Werte der Parameter welche die Blutlaktatkinetik während Belastung und Regeneration beschreiben zeigten signifikante Unterschiede zwischen Jungen und Männern (Tabelle 2). Die Amplituden A_1 and A_2 zeigten niedrigere Werte für Jungen als für die Männer, jeweils im 4x30-s Sprint und im 1x30-s Sprint ($p < 0.01$). Die Geschwindigkeitskonstanten γ_1 und γ_2 , welche die zentrale Aussage über die Geschwindigkeit der Diffusion und Elimination des Laktats liefern und somit für die vorliegende Studie am wichtigsten sind, waren bei den Jungen im 4x30-s Sprint und im 1x30-s Sprint höher als bei den Männern (4x30-s Sprint: $\gamma_1 p > 0.05$; $\gamma_2 p < 0.01$; 1x30-s Sprint: $\gamma_1 p < 0.01$; $\gamma_2 p < 0.05$; Tabelle 2). Der Unterschied bei γ_1 im 4x30-s Sprint erreichte keine statistische Signifikanz ($p > 0.05$). Die Berechnung der Entwicklung der Laktatnettofreisetzungsrates (NLRR, mmol/min) von der in der Belastung aktiven Muskulatur in das Blut zu den Zeitpunkten 15 und 30 Minuten der Regenerationsphase war bei den Jungen wesentlich geringer als bei den Erwachsenen, jeweils nach dem 4x30-s Sprint und dem 1x30-s Sprint ($p < 0.01$).

Tabelle 2. Mittelwert (± 1 Stabw.) der Blutlaktatkonzentrationen im Zeitverlauf und Mittelwerte der Parameter des Fits im 4x30-s Sprint und im 1x30-s Sprint Jungen und Männern

	Jungen 4x30-s Sprint	Männer 4x30-s Sprint	Jungen 1x30-s Sprint	Männer 1x30-s Sprint
A_1 [mmol·L ⁻¹]	16,28 \pm 2,61	22,62 \pm 5,39**	5,54 \pm 1,79	10,37 \pm 5,08**
γ_1 [min]	0,2335 \pm 0,05	0,2216 \pm 0,05	1,4531 \pm 0,65	0,5838 \pm 0,24**
A_2 [mmol·L ⁻¹]	-20,32 \pm 2,76	-26,90 \pm 4,91**	-9,36 \pm 2,48	-15,00 \pm 4,37**
γ_2 [min]	0,049 \pm 0,016	0,036 \pm 0,014**	0,059 \pm 0,023	0,043 \pm 0,013*
LA(0) [mmol·L ⁻¹]	12,26 \pm 2,32	15,73 \pm 3,40**	4,77 \pm 0,94	5,42 \pm 2,05**
NALR ₍₁₅₎ [mmol·L ⁻¹]	110,2 \pm 22,0	309,8 \pm 73,3**	46,3 \pm 14,0	157,8 \pm 79,0**
NALR ₍₃₀₎ [mmol·L ⁻¹]	110,6 \pm 21,6	311,6 \pm 73,7**	46,1 \pm 13,3	152,1 \pm 78,7**
LA _{peak} [mmol·L ⁻¹]	12,2 \pm 2,3	16,1 \pm 3,3**	8,7 \pm 1,8	11,5 \pm 2,1**
TLA _{peak} [min]	1:06 \pm 1:20	1:30 \pm 1:20	2:20 \pm 1:00	5:06 \pm 3:00**

A_1 und A_2 —Variationsamplituden der Blutlaktatkonzentration im arteriellen Blut. γ_1 und γ_2 —Geschwindigkeitskonstanten der biexponentiellen Zeitfunktion die den Laktataustausch zwischen Muskel und Blut, sowie die Fähigkeit zur Elimination von Laktat beschreiben. LA(0)—Blutlaktatkonzentration zu Beginn der Regeneration. NALR₍₁₅₎ und NALR₍₃₀₎—Schätzung der Menge der Laktatausschüttung 15 min und 30 min nach Ende der Belastung. LA_{peak}—Höchste gemessene Blutlaktatkonzentration. TBLA_{peak}—Zeitpunkt der Messung der höchsten Blutlaktatkonzentration. ** Signifikanter Unterschied ($p < 0.01$). * Signifikanter Unterschied ($p < 0.05$).

Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme

Die durchschnittliche Herzfrequenz der Jungen war in jedem der 4x30-s Sprints signifikant höher als die durchschnittliche Herzfrequenz der Männer ($p < 0.01$; Tabelle 3). Die mittlere Herzfrequenz des ersten Sprints der 4x30-s Sprints war in beiden Altersgruppen niedriger als in den Sprints 2, 3 und 4 ($p < 0.001$; Tabelle 3). Die Herzfrequenz der Jungen war im 1x30-s Sprint niedriger als in der Gruppe der Männer ($p < 0.01$; Tabelle 3).

Signifikante Unterschiede wurden in der relativen VO_{2peak} (ml·min⁻¹·kg⁻¹) und der absoluten VO_{2peak} (l·min⁻¹) im 4x30-s Sprint zwischen Jungen und Männern gefunden (Jungen: 42,05 \pm 5,7 ml·min⁻¹·kg⁻¹; Männer: 49,63 \pm 6,9 ml·min⁻¹·kg⁻¹).

$l \cdot \text{kg}^{-1}$; $p < 0.05$; Tabelle 1; Jungen: $1,6 \pm 0,2 l \cdot \text{min}^{-1}$; Männer: $3,7 \pm 0,5 l \cdot \text{min}^{-1}$; $p < 0.01$).

Tabelle 3. Mittelwert (± 1 Stabw.) der mittleren Herzfrequenz im 4x30-s Sprint und im 1x30-s Sprint der Jungen und Männer.

		Sprint 1	Sprint 2	Sprint 3	Sprint 4	1x30-s Sprint
HF	Jungen	166 ± 13	174 ± 8	175 ± 6	177 ± 8	164 ± 19
[s/min]						
HF	Männer	$154 \pm 13^*$	$163 \pm 11^*$	$162 \pm 11^*$	$160 \pm 20^*$	$173 \pm 12^*$
[s/min]						

HF—Herzfrequenz. * Signifikanter Unterschied ($p < 0.01$).

Leistungsindices

Die relative P_{peak} ($W \cdot \text{kg lean body mass}^{-1}$) der Jungen war in allen 4x30-s Sprints geringer als bei den Männern ($p < 0.01$; Table 4). Die relative P_{mean} ($W \cdot \text{kg lean body mass}^{-1}$) der Jungen in jedem der 4x30-s Sprints war ebenfalls geringer (Sprint 1, 2 und 3 $p < 0.01$; Sprint 4 $p < 0.05$; Tabelle 4). In beiden Altersgruppen erfolgte ein signifikanter Rückgang der P_{peak} vom ersten zum vierten Sprint während den 4x30-s Sprints ($p < 0.01$; Tabelle 4). In der Gruppe der Jungen war der Rückgang der P_{peak} vom ersten zum vierten Sprint geringer als der Rückgang in der Gruppe der Männer (Jungen: $-9,2\% \pm 13,9$; Männer: $-19,2\% \pm 11,5$; $p < 0.05$; Tabelle 4). Der FI in allen 4x30-s Sprints zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen Jungen und Männern ($p < 0.01$; Table 4).

Die relative P_{peak} und relative P_{mean} ($W \cdot \text{kg lean body mass}^{-1}$) der Jungen im 1x30-s Sprint war signifikant niedriger als bei den Männern ($p < 0.01$; Tabelle 4). Der FI der Jungen im 1x30-s Sprint war geringer als der FI der Männer ($p < 0.01$; Table 4).

Tabelle 4. Mittelwert (± 1 Stabw.) der Leistungsindices Peak Power, Mean Power und Fatigue Index in Sprint 1 bis 4 des 4x30-s Sprints und dem 1x30-s Sprint bei Jungen und Männern.

	P_{peak} Jungen [W/kg lbm]	Rückgang P_{peak} Jungen [%]	P_{peak} Männer [W/kg lbm]	Rückgang P_{peak} Männer [%]	P_{mean} Jungen [W/kg lbm]	P_{mean} Männer [W/kg lbm]	Fatigue index Jungen [%]	Fatigue index Männer [%]
Sprint 1	11,2 \pm 1,3	NA	14,9 \pm 1,6**	NA	8,5 \pm 0,7	9,8 \pm 0,9**	51,8 \pm 12,3	55,2 \pm 11,8
Sprint 2	10,5 \pm 1,1	5,8 \pm 8,4	13,4 \pm 1,2**	9,8 \pm 7,6	7,5 \pm 0,6	8,6 \pm 0,6**	59,4 \pm 10,1	56,3 \pm 7,6
Sprint 3	10,0 \pm 1,2	9,7 \pm 11,6	12,5 \pm 2,0**	15,5 \pm 11,3	6,7 \pm 0,7	7,8 \pm 0,9**	60,3 \pm 11,4	56,6 \pm 9,8
Sprint 4	10,1 \pm 1,5	9,2 \pm 13,9	11,9 \pm 1,6**	19,2 \pm 11,5*	6,6 \pm 0,8	7,4 \pm 0,9*	59,9 \pm 9,5	57,0 \pm 8,1
Single sprint	11,6 \pm 1,2	NA	15,7 \pm 1,4	NA	8,9 \pm 0,7	10,2 \pm 0,9	42,9 \pm 16,5	70,8 \pm 10,3

lbm—lean body mass. NA—Nicht anwendbar. ** Signifikanter Unterschied ($p < 0.01$). * Signifikanter Unterschied ($p < 0.05$). † signifikanter Rückgang der Peak Power vom ersten zum vierten Sprint im 4x30-s Sprint ($p < 0.01$).

7.5 Diskussion

Das Ziel der vorliegenden Studie war die Analyse der Blutlaktatkinetik, der dynamische Muskelkraft und der Ermüdung der dynamischen Muskelkraft sowie die Analyse der Herzfrequenz und der Sauerstoffaufnahme als Reaktion auf jeweils eine Einheit (a) Hochintensives Intervalltraining (4x30-s Sprint) und (b) Hochintensives Training (1x30-s Sprint) bei trainierten 11-jährigen Jungen und trainierten Männern. Die Forschungshypothese vermutete eine schnellere Blutlaktatkinetik (Diffusion und Elimination) der trainierten Jungen als bei den erwachsenen Sportlern in beiden Belastungen.

Die wichtigsten Ergebnisse der Studie zeigten, dass a) Jungen ein früheres Auftreten der LA_{peak} Konzentrationen nach dem 1x30-s Sprint zeigen als Männer; b) Die Bildung und Elimination der Blutlaktatkonzentrationen während und nach beiden Sprintprotokollen bei den Jungen schneller erfolgte als bei den Männern. Die Diffusion des Laktates in das Blut erfolgte bei den Jungen während des 4x30-s Sprints schneller als bei den Männern, doch wurde das Signifikanzniveau nicht erreicht; c) Die Blutlaktatkonzentrationen im Anschluss an die 4x30-s Sprints und den 1x30-s Sprint der Jungen sind niedriger als bei den Männern; d) Die Herzfrequenz der Jungen ist in den 4x30-

s Sprints höher und im 1x30-s Sprint niedriger als die Herzfrequenz der Männer; e) Die relative P_{peak} und die relative P_{mean} der Jungen sind in allen Sprints geringer als relative P_{peak} und P_{mean} der Männer und der Rückgang der relativen P_{peak} vom ersten zum vierten Sprint in den 4x30-s Sprints ist bei den Jungen geringer als in der Gruppe der Männer.

Von zentraler und wichtiger Bedeutung für die vorliegende Studie sind die Geschwindigkeitskonstanten γ_1 und γ_2 , welche eine schnellere Diffusion des Laktates in das Blut nach dem 4x30-s Sprint (nicht signifikant, $p>0.05$) und dem 1x30-s Sprint (signifikant, $p<0.01$) sowie eine bessere Elimination des Laktates in der Regenerationsphase nach beiden Belastungen (4x30-s Sprint: $p<0.01$; 1x30-s Sprint: $p<0.05$) bei den Jungen belegen.

Die Parameter der Blutlaktatkinetik als Reaktion auf den 4x30-s Sprint und den 1x30-s Sprint auf dem Fahrradergometer zeigten, dass der Laktatstoffwechsel der Jungen teilweise schneller abläuft als bei den Männern. Die Unterschiede in den Parametern des biexponentiellen Modells zwischen Jungen und Männern zeigten, dass die niedrigeren Blutlaktatkonzentrationen bei den Jungen, sowohl im 4x30-s Sprint als auch im 1x30-s Sprint, insbesondere die LA_{peak} , mitunter eine Konsequenz der schnelleren Diffusion des Laktates aus dem Muskel in das Blut (während des 1x30-s Sprints (γ_1 ; $p<0.01$)) und der schnelleren Elimination des Laktates aus dem Blut nach dem 4x30-s Sprint (γ_2 ; $p<0.01$) und dem 1x30-s Sprint (γ_2 ; $p<0.05$) sein könnte. Die Geschwindigkeitskonstanten γ_1 und γ_2 repräsentieren die Fähigkeit des Organismus das Laktat zwischen der in den Sprints aktiven Muskulatur und dem Blut zu diffundieren beziehungsweise das gebildete Laktat wieder aus dem Blutkreislauf zu eliminieren. Zusätzlich wird der schnelle Laktatmetabolismus der Jungen durch das frühe Auftreten der LA_{peak} im 1x30-s Sprint deutlich ($p<0.01$). Die LA_{peak} Konzentration der Jungen bei den 4x30-s Sprints trat ebenfalls früher auf als bei den Männern, doch war der Unterschied nicht signifikant ($p>0.05$). Die Geschwindigkeitskonstanten γ_1 und γ_2 der Jungen in der vorliegenden Studie tragen sehr wahrscheinlich zu den niedrigen Blutlaktatkonzentrationen der Jungen bei. Die Hypothese, dass die geringeren Blutlaktatkonzentrationen von Kindern allein durch einen reduzierten anaeroben Metabolismus bedingt sind (Eriksson et al. 1971; Eriksson et al. 1974; Fournier et al. 1982; Gollnick et al. 1972) kann aufgrund der Ergebnisse der

vorliegenden Studie nicht bestätigt werden. Vielmehr scheint es als wenn die niedrigen Laktatkonzentrationen der Jungen auch durch die Geschwindigkeit der Diffusion und Elimination des Laktats mitbeeinflusst werden. Die genauen Ursachen der schnelleren Geschwindigkeitskonstanten γ_1 und γ_2 im biexponentiellen Modell bei den Jungen sind letztlich schwer zu bestimmen da die Blutlaktatkinetik eine Vielzahl von Prozessen repräsentiert welche die Bildung, Diffusion und Elimination von Laktat im Organismus modulieren und beeinflussen (Stanley et al. 1985). Daher ist die Diskussion über die genauen Ursachen der niedrigeren Blutlaktatwerte nach intensiven Belastungen bei Kindern bis heute kontrovers. Wahrscheinlich liegt ein Zusammenhang zwischen der Blutlaktatkinetik und der geringeren Muskelermüdung die bei den Jungen in der vorliegenden Studie beobachtet wurde vor (Ratel et al. 2002; Bangsbo et al., 1996).

Eine Ursache für die reduzierten maximalen Laktatwerte nach den beiden Sprintprotokollen und der geringeren Muskelermüdung während den 4x30-s Sprints bei den Jungen könnte in der unterschiedlichen Energiebereitstellung während der intensiven Belastung begründet sein. Im Vergleich zu Erwachsenen sind Kinder während intensiven Belastungen in der Lage die Energie länger aerob bereit zu stellen. Besonders zu Beginn von intensiven Belastungen können Kinder die benötigte Energie aerob bereitstellen (Hebestreit et al., 1993; Armon et al., 1991). Möglich wird das durch die höhere oxidative Enzymaktivität im Muskelgewebe (Harlambie, 1982; Berg et al., 1986), der größeren relativen Dichte von Mitochondrien (Bell et al., 1980) und der schnelleren Anpassung der Sauerstoffaufnahme an einen erhöhten Bedarf (Williams, et al., 2001).

Ein weiterer Faktor für die Unterschiede in der Dynamik der Blutlaktatkonzentrationen kann die unterschiedliche Verteilung der Muskelfasertypen bei Kindern und Erwachsenen darstellen. Der Prozentsatz der oxidativen Typ I Muskelfasern ist bei Kindern höher als bei jungen Erwachsenen (Jansson, 1996). Darüber hinaus fanden Lexell et al. (1992), dass der relative Prozentsatz der Typ II Muskelfasern im vastus lateralis sich von der Kindheit über die Adoleszenz von 35% im Alter von 5 Jahren auf 50% im Alter von 20 erhöht. Da der vastus lateralis einer der Hauptarbeitsmuskeln in den Sprints auf dem Fahrradergometer ist die in dieser Studie absolviert wurden, ist

es wahrscheinlich, dass die Unterschiede in den Muskelfasertypen konsequenterweise Mitursache für die niedrigen Blutlaktatkonzentrationen, die schnellere Blutlaktatkinetik und die verbesserte Ermüdungsresistenz bei den Jungen ist. Die Typ I Muskelfaser produziert weniger Laktat und H^+ Ionen während der Belastung, oxidiert mehr metabolische Stoffwechselprodukte als die Typ II Muskelfaser und weist eine beschleunigte Resynthese der energiereichen Phosphate (beispielsweise Kreatinphosphat) auf.

Ein weiterer Grund für die verbesserte Laktatelimination und die reduzierte Muskelermüdung der Jungen in dieser Studie könnte der Zeitverlauf der Diffusion der Stoffwechselprodukte im Anschluss an das Hochintensive Training sein. Da es keinen Unterschied in der Produktion von H^+ in der Muskelzelle zwischen Kindern und Jugendlichen gibt (Petersen et al., 1999) kann angenommen werden, dass der Druckunterschied der H^+ Ionen zwischen intra- und extrazellulärem Raum bei Kindern höher ist als bei Erwachsenen. Daher ist die Diffusion der H^+ Ionen bei Kindern zwischen dem Sarkolemm und den Kapillaren vermutlich schneller (Ratel et al. 2006).

In der vorliegenden Studie zeigten die Jungen niedrigere relative Leistungsindices im 4x30-s Sprint sowie im 1x30-s Sprint, einen geringeren Rückgang der P_{peak} vom ersten zum vierten Sprint während dem 4x30-s Sprint und einen signifikant niedrigeren Fatigue Index im 1x30-s Sprint. Diese Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit vorherigen Studien. Niedrigere absolute und relative Leistungsindices, geringere Fatigue Indices (Inbar et al. 1996; Beneke et al., 2005; Hebestreit, Mimura & Bar-Or, 1993) und eine verbesserte Ermüdungsresistenz (Ratel et al., 2002; Falk & Dotan, 2006) wurden während intensiven Einzel- und Intervallsprints bei Jungen gegenüber Männern gefunden. Die Hauptursachen der geringeren absoluten und relativen Leistungen der Kinder werden darin vermutet, dass Kinder hochintensive Belastungen mit weniger Muskelmasse absolvieren als Erwachsene. Die Kinder rekrutieren darüber hinaus weniger motorische Einheiten als Erwachsene und es erfolgt eine geringere Rekrutierung von höherhierarchischen motorischen Einheiten (z.B. Typ II Muskelfasern), da die neuromuskuläre Koordination bei Kindern noch nicht voll entwickelt ist (Van Praagh et al. 2002; Falk & Dotan, 2006; Dotan et al., 2012).

Die Unterschiede in den Größenverhältnissen und der Körperkomposition zwischen Kindern und Erwachsenen können ebenfalls einen wichtigen Faktor bei der Laktatkinetik und der Fatigue Resistance darstellen. Ein kleinerer Querschnitt der Muskelfasern der Kinder (Brooke & Engel, 1969) resultiert in kürzeren Diffusionsstrecken zwischen Muskel und Blut (Falk & Dotan, 2006). Die kürzeren Diffusionsstrecken zwischen Muskel und Blut bedeuten eine höhere relative Dichte von Kapillargefäßen (Kayar et al., 1982). Diese größenbedingten Unterschiede in der Körperkomposition lassen vermuten, dass Kinder dazu in der Lage sind eine schnellere Diffusion von O₂, CO₂ und Stoffwechselprodukten wie Laktat und H⁺ von der Muskulatur in das Blut während und nach intensiven Sprints zu realisieren (Falk & Dotan, 2006). Darüber hinaus bedingen die kleineren Größenverhältnisse der Kinder kürzere kardiovaskuläre Kreislaufzeiten und können dadurch ein frühes Auftreten der LA_{peak} Konzentrationen nach intensiven Sprints begünstigen, wie es in der vorliegenden Studie und auch bei Beneke et al. (2005) und bei Dotan et al. (2003) der Fall war. Die geringere relative Muskelmasse und der größere relative Laktatverteilungsraum („total lactate water space“) der Kinder ermöglichen zudem eine schnellere Diffusion des Laktats (Beneke et al., 2005).

7.6 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie stellt den experimentellen Ansatz dar die Blutlaktatkinetik von trainierten Jungen und männlichen Athleten als Reaktion auf eine Einheit HIIT sowie einen einzelnen intensiven Sprint mit Hilfe eines biexponentiellen vier-Parameter Kinetikmodells zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass nach beiden Sprintprotokollen das Niveau der Konzentrationen von LA_{peak} bei den Jungen niedriger ist und nach dem 1x30-s Sprint LA_{peak} früher erreicht wird. Als zentrales Ergebniss können die Unterschiede in den Geschwindigkeitskonstanten der Diffusion und Elimination des Laktates (γ_1 und γ_2) zwischen den Jungen und den Männern betrachtet werden. Hier zeigen die Jungen einen schnelleren Anstieg der Laktatkonzentrationen im Blut im 4x30-s Sprint gegenüber den Männern und eine schnellere Elimination des Laktats aus dem Blut nach beiden Belastungsprotokollen (4x30-s und 1x30-

s). Dadurch kann bei den Jungen auf einen schnelleren Laktattransport bei Hochintensiven Einzel- und Intervallbelastungen geschlussfolgert werden. Die exakten Ursachen für den schnellen Laktattransport der Jungen in den beiden Belastungsprotokollen konnte im Rahmen der Studie nicht ermittelt werden. Anhand der in der Diskussion dargestellten Literatur können die Ursachen jedoch in einer Kombination aus biologischen, anthropometrischen und physiologischen Faktoren des kindlichen Organismus vermutet werden.

Als weitere Ergebnisse wiesen die Jungen einen geringeren Rückgang der Leistung während des 4x30-s Sprints und einen geringeren Fatigue Index im 1x30-s Sprint auf. Die bessere Ermüdungswiderstandsfähigkeit der dynamischen Muskelkraft der Jungen kann möglicherweise durch den schnellen Laktatstoffwechsel der Jungen bedingt sein. Die bessere Ermüdungswiderstandsfähigkeit der dynamischen Muskelkraft und der schnelle Laktatstoffwechsel der Jungen repräsentieren zwei positive Faktoren für die Anwendung von HIIT im Nachwuchsleistungssport.

8 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Um die Effektivität von (Hoch-)intensivem Intervalltraining (HIIT) im Nachwuchsleistungssport und bei untrainierten gesunden Kindern und Jugendlichen in der wissenschaftlichen Literatur einzuschätzen, wurde ein Überblicksartikel erstellt, in dem eine computerbasierte Literaturrecherche in den elektronischen Datenbanken PubMed, MEDLINE, SPORTDiscus und Web of Science durchgeführt wurde. Studien, welche die Auswirkungen von HIIT-Interventionen auf die Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen (9-18 Jahre) anhand von Analysen der motorischen oder leistungsphysiologischen Kenngrößen der Probanden, vor und nach der Trainingsintervention, analysierten wurden berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigten, dass es sich beim Hochintensiven Intervalltraining um eine wirksame Trainingsmethode im Kinder- und Jugendsport, sowohl mit Athleten und Athletinnen im Nachwuchsleistungssport als auch bei untrainierten Mädchen und Jungen, handelt. Das HIIT führte zu Trainingseffekten im aeroben sowie im anaeroben Bereich. In den analysierten Interventionsstudien wurden innerhalb von zwei bis zehn Wochen Steigerungen der maximalen Sauerstoffaufnahme von 1,0% bis 11,5% (durchschnittlich $7,9\% \pm 3,9$) erzielt. Anaerobe Leistungen wie beispielsweise die Leistungen im Wingate Anaerobic Test (McManus et al., 1997), High Box Jump (Breil et al., 2010) oder die Sprint- und Sprungleistungen (Sperlich et al., 2011; Mc Millan et al., 2005) verbesserten sich ebenfalls signifikant. Der wesentliche Vorteil des HIIT wird von vielen Autoren in dem guten Verhältnis von zeitlichem Aufwand und lohnenden Trainingseffekten gesehen (Sperlich et al., 2010; Faude et al., 2008). Gerade gegenüber dem umfangsorientiertem Ausdauertraining bei niedrigen Intensitäten zeichnet sich das HIIT durch bessere mittelfristige Trainingseffekte und den geringeren Zeitaufwand aus (Gibala & Little, 2010). Allerdings fehlen bisher Langzeitstudien welche auf Nachhaltigkeit und langfristige Trainingseffekte von HIIT hinweisen.

Die Eignung von Kindern für intensive anaerob laktazide Ausdauerbelastungen wie sie das HIIT beinhaltet scheint auch gegeben zu sein. Kinder erzielen während HIIT zwar geringere Leistungen (sowohl relativ als auch auf Körpergewicht und Muskelmasse relativiert) als Erwachsene, doch wurde bei den Kindern eine weniger starke Ermüdung, die sogenannte Fatigue Resistance, im Verlauf der hochintensiven Intervallarbeit konstatiert (Falk & Dotan, 2006; Ratel et al., 2006). Die verbesserte Fatigue Resistance der Kinder ist durch eine Vielzahl von physiologischen und anatomischen Unterschieden des kindlichen Organismus im Vergleich zum adulten Organismus bedingt. So weisen Kinder bei intensiven Belastungen niedrigere Blutlaktatwerte (Ratel et al., 2002), ein früheres Auftreten der maximalen Blutlaktatkonzentrationen und schnellere Eliminationsraten des Blutlaktats als Erwachsene auf (Beneke et al., 2005). Weitere anatomische und physiologische Faktoren, welche die Fatigue Resistance, und damit die Eignung von Kindern für intensives Ausdauertraining positiv beeinflussen sind im Muskelfaserspektrum (höherer Anteil an Typ I Muskelfasern als Erwachsene) und in dem kleineren Muskelfaserquerschnitt zu finden (Bell et al., 1980; Jansson, 1996). Die kürzeren Kreislaufzeiten (Brooke & Engel, 1969), die langsamere Entleerung und die schnellere Auffüllung der Kreatinphosphatspeicher (Kappenstein et al., 2013), die eingeschränkte Rekrutierung von motorischen Einheiten (Ratel et al., 2006) und die schnelleren Sauerstoffkinetik zu Beginn von intensiven Belastungen (Armon et al., 1991) tragen ebenfalls zur besseren Fatigue Resistance bei.

Grundsätzlich jedoch geht es beim Einsatz von HIIT keinesfalls um den Verzicht von Trainingsphasen mit grundlagenausdauerorientiertem Training, sondern um das Verbessern der Trainingsqualität zum Erschließen von Leistungsreserven durch das Durchführen gezielter Blöcke hoher bis höchster Intensitäten.

Die Studie I ist bisher die erste experimentelle Studie welche die hormonelle Reaktion auf HIIT von trainierten Jungen analysiert. In der selbstständig durchgeführten empirischen Studie konnte gezeigt werden, dass eine einzelne Einheit HIIT bei trainierten 11-jährigen Jungen und trainierten 30-jährigen Männern zu einer hohen kardiorespirativen, metabolischen und hormonellen Belastung führt. Das HIIT verursachte in beiden Probandengruppen eine hohe Belastung durch das katabol wirkende Hormon Cortisol. Die Konzentration des Stresshormons Cortisol (gemessen im Speichel) erhöhte sich 30 Minuten nach Ende

der Intervallbelastung von 4 x 30 Sekunden, durchgeführt mit maximaler Intensität und zwei Minuten aktiver Regeneration zwischen den Intervallen, um 173% bei den Jungen und um 171% bei den Männern. Mit diesem Ergebnis konnte gezeigt werden, dass eines der sensibelsten auf Stress reagierende System (die HPA-Achse) von 11-jährigen Jungen und erwachsenen Sportlern im gleichen Maße und mit einer als hoch einzustufenden Produktion von Cortisol auf HIIT reagiert. Darüber hinaus ergab der Vergleich mit anderen Studien, dass sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen der Anstieg der Cortisolkonzentration nach HIIT höher ist als nach anderen körperlichen Aktivitäten und Trainingsmethoden. Daher könnte die Anwendung von Langzeitinterventionen im Nachwuchsleistungssport mit wiederholten und exzessivem HIIT zu einer dauerhaft hohen Aktivität der HPA-Achse führen, was wiederum negative Auswirkungen auf Immunsystem (z. B. inflammatorische Diathese) und Leistungsfähigkeit von jungen Sportlern haben könnte.

Da die Studie I lediglich die Akutreaktion auf eine einzelne Einheit HIIT analysiert, sind Studien nötig welche die längerfristige hormonelle Reaktion auf eine Einheit HIIT (24-48 Stunden) sowie auf Mittel- und Langzeitinterventionen mit HIIT bei Nachwuchsleistungssportlern analysieren.

Die Studie von Zinner et al. (2013) zeigte, dass eine zweiwöchige Trainingsintervention mit ausschließlich Hochintensivem Intervalltraining bei trainierten Jugendlichen zwar zu Leistungsverbesserungen führt, aber kein „Gewöhnungseffekt“ auf hormoneller Ebene (in Form einer niedrigeren Produktion von Cortisol als Reaktion auf das HIIT) an das HIIT erfolgt. Die Steigerung der Cortisolproduktion als unmittelbare Reaktion auf das HIIT war bei den jugendlichen Triathleten zu Beginn sowie am Ende der zwei Wochen gleich hoch (Zinner, Wahl, Achtzehn, Reed & Mester, 2013). Es kann daher auch bei Mittel- und Langzeitinterventionen mit HIIT mit einer hohen Belastung durch Cortisol bei Kindern und Jugendlichen gerechnet werden.

Aufgrund der hohen Belastung durch HIIT sollte im Nachwuchsleistungssport ein langfristiger exzessiver Einsatz von HIIT vermieden werden. Vielmehr sollte HIIT in einem verantwortungsvollen Maße mit ausreichender Regeneration angewendet werden. Detailliertere Hinweise zur sinnvollen Periodisierung von HIIT im Nachwuchsleistungssport anhand der Ergebnisse aus Studie I zu geben ist weiterhin schwierig, da bisher, trotz großer Anzahl wissenschaftlicher

Studien zu diesem Aspekt, keine validen physiologischen Marker und entsprechende Grenzwerte für ein Overreaching oder einen Übertrainingszustand zu identifizieren sind. Daher besteht dringend weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der mittel- und langfristigen Auswirkungen von HIIT auf die HPA-Achse und das Immunsystem bei trainierten Kindern und Erwachsenen, sowohl anhand von physiologischen, hormonellen als auch fragebogenbasierter Erfassungsmethoden. Aus den Analysen der Trainingsdokumentationen erfolgreicher Elitesportler geht hervor, dass diese maximal zwei intensive Trainingseinheiten pro Woche absolvieren, da eine höhere Anzahl langfristig nicht verträglich ist (Seiler & Tonnessen, 2009). Die Anzahl von zwei Trainingseinheiten HIIT pro Woche könnte auch im Nachwuchsleistungssport als vorläufiger Anhaltspunkt dienen, doch entbindet dieser vorläufige Anhaltspunkt nicht von weiterer Forschung zu diesem Aspekt. Alternativ zu den zwei Trainingseinheiten HIIT pro Woche steht das Modell eines konzentrierten HIIT Mikrozyklus über zwei Wochen, in dem ausschließlich mit HIIT trainiert wird (Breil et al., 2010; Wahl et al., 2013; Zinner et al., 2013). Diese Variante der Trainingsintervention mit HIIT ist zwar durch eine hohe Ausschüttung von Cortisol geprägt, doch wurde auch eine Produktion des anabol wirkenden Hormons Testosteron gemessen (Zinner et al., 2013). Der Vorteil des konzentrierten HIIT Mikrozyklus ist sicherlich die begrenzte Zeitspanne in der mit hohen bis sehr hohen Intensitäten gearbeitet wird. Die Periode der unmittelbaren Wettkampfvorbereitung, auf die dann eine Phase der Regeneration folgt (Weineck, 2007) bietet sich für einen solchen konzentrierten HIIT Mikrozyklus an. Darüber hinaus sollten die Richtlinien der American Academy of Pediatrics (Brenner et al., 2007) als Anhaltspunkte zur Vorbeugung von Overreaching- und Übertrainingszuständen im Training mit Kindern und Jugendlichen Berücksichtigung finden (siehe Kapitel 4.4 Gesundheitliche Aspekte zum HIIT mit Kindern).

In Studie II konnte hinsichtlich der Fähigkeit zur Bildung und Elimination von Laktat bei intensiven Einzel- und Intervallbelastungen mit den beiden Probandengruppen trainierte Jungen und trainierte Männer folgende Beobachtungen gemacht werden. Als zentrale Ergebnisse der Studie zur Blutlaktatkinetik konnten die Parameter der Blutlaktatkinetik (Bildung und die Elimination von Laktat) bei einer Intervallbelastung (4 x 30 Sekunden) und einer einzelnen intensiven Belastung (1 x 30 Sekunden) mittels biexponentieller Zeitfunktion identifiziert

werden. Demnach erfolgte die Diffusion des Laktates von der Muskulatur in das Blut bei der intensiven Einzelbelastung bei den Jungen schneller als bei den Erwachsenen. Bei der Intervallbelastung gab es bei der Diffusion des Laktates von der Muskulatur in das Blut keine Unterschiede zwischen den beiden Probandengruppen, jedoch erfolgte bei den Jungen nach der Intervall- und der Einzelbelastung eine schnellere Elimination des Blutlaktats. Die bessere Fähigkeit zur Laktatelimination nach hochintensiven Einzel- und Intervallbelastungen stellt eine wesentliche Fähigkeit zur unmittelbaren Regeneration nach hochintensiven Belastungen dar. Der schnelle Laktatmetabolismus bzw. Laktattransport der trainierten Jungen könnte eine Ursache für die ebenfalls in der Studie II festgestellte verbesserte Ermüdungsresistenz (Fatigue Resistance) der Jungen gegenüber den Männern während dem HIIT darstellen. Im Verlauf der vier absolvierten 30-sekündigen Wingate Anaerobic Tests war die Peak Power der Jungen nur um 9% gesunken, bei den Erwachsenen Athleten aber um 19%, was einen signifikanten Unterschied darstellt. Als Schlussfolgerung lässt sich, aufgrund des schnellen Laktatmetabolismus bzw. Laktattransport und der verbesserten Fatigue Resistance, eine gute Eignung von trainierten Nachwuchssportlern für hochintensive Einzel- und Intervallbelastungen konstatieren. Einen weiteren Diskussionspunkt stellt die geringere Leistungsabgabe der Jungen in den 4x30 s Sprints dar. Da die Jungen in jedem der vier 30-sekündigen Sprints sowohl absolut als auch relativ (Watt/kg lean body mass) signifikant weniger Leistung erbringen als die Männer stellt sich die Frage ob die Jungen tatsächlich mit den 4x30 s Sprints eine „hochintensive Belastung“ absolviert haben. Die Ursache für die geringere Leistung der Jungen könnte auch darin liegen dass die Jungen die Belastung nicht mit ihrer individuellen maximalen Leistung absolviert haben, wie es gefordert war. Jedoch ist davon auszugehen dass die geringeren Leistungen von Kindern bei intensiven Belastungen auf ihre eingeschränkte Fähigkeit zum Rekrutieren von höherhierarchischen motorischen Einheiten zurück zu führen sind (Dotan et al., 2012). Anhand der Literaturanalysen von Dotan et al. (2013) ist davon auszugehen, dass die Hauptursache für die geringere Leistung der Jungen in der eingeschränkten Rekrutierung der motorischen Einheiten liegt und somit für die Kinder willentlich nicht beeinflussbar ist. Insofern müssen die geringeren Leistungen der Jungen als gegeben hingenommen werden und als die bestmögliche Leistung betrachtet werden. Darüber

hinaus zeigen die Blutlaktatwerte der Jungen, dass es sich bei den absolvierten 4x30 s Sprints tatsächlich um eine Belastung mit hoher Intensität handelt. Zwar sind die Blutlaktatwerte der Jungen signifikant geringer als bei den Männern, doch wenn man berücksichtigt dass die Blutlaktatwerte bei Kindern prinzipiell ein niedrigeres Maximum aufweisen als bei Erwachsenen bewegen sich die Blutlaktatwerte der Jungen in einem Bereich der als sehr intensiv zu bewerten ist. Daher kann man schlussfolgern dass die Jungen in der vorliegenden Arbeit in Studie I und Studie II mit den 4x30 s Sprints zumindest intensive, wenn nicht eine hochintensive Belastung absolviert haben.

8.1 Schlussfolgerungen und Konsequenzen für die Sportpraxis

Das Hochintensive Intervalltraining stellt eine lohnenswerte und effektive Trainingsmethode für trainierte sowie untrainierte Kinder und Jugendliche dar. In zahlreichen Interventionsstudien mit HIIT bei Kindern und Jugendlichen (10-18 Jahre) wurden lohnenswerte Trainingseffekte aerober und anaerober Leistungen sowie Verbesserungen der sportartspezifischen Leistungsfähigkeiten erzielt. Der Vorteil des HIIT liegt in der Zeitersparnis gegenüber volumenorientiertem niedrigintensivem Ausdauertraining. Typische Belastungsmuster im HIIT sind:

- 1) Sehr kurze Belastungsdauer: ≤ 15 s
z. B.: 8-10 x 15 s Belastung (100-120 % vVO_{2max}) / 15 s passive Pause (Buchheit & Laursen, 2013 Part II)
- 2) Mittlere Belastungsdauer: < 45 s
z. B.: 12 x 30 s Belastung (90-95 % HR_{max}) / 30 s Pause (50-60 % HR_{max}) (Buchheit & Laursen, 2013 Part II; Sperlich et al., 2011)
- 3) Lange Belastungsdauer: 2-4 min
z. B.: 4-6 x 4 min ($\geq 95\%$ vVO_{2max} oder 90-95% HF_{max}) / 4-5 min aktive Pause ($\leq 60-70\%$ vVO_{2max}) (Buchheit & Laursen, 2013 Part II; Helgerud et al. 2001).

Kinder sind aufgrund ihrer Leistungsphysiologie sowie durch zahlreiche biologische und anthropometrische Eigenschaften des kindlichen Organismus gut für die im HIIT auftretenden Belastungen geeignet. Kinder leisten in hochintensiven Intervallbelastungen zwar (absolut und relativ zum Körpergewicht und zur Muskelmasse) weniger als Erwachsene, doch ermüden sie langsamer und regenerieren anschließend schneller (Falk & Dotan, 2006; Hebestreit et al., 1993). Darüber hinaus konnte in der vorliegenden Arbeit gezeigt werden, dass der Laktataustausch zwischen einzelnen Gewebskompartimenten sowie die Beseitigung des Laktates nach Ende von hochintensiven Intervallbelastungen bei trainierten Jungen schneller ist als bei trainierten Männern (Studie II). Dieser Faktor begünstigt die Ermüdungsresistenz während und die Regeneration nach Hochintensiven Intervallbelastungen bei Kindern. Jedoch ist die hormonelle Belastung durch katabol wirkende Hormone nach HIIT bei trainierten Jungen sowie bei erwachsenen Sportlern als hoch einzuschätzen (Studie I). Über die dauerhafte Wirkung von katabolen Hormonen bei Kindern liegen bisher keine Erkenntnisse vor.

Wie in Studie I und Studie II gezeigt werden konnte stellt das HIIT tatsächlich eine intensive Belastung (auf metabolischer und hormoneller Ebene) für Kinder und Erwachsene dar. Die Analyse der metabolischen und hormonellen Reaktion auf typische Belastungsmuster im HIIT zeigte bei jungen sowie bei den erwachsenen Sportlern jeweils hohe Laktatwerte, Herzfrequenzen, eine hohe $VO_{2\text{peak}}$ sowie einen hohen Anstieg des Speichelcortisol (Studie I & II). Doch ergibt sich teilweise ein Widerspruch zwischen den Ergebnissen aus Studie I und Studie II. In Studie II wurde aufgrund der besseren Laktatelimination und der geringeren Ermüdung im HIIT bei den Jungen auf eine gute Eignung von trainierten Jungen für HIIT geschlossen. In Studie I deutet die hohe Belastung durch den hohen Anstieg des katabolen Hormons Cortisol auf eine mögliche Belastung des Immunsystems bei einer häufigen Anwendung von HIIT bei Kindern hin. Im Gesamtzusammenhang können die Ergebnisse aus Studie I und Studie II folgendermaßen interpretiert werden: Zwar sind trainierte Jungen aufgrund einer Vielzahl von biologischen und anthropometrischen Eigenschaften des kindlichen Organismus gut geeignet um die unmittelbaren Belastungen des HIIT auf metabolischer Ebene zu tolerieren. Die Kinder verfügen über einen schnelleren Laktatmetabolismus und eine bessere Ermüdungsresistenz als Er-

wachsene, was sie als besser geeignet und objektiv weniger belastet erscheinen lässt. Doch hormonell sind die Kinder ähnlich hoch durch das HIIT belastet wie die Erwachsenen. Daher sollte zwischen der hormonellen Belastung und der Belastung durch Stoffwechselmetabolite wie Laktat differenziert werden. Als Konsequenz für die Sportpraxis sollte die Anwendung von HIIT im Nachwuchsleistungssport nicht uneingeschränkt und dauerhaft erfolgen. Eine übermäßige und permanente Anwendung von HIIT über das ganze Jahr sollte daher im Nachwuchstraining möglichst vermieden werden. Das HIIT sollte vielmehr gezielt in der Vorbereitungsphase (zum Beispiel in der unmittelbaren Wettkampfvorbereitung), je nach Leistungsniveau und individuellen Zielen, etwa zwei bis maximal drei Mal pro Woche, zusätzlich zum normalen Vereinstraining, durchgeführt werden. In den analysierten Interventionsstudien (Überblicksartikel) wurde das HIIT durchschnittlich zwei Mal pro Woche und maximal dreimal, zusätzlich zum normalen Vereinstraining, über einen Zeitraum von zwei bis zehn Wochen angewendet. Wichtig ist hier, dass die Anzahl der Trainingseinheiten pro Woche und der Zeitraum der Trainingsphase mit HIIT begrenzt sind. Eine Intervention mit HIIT sollte nicht über das ganze Jahr durchgeführt werden, der Zeitraum der Intervention mit HIIT sollte klar abgegrenzt sein und eine Regenerationsphase sollte nach der Trainingsperiode mit HIIT erfolgen. Hinweise aus dem Profisport machen deutlich, dass mehr als zwei intensive Trainingseinheiten pro Woche von Athleten mit hohen Trainingsumfängen schlecht toleriert werden (Seiler & Tonnessen, 2009).

Eine Alternative zur wöchentlichen Anwendung von HIIT bietet der konzentrierte HIIT Mikrozyklus über einen Zeitraum von zehn bis vierzehn Tagen, in dem ausschließlich mit HIIT trainiert wird (Breil et al., 2010; Wahl et al., 2013; Zinner et al., 2013). Diese Variante der Trainingsintervention mit HIIT stellt eine Balung der Intensitäten da, doch ist der Zeitraum klar abgegrenzt und es werden schon in diesem kurzen Zeitraum relevante Trainingseffekte erzielt (Breil et al., 2010; Wahl et al., 2013; Zinner et al., 2013). Ein weiterer Vorteil des HIIT Mikrozyklus ist auch die Tatsache dass in dieser Phase dann der Fokus ausschließlich auf der Verbesserung der motorischen Fähigkeiten liegt und anschließend nach einer Regenerationsphase dann wieder vermehrt taktisch technische Fertigkeiten trainiert werden können. Der konzentrierte HIIT Mikrozyklus ist zwar durch eine permanent hohe Ausschüttung von Cortisol als Reak-

tion auf das Training geprägt, doch wurde parallel dazu eine hohe Produktion des anabol wirkenden Hormons Testosteron gemessen (Zinner et al., 2013), was ein Hinweis ist, dass auch anabole Prozesse durch HIIT ausgelöst werden. Der Vorteil des konzentrierten HIIT Mikrozyklus ist sicherlich die begrenzte Zeitspanne in der mit sehr hohen Intensitäten gearbeitet wird. Die Periode der unmittelbaren Wettkampfvorbereitung, auf die dann eine Phase der Regeneration folgt (Weineck, 2007) bietet sich für einen solchen konzentrierten HIIT Mikrozyklus an. Eine konsequente Regenerationsphase im Anschluss an den konzentrierten HIIT Mikrozyklus ist durch die hohe Dichte von intensiven Trainingsreizen und die damit verbundene dauerhaft hohe Cortisolproduktion besonders wichtig. Darüber hinaus sollten die Richtlinien der American Academy of Pediatrics (Brenner et al., 2007) zur Prävention von Überlastungserscheinungen im Nachwuchsleistungssport berücksichtigt werden. Die wichtigsten Punkte sind hier: Pro Woche ein bis zwei trainingsfreie Tage (die natürlich auch während des konzentrierten HIIT Mikrozyklus eingehalten werden müssen); Steigerung von Trainingsumfängen von Woche zu Woche nicht mehr als um 10%; zwei bis drei Monate pro Jahr kein sportartspezifisches Training; keine exzessiven Wettkampfteilnahmen.

Deutlich wurde, dass keine Langzeitstudien zur Überprüfung von Nachhaltigkeit der Trainingseffekte sowie der mittel- und langfristigen Wirkung von HIIT auf das Immunsystem und das Belastungsempfinden bei jungen Sportlern und Sportlerinnen existieren. Diese sind jedoch dringend notwendig um die Verträglichkeit von HIIT in der Zielgruppe junge Sportler/innen sicher zu gewährleisten. Als Fazit der vorliegenden Arbeit konnte klar erarbeitet werden dass HIIT eine attraktive und effektive Trainingsmethode für den Nachwuchsleistungssport darstellt und dadurch insgesamt überzeugt. Wie der Name der Trainingsmethode deutlich macht ist das Hochintensive Intervalltraining tatsächlich sehr intensiv, was die Relevanz der Regenerationsphasen im Anschluss an Mikro- und oder Makrozyklen mit hohen Anteilen von HIIT deutlich macht.

8.2 Transferpotential von HIIT auf weitere Anwendungsfelder

Das Hochintensive Intervalltraining hat in der Anwendung im Nachwuchsleistungssport insgesamt überzeugt, wie in den Schlussfolgerungen der vorliegenden Arbeit dargelegt wurde. Doch wie ist die Übertragbarkeit des Hochintensiven Intervalltrainings auf weitere Sportfelder?

Der wesentliche Vorteil des HIIT ist der geringere Zeitbedarf der Trainingsmethode gegenüber dem traditionellen Ausdauertraining mit niedrigen Intensitäten (Sperlich et al., 2010; Sperlich et al., 2011; Gibala & Little, 2010) sowie die lohnenswerten Trainingseffekte die schon nach kurzer Zeit erzielt werden (Breil et al., 2010; Wahl et al., 2013; Gibala & Little, 2010).

Im Schulsport spielt der Zeitbedarf eine entscheidende Rolle, denn es stehen brutto nur 45 Minuten bzw. 90 Minuten zur Verfügung und pro Woche zwei bis maximal drei Mal die Gelegenheit eine „Trainingseinheit“ zu absolvieren. Darüber hinaus ist der Zeitraum in dem ein bestimmtes Thema bzw. ein Unterrichtsinhalt praktiziert werden kann, aufgrund von Vorgaben des Curriculums, beschränkt. Daher bietet sich das HIIT im Schulsport sehr gut an, da schon nach wenigen Trainingseinheiten und innerhalb weniger Tage effektive Trainingseffekte erzielt werden, die gesundheitswirksam sind und sowohl auf der molekularen und zellulären Ebene sowie auf der motorischen Hauptbeanspruchungsformen wirken. Burgomaster et al. (2005) beobachtete schon nach sechs Trainingseinheiten eine Verbesserung der oxidativen Leistungsfähigkeit des Muskels und auch eine verbesserte aerobe Leistungsfähigkeit bei 22-jährigen untrainierten Probanden. Eine Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf junge und jugendliche Schüler/innen ist sicherlich möglich, dies zeigen folgende Studien von Interventionen mit HIIT im Schulsport. McManus et al. (1997) und (2005) wiesen jeweils in zwei Studien nach, dass HIIT bereits im Grundschulalter (9-jährige Schülerinnen bzw. 10-jährige Schüler) und noch wichtiger im zeitlichen und örtlichen Rahmen des Schulsports effektiv durchführbar ist. Das von McManus und Mitarbeitern durchgeführte HIIT bewirkte effektive Leistungsverbesserungen bei 9-jährigen Grundschülerinnen bzw. bei den 10-jährigen Schülern. Das HIIT wurde in beiden Studien jeweils über 8 Wochen durchgeführt und beinhaltete drei Trainingseinheiten pro Woche à 20 Minuten. Baquet und Mitarbeiter (2002) führten ebenfalls im Sportunterricht mit 10-jährigen Schulkindern

ein 7-wöchiges HIT-Programm (zwei Trainingseinheiten die Woche à 30 Minuten) durch, woraufhin sich die VO_{2max} und die maximale aerobe Laufgeschwindigkeit der Kinder signifikant um 8,2% verbesserte.

Selbst in einer einzelnen Sportstunde von 45 Minuten scheint die Durchführbarkeit von 20 bis 30 Minuten HIIT mit jungen Kindern realistisch. Zusätzlich wurde in zahlreichen Studien bereits gezeigt dass ein Zeitaufwand von unter 45 Minuten pro Trainingseinheit ausreicht um positive Trainingseffekte zu erzielen (siehe Tabellen 2-4). Wie die drei Studien von McManus et al. (1997) und (2005) und Baquet (2002) zeigen ist HIIT methodisch und organisatorisch in der Schule durchführbar und wird darüber hinaus von den jungen Schülern und Schülerinnen auch toleriert.

Die Motivation von jungen Schüler/innen sich über kurze Zeitspannen mit hoher Intensität zu Bewegen dürfte höher sein als beim klassischen Ausdauertraining mit langer Dauer und niedrigen Intensitäten, da das zu erst genannte Belastungsmuster dem natürlichen und selbstgewählten Bewegungsmustern von Kindern entspricht (Bailey et al., 1995). Dass eine generelle Notwendigkeit zur Verbesserung der aeroben und anaeroben Ausdauer für Schüler und Schülerinnen (bereits im Grundschulalter) besteht ist ohnehin klar und wird durch viele Expertenstatements gefordert (Bös, 2008; Bös, Opper, Woll et al., 2008; Graf, Beneke, Bloch, et al., 2013). Insgesamt bietet sich somit das Hochintensive Intervalltraining im Schulsport durch sein gutes Verhältnis von zeitlichem Aufwand und Trainingseffekten ideal an. Ein zusätzlicher Vorteil für die Anwendung im Schulsport ist die vermutlich gute Motivation für die Bewegungsmuster des HIIT von Kindern.

In den letzten zwei bis drei Jahren hat das Thema Hochintensives Intervalltraining auch außerhalb der wissenschaftlichen Literatur für den Freizeit- und Gesundheitssport vermehrt Aufmerksamkeit erfahren, wie Artikel auf *Spiegel Online* oder in der Onlineausgabe von *DIE WELT* zeigen (Mertin, 2014; DIE WELT 2013). Hier wird besonders stark auf die Zeitersparnis und die Effektivität des HIIT für den Freizeit- und Gesundheitssportler verwiesen. Die beiden Artikel (Mertin, 2014; DIE WELT 2013) empfehlen das HIIT als sinnvolle Ergänzung des Trainings für den von Zeitmangel geplagten Freizeitjogger der „fit“ werden will. Als Belege für Effektivität und Verträglichkeit von HIIT werden solide wissenschaftliche Studien herangezogen. Eine Relevanz von HIIT für den

Freizeit- und Gesundheitssport scheint somit zu existieren. Und tatsächlich ist Zeitmangel der Hauptgrund für den Verzicht auf Sport in der Altersgruppe der 18- bis 39-jährigen untrainierten Männern und Frauen (Booth et al., 1997). Richtlinien für eine gesundheitswirksame körperliche Aktivität für Erwachsene empfehlen etwa 150 Minuten körperliche Aktivität pro Woche mit moderater Intensität von etwa 40-60% der maximalen Sauerstoffaufnahme (Gibala & Little, 2010). Diese Empfehlungen basieren auf Evidenzen dass Ausdauertraining das Risiko von chronischen Krankheiten effektiv reduziert (Gibala & Little, 2010). Da, wie bereits erwähnt, ein großer Prozentsatz (40%) von sportlich nicht aktiven Erwachsenen diese Empfehlungen aufgrund von Zeitmangel nicht einhalten (Booth et al., 1997), empfehlen Gibala & Little (2010), dass HIIT in die Empfehlungen für gesundheitswirksame körperliche Aktivität als Prophylaxe für chronische Erkrankungen aufzunehmen. In ihrem Review verweisen Gibala & Little (2010) auf zahlreiche Studienergebnisse die durch HIIT, bei reduziertem zeitlichen Aufwand, gesundheitsrelevante physiologische Anpassungen zur Vorbeugung von chronischen Krankheiten erreichten. Beispielsweise wurde nach nur 14-tägigem HIIT (16 Minuten pro Trainingseinheit) die Insulinsensitivität von jungen Erwachsenen verbessert (Richards et al., 2010). Zahlreiche ähnliche Ergebnisse sind im Kapitel „Zelluläre und molekulare Anpassungserscheinungen an Hochintensives Intervalltraining“ dieser Arbeit aufgeführt (siehe Tabelle 3). Allerdings betonen einige Autoren (Gibala & Little, 2010; Wahl et al., 2010) dass die hohen Intensitäten im HIIT eine hohe Motivation erfordert, was nicht immer als gegeben betrachtet werden kann. Zusätzlich wird in den Empfehlungen für HIIT im Freizeit- und Gesundheitssport explizit darauf hingewiesen, dass aufgrund der Ausbelastung unbedingt eine Unbedenklichkeit gegenüber intensiven Belastungen, durch entsprechende sportmedizinische Untersuchung, im Vorfeld vorhanden sein muss (Wahl et al., 2010; Mertin, 2014). Wenn das gegeben ist kann das HIIT als zeitsparende und effektive Trainingsmethode im Freizeit- und Gesundheitssport als Ergänzung eingesetzt werden. Ein komplettes Ersetzen von aeroben längeren Ausdauerbelastungen ist zum jetzigen Zeitpunkt des Forschungsstandes nicht sinnvoll. Dies betonen auch die Autoren die sich prinzipiell für HIIT im Freizeit- und Gesundheitssport aussprechen (Gibala & Little, 2010; Wahl et al., 2010; Mertin, 2014). Das HIIT sollte weiterhin als Ergänzung zum aeroben Ausdauertraining angewendet werden, denn beide

Trainingsmethoden (HIIT und VOT) bewirken spezifische Anpassungserscheinungen und haben daher eine Anwendungsberechtigung (Wahl et al., 2010).

Im Kapitel „Gesundheitliche Effekte von HIIT“ in der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von HIIT in der Rehabilitation durch Sport mit Kindern ausführlich thematisiert und eine Literaturrecherche zu dem Thema präsentiert (siehe Tabelle 5). Dort wurde deutlich, dass HIIT in der Sporttherapie mit Kindern noch wenig angewendet wird, jedoch geben die wenigen Studien erste Hinweise darauf, dass die Sporttherapie mit HIIT die Krankheitsbilder positiv beeinflussen konnte und Risikofaktoren für Adipositas reduzierte und keine Komplikationen in der Anwendung auftraten (Tjønnå et al., 2009; Corte de Araujo et al., 2012; siehe Tabelle 5).

Im Rehasport mit Erwachsenen konnte bereits in vielen Studien der positive Einfluss von HIIT auf unterschiedliche Krankheitsbilder deutlich gezeigt werden. Sogar bei Patienten mit schwerwiegenden aber stabilen Krankheitsbildern wie der stabilen koronaren Herzkrankheit (Amundsen et al., 2008; Rognmo et al., 2004; Warburton et al., 2005), dem metabolischen Syndrom (Tjønnå et al., 2008), Übergewicht (Tjønnå et al., 2009), Typ 1 Diabetes (Harmer et al., 2008) und infarktbedingter Herzinsuffizienz (Wisloff et al., 2007) wurde das HIIT in verschiedenen Intensitäten (80-90% VO_{2max} , 90-95% der HF_{max}) und meistens in 4x4 Minuten Intervallen erfolgreich angewendet. In allen Studien erzielte das HIIT eine Verbesserung der Krankheitssymptome sowie eine Steigerung der VO_{2max} . Die Autoren der einzelnen Studien betonen einmal mehr positiv die Unterschiede in der Trainingszeit die das HIIT gegenüber dem VOT mit sich bringt (Wahl et al., 2013; Gibala & Little, 2010; Gibala & McGee, 2008). Jedoch kritisieren Wahl et al. (2010), dass viele HIIT-Studien mit Patienten nur über relativ kurze Zeiträume laufen (10-24 Wochen) und bisher nicht bekannt ist ob ein ausschließliches trainieren mit HIIT über längere Zeiträume in der Sporttherapie ohne Überlastungserscheinungen von den Patienten toleriert wird. Zudem ist nicht klar wie sich die Anpassungserscheinungen über längere Zeiträume verhalten und ob die durch HIIT erreichten Adaptionen denen von VOT entsprechen (Wahl et al., 2010). Da eine dauerhafte Verträglichkeit des Trainings in der Sporttherapie besonders von Bedeutung ist, sollte bei dem jetzigen Forschungsstand das HIIT nur als Ergänzung oder zeitlich begrenzt erfolgen.

Interessant für den Rehasport ist die Feststellung von Wahl et al. (2010), dass in vergleichenden Studien (HIIT vs. VOT) im Rehabereich bei gleichem Gesamtenergieverbrauch die Trainingsmethode HIIT bei der Umkehr und Reduzierung von Risikofaktoren und der Verbesserung der Krankheitssymptome effektiver ist als das Ausdauertraining bei niedrigen bis moderaten Intensitäten. Dies ist als zusätzlicher Vorteil von HIIT zu berücksichtigen. Aufgrund des geringen zeitlichen Aufwandes von HIIT empfehlen Wahl et al. (2010) das HIIT insgesamt für die Prävention und die Rehabilitation durch Sport. Doch merken die Autoren gleichzeitig an, dass HIIT nicht ausschließlich als einzige Trainingsmethode in der Rehabilitation verwendet werden sollte, sondern als Ergänzung und zusätzliche Trainingsmethode. Leider ist das HIIT bisher noch gar nicht in aktuellen Richtlinien verschiedener Organisatoren zum Training mit Patienten unterschiedlicher Krankheitsbilder vorgesehen (Swain & Franklin, 2002). Im Rehabilitationsbereich sind Vorsichtsmaßnahmen natürlich besonders wichtig. Hier sollten vor HIIT-Interventionen ausreichende Belastungstests mit den Patienten durchgeführt werden (Wahl et al. 2010). Dann kann das HIIT in der Sporttherapie erfolgreich und sinnvoll angewendet werden. Besonders die kurzen Intervalle im HIIT (30-60 Sekunden) stellen hohe Stimulationen für die Muskulatur dar, bei gleichzeitig geringer Beanspruchung des Herzens und sind daher für Patienten mit kardialen Erkrankungen oder Einschränkungen gut geeignet (Meyer et al., 1997; Wahl et al. 2010).

Insgesamt konnte in vielen Studien gezeigt werden, dass Patienten mit unterschiedlichsten und stabilen aber schwerwiegenden Krankheitsbildern Trainingsphasen von 10 bis 16 Wochen mit regelmäßigem HIIT gut tolerieren. Gleichzeitig erreichten die Patienten mittels HIIT gute Anpassungserscheinungen und Verbesserungen der Krankheitsbilder bei erheblich geringerem Zeitaufwand als beim Ausdauertraining mit niedriger Intensität. Als Schlussfolgerung rechtfertigt dies vorerst eine Anwendung von HIIT in der Rehabilitation mit Sport. Die Trainingsmethode HIIT sollte aufgrund der Erkenntnisse jedoch nicht ausschließlich als einzige Trainingsmethode verwendet werden, HIIT und VOT sollten Bestandteil des Ausdauertrainings in der Rehabilitation sein. Wie in den anderen Sportfeldern auch bleibt es in der Rehabilitation zu klären wie sich die Anpassungen und die Belastungsverträglichkeit bei längeren HIIT-Interventionen verhalten. Wie Wahl et al. (2010) anmerken sollte präventives

und rehabilitatives Training über viele Jahre, oder sogar lebenslänglich praktiziert werden, was längerfristige Untersuchungen zum HIIT (Monate und Jahre) unbedingt notwendig macht. Gleichmaßen gilt diese Anmerkungen natürlich auch für die Sportfelder Nachwuchsleistungssport, Leistungssport sowie für den Freizeit- und Gesundheitssport. Daher sollte die Nachhaltigkeit der Trainingsmethode HIIT unbedingt evaluiert werden.

9 Literaturverzeichnis

- American Academy of Pediatrics (2000). Intensive training and sports specialization in young athletes. American Academy of Pediatrics. Committee on Sports Medicine and Fitness. *Pediatrics*, 106 (1 Pt 1), 154–157.
- Amundsen, B.H., Rognmo, Ø., Hatlen-Rebhan, G. & Slørdahl, S.A. (2008). High-intensity aerobic exercise improves diastolic function in coronary artery disease. *Scandinavian Cardiovascular Journal: SCJ*, 42 (2), 110–117.
- Armon, Y., Cooper, D.M., Flores, R., Zanconato, S. & Barstow, T.J. (1991). Oxygen uptake dynamics during high-intensity exercise in children and adults. *Journal of Applied Physiology*, 70 (2), 841–848.
- Armon, Y., Cooper, D.M. & Zanconato, S. (1991). Maturation of ventilatory responses to 1-minute exercise. *Pediatric Research*, 29 (4 Pt 1), 362–368.
- Armstrong, L.E. & VanHeest, J.L. (2002). The unknown mechanism of the overtraining syndrome: clues from depression and psychoneuroimmunology. *Sports Medicine*, 32 (3), 185–209.
- Armstrong, N. & Welsman, J.R. (2007). Aerobic fitness: what are we measuring? *Medicine and Sport Science*, 50, 5–25.
- Armstrong, N. & McManus A.M. (2011). *The Elite Young Athlete*. Basel: Karger.
- Astrand, P.O. & Rodahl, K. (1986). *Textbook of Work Physiology* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Babraj, J.A., Vollaard, N.B.J, Keast, C., Guppy, F.M., Cottrell, G. & Timmons, J.A. (2009). Extremely short duration high intensity interval training substantially improves insulin action in young healthy males. *BMC Endocrine Disorders*, 9, 3.

- Bailey, R.C., Olson, J., Pepper, S.L., Porszasz, J., Barstow, T.J. & Cooper, D.M. (1995). The level and tempo of children's physical activities: an observational study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27 (7), 1033–1041.
- Balsom, P. (1994). Evaluation of physical performance. In Ekblom B (Hrsg.), *Football (Soccer)* (S. 102–123). Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications.
- Bangsbo, J., Madsen, K., Kiens, B. & Richter, E.A. (1996). Effect of muscle acidity on muscle metabolism and fatigue during intense exercise in man. *The Journal of Physiology*, 495 (2), 587–596.
- Baquet, G., Berthoin, S., Dupont, G., Blondel, N., Fabre, C. & van Praagh, E. (2002). Effects of high intensity intermittent training on peak VO₂ in pre-pubertal children. *International Journal of Sports Medicine*, 23 (6), 439–444.
- Baranowski, T., Hooks, P., Tsong, Y., Cieslik, C. & Nader, P.R. (1987). Aerobic physical activity among third- to sixth-grade children. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics: JDBP*, 8 (4), 203–206.
- Barker, A.R., Welsman, J.R., Fulford, J., Welford, D. & Armstrong, N. (2008). Muscle phosphocreatine kinetics in children and adults at the onset and offset of moderate-intensity exercise. *Journal of Applied Physiology*, 105 (2), 446–456.
- Bar-Or, O. (1983). *Sports Medicine for the Practitioner*. New York: Springer-Verlag.
- Bar-Or O. & Rowland T.W. (2004). *Pediatric Exercise Medicine: from Physiologic Principles to Health Care Application*. Champaign: Human Kinetics.
- Beauchamp, M.K., Nonoyama, M., Goldstein, R.S., Hill, K., Dolmage, T.E., Mathur, S. & Brooks, D. (2010). Interval versus continuous training in individuals with chronic obstructive pulmonary disease--a systematic review. *Thorax*, 65 (2), 157–164.

- Behringer, M., Vom Heede, A. & Mester, J. (2010). *Krafttraining im Nachwuchsleistungssport. unter besonderer Berücksichtigung von Diagnostik, Trainierbarkeit und Trainingsmethodik* (1. Aufl). Köln: Sportverl. Strauss.
- Behringer, M., Vom Heede, A., Matthews, M. & Mester, J. (2011). Effects of strength training on motor performance skills in children and adolescents: a meta-analysis. *Pediatric Exercise Science*, 23 (2), 186–206.
- Belcastro, A.N. & Bonen, A. (1975). Lactic acid removal rates during controlled and uncontrolled recovery exercise. *Journal of Applied Physiology*, 39 (6), 932–936.
- Bell, R.D., MacDougall, J.D., Billeter, R. & Howald, H. (1980). Muscle fiber types and morphometric analysis of skeletal muscle in six-year-old children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12 (1), 28–31.
- Beneke, R., Pollmann, C., Bleif, I., Leithäuser, R.M. & Hütler, M. (2002). How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans? *European Journal of Applied Physiology*, 87 (4-5), 388–392.
- Beneke, R., Hütler, M., Jung, M. & Leithäuser, R.M. (2005). Modeling the blood lactate kinetics at maximal short-term exercise conditions in children, adolescents, and adults. *Journal of Applied Physiology*, 99 (2), 499–504.
- Benitez-Sillero, Jde. D., Perez-Navero, J.L., Tasset, I., Guillen-Del Castillo, M., Gil-Campos, M. & Tunez, I. (2009). Influence of intense exercise on saliva glutathione in prepubescent and pubescent boys. *European Journal of Applied Physiology*, 106 (2), 181–186.
- Berg, A., Kim, S.S. & Keul, J. (1986). Skeletal muscle enzyme activities in healthy young subjects. *International Journal of Sports Medicine*, 7 (4), 236–239.
- Bishop, D. & Spencer, M. (2004). Determinants of repeated-sprint ability in well-trained team-sport athletes and endurance-trained athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 44 (1), 1–7.
- Bishop, D., Girard, O. & Mendez-Villanueva, A. (2011). Repeated-sprint ability - part II: recommendations for training. *Sports Medicine*, 41 (9), 741–756.

- Bogdanis, G.C., Nevill, M.E., Boobis, L.H. & Lakomy, H.K. (1996). Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *Journal of Applied Physiology*, 80 (3), 876–884.
- Bohrmann, I., Pahlke, U. & Peters, H. (1981). Blutlaktatkonzentrationen nach Wettkampfbelastungen im Schwimmen und Laufen bei 9-jährigen Kindern. *Medizin und Sport* (21), 198–201.
- Boisseau, N. & Delamarche, P. (2000). Metabolic and hormonal responses to exercise in children and adolescents. *Sports Medicine*, 30 (6), 405–422.
- Bonen, A., Campbell, C.J., Kirby, R.L. & Belcastro, A.N. (1979). A multiple regression model for blood lactate removal in man. *European Journal of Physiology*, 380 (3), 205–210.
- Booth, F.W. & Thomason, D.B. (1991). Molecular and cellular adaptation of muscle in response to exercise: perspectives of various models. *Physiological Reviews*, 71 (2), 541–585.
- Booth, M.L., Bauman, A., Owen, N. & Gore, C.J. (1997). Physical activity preferences, preferred sources of assistance, and perceived barriers to increased activity among physically inactive Australians. *Preventive Medicine*, 26 (1), 131–137.
- Borg G. (1998). *Borg's perceived exertion and pain scales*. Champaign: Human Kinetics.
- Bös, K., Opper, E., Woll, A., et al. (2001) Fitness in der Grundschule. *Haltung und Bewegung* 21:4–67.
- Bös, K. (2008). Motorische Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen. In W. Schmidt (Hrsg.), *Zweiter Deutscher Kinder- und Jugendsportbericht* (Deutscher Kinder- und Jugendsportbericht, 1.2006, S. 85–109). Schorn-dorf: Hofmann.
- Breil, F.A., Weber, S.N., Koller, S., Hoppeler, H. & Vogt, M. (2010). Block training periodization in alpine skiing: effects of 11-day HIT on VO₂max and performance. *European Journal of Applied Physiology*, 109 (6), 1077–1086.
- Brenner, J.S. (2007). Overuse injuries, overtraining, and burnout in child and adolescent athletes. *Pediatrics*, 119 (6), 1242–1245.

- Brooke, M.H. & Engel, W.K. (1969). The histographic analysis of human muscle biopsies with regard to fiber types. 4. Children's biopsies. *Neurology*, 19 (6), 591–605.
- Buchan, D.S., Ollis, S., Young, J.D., Cooper, S.-M., Shield, Julian P.H. & Baker, J.S. (2013). High intensity interval running enhances measures of physical fitness but not metabolic measures of cardiovascular disease risk in healthy adolescents. *BMC Public Health*, 13, 498.
- Buchheit, M., Laursen, P.B., Kuhnle, J., Ruch, D., Renaud, C. & Ahmaidi, S. (2009). Game-based training in young elite handball players. *International Journal of Sports Medicine*, 30 (4), 251–258.
- Buchheit, M., Duché, P., Laursen, P.B. & Ratel, S. (2010). Postexercise heart rate recovery in children: relationship with power output, blood pH, and lactate. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 35 (2), 142–150.
- Buchheit, M. & Laursen, P.B. (2013). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Medicine*, 43 (5), 313–338.
- Buchheit, M. & Laursen, P.B. (2013). High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle. Part II: Anaerobic Energy, Neuromuscular Load and Practical Applications. *Sports Medicine*, 43 (10), 927–954.
- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietrassyk-Kendziorra, S., Machado, S., Ribeiro, P. & Arafat, A.M. (2010). Steroid hormones in the saliva of adolescents after different exercise intensities and their influence on working memory in a school setting. *Psychoneuroendocrinology*, 35 (3), 382–391.
- Budde, H., Windisch, C., Kudielka, B.M. & Voelcker-Rehage, C. (2010). Saliva cortisol in school children after acute physical exercise. *Neuroscience Letters*, 483 (1), 16–19.
- Budgett, R. (1998). Fatigue and underperformance in athletes: the overtraining syndrome. *British Journal of Sports Medicine*, 32 (2), 107–110.
- Burgomaster, K.A., Hughes, S.C., Heigenhauser, George J.F., Bradwell, S.N. & Gibala, M.J. (2005). Six sessions of sprint interval training increases mus-

cle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans. *Journal of Applied Physiology*, 98 (6), 1985–1990.

Burgomaster, K.A., Heigenhauser, George J F & Gibala, M.J. (2006). Effect of short-term sprint interval training on human skeletal muscle carbohydrate metabolism during exercise and time-trial performance. *Journal of Applied Physiology*, 100 (6), 2041–2047.

Burgomaster, K.A., Cermak, N.M., Phillips, S.M., Benton, C.R., Bonen, A. & Gibala, M.J. (2007). Divergent response of metabolite transport proteins in human skeletal muscle after sprint interval training and detraining. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 292 (5), R1970-6.

Burgomaster, K.A., Howarth, K.R., Phillips, S.M., Rakobowchuk, M., Macdonald, M.J., McGee, S.L. & Gibala, M.J. (2008). Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *The Journal of Physiology*, 586 (1), 151–160.

Caine D. (1990). Growth Plate Injury and Bone Growth: An Update. *Pediatric Exercise Science*, 2 (3), 209–229.

Caine, D., Lewis, R., O'Connor, P., Howe, W. & Bass, S. (2001). Does gymnastics training inhibit growth of females? *Clinical Journal of Sport Medicine*, 11 (4), 260–270.

Capranica, L., Lupo, C., Cortis, C., Chiodo, S., Cibelli, G. & Tessitore, A. (2012). Salivary cortisol and alpha-amylase reactivity to taekwondo competition in children. *European Journal of Applied Physiology*, 112 (2), 647–652.

Chamari, K., Hachana, Y., Kaouech, F., Jeddi, R., Moussa-Chamari, I. & Wisløff, U. (2005). Endurance training and testing with the ball in young elite soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 39 (1), 24–28.

Chia, MYH. (2001). Recovery of Wingate anaerobic test power following prior sprints of a short duration: a comparison between girls and women. [abstract]. In, *Pediatric Exercise Science*, 13 (2), 273.

- Choi, D., Cole, K.J., Goodpaster, B.H., Fink, W.J. & Costill, D.L. (1994). Effect of passive and active recovery on the resynthesis of muscle glycogen. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 26 (8), 992–996.
- Chrousos, G.P. (2009). Stress and disorders of the stress system. *Nature Reviews Endocrinology*, 5 (7), 374–381.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. (2nd). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Colliander, E.B., Dudley, G.A. & Tesch, P.A. (1988). Skeletal muscle fiber type composition and performance during repeated bouts of maximal, concentric contractions. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 58 (1-2), 81–86.
- Cooper DM, Barstow TJ (1996). Magnetic resonance imaging and spectroscopy in studying exercise in children children. *Exercise and Sports Science Reviews*, 24, 475–499.
- Corte de Araujo, A.C., Roschel, H., Picanço, A.R., do Prado, D. M., Villares, S. M., de Sá Pinto, A. L. & Gualano, B. (2012). Similar health benefits of endurance and high-intensity interval training in obese children. *PLoS One*, 7 (8), e42747.
- Counil, F.-P., Varray, A., Matecki, S., Beurey, A., Marchal, P., Voisin, M. & Préfaut, C. (2003). Training of aerobic and anaerobic fitness in children with asthma. *The Journal of Pediatrics*, 142 (2), 179–184.
- Counsilman, J.E. (1977). *Schwimmen. Technik, Trainingsmethoden, Trainingsorganisation* (4. Aufl.). Wiebelsheim: Limpert.
- Cumming, G.R. (1978). Recirculation times in exercising children. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 45 (6), 1005–1008.
- Dalton, S.E. (1992). Overuse injuries in adolescent athletes. *Sports Medicine*, 13 (1), 58–70.
- Delextrat, A. & Martinez, A. (2013). Small-Sided Game Training Improves Aerobic Capacity and Technical Skills in Basketball Players. *International Journal of Sports Medicine*.

- Dhabhar, F.S., Malarkey, W.B., Neri, E. & McEwen, B.S. (2012). Stress-induced redistribution of immune cells--from barracks to boulevards to battlefields: a tale of three hormones--Curt Richter Award winner. *Psychoneuroendocrinology*, 37 (9), 1345–1368.
- Di Luigi, L., Baldari, C., Gallotta, M.C., Perroni, F., Romanelli, F., Lenzi, A. & Guidetti, L. (2006). Salivary steroids at rest and after a training load in young male athletes: relationship with chronological age and pubertal development. *International Journal of Sports Medicine*, 27 (9), 709–717.
- Di Luigi, L., Guidetti, L., Baldari, C., Gallotta, M.C., Sgrò, P., Perroni, F., Romanelli, F. & Lenzi, A. (2006). Cortisol, dehydroepiandrosterone sulphate and dehydroepiandrosterone sulphate/cortisol ratio responses to physical stress in males are influenced by pubertal development. *Journal of Endocrinological Investigation*, 29 (9), 796–804.
- Diallo, O., Dore, E., Duche, P. & van Praagh, E. (2001). Effects of plyometric training followed by a reduced training programme on physical performance in prepubescent soccer players. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 41 (3), 342–348.
- Die Welt (2013). Mit Intervalltraining sparen Hobbysportler Zeit. *DIE WELT*, 1. Zugriff am 09.04.2014 unter <http://www.welt.de/gesundheit/article116840385/Mit-Intervalltraining-sparen-Hobbysportler-Zeit.html>
- Dipla, K., Tsirini, T., Zafeiridis, A., Manou, V., Dalamitros, A., Kellis, E. & Kellis, S. (2009). Fatigue resistance during high-intensity intermittent exercise from childhood to adulthood in males and females. *European Journal of Applied Physiology*, 106 (5), 645–653.
- Docherty, D. & Gaul, C.A. (1991). Relationship of body size, physique, and composition to physical performance in young boys and girls. *International Journal of Sports Medicine*, 12 (6), 525–532.
- Doré, E., Diallo, O., França, N.M., Bedu, M. & van Praagh, E. (2000). Dimensional changes cannot account for all differences in short-term cycling power during growth. *International Journal of Sports Medicine*, 21 (5), 360–365.

- Dotan, R., Falk, B. & Raz, A. (2000). Intensity effect of active recovery from glycolytic exercise on decreasing blood lactate concentration in prepubertal children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32 (3), 564–570.
- Dotan, R., Ohana, S., Bediz, C. & Falk, B. (2003). Blood lactate disappearance dynamics in boys and men following exercise of similar and dissimilar peak-lactate concentrations. *Journal of Pediatric Endocrinology & Metabolism*, 16 (3), 419–429.
- Dotan, R., Mitchell, C., Cohen, R., Klentrou, P., Gabriel, D. & Falk, B. (2012). Child-adult differences in muscle activation--a review. *Pediatric Exercise Science*, 24 (1), 2–21.
- Duarte, J.A., Magalhães, J.F., Monteiro, L., Almeida-Dias, A., Soares, J.M. & Appell, H.J. (1999). Exercise-induced signs of muscle overuse in children. *International Journal of Sports Medicine*, 20 (2), 103–108.
- Dupont G, Berthoin S, Gerbeaux M. (2000). Performance during anaerobic intermittent exercise: comparison between children and mature subjects. *Sci Sports*, 15, 147–153.
- Eddy, D.O., Sparks, K.L. & Adelizi, D.A. (1977). The effects of continuous and interval training in women and men. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 37 (2), 83–92.
- Edge, J., Bishop, D. & Goodman, C. (2006). The effects of training intensity on muscle buffer capacity in females. *European Journal of Applied Physiology*, 96 (1), 97–105.
- Eisenhut, A. & Zintl, F. (2013). *Ausdauertraining. Grundlagen, Methoden, Trainingssteuerung* (8. Aufl.). München: BLV Buchverlag.
- Ekblom, B. (Hrsg.) (1994). *Football (Soccer)*. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications.
- Eliakim, A., Portal, S., Zadik, Z., Rabinowitz, J., Adler-Portal, D., Cooper, D.M., Zaldivar, F. & Nemet, D. (2009). The effect of a volleyball practice on anabolic hormones and inflammatory markers in elite male and female adolescent players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23 (5), 1553–1559.

- Engel, F., Sperlich, B. (2014). (Hoch-)intensives Intervalltraining mit Kindern und Jugendlichen im Nachwuchsleistungssport. *Wien Med Wochenschr*, DOI 10.1007/s10354-014-0277-x.
- Engelhardt M., Neumann G. (1994). *Sportmedizin. Grundlagen für alle Sportarten*. München: BLV Sportwissen.
- Engelmeyer, E. (2012). Analyse des Gesundheits- und Leistungsstatus von Kinderathleten olympischer Sportarten. Hamburg: Kovač.
- Eriksson, B.O., Karlsson, J. & Saltin, B. (1971). Muscle metabolites during exercise in pubertal boys. *Acta Paediatrica Scandinavica. Supplement*, 217, 154–157.
- Eriksson, O. & Saltin, B. (1974). Muscle metabolism during exercise in boys aged 11 to 16 years compared to adults. *Acta Paediatrica Belgica, 28 suppl*, 257–265.
- Eriksson, B.O. (1980). Muscle metabolism in children--a review. *Acta Paediatrica Scandinavica. Supplement*, 283, 20–28.
- Esteve-Lanao, J., San Juan, A. F, Earnest, C.P., Foster, C. & Lucia, A. (2005). How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37 (3), 496–504.
- Faigenbaum, AD., Schram J. (2004). Can resistance training reduce injuries in youth sports? *Strength and Conditioning Journal*, 26 (3), 16–21.
- Faigenbaum, AD. (2007). Resistance Training for Children and Adolescents: Are There Health Outcomes? *American Journal of Lifestyle Medicine*, 1, 190–200.
- Falgairrette, G., Bedu, M., Fellmann, N., Van-Praagh, E. & Coudert, J. (1991). Bio-energetic profile in 144 boys aged from 6 to 15 years with special reference to sexual maturation. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 62 (3), 151–156.
- Falk, B. & Tenenbaum, G. (1996). The effectiveness of resistance training in children. A meta-analysis. *Sports Medicine*, 22 (3), 176–186.

- Falk, B. & Eliakim, A. (2003). Resistance training, skeletal muscle and growth. *Pediatric Endocrinology Reviews*, 1 (2), 120–127.
- Falk, B. & Dotan, R. (2006). Child-adult differences in the recovery from high-intensity exercise. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 34 (3), 107–112.
- Faude, O., Meyer, T., Scharhag, J., Weins, F., Urhausen, A. & Kindermann, W. (2008). Volume vs. intensity in the training of competitive swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 29 (11), 906–912.
- Föhrenbach R., Frick U., Göbel M., Nagel P., Stutz R., Schmidtbleicher D., Böhrmer D. (1991). Dauerlauf versus Intervalltraining bei Fußballspielern. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 42, 136–146.
- Fournier, M., Ricci, J., Taylor, A.W., Ferguson, R.J., Montpetit, R.R. & Chaitman, B.R. (1982). Skeletal muscle adaptation in adolescent boys: sprint and endurance training and detraining. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14 (6), 453–456.
- Freedson, P.S., Gilliam, T.B., Sady, S.P. & Katch, V.L. (1981). Transient VO₂ characteristics in children at the onset of steady-rate exercise. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 52 (2), 167–173.
- Freund, H. & Zouloumian, P. (1981). Lactate after exercise in man: I. Evolution kinetics in arterial blood. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 46 (2), 121–133.
- Freund, H. & Zouloumian, P. (1981). Lactate after exercise in man: IV. Physiological observations and model predictions. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 46 (2), 161–176.
- Freund, H., Oyono-Enguelle, S., Heitz, A., Marbach, J., Ott, C., Zouloumian, P. & Lampert, E. (1986). Work rate-dependent lactate kinetics after exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 61 (3), 932–939.
- Frost, G., Dowling, J., Dyson, K. & Bar-Or, O. (1997). Cocontraction in three age groups of children during treadmill locomotion. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 7 (3), 179–186.
- Fry, R.W., Morton, A.R. & Keast, D. (1991). Overtraining in athletes. An update. *Sports Medicine*, 12 (1), 32–65.

- Fuchs, R.K., Bauer, J.J. & Snow, C.M. (2001). Jumping improves hip and lumbar spine bone mass in prepubescent children: a randomized controlled trial. *Journal of Bone and Mineral Research*, 16 (1), 148–156.
- Gaul, C.A., Docherty, D. & Cicchini, R. (1995). Differences in anaerobic performance between boys and men. *International Journal of Sports Medicine*, 16 (7), 451–455.
- Gibala, M.J., Little, J.P., van Essen, M., Wilkin, G.P., Burgomaster, K.A., Safdar, A., Raha, S. & Tarnopolsky, M.A. (2006). Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *The Journal of Physiology*, 575 (3), 901–911.
- Gibala, M.J. & McGee, S.L. (2008). Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 36 (2), 58–63.
- Gibala, M.J. & Little, J.P. (2010). Just HIT it! A time-efficient exercise strategy to improve muscle insulin sensitivity. *The Journal of Physiology*, 588 (18), 3341–3342.
- Girard, O., Mendez-Villanueva, A. & Bishop, D. (2011). Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Medicine*, 41 (8), 673–694.
- Gleeson, M., McDonald, W.A., Pyne, D.B., Cripps, A.W., Francis, J.L., Fricker, P.A. & Clancy, R.L. (1999). Salivary IgA levels and infection risk in elite swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31 (1), 67–73.
- Gloeckl, R., Marinov, B. & Pitta, F. (2013). Practical recommendations for exercise training in patients with COPD. *European Respiratory Review*, 22 (128), 178–186.
- Gollnick, P.D., Armstrong, R.B., Saubert, C.W., Piehl, K. & Saltin, B. (1972). Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of untrained and trained men. *Journal of Applied Physiology*, 33 (3), 312–319.
- Gollnick, P.D., Armstrong, R.B., Saltin, B., Saubert, C.W., Sembrowich, W.L. & Shepherd, R.E. (1973). Effect of training on enzyme activity and fiber

composition of human skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, 34 (1), 107–111.

Gould D., Eklund R. (1991). The application of sport psychology for performance of optimization. *Thai Journal of Sports Science* (1), 10–21.

Graf, C., Dordel, S., Tokarski, W. & Predel, H.-G. (2006). Übergewicht und Adipositas im Kindes- und Jugendalter - ist Prävention möglich? *Herz*, 31 (6), 507–513.

Graf, C., Beneke, R., Bloch, W., Bucksch, J., Dordel, S., Eiser, S., Ferrari, N., Koch, B., Krug, S., Lawrenz, W., Manz, K., Naul, R., Oberhoffer, R., Quilling, E., Schulz, H., Stemper, T., Stibbe, G., Tokarski, W., Völker, K. & Woll, A. (2013). Vorschläge zur Förderung der körperlichen Aktivität von Kindern und Jugendlichen in Deutschland. *Monatsschrift Kinderheilkunde*, 161 (5), 439–446.

Granacher U., Kriemler S., Gollhofer A., Zahner L. (2009). Neuromuskuläre Auswirkungen von Krafttraining im Kindes- und Jugendalter: Hinweise für die Trainingspraxis. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 60 (2), 41–49.

Gutin, B., Barbeau, P., Owens, S., Lemmon, C.R., Bauman, M., Allison, J., Kang, H.-S. & Litaker, M.S. (2002). Effects of exercise intensity on cardiovascular fitness, total body composition, and visceral adiposity of obese adolescents. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 75 (5), 818–826.

Hackney, A.C., Viru, M., VanBruggen, M., Janson, T., Karelson, K. & Viru, A. (2011). Comparison of the hormonal responses to exhaustive incremental exercise in adolescent and young adult males. *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia e Metabologia*, 55 (3), 213–218.

Hägele, M., Zinner C., Wahl, P., Sperlich, B. & Mester, J. (2009). Aktiv oder passiv - der Effekt unterschiedlicher Erholungsprotokolle nach hochintensivem Intervall-Training (HIT). *Leistungssport*, 39 (6), 10–14.

Halin, R., Germain, P., Bercier, S., Kapitaniak, B. & Buttelli, O. (2003). Neuromuscular response of young boys versus men during sustained maximal

- contraction. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35 (6), 1042–1048.
- Hamada, T., Sale, D.G., MacDougall, J.D. & Tarnopolsky, M.A. (2003). Interaction of fibre type, potentiation and fatigue in human knee extensor muscles. *Acta Physiologica Scandinavica*, 178 (2), 165–173.
- Haralambie, G. (1982). Enzyme activities in skeletal muscle of 13-15 years old adolescents. *Bulletin Européen de Physiopathologie Respiratoire*, 18 (1), 65–74.
- Harmer, A.R., Chisholm, D.J., McKenna, M.J., Hunter, S.K., Ruell, P.A., Naylor, J.M., Maxwell, L.J., Flack, J.R. (2008). Sprint training increases muscle oxidative metabolism during high-intensity exercise in patients with type 1 diabetes. *Diabetes Care*, 31: 2097–2102.
- Harre, D. (1976). *Trainingslehre* (6. Aufl.). Berlin: Sportverlag.
- Hartmann, U., Platen, P., Niessen, M., Mank, D., Marzin, T., Bartmus, U. & Hawener, I. (2010). *Krafttraining im Nachwuchsleistungssport. unter besonderer Berücksichtigung von Ontogenese, biologischen Mechanismen und Terminologie* (1. Aufl). Köln: Sportverl. Strauss.
- Haskell, W.L., Lee, I.-M., Pate, R.R., Powell, K.E., Blair, S.N., Franklin, B.A., Macera, C.A., Heath, G.W., Thompson, P.D. & Bauman, A. (2007). Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Circulation*, 116 (9), 1081–1093.
- Hebestreit, H., Mimura, K. & Bar-Or, O. (1993). Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: comparing boys and men. *Journal of Applied Physiology*, 74 (6), 2875–2880.
- Hebestreit, H., Meyer, F., Htay-Htay, Heigenhauser, G.J. & Bar-Or, O. (1996). Plasma metabolites, volume and electrolytes following 30-s high-intensity exercise in boys and men. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 72 (5-6), 563–569.
- Heck, H. & Schulz, H. (2002). Methoden der anaeroben Leistungsdiagnostik. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 53 (7+8), 202–212.

- Hedelin, R., Kenttä, G., Wiklund, U., Bjerle, P. & Henriksson-Larsén, K. (2000). Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32 (8), 1480–1484.
- Heim, C., Ehlert, U. & Hellhammer, D.H. (2000). The potential role of hypocortisolism in the pathophysiology of stress-related bodily disorders. *Psychoneuroendocrinology*, 25 (1), 1–35.
- Helgerud, J., Engen, L.C., Wisloff, U. & Hoff, J. (2001). Aerobic endurance training improves soccer performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33 (11), 1925–1931.
- Helgerud, J., Høydal, K., Wang, E., Karlsen, T., Berg, P., Bjerkaas, M., Simonsen, T., Helgesen, C., Hjorth, N., Bach, R. & Hoff, J. (2007). Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39 (4), 665–671.
- Helgerud, J., Rodas, G., Kemi, O.J. & Hoff, J. (2011). Strength and endurance in elite football players. *International Journal of Sports Medicine*, 32 (9), 677–682.
- Hermansen, L. & Stensvold, I. (1972). Production and removal of lactate during exercise in man. *Acta Physiologica Scandinavica*, 86 (2), 191–201.
- Hewson, D.J. & Hopkins, W.G. (1995). Prescribed and self-reported seasonal training of distance runners. *Journal of Sports Sciences*, 13 (6), 463–470.
- Hoff, J. & Helgerud, J. (2004). Endurance and strength training for soccer players: physiological considerations. *Sports Medicine*, 34 (3), 165–180.
- Hohmann, A. (2005). Steuerung sportlicher Spitzenleistungen aus trainingswissenschaftlicher Sicht. *Leistungssport* (6), 65.
- Hollmann, W. & Hettinger, T. (2000). *Sportmedizin. Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin* (4. Aufl). Stuttgart: Schattauer.
- Holloszy J.O. (Hrsg.) (1996). *Exercise and Sports Science Reviews*. Baltimore: Williams & Wilkins.

- Hooper, S.L., Mackinnon, L.T., Howard, A., Gordon, R.D. & Bachmann, A.W. (1995). Markers for monitoring overtraining and recovery. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27 (1), 106–112.
- Faigenbaum, A.D. (2007). State of the Art Reviews: Resistance Training for Children and Adolescents: Are There Health Outcomes? *American Journal of Lifestyle Medicine*, 1 (3), 190–200.
- Impellizzeri, F.M., Marcora, S.M., Castagna, C., Reilly, T., Sassi, A., Iaia, F.M. & Rampinini, E. (2006). Physiological and performance effects of generic versus specific aerobic training in soccer players. *International Journal of Sports Medicine*, 27 (6), 483–492.
- Inbar, O., Bar-Or, O. & Skinner, J.S. (1996). *The Wingate Anaerobic Test*. Champaign: Human Kinetics.
- Irwin, M.R. & Cole, S.W. (2011). Reciprocal regulation of the neural and innate immune systems. *Nature Reviews. Immunology*, 11 (9), 625–632.
- Jansson E. (1996). Age-related fiber type changes in human skeletal muscle. In Maughan RJ, Shireffs SM (Hrsg.), *Biochemistry of Exercise IX*. (S. 297–307). Champaign: Human Kinetics.
- Juel, C. (2001). Current aspects of lactate exchange: lactate/H⁺ transport in human skeletal muscle. *European Journal of Applied Physiology*, 86 (1), 12–16.
- Kanehisa, H., Okuyama, H., Ikegawa, S. & Fukunaga, T. (1995). Fatigability during repetitive maximal knee extensions in 14-year-old boys. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 72 (1-2), 170–174.
- Kappenstein, J., Ferrauti, A., Runkel, B., Fernandez-Fernandez, J., Müller, K. & Zange, J. (2013). Changes in phosphocreatine concentration of skeletal muscle during high-intensity intermittent exercise in children and adults. *European Journal of Applied Physiology*, 113 (11), 2769–2779.
- Katch, V.L. (1983). Physical conditioning of children. *Journal of Adolescent Health Care*, 3 (4), 241–246.

- Katzenbogner, H. (2010). *Kinderleichtathletik. Spielerisch und motivierend üben in Schule und Verein* (4. Aufl.). Münster: Philippka.
- Kayar, S.R., Lechner, A.J. & Banchemo, N. (1982). The distribution of diffusion distances in the gastrocnemius muscle of various mammals during maturation. *European Journal of Physiology*, 394 (2), 124–129.
- Kellmann M. (2000). Psychologische Methoden der Erholungs-Beanspruchungs-Diagnostik. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 51 (7+8), 253–258.
- Kellmann M., Kallus K.W. (2000). *Der Erholungs-Belastungs-Fragebogen für Sportler; Handanweisung*. Frankfurt: Verlag Swets Test Services.
- Kellmann M. (2002). Under recovery and overtraining: different concepts - similar impact? In M. Kellmann (Hrsg.), *Enhancing Recovery* (S. 3–24). Campaign: Human Kinetics.
- Kellmann M. (2004). Erholungs- und Beanspruchungsverläufe von Nationalmannschaften des Deutschen Ruderverbandes während der unmittelbaren Wettkampfvorbereitung auf die Weltmeisterschaften 2003. *BISp-Jahrbuch: Forschungsförderung*, 377–383.
- Kenttä, G. & Hassmén, P. (1998). Overtraining and recovery. A conceptual model. *Sports Medicine*, 26 (1), 1–16.
- Kenttä, G., Hassmén, P. & Raglin, J.S. (2001). Training practices and overtraining syndrome in Swedish age-group athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 22 (6), 460–465.
- Killing, W. (2010). *Jugendleichtathletik. Rahmentrainingsplan des Deutschen Leichtathletik-Verbandes für die disziplinenübergreifenden Grundlagen im Aufbautraining*. Münster: Philippka-Sportverl.
- Kirschbaum, C. & Hellhammer, D.H. (1994). Salivary cortisol in psychoneuroendocrine research: recent developments and applications. *Psychoneuroendocrinology*, 19 (4), 313–333.
- Laursen, P.B. & Jenkins, D.G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Medicine*, 32 (1), 53–73.

- Laursen, P.B., Shing, C.M., Peake, J.M., Coombes, J.S. & Jenkins, D.G. (2002). Interval training program optimization in highly trained endurance cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 (11), 1801–1807.
- Laursen, P.B. (2010). Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20 (Suppl 2), 1–10.
- Lazaar, N., Ratel, S., Rudolf, P., Bedu, M., Duché, P. (2002). Performance during intermittent running exercise: effects of age and recovery duration. *Biom. Hum Anthropol* (20), 29–34.
- Lehmann, M., Keul, J., da Prada, M., Kindermann, W. (1980). Plasamkatecholamine, Glukose, Lactat und Sauerstoffaufnahme-fähigkeit von Kindrn bei aeren und anaeroben Belastungen. *Dt Z Sportmed*, 31, 230-236.
- Leite, R.D., Prestes, J., Rosa, C., De Salles, B F, Maior, A., Miranda, H. & Simão, R. (2011). Acute effect of resistance training volume on hormonal responses in trained men. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 51 (2), 322–328.
- Le Meur, B. & Hausswirth C. (2013). Managing Active Recovery. In: Hausswirth C, Mujika I, (Hrsg.), *Recovery for Performance in Sport*. Champaign: Human Kinetics, pp. 29-42.
- Lexell, J., Sjöström, M., Nordlund, A.S. & Taylor, C.C. (1992). Growth and development of human muscle: a quantitative morphological study of whole vastus lateralis from childhood to adult age. *Muscle & Nerve*, 15 (3), 404–409.
- Lindner, W. (1993). *Erfolgreiches Radsporttraining. Vom Amateur zum Profi*. München, Wien, Zürich: Blv.
- Little, J.P., Safdar, A., Wilkin, G.P., Tarnopolsky, M.A. & Gibala, M.J. (2010). A practical model of low-volume high-intensity interval training induces mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle: potential mechanisms. *The Journal of Physiology*, 588 (6), 1011–1022.

- Lovell, D., Kerr, A., Wiegand, A., Solomon, C., Harvey, L. & McLellan, C. (2013). The contribution of energy systems during the upper body Wingate anaerobic test. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 38 (2), 216–219.
- Ludwig, O., Mazet, D. & Schmitt, E. (2003). Haltungsschwächen bei Kindern und Jugendlichen - eine interdisziplinäre Betrachtung. *Gesundheitssport und Sporttherapie*, (19), 165–171.
- Malina, R.M. (1969). Quantification of fat, muscle and bone in man. *Clinical Orthopaedics and related Research*, 65, 9–38.
- Malina, R.M., Bouchard, C. & Bar-Or, O. (2004). *Growth, maturation, and physical activity*. Champaign: Human Kinetics.
- Marées, H.d. & Heck, H. (2006). *Sportphysiologie*. Köln: Sportverlag Strauß.
- Margaria, R., Aghemo, P. & Rovelli, E. (1966). Measurement of muscular power (anaerobic) in man. *Journal of Applied Physiology*, 21 (5), 1662–1664.
- Martin, D.E. & Coe, P.N. (1992). *Mittel- und Langstreckentraining*. Aachen: Meyer und Meyer.
- Martin, D. (1999). *Handbuch Kinder- und Jugendtraining*. Schorndorf: Verlag Hofmann.
- Matejkova J, Koprivova Z, Placheta Z (1980). Changes in acid-base balance after maximal exercise. In Placheta Z, Brno JE (Hrsg.), *Youth and Physical Activity*. (S. 191–200). Usti nad Labem: Purkyne University.
- Matos, N. & Winsley, R.J. (2007). Trainability of Young Athletes and Overtraining. *Journal of Sports Science & Medicine*, 6 (3), 353–367.
- Maughan RJ, Shireffs SM (Hrsg.) (1996). *Biochemistry of Exercise IX*. Champaign: Human Kinetics.
- McEwen, B.S. (1998). Stress, adaptation, and disease. Allostasis and allostatic load. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 840, 33–44.
- McManus, AM, Armstrong, N, Williams, CA (1997). Effect of training on the aerobic power and anaerobic performance of prepubertal girls. *Acta Paediatrica Belgica*, 86 (5), 456–459.

- McManus, A.M., Cheng, C.H., Leung, M.P., Yung, T.C. & Macfarlane, D.J. (2005). Improving aerobic power in primary school boys: a comparison of continuous and interval training. *International Journal of Sports Medicine*, 26 (9), 781–786.
- McMillan, K., Helgerud, J., Macdonald, R. & Hoff, J. (2005). Physiological adaptations to soccer specific endurance training in professional youth soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 39 (5), 273–277.
- McNair D., Lorr M., Dropplemann LF. (1971, 1992). *Profile of Mood States Manual*. San Diego: Educational and Industrial Testing Service.
- McNair D., Lorr M., Dropplemann LF., Biehl B., Dangel S. (1981). Profile of Mood States (Dt. Bearbeitung). In W. Beltz Verlag (Hrsg.), *Collegium Internationale Psychiatriae Salarum*. Weinheim: Beltz Verlag.
- Meeusen, R., Duclos, M., Gleeson, M., Rietjens, G., Steinacker, J. & Urhausen, A. (2006). Prevention, diagnosis and treatment of the Overtraining Syndrome. *European Journal of Sport Science*, 6 (1), 1–14.
- Menzies, P., Menzies, C., McIntyre, L., Paterson, P., Wilson, J. & Kemi, O.J. (2010). Blood lactate clearance during active recovery after an intense running bout depends on the intensity of the active recovery. *Journal of Sports Sciences*, 28 (9), 975–982.
- Mertin, A. (2014). Hochintensitätstraining HIIT: Raus aus dem Wohlfühlbereich! *Spiegel Online*, 1. Zugriff am 09.04.2014 unter <http://www.spiegel.de/gesundheit/ernaehrung/hiit-high-intensity-interval-training-bringt-ausdauer-a-961073.html>
- Messonnier, L., Freund, H., Denis, C., Féasson, L. & Lacour, J.-R. (2006). Effects of training on lactate kinetics parameters and their influence on short high-intensity exercise performance. *International Journal of Sports Medicine*, 27 (1), 60–66.
- Mester, J., Vom Heede, A. & Behringer, M. (2009). Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Training und zur Belastbarkeit von Kindern und Jugendlichen im internationalen Vergleich. In L. Nordmann, C. Dolch & H. Steingrebe

- (Hrsg.), *Talente suchen und entwickeln. Chancen, Wege und Methoden* (Sport ist Spitze, Bd. 23, S. 48–84). Aachen: Meyer & Meyer.
- Meyer, K., Samek, L., Schwaibold, M., Westbrook, S., Hajric, R., Beneke, R., Lehmann, M., Roskamm, H. (1997). Interval training in patients with severe chronic heart failure: analysis and recommendations for exercise procedures. *Med Sci Sports Exerc*, 29: 306–312.
- Midgley, A.W., Carroll, S., Marchant, D., McNaughton, L.R. & Siegler, J. (2009). Evaluation of true maximal oxygen uptake based on a novel set of standardized criteria. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 34 (2), 115–123.
- Mikines, K.J., Sonne, B., Farrell, P.A., Tronier, B. & Galbo, H. (1989). Effect of training on the dose-response relationship for insulin action in men. *Journal of Applied Physiology*, 66 (2), 695–703.
- Ministry of Education (2011). *Program guide for daily physical activity (update 2011)*. Zugriff am 26. August 2013 unter http://www.bced.gov.bc.ca/dpa/pdfs/program_guide.pdf.
- Mujika, I., Spencer, M., Santisteban, J., Goiriena, J.J. & Bishop, D. (2009). Age-related differences in repeated-sprint ability in highly trained youth football players. *Journal of Sports Sciences*, 27 (14), 1581–1590.
- Nance, D.M. & Sanders, V.M. (2007). Autonomic innervation and regulation of the immune system (1987-2007). *Brain, Behavior, and Immunity*, 21 (6), 736–745.
- Nieman, D.C. (1995). Upper respiratory tract infections and exercise. *Thorax*, 50 (12), 1229–1231.
- Nieman, D.C., Henson, D.A., Austin, M.D. & Brown, V.A. (2005). Immune response to a 30-minute walk. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37 (1), 57–62.
- O'Connor, P.J. & Corrigan, D.L. (1987). Influence of short-term cycling on salivary cortisol levels. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19 (3), 224–228.

- O'Connor, P.J., Morgan, W.P., Raglin, J.S., Barksdale, C.M. & Kalin, N.H. (1989). Mood state and salivary cortisol levels following overtraining in female swimmers. *Psychoneuroendocrinology*, 14 (4), 303–310.
- O'Donovan, G., Owen, A., Bird, S.R., Kearney, E.M., Nevill, A.M., Jones, D.W. & Woolf-May, K. (2005). Changes in cardiorespiratory fitness and coronary heart disease risk factors following 24 wk of moderate- or high-intensity exercise of equal energy cost. *Journal of Applied Physiology*, 98 (5), 1619–1625.
- Oertel, G. (1988). Morphometric analysis of normal skeletal muscles in infancy, childhood and adolescence. An autopsy study. *Journal of the Neurological Sciences*, 88 (1-3), 303–313.
- Paraschos, I., Hassani, A., Bassa, E., Hatzikotoulas, K., Patikas, D. & Kotzamanidis, C. (2007). Fatigue differences between adults and prepubertal males. *International Journal of Sports Medicine*, 28 (11), 958–963.
- Passelergue, P. & Lac, G. (1999). Saliva cortisol, testosterone and T/C ratio variations during a wrestling competition and during the post-competitive recovery period. *International Journal of Sports Medicine*, 20 (2), 109–113.
- Paterson, D.H., Cunningham, D.A. & Bumstead, L.A. (1986). Recovery O₂ and blood lactic acid: longitudinal analysis in boys aged 11 to 15 years. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 55 (1), 93–99.
- Payne, V.G., Morrow, J.R., Johnson, L. & Dalton, S.N. (1997). Resistance training in children and youth: a meta-analysis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 68 (1), 80–88.
- Péronnet, F. & Massicotte, D. (1991). Table of nonprotein respiratory quotient: an update. *Canadian Journal of Sport Sciences*, 16 (1), 23–29.
- Pescatello LS, Arena R, Rieber D, Thompson PD (Eds.) (2013). *Acsm's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins.

- Petersen SR, Gaul CA, Stanton MM, Hanstock CC (1999). Skeletal muscle metabolism during short-term, high-intensity exercise in prepubertal and pubertal girls. *Journal of Applied Physiology*, 87 (6), 2151–2156.
- Pichot, V., Busso, T., Roche, F., Garet, M., Costes, F., Duverney, D., Lacour, J.-R. & Barthélémy, J.-C. (2002). Autonomic adaptations to intensive and overload training periods: a laboratory study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 (10), 1660–1666.
- Pilegaard, H., Terzis, G., Halestrap, A. & Juel, C. (1999). Distribution of the lactate/H⁺ transporter isoforms MCT1 and MCT4 in human skeletal muscle. *The American Journal of Physiology*, 276 (5 Pt 1), 843-8.
- Pilz-Burstein, R., Ashkenazi, Y., Yaakovovitz, Y., Cohen, Y., Zigel, L., Nemet, D., Shamash, N. & Eliakim, A. (2010). Hormonal response to Taekwondo fighting simulation in elite adolescent athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 110 (6), 1283–1290.
- Placheta Z, Brno JE (Hrsg.) (1980). *Youth and Physical Activity*. Usti nad Labem: Purkyne University.
- Platen, P. (2010). *Krafttraining im Nachwuchsleistungssport*. Köln: Sportverlag Strauss.
- Prasad, N., Coutts K.D., Jespersen, D., Wolski, L., Cooper, T. (1995). Relationship between aerobic and anaerobic exercise capacities in pre-pubertal children. *Medicine & Science in Sports & Exercise* (27), 115.
- Raglin, J., Sawamura, S., Alexiou, S., Hassmén, P. and Kentta, G. (2000). Training practices and staleness in 13-18-year-old swimmers: A cross-cultural study. *Pediatric Exercise Science*, 12 (1), 61–70.
- Raison, C.L. & Miller, A.H. (2003). When not enough is too much: the role of insufficient glucocorticoid signaling in the pathophysiology of stress-related disorders. *The American Journal of Psychiatry*, 160 (9), 1554–1565.
- Rakobowchuk, M., Tanguay, S., Burgomaster, K.A., Howarth, K.R., Gibala, M.J. & Macdonald, M.J. (2008). Sprint interval and traditional endurance training induce similar improvements in peripheral arterial stiffness and flow-

- mediated dilation in healthy humans. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 295 (1), 236-42.
- Ratel, S., Bedu, M., Hennegrave, A., Doré, E. & Duché, P. (2002). Effects of age and recovery duration on peak power output during repeated cycling sprints. *International Journal of Sports Medicine*, 23 (6), 397–402.
- Ratel, S., Duche, P., Hennegrave, A., van Praagh, E. & Bedu, M. (2002). Acid-base balance during repeated cycling sprints in boys and men. *Journal of Applied Physiology*, 92 (2), 479–485.
- Ratel, S., Lazaar, N., Williams, C.A., Bedu, M. & Duché, P. (2003). Age differences in human skeletal muscle fatigue during high-intensity intermittent exercise. *Acta Paediatrica*, 92 (11), 1248–1254.
- Ratel, S., Williams, C.A., Oliver, J. & Armstrong, N. (2004). Effects of age and mode of exercise on power output profiles during repeated sprints. *European Journal of Applied Physiology*, 92 (1-2), 204–210.
- Ratel, S., Williams, C.A., Oliver, J. & Armstrong, N. (2006). Effects of age and recovery duration on performance during multiple treadmill sprints. *International Journal of Sports Medicine*, 27 (1), 1–8.
- Ratel, S., Duché, P. & Williams, C.A. (2006). Muscle fatigue during high-intensity exercise in children. *Sports Medicine*, 36 (12), 1031–1065.
- Ratel, S., Tonson, A., Le Fur, Y., Cozzone, P. & Bendahan, D. (2008). Comparative analysis of skeletal muscle oxidative capacity in children and adults: a ³¹P-MRS study. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 33 (4), 720–727.
- Ratel, S. (2011). High- intensity and Resistance Training and Elite Young Athletes. In N. Armstrong & McManus AM (Hrsg.), *The Elite Young Athlete* (S. 84–96). Basel: Karger.
- Reindell H., Roskamm H. (1959). Ein Beitrag zu den physiologischen Grundlagen des Intervalltrainings unter besonderer Berücksichtigung des Kreislaufs. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin*, 7, 1–8.
- Richards, J.C., Johnson, T.K., Kuzma, J.N., Lonac, M.C., Schweder, M.M., Voyles, W.F. & Bell, C. (2010). Short-term sprint interval training increases

- insulin sensitivity in healthy adults but does not affect the thermogenic response to beta-adrenergic stimulation. *The Journal of Physiology*, 588 (15), 2961–2972.
- Riddell, M.C. (2008). The endocrine response and substrate utilization during exercise in children and adolescents. *Journal of Applied Physiology*, 105 (2), 725–733.
- Rimaud, D., Messonnier, L., Castells, J., Devillard, X. & Calmels, P. (2010). Effects of compression stockings during exercise and recovery on blood lactate kinetics. *European Journal of Applied Physiology*, 110 (2), 425–433.
- Rognmo, Ø., Hetland, E., Helgerud, J., Hoff, J. & Slørdahl, S.A. (2004). High intensity aerobic interval exercise is superior to moderate intensity exercise for increasing aerobic capacity in patients with coronary artery disease. *European Journal of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation*, 11 (3), 216–222.
- Rowland, T.W. (2005). *Children's Exercise Physiology*. Champaign: Human Kinetics.
- Ryden, L., Grant, P.J., Anker, S.D., Berne, C., Cosentino, F., Danchin, N., Deaton, C., et al. (2013). ESC Guidelines on diabetes, pre-diabetes, and cardiovascular diseases developed in collaboration with the EASD: The Task Force on diabetes, pre-diabetes, and cardiovascular diseases of the European Society of Cardiology (ESC) and developed in collaboration with the European Association for the Study of Diabetes (EASD). *European Heart Journal*, 34 (39), 3035–3087.
- Saltin, B., Nazar, K., Costill, D.L., Stein, E., Jansson, E., Essén, B. & Gollnick, D. (1976). The nature of the training response; peripheral and central adaptations of one-legged exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 96 (3), 289–305.
- Seiler, K.S. & Kjerland, G.Ø. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 16 (1), 49–56.

- Seiler, S. & Tonnessen E. (2009). Intervals, thresholds, and long slow distance: the role of intensity and duration in endurance training. *Sports Science* (13), 32–54.
- Siegler, J., Gaskill, S. & Ruby, B. (2003). Changes evaluated in soccer-specific power endurance either with or without a 10-week, in-season, intermittent, high-intensity training protocol. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17 (2), 379–387.
- Simoneau, J.A., Lortie, G., Boulay, M.R. & Bouchard, C. (1983). Tests of anaerobic alactacid and lactacid capacities: description and reliability. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences*, 8 (4), 266–270.
- Skinner, JS. (2001). Körperliche Aktivität und Gesundheit: Welche Bedeutung hat die Trainingsintensität? *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 52 (6), 211–214.
- Smith, D.J. (2003). A framework for understanding the training process leading to elite performance. *Sports Medicine*, 33 (15), 1103–1126.
- Soares JMC, Mota P, Duarte JA, Appell HJ (1996). Children are less susceptible to exercise-induced muscle damage than adults: a preliminary investigation. *Pediatric Exercise Science*, 8 (4), 361–367.
- Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B. & Goodman, C. (2005). Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: specific to field-based team sports. *Sports Medicine*, 35 (12), 1025–1044.
- Sperlich, B., Zinner, C., Heilemann, I., Kjendlie, P.-L., Holmberg, H.-C. & Mester, J. (2010). High-intensity interval training improves VO₂peak, maximal lactate accumulation, time trial and competition performance in 9-11-year-old swimmers. *European Journal of Applied Physiology*, 110 (5), 1029–1036.
- Sperlich, B., Marées, M. de, Koehler, K., Linville, J., Holmberg, H.-C. & Mester, J. (2011). Effects of 5 weeks of high-intensity interval training vs. volume training in 14-year-old soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25 (5), 1271–1278.

- Sperlich, B., Hoppe MW., Hägele M. (2013). Ausdauertraining – Dauerethode versus intensive Intervallmethode im Fußball. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 65 (1), 10–17.
- Stanley, W.C., Gertz, E.W., Wisneski, J.A., Morris, D.L., Neese, R.A. & Brooks, G.A. (1985). Systemic lactate kinetics during graded exercise in man. *The American Journal of Physiology*, 249 (6 Pt 1), 595-602.
- Swain, D.P. & Franklin, B.A. (2002). Is there a threshold intensity for aerobic training in cardiac patients? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 (7), 1071–1075.
- Swain, D.P. & Franklin, B.A. (2002). VO₂ reserve and the minimal intensity for improving cardiorespiratory fitness. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 (1), 152–157.
- Tanner, J.M. & Whitehouse, R.H. (1976). Clinical longitudinal standards for height, weight, height velocity, weight velocity, and stages of puberty. *Archives of Disease in Childhood*, 51 (3), 170–179.
- Taoutaou, Z., Granier, P., Mercier, B., Mercier, J., Ahmaidi, S. & Prefaut, C. (1996). Lactate kinetics during passive and partially active recovery in endurance and sprint athletes. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 73 (5), 465–470.
- Taylor, D.J., Kemp, G.J., Thompson, C.H. & Radda, G.K. (1997). Ageing: effects on oxidative function of skeletal muscle in vivo. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 174 (1-2), 321–324.
- Theintz, G.E., Howald, H., Weiss, U. & Sizonenko, P.C. (1993). Evidence for a reduction of growth potential in adolescent female gymnasts. *The Journal of Pediatrics*, 122 (2), 306–313.
- Tjønnå, A.E., Lee, S.J., Rognmo, Ø., Stølen, T.O., Bye, A., Haram, P.M., Loennechen, J.P., Al-Share, Q.Y., Skogvoll, E., Slørdahl, S.A., Kemi, O.J., Najjar, S.M. & Wisløff, U. (2008). Aerobic interval training versus continuous moderate exercise as a treatment for the metabolic syndrome: a pilot study. *Circulation*, 118 (4), 346–354.

- Tjønnå, A.E., Stølen, T.O., Bye, A., Volden, M., Slørdahl, S.A., Odegård, R., Skogvoll, E. & Wisløff, U. (2009). Aerobic interval training reduces cardiovascular risk factors more than a multitreatment approach in overweight adolescents. *Clinical Science*, 116 (4), 317–326.
- Tomkinson G.R., Olds, T.S. (2007). *Pediatric Fitness. Secular Trends and Geographic Variability*. Basel: Karger.
- Tonson, A., Ratel, S., Le Fur, Y., Vilmen, C., Cozzone, P.J. & Bendahan, D. (2010). Muscle energetics changes throughout maturation: a quantitative ³¹P-MRS analysis. *Journal of Applied Physiology*, 109 (6), 1769–1778.
- Urhausen, A. & Kindermann, W. (2002). Diagnosis of overtraining: what tools do we have? *Sports Medicine*, 32 (2), 95–102.
- van Baak, M.A. (2001). The peripheral sympathetic nervous system in human obesity. *Obesity Reviews*, 2 (1), 3–14.
- van Praagh, E. & Doré, E. (2002). Short-term muscle power during growth and maturation. *Sports Medicine*, 32 (11), 701–728.
- van Praagh, E. (2007). Anaerobic fitness tests: what are we measuring? *Medicine and Sport Science*, 50, 26–45.
- VanBruggen, M.D., Hackney, A.C., McMurray, R.G. & Ondrak, K.S. (2011). The relationship between serum and salivary cortisol levels in response to different intensities of exercise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6 (3), 396–407.
- Varray, A.L., Mercier, J.G., Terral, C.M. & Prefaut, C.G. (1991). Individualized aerobic and high intensity training for asthmatic children in an exercise re-adaptation program. Is training always helpful for better adaptation to exercise? *Chest*, 99 (3), 579–586.
- Viru, A., Karelson, K. & Smirnova, T. (1992). Stability and variability in hormonal responses to prolonged exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 13 (3), 230–235.
- Wahl, P., Hägele, M., Zinner C., Bloch, W. & Mester, J. (2010). High Intensity Training (HIT) für die Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit im

- Leistungssport. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 58 (4), 125–133.
- Wahl, P., Hägele, M., Zinner, C., Bloch, W. & Mester, J. (2010). High Intensity Training (HIT) für die Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit von Normalpersonen und im Präventions- & Rehabilitationsbereich. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, 160 (23-24), 627–636.
- Wahl, P., Mathes, S., Köhler, K., Achtzehn, S., Bloch, W. & Mester, J. (2013). Acute Metabolic, Hormonal, and Psychological Responses to Different Endurance Training Protocols. *Hormone and Metabolic Research*, 45 (11), 827-833.
- Wahl, P., Zinner, C., Grosskopf, C., Rossmann, R., Bloch, W. & Mester, J. (2013). Passive recovery is superior to active recovery during a high-intensity shock microcycle. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27 (5), 1384–1393.
- Warburton, D.E., McKenzie, D.C., Haykowsky, M.J., Taylor, A., Shoemaker, P., Ignaszewski, A.P., Chan, S.Y. (2005). Effectiveness of high-intensity interval training for the rehabilitation of patients with coronary artery disease. *Am J Cardiol*, 95: 1080–1084.
- Webber L.M., Byrnes W.C., Rowland T.W., Foster V.L. (1989). Serum Creatine Kinase Activity and Delayed Onset Muscle Soreness in Prepubescent Children: A Preliminary Study. *Pediatric Exercise Science*, 1 (4), 351–359.
- Weineck, J. (2007). *Optimales Training. Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings*. Baltingen: Spitta.
- Williams, C.A., Carter, H., Jones, A.M. & Doust, J.H. (2001). Oxygen uptake kinetics during treadmill running in boys and men. *Journal of Applied Physiology*, 90 (5), 1700–1706.
- Wisløff, U., Støylen, A., Loennechen, J.P., Bruvold, M., Rognum, Ø., Haram, P.M., Tjønnå, A.E., Helgerud, J., Slørdahl, S.A., Lee, S.J., Videm, V., Bye, A., Smith, G.L., Najjar, S.M., Ellingsen, Ø. & Skjaerpe, T. (2007). Superior cardiovascular effect of aerobic interval training versus moderate continu-

- ous training in heart failure patients: a randomized study. *Circulation*, 115 (24), 3086–3094.
- Yanagiya, T., Kanehisa, H., Kouzaki, M., Kawakami, Y. & Fukunaga, T. (2003). Effect of gender on mechanical power output during repeated bouts of maximal running in trained teenagers. *International Journal of Sports Medicine*, 24 (4), 304–310.
- Zafeiridis, A., Dalamitros, A., Dipla, K., Manou, V., Galanis, N. & Kellis, S. (2005). Recovery during high-intensity intermittent anaerobic exercise in boys, teens, and men. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37 (3), 505–512.
- Zanconato, S., Cooper, D.M. & Armon, Y. (1991). Oxygen cost and oxygen uptake dynamics and recovery with 1 min of exercise in children and adults. *Journal of Applied Physiology*, 71 (3), 993–998.
- Zanconato, S., Buchthal, S., Barstow, T.J. & Cooper, D.M. (1993). ³¹P-magnetic resonance spectroscopy of leg muscle metabolism during exercise in children and adults. *Journal of Applied Physiology*, 74 (5), 2214–2218.
- Zinner, C., Wahl, P., Achtzehn, S., Reed, J. L. & Mester, J. (2013). Acute Hormonal Responses Before and After 2 Weeks of HIT in Well Trained Junior Triathletes. *Int J Sports Med*, 35 (4), 316–322.
- Zintl, F. & Eisenhut, A. (2009). *Ausdauertraining. Grundlagen, Methoden, Trainingssteuerung*. München: Blv.
- Zouloumian, P. & Freund, H. (1981). Lactate after exercise in Man: II. Mathematical model. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 46 (2), 135–147.
- Zouloumian, P. & Freund, H. (1981). Lactate after exercise in man: III. Properties of the compartment model. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 46 (2), 149–160.

10 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema “Physiologische und hormonelle Reaktionen auf Hochintensives Intervalltraining bei Nachwuchsleistungssportlern und erwachsenen Athleten” selbständig verfasst, nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt, wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen als solche gekennzeichnet und die Satzung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) [ehemals Satzung der Universität Karlsruhe (TH)] zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis beachtet habe. Des Weiteren wurde diese Arbeit nicht bereits anderweitig als Prüfungsarbeit verwendet.



Florian Engel

Karlsruhe, den 14.05.2014

11 Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Florian Engel

Geburtsort: Herdecke

Nationalität: deutsch

Schulbildung

1992-2002 Ruhr-Gymnasium Witten, allgemeine Hochschulreife

Akademischer Werdegang

2003-2009 Studium Sportwissenschaft an der Ruhr-Universität Bochum, Abschluss „Diplom-Sportwissenschaftler mit Schwerpunkt Prävention und Rehabilitation“

2009-2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum für den Schulsport und den Sport von Kindern und Jugendlichen (FoSS) am Karlsruher Institut für Technologie

Seit 6/2011 Promotionsstipendiat des Ernst Ludwig Ehrlich Studienwerks e.V.

Aktive Kongressteilnahmen

- 2009 41. Deutscher Sportärztekongress, 24. - 26.09.2009 in Ulm.
Posterpräsentation: Laktatelimination und Säure-Basen Status nach intensiver Intervallbelastung bei Kindern und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Erholungsgestaltung.
- 2009 24. internationaler Workshop „Suchen, entwickeln, fördern - fundamentale Aufgaben im Nachwuchsleistungssport, 08. - 09. Juni 2009 in Lünen. Vortrag: Benötigt die Leichtathletik neue Maßnahmen zur Talentauswahl in den Laufdisziplinen?
- 2010 25. Internationaler Workshop „Leistungssport 2020 - Neue Antworten auf veränderte Wirklichkeit“ am 31 Mai - 1. Juni 2010 in Duisburg. Vortrag: Vorstellung der Testbereiche des Motorischen Tests MT2 für die NRW-Sportschulen Talentsuche und Talentförderung.
- 2010 8. gemeinsames Symposium der dvs-Sektionen Biomechanik, Sportmotorik und Trainingswissenschaft vom 02. - 04. September in Hamburg. Vortrag: Der Motorische Test MT2 – ein Testverfahren zur Sichtung von Nachwuchsathleten im Alter von 12 bis 15 Jahren an den NRW-Sportschulen.
- 2011 20. Sportwissenschaftlicher Hochschultag der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft (dvs) vom 21. - 23. September 2011 in Halle (Saale). Vortrag 1: Speichelcortisol-

konzentrationen von Jungen nach anaerob-laktaziden Intervallbelastungen.

Vortrag 2: Leistung, Belastungstoleranz und pH-Verschiebungen bei Kurzzeit-Intervallsprints im Kindes- und Erwachsenenalter.

2011 42. Deutscher Sportärztekongress, 6. - 8.10.2011 in Frankfurt am Main. Posterpräsentation: Speichelcortisolbelastung von vorpubertären Jungen und Männern nach anaerob-laktaziden Intervallbelastungen.

2012 2nd Wingate Congress of Exercise and Sport Sciences, vom 15. - 18. März in Netanja, Israel. Vortrag: Saliva Cortisol in Prepubescent Soccer Players after High Intensity Interval Training.

2013 18th annual Congress of the European College of Sports Science, 26. - 29. Juni in Barcelona, Spanien. Vortrag 1: Blood lactate kinetics and muscle power following one session of high intensive interval training and high intensive training in young and adult male athletes.

2013 21. Sportwissenschaftlicher Hochschultag der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft (dvs) vom 25. - 27. September 2013 in Konstanz. Vortrag: Akute Belastungsreaktionen und Ermüdung während Hoch Intensivem Intervalltraining bei Kindern und Erwachsenen.

Veröffentlichungen

- Müller, J., **Engel, F.** & Ferrauti, A. (2009). Children tolerate intensive exercise better than adults. In S. Loland, K. Bø, K. Fasting, J. Hallén, Y. Omundsen, G. Roberts & E. Tsolakidis (Hrsg.), *14th Annual Congress of the European College of Sports Science* (Book of abstracts, S. 223). Oslo.
- Müller, J., **Engel, F.** & Ferrauti, A. (2009). Laktatelimination und Säure-Basen Status nach intensiver Intervallbelastung bei Kindern und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Erholungsgestaltung. *Dtsch. Z. Sportmed.* 60, 187.
- Engel, F.** (2009). Ausdauertraining im Schulsport. Praxisbeispiele für das Ausdauertraining in der Schule sowie physiologische und psychologische Voraussetzungen von Kindern für Ausdauerbelastungen im Laufen. *Schulsport INFO*, 2, 4 – 7.
- Engel, F.** (2010). Benötigt die Leichtathletik neue Maßnahmen zur Talentauswahl in den Laufdisziplinen? In J. Freiwald & Pieper, S. (Red.), *Sport ist Spitze - Suchen, entwickeln, fördern – Fundamentale Aufgaben im Nachwuchsleistungssport* (S. 10-21). Aachen: Meyer & Meyer.

- Seidel, I., **Engel, F.**, Bös, K. (2010). Der Motorische Test MT2 – ein Testverfahren zur Sichtung von Nachwuchsathleten im Alter von 12 bis 15 Jahren an den NRW-Sportschulen. In: *Bewegung und Leistung – Sport, Gesundheit & Alter. Abstractband* (S. 68). Hamburg: Feldhaus.
- Engel, F.** (2010). Triathlon im Schulsport. Praxisbeispiele und Übungsreihen. *SportPraxis*, 51 (5+6), 6-13.
- Engel, F.** & Neumann, R. (2011). Der Tanz auf dem Band: Slacklining mit Kindern und Jugendlichen. *SportPraxis*, 52 (5+6), 6-13.
- Engel, F.** & Seidel, I. (2011). Vorstellung der Testbereiche des Motorischen Tests MT2 für die NRW-Sportschulen. In M. Brach (Hrsg.), *Sport ist Spitze. Talentsuche und Talentförderung in Nordrhein-Westfalen* (S. 52-54). Aachen: Meyer & Meyer.
- Engel, F.**, Kappenstein, J., Ferrauti, A. (2011). Leistung, Belastungstoleranz, und pH-Verschiebung bei Kurzzeit-Intervallsprints im Kindes- und Erwachsenenalter. Abstract. In K. Hottenrott, O. Stoll, R. Wollny (Hrsg.), *Kreativität - Innovation - Leistung. Wissenschaft bewegt SPORT bewegt Wissenschaft* (S. 153). Hamburg: Feldhaus Verlag.
- Engel, F.**, Härtel, S., Bös, K. (2011). Speichelcortisol von trainierten vorpubertären Jungen nach anaerob-laktaziden Intervallbelastungen. Abstract. In K. Hottenrott, O. Stoll, R. Wollny (Hrsg.), *Kreativität - Innovation - Leistung. Wissenschaft bewegt SPORT bewegt Wissenschaft* (S. 154). Hamburg: Feldhaus Verlag.

- Engel, F., Härtel, S., Bös, K. (2011).** Speichelcortisolbelastung von vorpubertären Jungen und Männern nach anaerob-laktaziden Intervallbelastungen. *Dtsch. Z. Sportmed.* 62, 241.
- Engel, F. (2011)** Ausdauertraining mit Kindern und Jugendlichen. *Praxis der Psychomotorik*, 36, 4, 217-220.
- Engel, F. & Ingelmann, C. (2012).** Kraulschwimmen leicht gemacht: Natürliche Bewegungsmuster nutzen Die Einführung des Kraulschwimmens im Sportunterricht. *SportPraxis*, 52 (3+4), 46-52.
- Engel, F., Haertel, S. & Boes, K. (2012).** Saliva Cortisol in Prepubescent Soccer Players after High Intensity Interval Training. Abstract. In D. Hellerstein, A. Dunsky & Y Meckel (Hrsg.), *Exercise and Sport Sciences, Book of Abstracts* (S. 35). Netanja: The Wingate Institute for Physical Education and Sport.
- Engel, F., Stockinger, C., Haertel, S. & Boes, K. (2013).** Blood lactate kinetics and muscle power following one session of high intensive interval training and high intensive training in young and adult male athletes. Abstract. In N. Balagué, C. Torrents, A. Vilanova, J. Cadefau, R. Tarragó & E. Tsolakidis (Hrsg.), *18th Annual Congress of the European College of Sports Science (Book of Abstracts, S. 330)*. Barcelona: Open Print.
- Engel, F., Stockinger, C., Härtel, S. & Bös, K. (2013).** Akute Belastungsreaktionen und Ermüdung während Hoch Intensivem Intervalltraining bei Kindern und Erwachsenen. Abstract. In F. Mess, M. Gruber & A. Woll (Hrsg.), *Sportwissenschaft grenzenlos?! (S. 249)*. Hamburg: Feldhaus.



