

Patrick Wahl^{1,2,3}, Matthias Hägele¹, Christoph Zinner¹, Wilhelm Bloch^{2,3}, Joachim Mester^{1,3}

¹ Institut für Trainingswissenschaft und Sportinformatik; Deutsche Sporthochschule Köln

² Abteilung für molekulare und zelluläre Sportmedizin; Deutsche Sporthochschule Köln

³ Das Deutsche Forschungszentrum für Leistungssport; Deutsche Sporthochschule Köln

High Intensity Training (HIT) für die Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit im Leistungssport

Zusammenfassung

Auch wenn intensive Belastungen prinzipiell nicht neu sind, so ist mit dem «High Intensity (Interval) Training» (HIT) in recht kurzer Zeit eine derartige Methode vehement in die internationale wissenschaftliche Diskussion gekommen. Neu ist die grosse Anzahl an Studien und die immer detaillierter werdenden Erkenntnisse über die physiologischen Reaktionen von HIT (im Vergleich zum klassischen, niedrigintensiven, umfangsorientierten Ausdauertraining). Der vorliegende Artikel fasst den aktuellen Erkenntnisstand zum Thema HIT (Konditionsbereich Ausdauer) im Leistungssport zusammen. Diskutiert werden die Anpassungserscheinungen von HIT im Vergleich zum klassischen Ausdauertraining. Ausserdem wird versucht, eine rationale physiologische Begründung für Steuerungsgrössen und Protokolle bei HIT zu finden. Der letzte Teil diskutiert die mögliche Verwendung von HIT-Einheiten oder HIT-Blöcken in der Periodisierung.

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 58 (4), 125–133, 2010

Summary

Although intensive exercise protocols are commonly used in practical training and scientific studies, there started recently a scientific debate about “high intensity (interval) training” (HIT). New are the many studies and the more detailed knowledge about the physiological responses and adaptations to HIT in comparison to the classic high volume, low intensity endurance training. The present article summarizes the current knowledge about HIT in endurance exercise for elite athletes. In the first part, adaptations to HIT are discussed in comparison to low intensity high volume training. Furthermore, we try to consider the physiological significance, feasibility and rationale for the use of HIT as well as which HIT protocols and exercise intensities should be used. The last section discusses possible applications of HIT during periodization.

Einleitung

Während die physiologischen Reaktionen und Adaptationen auf ein niedrig-intensives, sog. Grundlagenausdauertraining (HVT; «High Volume [low intensity] Training») bei mässig trainierten Probanden meist bekannt sind, so besteht hinsichtlich der Anpassungen unterschiedlicher Ausdauertrainingsprogramme bei hochtrainierten (Ausdauer-)Athleten, insbesondere angesichts der individuellen Reaktionen, noch grösserer Forschungsbedarf [53; 56]. Während das sog. Grundlagenausdauertraining bei mässig trainierten Personen mit einer Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit und begleitenden physiologischen Parametern einhergeht, führen weitere Steigerungen des Belastungsumfanges im submaximalen Bereich bei hochtrainierten Athleten oft nicht mehr zu Verbesserungen der aeroben Leistungsfähigkeit und der physiologischen Parameter (z.B. VO_{2max}) [23–24]. Häufig ist eine weitere Steigerung der Trainingsumfänge in Ausdauersportarten, aber auch in technik- oder taktikdominierten Sportarten, wie z.B. Mannschaftsspielen [65], auf Grund der anderen zu trainierenden Fähigkeiten, aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Trotzdem wurde und wird oft, um zu hohe Belastungen gerade im Ausdauerbereich zu vermeiden, in vielen Situationen vornehmlich umfangsorientiert trainiert. Dies ist u.a. auf falsche Interpretationen von Schwellenkonzepten und laktatbasierte Trainingsableitungen zurückzuführen, die sich in der Trainingspraxis

häufig in niedrig-intensiven und umfangsorientierten Trainingsempfehlungen niederschlagen [16; 88]. Das bedeutet nicht, dass laktatbasierte Trainingsempfehlungen, auch mangels einer fehlenden wissenschaftlich gesicherten Alternative, nicht geeignet sind. Es lassen sich sehr wohl Trainingsbereiche aus der Laktatkurve abgrenzen [34; 68], was eigentlich die Frage, wie intensiv trainiert werden sollte, nicht tangiert. Dennoch ist durch die «Schwellenkonzepte» die Tendenz zum HVT gefördert worden. Hinzu kommen Analysen des Wettkampfprofils, die dahingehend interpretiert werden, dass zur Verbesserung der aeroben Leistungsfähigkeit hauptsächlich niedrigintensiv und umfangsorientiert trainiert werden muss. Des Weiteren wird umfangsorientiertes Training, z.B. im Schwimmen und im Rudern, mit dem Argument des Techniktrainings vertreten. Nicht hinreichend berücksichtigt wird hier aber, dass räumlich-zeitliche Merkmale einer Technik bei geringen Ausführungsgeschwindigkeiten völlig andere sein können als unter Wettkampfbedingungen.

Laursen et al. [56] nehmen an, dass gut bis sehr gut ausdauertrainierte Personen bereits alle kardiorespiratorischen Anpassungen, die durch submaximales Training hervorgerufen werden, erreicht haben, und eine weitere Steigerung des Belastungsumfanges zu keiner weiteren Leistungssteigerung führt. Weiterhin vermuten die Autoren einen zu geringen Anteil an hoch intensivem Training (HIT; «High Intensity Training») in den Trainingsprogrammen vieler Spitzensportler. Unterstützt wird diese These durch Studien,

welche ergaben, dass die erfassten Athleten weniger als 4% des Trainings im hochintensiven Bereich durchführen und vornehmlich weit unterhalb von VO_{2max} trainieren [3; 71]. Eine retrospektive Studie, bei der 123 Lauftrainer befragt wurden, ergab, dass diese vornehmlich langes Grundlagentraining bevorzugen und nur geringe Anteile im intensiven Dauer- bzw. Intervallbereich durchführen [43]. Diese Präferenz für Grundlagentraining schlägt sich zwangsläufig in grossen Wochenumfängen von Elite-Ausdauerathleten nieder [6; 10; 15]. Aktuellere Publikationen zeigen jedoch, dass im Spitzenbereich in den letzten Jahren zumindest teilweise ein gegenläufiger Trend, mit ~17% im hochintensiven Bereich, zu verzeichnen ist [33; 75].

Heute ist zu vermuten, dass dauerhaft submaximale Belastungen dazu beitragen, dass ein für eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit benötigter Trainingsreiz langfristig nicht mehr vorhanden ist, was in einer Stagnation der Leistungsfähigkeit resultieren kann [23–24]. Dies kann in den Zusammenhang der Ergebnisse von Swain & Franklin [86] gestellt werden, welche zeigen, dass die minimale Trainingsintensität, die zu Verbesserungen von VO_{2max} führt, stark abhängig vom initialen VO_{2max} ist. Das bedeutet, dass hochtrainierte Athleten bei höheren Intensitäten trainieren müssen als wenig Trainierte, um VO_{2max} zu steigern [86]. Dabei geht es keinesfalls um den Verzicht grundlagenorientierter Ausdauerblöcke, sondern um das Verbessern der Trainingsqualität durch das Einstreuen gezielter Blöcke hoher bis höchster Intensitäten [17; 51; 78]. Die Frage der Dosierung bleibt dennoch weiterhin existent (die Dosis macht das Gift), die Gefahr einer Überlastung besteht jedoch nicht nur bei zu intensivem Training, sondern auch bei zu grossen Umfängen.

Ziel des Artikels ist 1) aktuelle Ergebnisse von HIT-Studien aus dem Leistungssportbereich zusammenzufassen und 2) basierend auf den Ergebnissen eine rationale Begründung für die Gestaltung von HIT-Protokollen zu liefern, sowie 3) eine mögliche Eingliederung in die Periodisierung darzustellen.

HIT im Leistungssport

Bisher ist nur wenig über die Anpassungserscheinungen und die Effekte auf die Leistung von HIT bei gut bis hochtrainierten Ausdauerathleten ($VO_{2max} \geq 60 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), aber auch bei Athleten aus anderen Sportarten bekannt. Die *Tabellen 1, 2 und 3* stellen die bis dato vorliegenden Ergebnisse dar. Hierzu ist anzumerken, dass in den Studien mit gut trainierten Probanden (*Tab. 1 und 2*) meist nur 1–2 HIT-Einheiten/Woche während 4 Wochen durchgeführt wurden. Diese Zahl deckt sich gut mit Erkenntnissen von Billat et al. [11] und Seiler & Tonnessen [78], wonach für Eliteathleten die optimale Zahl an effektiven bzw. gerade noch verträglichen intensiven Trainingseinheiten bei 2 pro Woche liegt. Somit ist es vermutlich im Elitesport schwierig, den Anteil intensiver Einheiten über längere Zeiträume wesentlich zu erhöhen. Ein anderes Konzept zum Einbau von HIT wären Intensitätsblöcke mit bis zu 10 Einheiten/Woche während 1–2 Wochen. Mittels solchen kurzzeitigen Intensitätsblöcken könnte der Anteil intensiver Trainingseinheiten erhöht und effektiv zur Verbesserung der Ausdauer eingesetzt werden, wie die Studie von Stolen et al. [85] und Breil et al. [17] zeigen (*Tab. 3*).

Doch trotz dieser geringen Dichte an HIT-Einheiten finden sich mehrheitlich Verbesserungen der Leistung und teilweise Verbesserungen begleitender physiologischer Parameter. In nur 4 Studien finden sich, soweit gemessen, Verbesserungen von VO_{2max} , der ventilatorischen Schwelle und der anaeroben Kapazität [55; 59; 80–81]. Die Stimulsdichte von 1–2 HIT-Einheiten pro Woche reicht in diesem Fall evtl. nicht aus, um messbare physiologische Veränderungen von VO_{2max} herbeizuführen. Da jedoch nicht alle durch das Training induzierten adaptiven Veränderungen allein durch die Messung von VO_{2max} erfasst werden können [26], sollten zur Beurteilung der Effektivität eines Trainingsprotokolls mehrere Parameter herangezogen werden. Im Falle von VO_{2max} ist dies gerade bei gut bis sehr gut trainierten Läufern der Fall, da dort nur noch geringfügige Steigerungen zu erwarten sind, diese

jedoch nicht als Leistungsstagnation interpretiert werden dürfen [1; 73], da in diesem Leistungsbereich im Sinne von Grenzwertzusammenhängen die Leistungsfähigkeit nicht mehr unbedingt mit VO_{2max} korreliert. Aufgrund dieser Tatsache muss neben einem möglichst breiten Spektrum von diagnostischen Parametern (z.B. Laktat, VO_2 , Herzfrequenz, Blutgasparameter) vor allem die Leistung als objektives Mass zur Effizienz einer Trainingsintervention genutzt werden.

Nur 4 Studien verwendeten Kontrollgruppen, die im Vergleich zur HIT-Gruppe ihr normales Training weiterführten [55; 58–59; 80]. In keinem Fall führte jedoch der Einbau von HIT bei geringem Zeitaufwand in das laufende Training zu Verschlechterungen der Leistung. Hervorzuheben ist an dieser Stelle sicher auch noch einmal der (zeit-)ökonomische Aspekt von HIT im Hochleistungssport. Fröhlich et al. [36] zeigen, dass eine rein quantitative Ausweitung von Trainingszeiten auf Kosten des für andere Bereiche verbleibenden Zeitbudgets keineswegs erfolgsbegünstigend ist.

Rationale physiologische Begründung von Steuerungsgrössen und Protokollen beim HIT

Bisher ist wenig über die Gestaltung von HIT-Programmen für hochausdauertrainierte Athleten bekannt. Die Effektivität der verschiedenen HIT-Protokolle ist aufgrund der vorliegenden Literatur nicht einfach abschätzbar. Eine mögliche Optimierung müsste über Intensität, Dauer, Anzahl der Intervalle und Erholung zwischen den Intervallen (aktiv vs. passiv) erfolgen. Die oben genannten Variablen müssen an die Phase der Periodisierung, den Trainingsstatus und die individuelle Antwort des Athleten angepasst werden.

Intensität: Es liegt eine Vielzahl an Variablen bzw. Parametern zur Intensitätssteuerung vor. Diese umfassen VO_{2max} [11], diverse Laktat-Schwellenableitungen [4], ventilatorische Schwellen [57], die Herzfrequenz [42] und critical power [48]. Allerdings sind die physiologische Bedeutung und Aussagekraft, die Durchführbarkeit und die Begründung für die Verwendung dieser Parameter zur Intensitätssteuerung noch nicht ausreichend bekannt. Auch wenn die Intensitätssteuerung über prozentuale Angaben eines Maximalwertes äusserst praktikabel ist, so ist die Verwendung und Vergleichbarkeit doch zu hinterfragen. So können zwei Athleten eine nahezu identische VO_{2max} aufweisen, sich jedoch deutlich in ihrer sportartspezifischen Leistungsfähigkeit unterscheiden [25]. Schon seit Jahrzehnten ist bekannt, dass VO_{2max} nicht die einzige Variable ist, die die Leistung bestimmt [60]. Demnach würde eine prozentuale Angabe von VO_{2max} für die beiden Athleten eine unterschiedliche Belastungsintensität und demnach einen unterschiedlichen Stimulus bedeuten [5; 74]. Diese Tatsache sollte bei Trainingsvorgaben, speziell für Gruppen, berücksichtigt werden.

Auch wenn VO_{2max} nicht mit der sportartspezifischen Leistung gleichzusetzen ist [28], so ist sie dennoch eine wichtige Grösse zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit und eine Variable, die zur Trainingssteuerung in vielen Studien verwendet wurde. So wird die Laufgeschwindigkeit bei VO_{2max} als Intensitätsangabe mit einigem Erfolg zur Trainingssteuerung verwendet [7–9; 11–12; 14; 45–47]. Die Begründung für die Verwendung der Laufgeschwindigkeit ist, dass Verbesserungen von VO_{2max} nur erreicht werden, wenn bei bzw. oberhalb von VO_{2max} trainiert wird [56]. Der Hauptstimulus für morphologische Adaptationen des Myokards (Vergrösserung des Schlagvolumens) ist ein mechanischer Overload, erzeugt durch eine volumenbedingte Dehnung des Herzmuskels und durch einen gesteigerten Widerstand bei Entleerung, welcher nur durch hohe Intensitäten entsteht [21–22]. Da das Herzminutenvolumen und der Blutfluss mit steigender Belastungsintensität zunehmen, sind demnach auch die Stimuli und Anpassungen entsprechen grösser und führen auch bei hochtrainierten Athleten zu Anpassungen. Ziel muss es somit sein, während möglichst langer Zeit ein hohes Schlagvolumen und eine hohe VO_2 aufrechtzuerhalten.

Dougall und Sale [62] schlagen eine Trainingsintensität bei ca. 75% VO_{2max} zur Steigerung des Schlagvolumens vor, da nach ihrer Meinung der myokardiale Stress und damit der Stimulus für

Autoren	n	initiale VO _{2max} [ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹]	Kontroll- gruppe	Intensität	Dauer der Intervalle	Anzahl der Intervalle	Art (Intensität) der Erholung	Erholungs- dauer	Anzahl HIT- Einheiten	Interventions- dauer	VO _{2max} nach HIT [ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹]	HIT-Resultate			
Clark et al. [20]	8	64,6 ± 4,0	nein	85% VO _{2peak}	5 min	8	100 W	1 min	7	3 Wochen	↔ 65,3 ± 0,4	↑ PPO			
Lamberts et al. [54]	14	60,3 ± 7,2	nein	175% PPO	4 min	8	individuell	90 s	8	4 Wochen	↔ 61,7 ± 6,5	↑ TT	↑ PPO		
Laursen et al. [55]	14	67,5 ± 3,7	ja	PPO	60 sec	20	aktiv (50 W)	120 s	4	2 Wochen	↔	↑ VT1	↑ VT2	↑ PPO	
		67,5 ± 3,7		normales Training	normales Training	normales Training					↔	↔ VT1	↔ VT2	↔ PPO	
	8	65,6 ± 6,5		PPO	60% t _{lim}	8	N.A.	1:2			↑ 69,5 ± 6,3	↑ VT	↑ ANC	↑ TT	↑ PPO
	9	66,3 ± 4,3		PPO	60% t _{lim}	8	N.A.	65% HR _{max}			↑ 69,9 ± 2,7	↑ VT	↑ ANC	↑ TT	↑ PPO
Laursen et al. [59]	10	63,7 ± 3,8	ja	175% PPO	30 s	12	N.A.	4,5 min	8	4 Wochen	↔ 66,1 ± 5,8	↑ VT	↑ ANC	↑ TT	↑ PPO
	11	68,3 ± 4,6		normales Training	normales Training	normales Training	N.A.	normales Training			↔ 68,8 ± 4,1	↔ VT	↔ ANC	↔ TT	↔ PPO
Lindsay et al. [61]	8	5,2 ± 0,4 [l·min ⁻¹]	nein	80% PPO	5 min	6–8	aktiv (< 100 W)	1 min	6	4 Wochen	N.A.	↑ PPO	↑ 40 km TT	↑ T _{lim} (150% PPO)	
	4	61,5 ± 3,8		80% PPO	8 min	4	N.A.	1 min				↔ TT	↔ PPO		
	4	61,3 ± 3,8		85% PPO	4 min	8	N.A.	1,5 min				↑ TT	↑ PPO		
Stepsto et al. [84]	4	69,9 ± 6,8	nein	90% PPO	2 min	12	N.A.	3 min	6	3 Wochen	N.A.	↔ TT	↔ PPO		
	3	62,9 ± 17,1		100% PPO	1 min	12	N.A.	4 min				↔ TT	↔ PPO		
	4	60,3 ± 5,1		175% PPO	30 s	12	N.A.	4,5 min				↑ TT	↔ PPO		
Swart et al. [87]	21	59,9 ± 7	nein	80% PPO	4 min	8	aktiv individuell	90 s	8	4 Wochen	↔ 60,2 ± 0	↑ PPO	↑ 40 km TT		
		60,3 ± 4		80% HF _{max}							↔ 62,5 ± 2				
Westgarth-Taylor et al. [91]	8	N.A.	nein	80% PPO	5 min	6–9	aktiv (<100W) oder passiv	1 min	12	6 Wochen	N.A.	↑ PPO	↑ 40 km TT		
Weston et al. [92]	6	66,2 ± 2,6	nein	80% PPO	5 min	6–8	aktiv (100 W)	1 min	6	4 Wochen	N.A.	↑ PPO	↑ 40 km TT	↑ t _{lim} (150% PPO)	

Tabell 1: Literaturübersicht zu high intensity training (HIT)-Studien mit gut trainierten Radfahrern (VO_{2max} ≥ 60 ml·min⁻¹·kg⁻¹), (↑ signifikanter Anstieg; ↓ signifikanter Abfall; ↔ kein Effekt; t_{lim}: Zeit bis zur Erschöpfung; PPO: peak power output; VT: ventilatorische Schwelle; ANC: anaerobic capacity; TT: Zeitfahren; N.A.: keine Angaben).

Autoren	n	initiale $\dot{V}O_{2max}$ [ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹]	Kontrollgruppe	Intensität	Dauer der Intervalle	Anzahl der Intervalle	Art (Intensität) der Erholung	Erholungs-dauer	Anzahl HIT-Einheiten	Interventions-dauer	$\dot{V}O_{2max}$ nach HIT [ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹]	HIT-Resultate
Acevedo & Goldfarb [1]	7	65.3 ± 2.3	nein	90–95 % HF _{max}	N.A.	N.A.	passiv	Dauer bis HF < 120	24	8 Wochen	↔ 65.8 ± 2.4	↓ 10 km Bestzeit ↑ t _{lim}
Billat et al. [11]	8	71.6 ± 4.8	nein	v _{max}	50% t _{lim} bei v _{max}	5	N.A.	1:1 (Belastung: Erholung)	4	4 Wochen	↔ 72.7 ± 4.8	↑ RE ↑ v _{max}
Denadai et al. [27]	9	59.1 ± 6.0	nein	95 % v _{max}	60 % von t _{lim}	4	50% von 95% v _{max}	2:1 (Belastung: Erholung)	2 HIT 4 submax	4 Wochen	↔ 59.0 ± 5.7	↔ RE ↔ 1500 m ↑ 5000 m ↔ v _{max}
	8	60.0 ± 6.0		100 % v _{max}		1:1 (Belastung: Erholung)	↔ RE ↑ 1500 m ↑ 5000 m ↑ v _{max}					
Enoksen et al. [31]	26	70.2 ± 2.7	ja (gleicher Arbeitsumsatz & Trainingshäufigkeit)	33% des GU bei 82–92% HF _{max}	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	30	10 Wochen	↔ 71.4 ± 2.4	↑ v $\dot{V}O_{2max}$ ↑ vLT ↑ RE
		70.4 ± 3.8		13% des GU bei 82 b- 92% HF _{max}								↔ v $\dot{V}O_{2max}$ ↔ vLT ↑ RE
Kohn et al. [52]	18	67 ± 5	nein	94% v _{max} aus Rampentest	2.7 ± 0.5 min	6	aktiv	~1.35 min	12	6 Wochen	↔ 68 ± 3	↑ v _{max} ↑ Laktat ↓ HF
Smith et al. [80]	9	60.5 ± 1.9	ja	100% v _{max}	60% t _{lim}	6	N.A.	1:2 (Belastung: Erholung)	8	4 Wochen	↔ 64.1 ± 1.7	↑ t _{lim} ↑ 3000 m
	9	60.1 ± 0.6		100% v _{max}	70% t _{lim}	5	N.A.	1:2 (Belastung: Erholung)				↔ t _{lim} ↔ 3000 m
	9	63.6 ± 2.0		normales Training	normales Training	normales Training	↔ t _{lim} ↔ 3000 m					
Smith et al. [81]	5	61.5 ± 6.1	nein	v _{max}	60–75% t _{lim}	5	N.A.	1:2 (Belastung: Erholung)	8	4 Wochen	↑ 64.5 ± 2.1	↑ v _{max} ↑ t _{lim} ↓ 3000 m-Bestzeit
Zavorksy et al. [93]	12	72.5 ± 4.3	nein	96% v _{max}	400 m	10	aktiv (Intensität: N.A.)	60–80 s	3	2 Wochen	N.A.	↑ RE ↓ RQ

Tabelle 2: Literaturübersicht zu high intensity training (HIT)-Studien mit gut trainierten trainierten Läufern ($\dot{V}O_{2max} \geq 60 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), (↑ signifikanter Anstieg; ↓ signifikanter Abfall; ↔ kein Effekt; t_{lim}: Zeit bis zur Erschöpfung; v_{max}: Geschwindigkeit bei $\dot{V}O_{2max}$; HF: Herzfrequenz; GU: Gesamtumfang; N.A.: keine Angaben; RQ: respiratorischer Quotient; RE: Laufökonomie).

Autoren	n (Sportart)	initiale VO _{2max} [ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹]	Kontrollgruppe	Intensität	Dauer der Intervalle	Anzahl der Intervalle	Art (Intensität) der Erholung	Erholungs-dauer	Anzahl HIT-Einheiten	Interven-tionsdauer	VO _{2max} nach HIT [ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹]	HIT-Resultate
Breil et al. [17]	22 (Ski-Alpin) [#]	53.0 ± 4.6	ja	90–95% HF _{max}	4 min	4	aktiv	3 min	15	11 Tage	↑ 56.2 ± 5.1	↑ PPO* ↑ VT* ↑ high box jump
		52.9 ± 6.3		normales Training	–	–						
Chamari et al. [19]	18 (Fußball) [#]	65.3 ± 5.0	nein	90–95% HF _{max}	4 min	4	aktiv 60–70% HF _{max}	3 min	16	8 Wochen	↑ 70.7 ± 4.3	↑ Hoff-Test (9.6%) ↑ RE (14%)
		53.2 ± 6.4		90% VO _{2peak}	2.5 min	8	70% VO _{2peak}	N.A.			↓ 2000 m Zeit* ↑ 2000 m Leistung* ↔ 4 min all out ↔ LT	
Driller et al. [29]	10 (Rudern)	54.8 ± 7.3	ja	2–3 mmol·l ⁻¹	~60 min	–	–	–	7	4 Wochen	↑ 57.0 ± 8.4	↔ 4 min all out ↔ LT
		52.8 ± 3.2		90–95% HF _{max}	4 min	4	60–70% HF _{max}	3 min			↑ 12.5/28.1% yo-yo intermitt run ↔ wiederholte Sprint-Fähigkeit ↔ CMJ und SJ	
Ferrari et al. [35]	42 (Fußball)	55.7 ± 2.3	nein	maximal	40 m	3 x 6	passiv	20 s/4 min	14	7 Wochen	↑ 56.3 ± 3.1	↑ 12.5/28.1% yo-yo intermitt run ↔ wiederholte Sprint-Fähigkeit ↔ CMJ und SJ
		58.1 ± 4.5		90–95% HF _{max}	4 min	4	aktiv 50–60% HF _{max}	3 min			↑ LT ↑ RE ↑ Laufstrecke während Spiel	
Helgerud et al. [41]	19 (Fußball) [#]	55.6 ± 3.4	nein	90–95% HF _{max}	4 min	4	60–70% HF _{max}	3 min	16	8 Wochen	↑ 64.3 ± 3.9	↑ LT ↑ RE ↑ Laufstrecke während Spiel
		58.9 ± 3.1		90–95% HF _{max}	4 min	4	aktiv 55–65% HF _{max}	3 min			↑ LT ↑ RE ↑ Laufstrecke während Spiel	
McMillan et al. [64]	11 (Fußball) [#]	63.4 ± 5.6	nein	90–95% HF _{max}	4 min	4	aktiv 70% HF _{max}	3 min	20	10 Wochen	↑ 69.8 ± 6.6	↑ SJ ↑ CMJ
		62.0		90–95% HF _{max}	4 min	4	aktiv 55–65% HF _{max}	3 min			↑ 300 yard shuttle run test	
Stolten et al. [85]	10 (Fußball)	62.0	ja	70–75% HF _{max}	28 min	–	–	–	13	10 Tage	↑ 66.5	N.A.
		62.0		90–95% HF _{max}	4 min	4	N.A.	N.A.			↔ 63.1	

Tabelle 3: Literaturübersicht zu high intensity training (HIT)-Studien unterschiedlicher Sportarten (↑ signifikanter Anstieg; ↓ signifikanter Abfall; ↔ signifikanter Abfall; ↔ kein Effekt; HF: Herzfrequenz; PPO: peak power output; VT: ventilatorische Schwelle; LT: Laktatschwelle; RE: Laufökonomie; CMJ: counter movement jump; SJ: squat jump; #: Junioren; *: Verbesserung nur bei HIT; NA: keine Angaben).

myokardiale Adaptationen bei dieser Intensität am grössten ist. Diese Angaben basieren allerdings auf der Annahme, dass bei 40–50% VO_{2max} das Schlagvolumen bzw. bei 70–80% VO_{2max} der arterielle Druck ein Plateau bilden und nicht weiter ansteigen [62]. Neuere Untersuchungen zeigen allerdings, dass bei gut trainierten Personen das Schlagvolumen und der arterielle Druck stufenweise bis hin zu VO_{2max} ansteigen [38; 94]. Demnach müsste der maximale myokardiale Stress bei VO_{2max} am grössten sein. Die meisten neueren Studien verwenden daher Intensitäten von ~100% VO_{2max} . Gestützt wird die Beobachtung, dass das Ausmass einer Verbesserung von VO_{2max} mit der Trainingsintensität zusammenhängt, durch einen Übersichtsartikel mit 59 Trainingsstudien [90].

Andere Studien verwenden prozentuale Angaben der Herzfrequenz, wobei HIT-Intervalle bei 90–95% maximaler Herzfrequenz durchgeführt werden [42].

Dauer und Anzahl der Intervalle: Eine Möglichkeit, die Zeit bei VO_{2max} bzw. beim maximalen Schlagvolumen zu steuern, ist mittels der Dauer von Intervallen. Es hat sich gezeigt, dass Intervallprotokolle effektiver sind als intensive Dauerbelastungen, um die Belastungszeit bei VO_{2max} zu verlängern. Intervalle von 30 s bei 100% maximale Laufgeschwindigkeit, 30 s bei 50% erlauben es Läufern, 5–18 Wiederholungen (~10 min) bei VO_{2max} zu laufen. D.h. ca. 3x länger als bei einer einzelnen Belastung mit der maximalen Geschwindigkeit [13–14]. Intervalle mit der kleinsten Amplitude zwischen Belastungs- und Erholungsgeschwindigkeit erlauben die längsten Zeiten bei VO_{2max} [13].

Die Dauer der Intervalle variiert stark zwischen den unterschiedlichen Studien und reicht von 15 s bis hin zu 8 min [37; 42]. Eine Möglichkeit der Steuerung der Dauer, die in der Literatur angegeben wird, basiert auf der maximalen Geschwindigkeit bzw. der Zeit bis zur Ausbelastung mit der maximalen Geschwindigkeit (t_{max}). Es ist allerdings kritisch anzumerken, dass das Protokoll zur Bestimmung von VO_{2max} , die maximale Geschwindigkeit und damit t_{max} stark beeinflusst und diese damit meistens zwischen verschiedenen Studien nicht vergleichbar sind [67]. Die minimale Zeit bis VO_{2max} erreicht ist, wird mit ~60% t_{max} angegeben [47]. t_{max} wurde in mehreren Studien mit Erfolg verwendet [27; 32; 81]. Insgesamt geben mehrere Studien eine optimale Belastungsdauer zwischen 2–5 min an [27; 32; 42; 76–77; 80]. Beim Vergleich von 1-, 2-, 4- und 6-min-Intervallen fanden sich die höchsten VO_2 ab einer Dauer von 2 min [77]. Andere Studien empfehlen kürzere Intervalle im Bereich von 15–30 s [66; 69; 72]. Helgerud et al. [42] haben in einer Studie 15-s-Intervalle mit 4-min-Intervallen verglichen und ähnliche Anpassungen und Verbesserungen gefunden. Dennoch empfehlen Sie die längeren 4-min-Intervalle. Kürzere Intervalle sind ihrer Meinung nach nicht so effektiv zur Steigerung von VO_{2max} , da die entsprechenden Reize zur Steigerung des Schlagvolumens nicht mehr in ausreichendem Masse gegeben sind [42].

Die Anzahl der Intervalle richtet sich nach der gewählten Intensität und Dauer der Intervalle. In der Literatur finden sich Angaben zwischen 4 und 47 Wiederholungen. Ein wichtiger Punkt ist hier sicher auch der Aspekt der Gesamtbelastung bzw. der Gesamtbelastungszeit, die sich aus der Dauer eines Intervalls x der Anzahl der Intervalle und der Intensität zusammensetzt.

Erholung: Die Frage der Erholungsgestaltung ist wahrscheinlich ebenso wichtig wie die Steuerung (Intensität) und Dauer der Hauptbelastung. Über die Erholungsphasen zwischen den Intervallen lässt sich mit beeinflussen, wie oft und intensiv die Belastung im Training wiederholt werden kann [40]. Demnach beeinflusst die Erholung zwischen den Intervallen auch das Ausmass der Stimuli und die Anpassungen. Die meisten Studien geben eine Work/Rest-Ratio von 1:1 bzw. 2:1 unabhängig von der Belastungsdauer an [27; 32; 42; 66; 72; 76–77]. Rozenek et al. [72] finden für kurze Intervalle (15–60 s) ein optimales Verhältnis von 2:1. Ein Verhältnis von 4:1 ist ihrer Meinung nach das obere Limit. Der Vergleich unterschiedlicher Erholungszeiten (1, 2 und 4 min) im Wechsel mit 4-min-Belastung zeigt nur geringe Unterschiede in der VO_2 -Antwort. Die höchsten Werte werden jedoch mit 2-min-Pause erreicht [76]. Zusammenfassend ist somit ein Verhältnis Work/Rest von 1:1 bzw. 2:1 zu empfehlen.

Die Erholung wird in den meisten Studien aktiv gestaltet, wobei die Intensität meist im Bereich von 50–70% VO_{2max} liegt [27; 42; 69; 72]. Je nach Zielsetzung sollte man unserer Meinung nach jedoch auch passive Erholung zwischen den Belastungen in Betracht ziehen, da Unterschiede bei den metabolischen Stimuli zu erwarten sind. So reduziert aktive Erholung zwar bekanntlich die Laktatkonzentration und die Azidose, mehrere Studien [30; 39; 89] konnten jedoch den Einfluss von Laktat und Azidose auf Wachstumsfaktoren und Transkriptionsfaktoren darstellen, deren Wirkung durch aktive Erholung evtl. reduziert wird. Hier besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf, um die Unterschiede und physiologischen Auswirkungen zwischen unterschiedlichen Intensitäten bzw. zwischen aktiver und passiver Erholung beschreiben zu können oder Empfehlungen abzugeben.

Periodisierung

Die traditionelle Trainingsperiodisierung mit ein- oder mehrgipfligen Saisonhöhepunkten und daraus abgeleiteten Veränderungen von Umfängen und Intensitäten (die Unterteilung der Saison in kleinere Perioden und Trainingszyklen) wurde vor ca. 50 Jahren zum ersten Mal vorgeschlagen und wurde zum allgemeinen, bis heute vertretenen Ansatz. Doch die immer grösser werdende Anzahl an Wettkämpfen im Saisonverlauf und der oft damit verbundenen Reisebelastungen, sowie die immer grösser werdenden Trainingsbelastungen zeigen auch die Grenzen und Nachteile dieses Konzepts auf [50]. Dazu kommen die Schwierigkeiten, mehrere Saisonhöhepunkte und die Feinabstimmung durch lange Trainingszyklen zu gewährleisten. Hinzu kommt, dass in vielen gerade koordinativ-dominierten Sportarten oft die Zeit fehlt, grundlegende konditionelle Fähigkeiten ausreichend zu entwickeln, da andere Trainingsinhalte sonst zu kurz kämen. Heute ist es in vielen Sportarten gängig, dass alle Konditionsfaktoren parallel aufgebaut werden. Allerdings liegen im Durchschnitt die Leistungsverbesserungen im Kraft- als auch im Ausdauerbereich oft unter den Erwartungen. Ein Grund hierfür könnte die Interaktion verschiedener Trainingsreize sein. So ist bekannt, dass bei parallel durchgeführtem Kraft- und Ausdauertraining die Entwicklung der Kraftfähigkeiten gebremst wird [2; 44; 70]. Zudem können aufgrund der hohen Trainingsbelastung durch intensives Krafttraining die für einen effektiven Aufbau der Ausdauer benötigten hohen Intensitäten oft nicht erreicht werden [69].

Ein alternatives Trainingskonzept ist die sog. Block-Periodisierung bzw. das Blocktraining [50–51]. Die generelle Idee hinter diesem Konzept ist die Aneinanderreihung von kürzeren spezialisierten Mesozyklus-Blöcken, in denen hochintensive Belastungen auf wenige konditionelle/koordinative Fähigkeiten konzentriert werden. Diese Mesozyklen werden dabei immer wieder im Jahresverlauf durchlaufen [50]. Ein solches Blocktraining ermöglicht u.a. die Anwendung sog. Schock- oder Intensitäts-Mikrozyklen, in denen mit HIT z.B. die Ausdauerleistungsfähigkeit konzentriert entwickelt werden könnte. Matveyev [63] berichtete schon 1981 von diesen Schock- oder Intensitäts-Mikrozyklen, welche im Kraft- oder Ausdauerbereich Athleten aus dem Stadium der Stagnation holen und in kurzer Zeit Leistungsverbesserungen bewirken können. Stolen et al. [85] haben einen solchen Intensitätsblock bei 2.-Division-Fussballspielern, Breil et al. [17] bei Junioren-Ski-Alpinrennläufern untersucht. Nach 10 Tagen Training mit 13 zusätzlichen HIT-Einheiten bzw. 15 HIT-Einheiten in 11 Tagen war VO_{2max} signifikant um 7.3% bzw. 6.0% verbessert. Dies zeigt, dass es möglich ist, in technisch orientierten Sportarten die aerobe Kapazität in kurzer Zeit sehr effektiv zu steigern. Diese Art der Periodisierung, gekoppelt mit HIT, ermöglicht evtl. das Training und die biologisch zugrunde liegenden Adaptationen etwas feiner und öfter im Jahresverlauf zu steuern und auszulösen. Würden nach der klassischen Systematik lange Grundlagenphasen z.B. in der Vorbereitungsperiode 3–6 Monate für spezifische Anpassungen z.B. der Skelettmuskulatur (Faserspektrum) durchgeführt, zeigen neue Untersuchungen, dass sich auch in 3–4 Wochen, wie sie bei der Block-Periodisierung angewendet werden, u.a. Fasershifts und

mitochondriale Biogenese erzeugen lassen [83; eigene unpublizierte Ergebnisse]. Wissenschaftliche Untersuchungen zur Prüfung dieses Periodisierungskonzepts, sowie der Einbau von HIT in diese Art der Periodisierung stehen noch aus und sind dringend notwendig. Eine starke Veränderung bzw. Zunahme der Trainingsbelastung, wie sie bei der Durchführung von Intensitätsblöcken erfahren wird, kann zu Overreaching oder gar Übertraining führen [18; 79]. Bei der Durchführung von Intensitätsblöcken wird ein kurzzeitiges Overreaching jedoch bewusst in Kauf genommen. Dies sollte sich aber nach einem Intensitätsblock innerhalb von wenigen Tagen mit reduziertem Training in einer verstärkten Superkompensation mit deutlichem Leistungszuwachs äussern. Bei der Durchführung von Intensitätsblöcken sind deshalb der Zeitpunkt von Tests bzw. Wettkämpfen sowie ein individuelles Monitoring der Trainingsbelastung und -verträglichkeit von grosser Bedeutung.

Schlussdiskussion/Ausblick

Es liegen umfangreiche Ergebnisse bzgl. der physiologischen Anpassungen auf ein submaximales und auch intensives Training bei Untrainierten vor. Im Gegensatz dazu ist bisher wenig bekannt, wie bereits hochtrainierte Athleten auf modifizierte Trainingsprogramme reagieren. Es scheint jedoch, dass weitere Steigerungen im Anteil submaximalen Trainings keine weiteren Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit hervorrufen. HIT (mit seinen vielen Formen) kann im Gegensatz dazu signifikante Verbesserungen der Ausdauerleistungsfähigkeit auch bei bereits hochtrainierten Athleten auslösen [55; 81; 84]. Über die physiologischen Wirkungsweisen und Stimuli von HIT können zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nur Hypothesen aufgestellt werden. Die physiologische Antwort auf hohe bis höchste Belastungsintensitäten deutet jedoch darauf hin, dass ein Training an oder nahe bei VO_{2max} den optimalen Stimulus für die Steigerung von VO_{2max} bei hochtrainierten Athleten darstellt.

Dies sollte allerdings nicht dahingehend interpretiert werden, dass nur noch mit hohen Intensitäten trainiert werden sollte bzw. dass HIT HVT ersetzen könnte. Beide Trainingskonzepte haben ihre Daseinsberechtigung. Sowohl kurze intensive intervallartige Belastungen, als auch lange kontinuierliche niedrig-intensive Einheiten sollten Teil eines effektiven Ausdauertrainings sein. Seiler & Tonnessen [78] schlagen ein Verhältnis von 80 zu 20% zwischen HVT und HIT vor. HIT, in Form von einzelnen Einheiten oder konzentriert in einem Trainingsblock von 2–3 Wochen (Schock-Mikrozyklus), kann jedoch erhebliche Anpassungen hervorrufen, die kaum durch ein submaximales Training ausgelöst würden. HIT könnte ebenso ein zusätzliches Werkzeug zur Feinsteuerung von Anpassungen darstellen. Würden und werden bisher lange Trainingsphasen mit langen Grundlageneinheiten in der Vorbereitungsperiode verwendet, um z.B. Anpassungen im Faserspektrum der Skelettmuskulatur hervorzurufen, zeigen neue Untersuchungen, dass z.B. die Plastizität des Skelettmuskels grösser ist und Shifts im Faserspektrum schneller vonstattengehen als bisher angenommen [83]. So bestünde die Möglichkeit durch HIT, gekoppelt mit der Block-Periodisierung, das Training und die biologisch zugrunde liegenden Adaptationen deutlich feiner und öfter im Jahresverlauf zu steuern und auszulösen. Wie jedoch solch ein Protokoll exakt gestaltet werden muss, um die gewünschten Adaptationen auszulösen, muss Ziel weiterer Forschungsbemühungen sein. Eine Herausforderung wird es sein, die Ergebnisse kurzzeitiger Trainingsinterventionen in langfristige Leistungsentwicklungen und Trainingsorganisation zu übersetzen. Es bleibt bisher ungeklärt, zu welchem Zeitpunkt der Periodisierung und für welchen Zeitraum HIT bzw. HVT absolviert werden sollten.

Korrespondenzadresse:

Patrick Wahl, Das Deutsche Forschungszentrum für Leistungssport, Deutsche Sporthochschule Köln, Am Sportpark, Müngersdorf 6, 50933 Köln. Tel. 0049 -221 4382 6071; E-Mail: Wahl@dshs-koeln.de

Literaturverzeichnis

- 1 Acevedo E.O., Goldfarb A.H. (1989): Increased training intensity effects on plasma lactate, ventilatory threshold, and endurance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 21: 563–568.
- 2 Baar K. (2006): Training for endurance and strength: lessons from cell signaling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38: 1939–1944.
- 3 Basset F.A., Chouinard R., Boulay M.R. (2003): Training profile counts for time-to-exhaustion performance. *Can. J. Appl. Physiol.* 28: 654–666.
- 4 Billat L.V. (1996): Use of blood lactate measurements for prediction of exercise performance and for control of training. Recommendations for long-distance running. *Sports Med.* 22: 157–175.
- 5 Billat L.V. (2001): Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part II: anaerobic interval training. *Sports Med.* 31: 75–90.
- 6 Billat V., Demarle A., Paiva M., Koralsztein J.P. (2002): Effect of training on the physiological factors of performance in elite marathon runners (males and females). *Int. J. Sports Med.* 23: 336–341.
- 7 Billat V., Renoux J.C., Pinoteau J., Petit B., Koralsztein J.P. (1994): Reproducibility of running time to exhaustion at VO_{2max} in subelite runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26: 254–257.
- 8 Billat V., Renoux J.C., Pinoteau J., Petit B., Koralsztein J.P. (1994): Times to exhaustion at 100% of velocity at VO_{2max} and modelling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 271–273.
- 9 Billat V., Renoux J.C., Pinoteau J., Petit B., Koralsztein J.P. (1995): Times to exhaustion at 90, 100 and 105% of velocity at VO_{2max} (maximal aerobic speed) and critical speed in elite long-distance runners. *Arch. Physiol. Biochem.* 103: 129–135.
- 10 Billat V.L., Demarle A., Slawinski J., Paiva M., Koralsztein J.P. (2001): Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33: 2089–2097.
- 11 Billat V.L., Flechet B., Petit B., Muriaux G., Koralsztein J.P. (1999): Interval training at VO_{2max} : effects on aerobic performance and overtraining markers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31: 156–163.
- 12 Billat V.L., Hill D.W., Pinoteau J., Petit B., Koralsztein J.P. (1996): Effect of protocol on determination of velocity at VO_{2max} and on its time to exhaustion. *Arch. Physiol. Biochem.* 104: 313–321.
- 13 Billat V.L., Slawinski J., Bocquet V., Chassaing P., Demarle A., Koralsztein J.P. (2001): Very short (15s–15s) interval-training around the critical velocity allows middle-aged runners to maintain VO_{2max} for 14 minutes. *Int. J. Sports Med.* 22: 201–208.
- 14 Billat V.L., Slawinski J., Bocquet V., Demarle A., Lafitte L., Chassaing P., Koralsztein J.P. (2000): Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for a longer time than intense but submaximal runs. *Eur. J. Appl. Physiol.* 81: 188–196.
- 15 Boileau R.A., Mayhew J.L., Riner W.F., Lussier L. (1982): Physiological characteristics of elite middle and long distance runners. *Can. J. Appl. Sport Sci.* 7: 167–172.
- 16 Boutellier U. (2005): Die aerobe Schwelle. *Schweiz. Zschr. Sportmed. Sporttraumatol.* 53: 185.
- 17 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 VO_{2max} and performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 109: 1077–1086.
- 18 Budgett R. (1998): Fatigue and underperformance in athletes: the overtraining syndrome. *Br. J. Sports Med.* 32: 107–110.
- 19 Chamari K., Hachana Y., Kaouech F., Jeddi R., Moussa-Chamari I., Wisloff U. (2005): Endurance training and testing with the ball in young elite soccer players. *Br. J. Sports Med.* 39: 24–28.
- 20 Clark S.A., Chen Z.P., Murphy K.T., Aughey R.J., McKenna M.J., Kemp B.E., Hawley J.A. (2004): Intensified exercise training does not alter AMPK signaling in human skeletal muscle. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 286: E737–E743.
- 21 Clausen J.P. (1977): Effect of physical training on cardiovascular adjustments to exercise in man. *Physiol. Rev.* 57: 779–815.
- 22 Cooper G. (1997): Basic determinants of myocardial hypertrophy: a review of molecular mechanisms. *Ann. Rev. Med.* 48: 13–23.
- 23 Costill D.L., Flynn M.G., Kirwan J.P., Houmard J.A., Mitchell J.B., Thomas R., Park S.H. (1988): Effects of repeated days of intensified training on muscle glycogen and swimming performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 20: 249–254.

- 24 Costill D.L., Thomas R., Robergs R.A., Pascoe D., Lambert C., Barr S., Fink W.J. (1991): Adaptations to swimming training: influence of training volume. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23: 371–377.
- 25 Coyle E.F. (1995): Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 23: 25–63.
- 26 Daniels J.T., Yarbrough R.A., Foster C. (1978): Changes in $\dot{V}O_{2\max}$ and running performance with training. *Eur. J. Appl. Physiol.* 39: 249–254.
- 27 Denadai B.S., Ortiz M.J., Greco C.C., de Mello M.T. (2006): Interval training at 95% and 100% of the velocity at $\dot{V}O_{2\max}$: effects on aerobic physiological indexes and running performance. *Appl. Physiol. Nutr. Metabol.* 31: 737–743.
- 28 di Prampero P.E. (2003): Factors limiting maximal performance in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 90: 420–429.
- 29 Driller M.W., Fell J.W., Gregory J.R., Shing C.M., Williams A.D. (2009): The effects of high-intensity interval training in well-trained rowers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 4: 110–121.
- 30 Elias A.N., Wilson A.F., Naqvi S., Pandian M.R. (1997): Effects of blood pH and blood lactate on growth hormone, prolactin, and gonadotropin release after acute exercise in male volunteers. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 214: 156–160.
- 31 Enoksen E., Shalfawi S.A., Tonnessen E. (2010): The effect of high- vs. low-intensity training on aerobic capacity in well-trained male middle-distance runners. *J. Strength Cond. Res.* DOI: 10.1519/JSC.0b013e3181cc2291
- 32 Esfarjani F., Laursen P.B. (2007): Manipulating high-intensity interval training: effects on $\dot{V}O_{2\max}$, the lactate threshold and 3000 m running performance in moderately trained males. *J. Sci. Med. Sport* 10: 27–35.
- 33 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. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37: 496–504.
- 34 Faude O., Kindermann W., Meyer T. (2009): Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Med.* 39: 469–490.
- 35 Ferrari B.D., Impellizzeri F.M., Rampinini E., Castagna C., Bishop D., Wisloff U. (2008): Sprint vs. interval training in football. *Int. J. Sports Med.* 29: 668–674.
- 36 Fröhlich M., Emrich E., Büch M.P. (2007): Grenzerträge auch im Sport! – Erste Überlegungen zur ökonomischen Betrachtung trainingswissenschaftlicher Probleme: Ein Beitrag zu einer Ökonomie der Trainingswissenschaft. *Sportwissenschaft* 37: 296–311.
- 37 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. *J. Physiol.* 575: 901–911.
- 38 Gledhill N., Cox D., Jamnik R. (1994): Endurance athletes' stroke volume does not plateau: major advantage is diastolic function. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26: 1116–1121.
- 39 Gordon S.E., Kraemer W.J., Vos N.H., Lynch J.M., Knuttgen H.G. (1994): Effect of acid-base balance on the growth hormone response to acute high-intensity cycle exercise. *J. Appl. Physiol.* 76: 821–829.
- 40 Haegele M., Zinner C., Wahl P., Sperlich B., Mester J. (2009): Aktiv oder passiv – der Effekt unterschiedlicher Erholungsprotokolle nach hochintensivem Intervall-Training (HIT). *Leistungssport* 39: 10–15.
- 41 Helgerud J., Engen L.C., Wisloff U., Hoff J. (2001): Aerobic endurance training improves soccer performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33: 1925–1931.
- 42 Helgerud J., Hoydal 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 $\dot{V}O_{2\max}$ more than moderate training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 39: 665–671.
- 43 Hewson D.J., Hopkins W.G. (1995): Prescribed and self-reported seasonal training of distance runners. *J. Sports Sci.* 13: 463–470.
- 44 Hickson R.C. (1980): Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 45: 255–263.
- 45 Hill D.W., Rowell A.L. (1996): Running velocity at $\dot{V}O_{2\max}$. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28: 114–119.
- 46 Hill D.W., Rowell A.L. (1996): Significance of time to exhaustion during exercise at the velocity associated with $\dot{V}O_{2\max}$. *Eur. J. Appl. Physiol.* 72: 383–386.
- 47 Hill D.W., Rowell A.L. (1997): Responses to exercise at the velocity associated with $\dot{V}O_{2\max}$. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29: 113–116.
- 48 Hill D.W., Smith J.C. (1999): Determination of critical power by pulmonary gas exchange. *Can. J. Appl. Physiol.* 24: 74–86.
- 49 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. *Int. J. Sports Med.* 27: 483–492.
- 50 Issurin V. (2008): Block periodization versus traditional training theory: a review. *J. Sports Med. Phys. Fit.* 48: 65–75.
- 51 Issurin V.B. (2010): New horizons for the methodology and physiology of training periodization. *Sports Med.* 40: 189–206.
- 52 Kohn T.A., Essen-Gustavsson B., Myburgh K.H. (2010): Specific muscle adaptations in type II fibers after high-intensity interval training of well-trained runners. *Scand. J. Med. Sci. Sports* DOI: 10.1111/j.1600-0838.2010.01136.x
- 53 Kubukeli Z.N., Noakes T.D., Dennis S.C. (2002): Training techniques to improve endurance exercise performances. *Sports Med.* 32: 489–509.
- 54 Lamberts R.P., Swart J., Noakes T.D., Lambert M.I. (2009): Changes in heart rate recovery after high-intensity training in well-trained cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.* 105: 705–713.
- 55 Laursen P.B., Blanchard M.A., Jenkins D.G. (2002): Acute high-intensity interval training improves $\dot{V}O_{2\max}$ and peak power output in highly trained males. *Can. J. Appl. Physiol.* 27: 336–348.
- 56 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 Med.* 32: 53–73.
- 57 Laursen P.B., Rhodes E.C. (2001): Factors affecting performance in an ultraendurance triathlon. *Sports Med.* 31: 195–209.
- 58 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. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 1801–1807.
- 59 Laursen P.B., Shing C.M., Peake J.M., Coombes J.S., Jenkins D.G. (2005): Influence of high-intensity interval training on adaptations in well-trained cyclists. *J. Strength Cond. Res.* 19: 527–533.
- 60 Levine B.D. (2008): $\dot{V}O_{2\max}$: what do we know, and what do we still need to know? *J. Physiol.* 586: 25–34.
- 61 Lindsay F.H., Hawley J.A., Myburgh K.H., Schomer H. H., Noakes T.D., Dennis S.C. (1996): Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28: 1427–1434.
- 62 MacDougall D., Sale D. (1981): Continuous vs. interval training: a review for the athlete and the coach. *Can. J. Appl. Sport Sci.* 6: 93–97.
- 63 Matveyev L. (1981): Fundamentals of sports training. Progress Publishers, Moscow.
- 64 McMillan K., Helgerud J., Macdonald R., Hoff J. (2005): Physiological adaptations to soccer specific endurance training in professional youth soccer players. *Br. J. Sports Med.* 39: 273–277.
- 65 Meyer T. (2006): Organizing elite soccer training – scientific knowledge vs. soccer-specific tradition. *Dtsche Zschr. Sportmed.* 57: 132–137.
- 66 Midgley A.W., Mc Naughton L.R. (2006): Time at or near $\dot{V}O_{2\max}$ during continuous and intermittent running. A review with special reference to considerations for the optimisation of training protocols to elicit the longest time at or near $\dot{V}O_{2\max}$. *J. Sports Med. Phys. Fit.* 46: 1–14.
- 67 Midgley A.W., McNaughton L.R., Carroll S. (2007): Time at $\dot{V}O_{2\max}$ during intermittent treadmill running: test protocol dependent or methodological artefact? *Int. J. Sports Med.* 28: 934–939.
- 68 Midgley A.W., McNaughton L.R., Jones A.M. (2007): Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Med.* 37: 857–880.
- 69 Midgley A.W., McNaughton L.R., Wilkinson M. (2006): Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners? Empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations. *Sports Med.* 36: 117–132.
- 70 Nader G.A. (2006): Concurrent strength and endurance training: from molecules to man. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38: 1965–1970.
- 71 Robinson D.M., Robinson S.M., Hume P.A., Hopkins W.G. (1991): Training intensity of elite male distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23: 1078–1082.
- 72 Rozenek R., Funato K., Kubo J., Hoshikawa M., Matsuo A. (2007): Physiological responses to interval training sessions at velocities associated with $\dot{V}O_{2\max}$. *J. Strength Cond. Res.* 21: 188–192.
- 73 Saltin B., Hartley L.H., Kilbom A., Astrand I. (1969): Physical training in sedentary middle-aged and older men. II. Oxygen uptake, heart rate, and blood lactate concentration at submaximal and maximal exercise. *Scand. J. Clin. Lab Invest.* 24: 323–334.

- 74 Scharhag-Rosenberger F., Meyer T., Gassler N., Faude O., Kindermann W. (2010): Exercise at given percentages of $\text{VO}_{2\text{max}}$: heterogeneous metabolic responses between individuals. *J. Sci. Med. Sport* 13: 74–79.
- 75 Seiler K.S., Kjellerud G.O. (2006): Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an «optimal» distribution? *Scand. J. Med. Sci. Sports* 16: 49–56.
- 76 Seiler S., Hetlelid K.J. (2005): The impact of rest duration on work intensity and RPE during interval training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37: 1601–1607.
- 77 Seiler S., Sjuursen J.E. (2004): Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self-paced interval training. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 14: 318–325.
- 78 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.
- 79 Smith D.J. (2003): A framework for understanding the training process leading to elite performance. *Sports Med.* 33: 1103–1126.
- 80 Smith T.P., Coombes J.S., Geraghty D.P. (2003): Optimising high-intensity treadmill training using the running speed at maximal O_2 uptake and the time for which this can be maintained. *Eur. J. Appl. Physiol.* 89: 337–343.
- 81 Smith T.P., McNaughton L.R., Marshall K.J. (1999): Effects of 4-wk training using $v_{\text{max}}/t_{\text{max}}$ on $\text{VO}_{2\text{max}}$ and performance in athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31: 892–896.
- 82 Sporis G., Ruzic L., Leko G. (2008): The anaerobic endurance of elite soccer players improved after a high-intensity training intervention in the 8-week conditioning program. *J. Strength Cond. Res.* 22: 559–566.
- 83 Staron R.S., Karapondo D.L., Kraemer W.J., Fry A.C., Gordon S.E., Falkel J.E., Hagerman F.C., Hikida R.S. (1994): Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women. *J. Appl. Physiol.* 76: 1247–1255.
- 84 Stepto N.K., Hawley J.A., Dennis S.C., Hopkins W.G. (1999): Effects of different interval-training programs on cycling time-trial performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31: 736–741.
- 85 Stolen T., Chamari K., Castagna C., Wisloff U. (2005): Physiology of soccer: an update. *Sports Med.* 35: 501–536.
- 86 Swain D.P., Franklin B.A. (2002): VO_2 reserve and the minimal intensity for improving cardiorespiratory fitness. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 152–157.
- 87 Swart J., Lamberts R.P., Derman W., Lambert M.I. (2009): Effects of high-intensity training by heart rate or power in well-trained cyclists. *J. Strength Cond. Res.* 23: 619–625.
- 88 Wahl P., Bloch W., Mester J. (2009): Moderne Betrachtungsweisen des Laktats: Laktat ein überschätztes und zugleich unterschätztes Molekül. *Schweiz. Zschr. Sportmed. Sporttraumatol.* 57: 100–107.
- 89 Wahl P., Zinner C., Achtzehn S., Bloch W., Mester J. (2010): Effect of high- and low-intensity exercise and metabolic acidosis on levels of GH, IGF-I, IGFBP-3 and cortisol. *Growth Horm. IGF. Res.* 20: 380–385.
- 90 Wenger H.A., Bell G.J. (1986): The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Med.* 3: 346–356.
- 91 Westgarth-Taylor C., Hawley J.A., Rickard S., Myburgh K.H., Noakes T.D., Dennis S.C. (1997): Metabolic and performance adaptations to interval training in endurance-trained cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.* 75: 298–304.
- 92 Weston A.R., Myburgh K.H., Lindsay F.H., Dennis S.C., Noakes T.D., Hawley J.A. (1997): Skeletal muscle buffering capacity and endurance performance after high-intensity interval training by well-trained cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.* 75: 7–13.
- 93 Zavorsky G.S., Montgomery D.L., Pearsall D.J. (1998): Effect of intense interval workouts on running economy using three recovery durations. *Eur. J. Appl. Physiol.* 77: 224–230.
- 94 Zhou B., Conlee R.K., Jensen R., Fellingham G.W., George J.D., Fisher A. G. (2001): Stroke volume does not plateau during graded exercise in elite male distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33: 1849–1854.