RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
Fakultät für Sportwissenschaft
Lehrstuhl für Trainingswissenschaft

HRV-Monitoring im Rahmen eines vierwöchigen High-Intensity Intervalltrainings

Monitoring heart rate variability during 4-weeks of high-intensity interval training

Masterarbeit im Fach Sportwissenschaft

Christoph Schneider

Themensteller: Prof. Dr. Alexander Ferrauti

Bochum, September 2015

HRV-Monitoring im Rahmen eines vierwöchigen High-Intensity Intervalltrainings

Monitoring heart rate variability during 4-weeks of high-intensity interval training

Verfasser: Christoph Schneider
Christoph.Schneider-a5c@rub.de
Master of Science
Studienprofil: Diagnostik und Intervention im Sport

Themensteller: Prof. Dr. Alexander Ferrauti

Bochum, September 2015

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungen und Symbole.....	IV
1 Einleitung.....	- 1 -
2 Methodik.....	- 4 -
2.1 Stichprobe.....	- 4 -
2.2 Studiendesign.....	- 5 -
2.3 Trainingsintervention.....	- 6 -
2.4 Messverfahren.....	- 7 -
2.4.1 Leistungsdiagnostik.....	- 7 -
2.4.2 HRV-Monitoring.....	- 9 -
2.4.3 Trainingsdokumentation und Trainingsmonitoring.....	- 10 -
2.4.4 Reliabilität.....	- 11 -
2.5 Apparaturen.....	- 13 -
2.6 Statistik.....	- 14 -
3 Ergebnisse.....	- 16 -
3.1 Gruppenstatistische Auswertung.....	- 16 -
3.2 Einzelfallanalysen.....	- 22 -
4 Diskussion.....	- 27 -
4.1 Gruppenstatistische Auswertung.....	- 27 -
4.2 Einzelfallanalysen.....	- 30 -
5 Schlussfolgerung für die Praxis.....	- 33 -
6 Methodenkritik.....	- 34 -
7 Zusammenfassung.....	- 35 -
8 Abstract.....	- 36 -
Literaturverzeichnis.....	- 37 -
Anhang.....	- 42 -
Anhang A – PAR-Q Fragebogen.....	- 42 -
Anhang B – Trainingstagebuch.....	- 43 -
Erklärungen.....	- 44 -

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1** Studiendesign und schematische Darstellung des Untersuchungsgangs inkl. Testgewöhnung (Wiederholungssprints, Sprungtests), leistungsdiagnostischer Untersuchungen (Baseline, Post 1, Post 2), Monitoring (HR(V): Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität, Trainingsdokumentation) und High-Intensity Intervalltraining. *Kursiv: Messverfahren/Parameter* (KEB: Kurzsкала – Erholung und Beanspruchung, v: Geschwindigkeit, $\dot{V}O_2$: Sauerstoffaufnahme HR: Herzfrequenz, La: Laktatkonzentration, RPE: *rating of perceived exertion*, v_{peak} : maximale Geschwindigkeit; mean v_{peak} : mittlere Geschwindigkeit; FI: *fatigue index*, CMJ: Sprunghöhe (Countermovement Jump); RSI: Reaktivkraftindex. - 5 -
- Abb. 2** Durchschnittliche Herzfrequenz (HR) und Herzfrequenzvariabilität (Ln rMSSD, Ln rMSSD/RR) $\pm$ Standardabweichung der morgendlichen Ruhemessungen über den gesamten 8-wöchigen Untersuchungszeitraum. HR: Herzfrequenz; Ln rMSSD: *natural logarithm of square root of the mean of the sum of the squares of differences between adjacent normal R-R intervals*; Ln rMSSD/RR: Ln rMSSD relativiert am mittleren RR-Intervall; SWC: kleinste bedeutsame Veränderung (*smallest worthwhile change*). Die *schwarzen Linien* repräsentieren den gleitenden 7 Tage-Mittelwert der Parameter (s. *Messverfahren*), die *Dreiecke* den Wochenmittelwert. Der *gestrichelte Bereich* entspricht dem durchschnittlichen SWC (s. *Statistik*) und stellt, auf Grundlage der Tag-zu-Tag-Schwankungen während der Referenzphase, den Bereich der trivialen Veränderungen dar. Die *Kreise* zeigen bedeutsame Veränderungen mit einer Likelihood von > 75% (likely) an. - 18 -
- Abb. 3** Durchschnittliche Trainingsbeanspruchung, Sprunghöhe und Allgemeiner Erholungszustand $\pm$ Standardabweichung der morgendlichen Ruhemessungen über den gesamten 8-wöchigen Untersuchungszeitraum. Training Load: wöchentliche Trainingsbeanspruchung (Trainingsdauer [min] x Session-RPE [0-10]; Foster et al., 2001); Sprunghöhe: höchste Sprungleistung von drei Countermovement Jumps; Allgemeiner Erholung: Item des KEB (Kurzsкала – Erholung und Beanspruchung; 0: trifft gar nicht zu; 6: trifft voll zu) SWC: kleinste bedeutsame Veränderung (*smallest worthwhile change*). Die *Dreiecke* repräsentieren den Wochenmittelwert. Der *gestrichelte Bereich* entspricht dem durchschnittlichen SWC (s. *Statistik*) und stellt den Bereich der trivialen Veränderungen dar. Die *Kreise* zeigen bedeutsame Veränderungen mit einer Likelihood von > 75% (likely) an. - 19 -

- Abb. 4 Einzelfallstudien Spieler A und B (Messwert $\pm$ Messfehler (TE, s. *Reliabilität*)). Herzfrequenz (HR) und Herzfrequenzvariabilität (Ln rMSSD, Ln rMSSD/RR; rollender 7 Tage-Mittelwert), wöchentlicher Training Load, Sprungleistung (Countermovement Jump) und allgemeiner Erholungszustand (0: trifft gar nicht zu; 6: trifft voll zu). *Gestrichelter Bereich*: kleinste bedeutsame Veränderung (SWC, s. *Statistik*). *Kreise*: Likelihood für eine *wahre* bedeutsame Veränderung ($> \text{SWC}$) $> 75\%$ (*likely*, s. *Statistik*)..... - 23 -
- Abb. 5 Einzelfallstudie Spieler C (Messwert $\pm$ Messfehler (TE, s. *Reliabilität*)). Herzfrequenz (HR) und Herzfrequenzvariabilität (Ln rMSSD, Ln rMSSD/RR; rollender 7 Tage-Mittelwert), wöchentlicher Training Load, Sprungleistung (Countermovement Jump) und allgemeiner Erholungszustand (0: trifft gar nicht zu; 6: trifft voll zu). *Gestrichelter Bereich*: kleinste bedeutsame Veränderung (SWC, s. *Statistik*). *Kreise*: Likelihood für eine *wahre* bedeutsame Veränderung ($> \text{SWC}$) $> 75\%$ (*likely*, s. *Statistik*) - 24 -

Tabellenverzeichnis

- Tab. 1 *Anthropometrie und ausgewählte Leistungsparameter der Stichprobe zum Messzeitpunkt Baseline (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung)* - 4 -
- Tab. 2 *Reliabilität der Messverfahren hinsichtlich der verwendeten Parameter (Messfehler und Test-Retest-Differenzen in %, 90% Konfidenzintervall und qualitativem Rating der Variationsgröße)...* - 12 -
- Tab. 3 *Durchschnittliche Laufleistung und Akutreaktionen im Rahmen des High-Intensity Intervalltrainings (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung)* - 17 -
- Tab. 4 *Veränderung der Herzfrequenzvariabilität und der Leistungsparameter zwischen Baseline, Post 1 und Post 2 (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, 90% Konfidenzintervall, qualitative Inferenz und Likelihood (positiv/trivial/negativ)) – Teil 1* - 20 -
- Tab. 5 *Fallstudie A und B: Veränderung der Herzfrequenzvariabilität und der Leistungsparameter zwischen Baseline, Post 1 und Post 2 (Messwert, qualitative Inferenz und Likelihood (positiv/trivial/negativ))*..... - 24 -
- Tab. 6 *Fallstudie C: Veränderung der Herzfrequenzvariabilität und der Leistungsparameter zwischen Baseline, Post 1 und Post 2 (Messwert, qualitative Inferenz und Likelihood (positiv/trivial/negativ))*..... - 26 -

Abkürzungen und Symbole

A	ANS	kardial-autonomes Nervensystem
	AU	arbiträre Einheiten (<i>arbitrary units</i>)
	avg	Mittelwert (<i>average</i>)
B	Baseline	Eingangstestung(en)
	BMI	Body Mass Index
C	CI	Konfidenzintervall (90% CI)
	cm	Zentimeter
	CMJ	Countermovement Jump
	CO ₂	Kohlenstoffdioxid
	CV	Variationskoeffizient (<i>coefficient of variation</i>)
D	d	Tag
	<i>d</i>	standardisierte Effektstärke (Cohen's <i>d</i>)
F	FI	Ermüdungsindex (<i>fatigue index</i>)
H	h	Stunde
	HIT	High-Intensity Intervalltraining
	HR	Herzfrequenz (<i>heart rate</i>)
	HR _{ex}	Belastungsherzfrequenz
	HR _{max}	maximale Herzfrequenz
	HR _{peak}	maximale Herzfrequenz der Einheit oder des Tests
	HRV	Herzfrequenzvariabilität (<i>heart rate variability</i>)
	HR(V)	Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität
K	KEB	Kurzskala – Erholung und Beanspruchung
	kg	Kilogramm
	km	Kilometer
L	l	Liter

	^L	<i>likely</i>
	La	Blutlaktat
	Ln rMSSD	<i>natural logarithm of square root of the mean of the sum of the squares of differences between adjacent normal R-R intervals</i>
	Ln rMSSD/RR	Quotient aus Ln rMSSD und RR
	LT	minimales Laktatäquivalent (<i>lactate threshold</i>)
M	m	Meter
	MBI	Effektstärken-basierter Inferenzstatistik (<i>magnitude-based inferences</i>)
	mean SD	mittlere Standardabweichung
	mean v _{peak}	mittlere Spitzensprintgeschwindigkeit
	min	Minute
	ml	Milliliter
	^{ML}	<i>most likely</i>
	mmol	Millimol
	MRJ	Prellsprünge (<i>multiple rebound jumps</i>)
	MW	Mittelwert
N	n	Stichprobengröße
O	O ₂	Sauerstoff
P	p	Signifikanzniveau/ -wert
	PA	Parasympathikus Aktivität
	PAR-Q	<i>Physical Activity Readiness Questionnaire</i>
	Pilot	Pilotstudie
	Post	Ausgangstestung(en)
R	r	Korrelationskoeffizient
	R ²	Determinationskoeffizient
	Referenz	14-tägige Referenzphase
	RPE	Beanspruchungsempfinden (<i>rating of perceived exertion</i>)

Abkürzungen und Symbole

	RR	mittleres RR-Intervall
	RSI	Reaktivkraftindex (<i>reactive strength index</i>)
S	s	Sekunde
	S/min	Schläge pro Minute
	SD	Standardabweichung
	SD _{diff}	Standardabweichung der Differenzen
	sRPE	globales Belastungsempfinden der Einheit (<i>session rating of perceived exertion</i>)
	SWC	kleinster bedeutsamer Effekt (<i>smallest worthwhile change</i>)
T	T	Trainingseinheit
	TDZ	Trainingsdauer innerhalb der Herzfrequenzzone(n) 1 bis 5
	TE	Messfehler (<i>typical error</i>)
	TL	Trainingsbeanspruchung (<i>training load</i>)
	TRIMP	<i>training impulse</i>
V	v	Laufgeschwindigkeit
	v _{4mmol/l}	Laufgeschwindigkeit bei 4 mmol/l Blutlaktatkonzentration
	v _{inc}	Abbruchgeschwindigkeit im Stufentest (<i>velocity incremental test</i>)
	v _{Dickhuth}	Laufgeschwindigkeit an der Laktatschwelle nach Dickhuth
	v _L	<i>very likely</i>
	v _{peak}	maximale Sprintgeschwindigkeit
	ṀO ₂	Sauerstoffaufnahme
	ṀO _{2peak}	maximale Sauerstoffaufnahme des Tests
	vṀO _{2peak}	minimale Laufgeschwindigkeit bei Erreichen der ṀO _{2peak}
W	wk	Woche
	Δ	Differenz
	√	Quadratwurzel
	μl	Mikroliter

1 Einleitung

Das Monitoring von Belastungs- und Erholungsreaktionen im Sport gilt mittlerweile als zentrale Schlüsselstelle im Prozess der Optimierung und Individualisierung von Trainingsmaßnahmen (Halson, 2014). Im Rahmen der Saisonvorbereitung stehen Trainer häufig vor der Herausforderung einerseits physiologische Adaptationen zu maximieren, andererseits Überbeanspruchung und Überlastungserscheinungen zu vermeiden (Buchheit et al., 2013). Im Zusammenhang von Trainingsplanung und Trainingssteuerung scheint es elementar trainingsinduzierte physiologische Reaktionen zeitnah zu identifizieren, um Trainingsinhalte und Regenerationsmaßnahmen flexibel adjustieren zu können. Die Messung der Herzfrequenzvariabilität (*heart rate variability*, HRV) stellt hier ein vielversprechendes Monitoringtool dar (Buchheit, 2014), welches einen Einblick in Aktivität und Regulationsmechanismen des kardial-autonomen Nervensystems (ANS) liefern kann (Task Force, 1996).

Herzfrequenzvariabilität beschreibt die Variation innerhalb einer definierten Messreihe aufeinanderfolgender RR-Intervalle. Diese Schlag-zu-Schlag-Variabilität wird als Größe der autonomen Reaktionsfähigkeit verstanden (Achten & Jeukendrup, 2003), wobei das ANS grundsätzlich als Hauptintegrationssystem für zahlreiche afferente Signale gilt (Hottenrott, 2014). Die ANS-Aktivität dient somit als globaler Effektparameter der jeweils vorherrschenden intrinsischen und extrinsischen Einflussgrößen (Hottenrott, 2014) und ist in Ruhe primär von parasympathischer Modulation beeinflusst (Horn, 2003). Zur Beschreibung der Schlag-zu-Schlag-Variabilität dient eine Vielzahl an HRV-Indizes, welche unglücklicherweise, trotz divergierender mathematischer und physiologischer Bezugsgrößen, häufig mit dem Begriff HRV synonym verwendet werden (Hottenrott, Hoos & Esperer, 2006). Ein adäquater Transfer von Studienergebnissen bedarf somit stets der konsequenten Berücksichtigung der verwendeten Parameter sowie der messmethodischen Rahmenbedingungen (Horn, 2003).

In Sportarten mit hohen metabolischen Anforderungen und hohen Trainingsvolumina (i. e. Ausdauer- und Mannschaftssport) liegt schon seit einigen Dekaden ein besonderes Augenmerk auf Messgrößen der HR(V) (Herzfrequenz (HR) und Herzfrequenzvariabilität; (Achten & Jeukendrup, 2003; Alexandre et al., 2012; Borresen & Lambert, 2009; Buchheit, 2014)). Sie liefern verhältnismäßig kostengünstig, flexibel und ambulant sowohl unter Ruhe-, als auch unter Trainings- und Wettkampfbedingungen zuverlässige und objektive Informationen über Intensität und Leistungsfähigkeit sowie über parasympathische Modulation und vagalen Tonus (Achten & Jeukendrup, 2003; Aubert, Seps & Beckers, 2003; Borresen & Lambert, 2009; Buchheit, 2014; Plews, 2013). Siegfried Israel beschrieb die HR bereits 1982 als eine der wohl am weitesten verbreitetsten Messgrößen der angewandten Sportmedizin, welche wie keine ande-

re physiologische Kenngröße über Jahrzehnte hinweg in zahlreichen Anwendungsfeldern ein enormes Interesse genoss (Israel, 1982) und bis heute genießt (Achten & Jeukendrup, 2003; Aubert et al., 2003; Buchheit, 2014). Die Messung der HR(V) etabliert sich stetig durch eine wachsende Evidenzlage im Kontext der Übertrainingsforschung und im Rahmen der engmaschigen Erfassung des Trainingsstatus (Halsen, 2014; Le Meur et al., 2013; Plews, Laursen, Kilding & Buchheit, 2012).

Zentraler Bestandteil des Trainingsmonitorings ist die Quantifizierung der externen Trainingsbelastung, der damit einhergehenden internen Beanspruchung sowie der resultierenden kurz- bis langfristigen Anpassungen (Borresen & Lambert, 2009; Buchheit, 2014; Halsen, 2014). Traditionell bedienen sich die Ausdauersportarten zahlreicher Indizes zur Beschreibung und Analyse der Trainingsintensität. In Diagnostik und Training sind hier submaximale und maximale Belastungsherzfrequenzen (HR_{ex} , HR_{max} bzw. HR_{peak}) weitestgehend etabliert und akzeptiert (Achten & Jeukendrup, 2003; Buchheit et al., 2013). Allerdings beschränkt sich die Validität hinsichtlich der Intensitätsbeschreibung primär auf konstante (Dauermethoden) oder standardisierte Belastungsformen (Testprotokolle; Buchheit et al., 2013), was in erster Linie auf die verzögerte Reaktion kardialer Messgrößen auf Belastungsänderungen zurückzuführen ist (Marées, 2003, S. 450) und die Anwendbarkeit in intermittierenden Sportarten einschränkt.

Zur Berechnung der kardiorespiratorischen Gesamtbeanspruchung (häufig als *training impulse* (TRIMP) bezeichnet) wurden in der Vergangenheit diverse Methoden intensiv diskutiert (Borresen & Lambert, 2009). Im Zentrum steht hierbei eine möglichst präzise und differenzierte Gewichtung von Dauer und Intensität. *Edwards' TRIMP* setzt beispielsweise eine lineare Beziehung zwischen HR und Intensität voraus, wobei Belastungsherzfrequenzen $> 50\% HR_{max}$ im Rahmen fünf gleichgroßer Belastungszonen gewichtet werden (Borresen & Lambert, 2009). Vorteil gegenüber anderen Methoden, welche sich der differenzierten Gewichtung mittels Schwellenkonzepten (*Lucias's TRIMP*, Borresen & Lambert, 2009), Herzfrequenzreserve (*Banister's TRIMP*, Scott, Lockie, Knight, Clark & Janse de Jonge, 2013) oder individueller Laktat-Leistungsbeziehung ($TRIMP_i$, Manzi, Iellamo, Impellizzeri, D'Ottavio & Castagna, 2009) bedienen, ist der geringere messmethodische Aufwand und die Relativierung an der HR_{max} , welche durch Trainingsinterventionen tendenziell weniger beeinflusst wird als die Ruhe-HR oder die Laktat-Leistungsbeziehung. Ergänzend zu Beanspruchungsgrößen der HR wird das Monitoring neuromuskulärer Leistungsfähigkeit sowie der Befindlichkeit empfohlen (Borresen & Lambert, 2009; Buchheit, 2014).

Die Überwachung von Ermüdungsmarkern und Messgrößen der sportspezifischen Leistungsfähigkeit bilden einen zweiten Schwerpunkt im Trainingsmonitoring. Die hochgradige Individualität in Größe, Richtung und zeitlicher Dynamik von Akutreaktionen und Adaptationen auf standardisierte Belastungen

gilt mittlerweile als gesichert (Buchheit et al., 2010; Halson, 2014; Hautala, Kiviniemi & Tulppo, 2009; Hecksteden et al., 2015; Horn, 2003; Mann, Lamberts & Lambert, 2014; Plews et al., 2012; Scharhag-Rosenberger, Meyer, Gässler, Faude & Kindermann, 2010; Scharhag-Rosenberger, Walitzek, Kindermann & Meyer, 2012). Die Identifizierung von Einflussfaktoren ist in diesem Kontext in den letzten Dekaden in den Fokus der Wissenschaft gerückt. Systematische Übersichtsarbeiten, Meta-Analysen sowie aktuelle Untersuchungen stellten Zusammenhänge zwischen ANS-Status, Leistungsfähigkeit und -adaptationen heraus (Buchheit et al., 2010; Hautala et al., 2009; Hedelin, Bjerle & Henriksson-Larsén, 2001), wobei Geschlecht, Alter und Trainingsmodalität hier einen varianzaufklärenden Charakter aufweisen (Hautala et al., 2006; Sandercock, Bromley & Brodie, 2005; Voss, Schroeder, Heitmann, Peters & Perz, 2015).

In der aktuellen Literatur zur HRV-Trainingsforschung überwiegen inkonsistente Untersuchungsbedingungen (Körperhaltung, Labor vs. Feld), wobei unterschiedlich lange Einzelmessungen (Kurzzeit- vs. Langzeitmessungen) und variierende Rahmenbedingungen (Ruhe vs. Belastung) Anwendung finden. Diese Tatsache erklärt die teils gegenläufigen Schlussfolgerungen und die nach wie vor uneinheitlichen Empfehlungen zur Anwendbarkeit von HRV-Monitoring (Buchheit, 2014). Aufgrund erheblicher Tag-zu-Tag-Variabilität scheint die Interpretation von physiologischen Veränderungen und Adaptationen auf Grundlage einzelner Tagesmessungen kritisch (Plews, Laursen, Stanley, Kilding & Buchheit, 2013b). In langfristig angelegten Trainingsuntersuchungen mit Elite-Athleten im Rudern (Plews, Laursen, Kilding & Buchheit, 2014a; Plews et al., 2013b) und im Triathlon (Plews et al., 2012; Stanley, D'Auria & Buchheit, 2015) kristallisiert sich die Analyse gleitender Wochenmittelwerte im Sinne einer kontinuierlichen Trendanalyse als *Best Practice*-Methode heraus (Buchheit, 2014). Die methodische Überlegenheit gegenüber Einzelmessungen wurde sowohl in konsekutiven, als auch in unabhängigen Untersuchungen, herausgestellt (Le Meur et al., 2013; Plews et al., 2014b; Plews, Laursen, Kilding & Buchheit, 2013a). Bislang ist allerdings keine Untersuchung im Spportsport bekannt, welche sich der Trendanalyse bediente.

Die hierfür benötigte hohe Datendichte von mindestens drei bis vier Messungen pro Woche stellt die Praktikabilität in den Spportsportarten in Frage (Buchheit, 2014). Die Saisonvorbereitung nimmt jedoch eine Sonderstellung ein, da sie häufig mit über doppelt so hohen Trainingsbelastungen (Jeong, Reilly, Morton, Bae & Drust, 2011) ein deutlich gesteigertes Überbeanspruchungsrisiko provoziert. Ein engmaschiges Monitoring des ANS-Status birgt hier präventiv ein großes Potenzial und würde bei erfolgreicher Anwendung den hohen Mess- und Analyseaufwand rechtfertigen. Demnach war das Ziel dieser Untersuchung die Evaluation eines HRV-Monitorings im Rahmen eines vierwöchigen High-Intensity Intervalltrainings (HIT) hinsichtlich der Fähigkeit a) Belastungs- und Erholungsreaktionen sowie b) Leistungsveränderungen abzubilden.

2 Methodik

2.1 Stichprobe

15 Probanden absolvierten erfolgreich die Eingangstestung, von denen 12 nach Studienabschluss in die Auswertung einbezogen werden konnten (Tab. 1). Zwei Sportler beendeten ihre Studienteilnahme innerhalb der Interventionsphase aufgrund orthopädischer Beschwerden, ein Proband hatte infolge eines messtechnischen Defekts eine unzureichende Anzahl an HR(V)-Ruhemessungen. Alle Probanden wurden vor Beginn der Eingangstestungen detailliert über die Ziele der Studie informiert, über eventuelle Risiken aufgeklärt und unterzeichneten eine Einverständniserklärung, dass sie freiwillig an der Untersuchung teilnehmen und jederzeit die Möglichkeit haben, die Teilnahme abubrechen. Bei erfolgreichem Untersuchungsabschluss erhielten die Probanden 100 € Aufwandsentschädigung. Die Untersuchung wurde von der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Ruhr-Universität Bochum genehmigt (Registrier-Nr.: 2015-5265).

Tab. 1 *Anthropometrie und ausgewählte Leistungsparameter der Stichprobe zum Messzeitpunkt Baseline (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung)*

N	Alter [J]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m ²]	Fettmasse [%]	$\dot{V}O_{2peak}$ [ml/min/kg]	$v_{4mmol/l}$ [km/h]
12	22,8 $\pm$ 2,3	184,3 $\pm$ 8,2	79,2 $\pm$ 7,0	23,4 $\pm$ 2,5	12,9 $\pm$ 5,0	55,6 $\pm$ 4,4	12,8 $\pm$ 2,0

BMI: Body Mass Index; $\dot{V}O_{2peak}$: maximale Sauerstoffaufnahme; $v_{4mmol/l}$: Geschwindigkeit bei 4 mmol/l Laktatkonzentration im Laufbandtest

Die Probandenakquise fand von März bis April 2015 überwiegend durch persönliche Kontaktaufnahme im Rahmen von Veranstaltungen der Fakultät für Sportwissenschaft und des Hochschulsports der Ruhr-Universität Bochum statt, sowie durch Bekanntmachung in sozialen Netzwerken. Einschlusskriterien waren das männliche Geschlecht, die aktive Partizipation in Sportarten mit intermittierendem Belastungsprofil (vorwiegend Sportsportarten) mit einer spezifischen Trainingserfahrung von ≥ 5 Jahren sowie eine gute Ausdauerleistungsfähigkeit ($\dot{V}O_{2peak} \geq 50$ ml/min/kg). Ein Proband unterschritt die ursprüngliche Untergrenze der Leistungsfähigkeit, wurde aber für die vorliegende Fragestellung dennoch in die Analyse eingeschlossen, da keine Störeinflüsse durch die Leistungsfähigkeit bei Trainierten bekannt sind (Sandercock et al., 2005).

2.2 Studiendesign

Der achtwöchige Untersuchungszeitraum umfasste eine leistungsdiagnostische Eingangstesting (Baseline) neun bis sieben Tage vor Interventionsbeginn inkl. der Abklärung eventueller gesundheitlicher Einschränkungen mittels PAR-Q-Fragebogens (Deutsche Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention, 2007, *Anhang A*), eine vierwöchige Ausdauertrainingsintervention und zwei Ausgangstestungen zwei (Post 1) bzw. neun Tage (Post 2) nach der letzten Trainingseinheit (*Abb. 1*). Es wurden keine bedenklischen Abgaben im PAR-Q identifiziert, welche einen Ausschluss aus dem Untersuchungsvorhaben zur Folge hätten. Trainingsbegleitend sowie jeweils zwei Wochen vor und nach der Interventionsphase erfolgten täglich morgendliche HR(V)-Ruhemessungen sowie eine Trainingsdokumentation. Vor der Eingangstesting absolvierten alle Probanden eine Testgewöhnung für den Wiederholungssprinttest und die Sprungtests. Die Gewöhnung fand innerhalb von zwei Wochen vor der Baselinetestung statt.

Abb. 1 Studiendesign und schematische Darstellung des Untersuchungsgangs inkl. Testgewöhnung (Wiederholungssprints, Sprungtests), leistungsdiagnostischer Untersuchungen (Baseline, Post 1, Post 2), Monitoring (HR(V): Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität, Trainingsdokumentation) und High-Intensity Intervalltraining. *Kursiv:* Messverfahren/ Parameter (KEB: Kurzskala – Erholung und Beanspruchung, v : Geschwindigkeit, $\dot{V}O_2$: Sauerstoffaufnahme HR: Herzfrequenz, La: Laktatkonzentration, RPE: *rating of perceived exertion*, v_{peak} : maximale Geschwindigkeit; mean v_{peak} : mittlere Spitzengeschwindigkeit; FI: *fatigue index*, CMJ: Sprunghöhe (Countermovement Jump); RSI: Reaktivkraftindex).

2.3 Trainingsintervention

Das Training bestand aus Sport-spezifischen (Stone & Kilding, 2009), *hochintensiven langen Intervallen* (2, 3 und 4 min-Intervalle; Übersicht HIT in Abb. 1). Trainiert wurde jeweils montags (2 min), mittwochs (3 min) und freitags (4 min). Es wurden jeweils fünf (Freitag) bis sechs (Montag und Mittwoch) 1,5- bis 2-stündige Trainingseinheiten im Tagesverlauf angeboten, wobei die Probanden überwiegend konstante Trainingszeiten nutzten. Um eine größtmögliche Anzahl an Gesamttrainingseinheiten zu ermöglichen, wurden zeitliche Engpässe von Seiten der Probanden flexibel durch Alternativtermine ausgeglichen, was in Einzelfällen zu zwei HIT-Einheiten an zwei aufeinanderfolgenden Tagen führte. Aus organisatorischen Gründen absolvierte die Hälfte der Sportler die letzte Trainingseinheit bereits donnerstags, um eine mindestens 48-stündige Erholungsphase zu den Post 1-Tests zu gewährleisten.

Hochintensive lange Intervalle (> 60 s Intervalldauer, Belastungs-Pausen-Verhältnis > 1) eignen sich primär dafür den Umfang von Belastungsintensitäten nahe der $\dot{V}O_{2peak}$ (Zeit bei Intensitäten $\geq 90\% \dot{V}O_{2peak}$) zu maximieren, bei gleichzeitiger Vermeidung von hohen mechanischen und neuromuskulären Belastungen (Buchheit & Laursen, 2013a, 2013b). Das Training bestand in Woche 1 aus 7 x 2 min, 6 x 3 min und 4 x 4 min Belastung mit Wiederholungspausen von respektive 2 min, 2,5 min und 3 min, in denen sich die Sportler gehend zum Startpunkt bewegten. In Woche 2 und 3 wurden die Umfänge um jeweils ein Intervall gesteigert. Die Entlastungswoche enthielt die geringsten Umfänge mit 6, 5 und 3 Intervallen (Abb. 1). Somit ergaben sich relative Wochenumfänge von 23, 27, 31, 19% in den Wochen 1-4, was einer empfohlenen Verteilung in Intensitäts-Mesozyklen entsprach (Sleamaker & Browning, 1996, p. 63).

Das Training fand jeweils auf einer 400 m-Rundbahn statt. Die Zielintensitäten wurden für die 2, 3 und 4 min-Intervalleinheiten bei respektive 100%, 95% und 90% der individuellen $\dot{v}O_{2peak}$ definiert. Das Training begann mit einem standardisierten Warm-Up, bestehend aus einem submaximalen Dauerlauf, dynamischem Dehnen und einem Steigerungslauf. Zur Belastungssteuerung wurden den Athleten vor jeder Trainingseinheit die zu laufende Intervalldistanz sowie die entsprechenden 100 m und 400 m-Splitzeiten genannt. Jeder Proband verfügte durch die Bereitstellung der HR-Monitore über die Möglichkeit, permanent Rückmeldung über die Belastungszeit zu erhalten. Ergänzend wurden die Rundenzeiten laut bei Durchlauf kommuniziert und die individuellen Zieldistanzen waren mit farblichen Markierungen gekennzeichnet. Das Intervallende wurde durch ein akustisches Signal kommuniziert. Die Probanden waren angehalten in jeder Trainingseinheit eine maximale Gesamtlaufdistanz anzustreben. Aus Motivationsgründen erfolgten stets Rückmeldungen zu bisherigen und vergangenen Trainingsleistungen sowie verbale Anfeuerung während der letzten Trainingsintervalle.

2.4 Messverfahren

2.4.1 Leistungsdiagnostik

Stufentest. Die Ausdauerleistungsfähigkeit wurde mit einem kombinierten Stufen-Rampenprotokoll auf dem Laufband evaluiert (mod. nach Scharhag-Rosenberger et al., 2012). Aus Gründen der Ökonomie wurden jeweils zwei Probanden gleichzeitig auf zwei unterschiedlichen Laufbändern getestet (Ergo ELG2, Woodway GmbH, Weil am Rhein, Deutschland; Saturn 250/125r, h/p/cosmos sports & medical GmbH, Nussdorf-Traunstein, Deutschland). Die Probanden nutzten zu allen Messzeitpunkten jeweils dasselbe Laufband, sodass mögliche Störeinflüsse durch die Laufbandwahl intraindividuell im Längsschnitt vernachlässigt werden können. Das Testprotokoll begann mit vier submaximalen Stufen von je 3 min Stufendauer, gefolgt von 30-sekündigen Pausen zur kapillären Blutabnahme am Ohrläppchen zur Blutlaktatkonzentrationsbestimmung. Gestartet wurde mit einer Laufgeschwindigkeit von 8 km/h, welche um jeweils 2 km/h gesteigert wurde. Im Anschluss an die vierte Blutabnahme folgten rampenförmig gesteigerte 1-minütige Stufen mit einem Stufeninkrement von 0,8 km/h bis zur subjektiven Ausbelastung. Während der gesamten Testdauer betrug die Laufbandsteigung 0,5%. Die Probanden wurden bei allen Tests verbal angespornt maximale Leistungen zu erbringen. Das kombinierte Protokoll ermöglicht die gleichzeitige Ermittlung von submaximalen (laktatbasierte „Schwellenleistungen“) sowie maximalen Leistungsgrößen ($\dot{V}O_{2peak}$, $v\dot{V}O_{2peak}$: minimale Geschwindigkeit bei Erreichen der $\dot{V}O_{2peak}$, v_{inc} : Abbruchgeschwindigkeit; Meyer, Auracher, Heeg, Urhausen & Kindermann, 2006; Meyer, Auracher, Heeg, Urhausen & Kindermann, 2007; Scharhag-Rosenberger et al., 2012). Weitere kapilläre Blutentnahmen folgten unmittelbar nach Testabbruch, sowie 3 und 5 min nach Belastungsende. Das subjektive Belastungsempfinden (*rating of perceived exertion*, RPE) wurde mittels 15-stufiger Skala am Ende jeder Belastungsstufe erfragt (Borg, 1982). Nach der letzten Blutabnahme folgten 15 min Auslaufen bei 8 km/h oder RPE < 13.

Vor jeder Testung wurden entsprechend der Herstellerangaben Gas- und Volumenkalibrierungen der Spirometrie-Einheiten durchgeführt. Die Datenauswertung erfolgte in Microsoft Excel (Version 14.0 (32-Bit), Microsoft Office 2010) auf Grundlage des über 5 s-gemittelten Datenexports. Die $\dot{V}O_{2peak}$ wurde als höchster 30-s-Mittelwert definiert und die $v\dot{V}O_{2peak}$ als Geschwindigkeit bei Erreichen der $\dot{V}O_{2peak}$ (Robergs, Dwyer & Astorino, 2010). Folgende Ausbelastungskriterien wurden von allen Probanden erfüllt (RPE > 17, maximales Laktat > 8 mmol/l; Respiratorischer Quotient > 1,1; Marées, 2003, S. 457-459).

Die submaximalen Leistungsparameter wurden mithilfe einer speziellen Software zur Laktatschwellenbestimmung ermittelt (winlaktat 3 Version 3.0.3.0, mesics gmbh, Münster, Deutschland). Es kam ein polynomisches Kurvenfitting zur Anwendung, welches in allen vorliegenden Fällen das bestmögliche

Fitting gewährleistete ($R^2 > .99$). Zur Beurteilung der submaximalen Leistungsfähigkeit wurden die Geschwindigkeiten bei der individuellen Laktatschwelle nach Dickhuth 1991 (zitiert in Dörr, 2010) und bei einer fixen Laktatkonzentration von 4 mmol/l bestimmt. Die *Dickhuthschwelle* berücksichtigt die individuelle Höhe der Blutlaktatkonzentration auf den ersten Stufen und addiert auf die Laktatkonzentration an der *lactate threshold* (LT; minimales Laktatäquivalent: Laktat/Leistung) eine empirisch hergeleitete, fixe Laktatkonzentration von 1,5 mmol/l. Der hiermit bestimmten Laktatkonzentration wird die entsprechende Geschwindigkeit auf der Laktat-Leistungskurve zugeordnet (v_{Dickhuth}). Die *Dickhuthschwelle* ist in die Kategorie der individuellen Schwellen einzuordnen, welche sich im Vergleich zu diversen anderen Laktatschwellenkonzepten durch ihren Bezug zu einem realen physiologischen Ankerpunkt (LT) auszeichnet (Dörr, 2010, S. 25). In einer vergleichenden Studie mit ausdauertrainierten Athleten wurde die *Dickhuthschwelle* als eine der *Schwellen* identifiziert, welche, bei dem hier verwendeten Stufenprotokoll (Start: 8 km/h, Inkrement: 2 km/h alle 3 min), mit den geringsten Fehlerabweichungen das maximale Laktat-Steady-State vorhersagen könne (Dörr, 2010). Aufgrund der weiten Verbreitung und der höheren Reliabilität (s. *Reliabilität*) wurde ergänzend die Geschwindigkeit bei einer Laktatkonzentration von 4 mmol/l ($v_{4\text{mmol/l}}$) ermittelt (Hopkins, Schabert & Hawley, 2001).

Wiederholungssprinttest. Die Ermittlung der maximalen Sprintfähigkeit und der Wiederholungssprintfähigkeit erfolgte mittels nicht-motorisiertem Laufband (Force 3.0, Woodway GmbH, Weil am Rhein, Deutschland) 45 min nach Beendigung des Auslaufens und eines erneuten unspezifischen (dynamisches Dehnen und Sprünge) und spezifischen (5-minütiges Laufband-Protokoll) Warm-Ups. Das Belastungsprotokoll bestand aus sechs 4-sekündigen maximalen Sprints mit 20-sekündigen passiven Wiederholungspausen. Die maximale Sprintfähigkeit wurde als die höchste gemessene Geschwindigkeit der sechs Sprints definiert (v_{peak} ; Kirbschus, 2013). Als Parameter der Wiederholungssprintfähigkeit wurde die mittlere Spitzengeschwindigkeit der sechs Sprints gewählt (mean v_{peak}) sowie ein *Fatigue Index* bestimmt ($\text{FI} = (v_{\text{peak}} / \text{mean } v_{\text{peak}}) \times 100$). Die mittlere Spitzengeschwindigkeit (mean v_{peak}) wird in aktuellen Empfehlungen zur Diagnostik der Wiederholungssprintfähigkeit empfohlen, da sie mathematisch gesehen eine der stabilsten Messgrößen darstellt und somit für Längsschnittanalysen am geeignetsten erscheint (Oliver, 2009). Die eigentliche Kernfrage der Ermüdungsresistenz wird i. d. R. durch unterschiedliche *Fatigue Indices* oder *Decrement Scores* beschrieben. Die üblichen FIs haben allerdings den Nachteil, dass sie theoretisch gesehen zwar die Ermüdungsresistenz oder den Leistungsabfall beschreiben, jedoch aufgrund ihrer mathematischen Grundlage extrem unreliabel sind (Messfehler von bis zu 50%; Oliver, 2009). Der hier verwendete FI stellt lediglich die v_{peak} und die mean v_{peak} relativierend gegenüber und ist damit ebenfalls ein sehr reliabler Parameter (s. *Reliabilität*).

Sprungtests. Die Sprungleistung wurde durch die maximale Sprunghöhe im Countermovement Jump (CMJ) ermittelt. Der höchste von drei Versuchen wurde in die Auswertung einbezogen. Die Probanden mussten während der gesamten Bewegung die Hände an der Hüfte fixieren. Die Ausführungsqualität der Sprünge wurde durch die Testleiter überwacht, um eine deutliche Knieflexion kurz vor der Landung und damit eine künstlich verlängerte Flugzeit auszuschließen. Zur Beschreibung der Reaktiv- und Explosivkraft der unteren Extremitäten wurde eine Serie von wiederholten Prellsprüngen verwendet (*multiple rebound jumps*, MRJ). Die Probanden wurden angewiesen für ca. 15 s wiederholt maximal-reaktive Sprünge durchzuführen (Anweisung: maximale Sprunghöhe, bei minimaler Stützzeit). Es wurde der mittlere Reaktivkraftindex (*reactive strength index*, RSI: Sprunghöhe [m]/Stützzeit [s]; Ball & Zanetti, 2012) aus den fünf höchsten RSIs berechnet.

2.4.2 HRV-Monitoring

Die Messung der HR(V) (Herzfrequenz (HR) und Herzfrequenzvariabilität (HRV)) erfolgte täglich nach dem morgendlichen Aufwachen und nach verpflichtendem Toilettengang (Kiviniemi et al., 2010) über einen 6-minütigen Zeitraum in liegender Position. Die Messungen wurden mithilfe portabler Herzfrequenzmonitore (RS800/RS800CX/V800, Polar Electro GmbH, Büttelborn, Deutschland) durchgeführt. Die Rohdaten wurden mithilfe einer speziellen HRV-Software (Kubios HRV Version 2.2, Biosignal Analysis and Medical Imaging Group, Kuopio, Finnland) einer lokalen Datenfilterung bei mittlerer Filterstärke (*medium*: Korrekturschwelle von 0,25 s bei 60 S/min; Tarvainen, 2014) zur Elimination von Artefakten unterzogen.

Zur Berechnung der Zeitbereichsparameter (RR: mittleres RR-Intervall, HR: mittlere Herzfrequenz (*heart rate*), Ln rMSSD: *natural logarithm of square root of the mean of the sum of the squares of differences between adjacent normal R-R intervals*, Ln rMSSD/RR: Quotient aus Ln rMSSD und RR) wurde ein 5-minütiges Datenfenster von Minute 1 bis Minute 6 der Aufzeichnung angelegt (Buchheit, 2014; Plews, 2013). Der Parameter Ln rMSSD spiegelt primär die vagale Aktivität des autonomen Nervensystems wieder und ist bei Kurzzeit-Messungen (5 min) unter Feldbedingungen (ambulante Messungen, nicht standardisierte, spontane Atmung) zuverlässiger als Spektralindizes (Al Haddad, Laursen, Chollet, Ahmaidi & Buchheit, 2011; Penttilä et al., 2001). Ergänzend wurde der Ln rMSSD am mittleren RR-Intervall normalisiert (Ln rMSSD/RR). Dies ermöglicht u. a. eine optimierte inter- (Sacha, 2013) und intraindividuelle (Buchheit, 2014; Plews, 2013) Vergleichbarkeit der HRV, da die Messgrößen der HRV bei variierendem vagalen Tonus (HR bzw. RR) verzerrt werden (nicht-linearer Zusammenhang von HR und RR, Sacha, 2013). Die Analyse und Interpretation der HR(V)-Parameter erfolgte jeweils auf Grundlage des gleiten-

den 7 Tage-Mittelwerts. In mehreren aktuellen Untersuchungen wurde dargestellt, dass dieses Vorgehen ein deutlich stabileres Datensignal generiert als die Auswertung der Einzelmessungen (Wert am siebten Wochentag vs. Wochenmittelwert; Le Meur et al., 2013; Plews et al., 2012, 2013a, 2014b).

Aufgrund von fehlerhaften und fehlenden Messungen konnten lediglich bei zwei Probanden 100%-ig vollständige Datensätze analysiert werden. Sobald mehr als drei Messungen pro Woche und mehr als zwei Werte in Folge fehlten, wurde der Athlet aus der Analyse ausgeschlossen. Methodische Analysen von Plews (2014b) zeigten, dass ein Minimum von 3-4 Messungen pro Woche ausreicht, um ein stabiles Signal zu generieren. Insgesamt waren die HR(V)-Datensätze über den gesamten Untersuchungszeitraum zu 97% vollständig (*range*: 91-100%) und während der 2-wöchigen Referenzphase zu 96% (*range*: 93-100%), was als eine ausreichende Datendichte gewertet wurde. Für die drei analysierten HR(V)-Parameter (HR, Ln rMSSD und Ln rMSSD/RR) wurde jeweils ein individueller Referenzbereich auf Grundlage der 14-tägigen Referenzphase berechnet (Buchheit, 2014; Le Meur et al., 2013). Dieser Referenzbereich (*smallest worthwhile change*; SWC, s. Statistik) bildet die Grundlage für die Interpretation der Veränderungen im Längsschnitt. Veränderungen innerhalb des SWC sind als irrelevante Veränderungen im Rahmen der Tag-zu-Tag-Schwankungen zu deuten (Buchheit, 2014; Hopkins, 2004; Plews, 2013).

2.4.3 Trainingsdokumentation und Trainingsmonitoring

Trainingstagebuch. Während des gesamten 8-wöchigen Untersuchungszeitraums führten alle Probanden ein Trainingstagebuch, in dem sie jegliche sportlichen Aktivitäten dokumentieren sollten (*Anhang B – Trainingstagebuch*). Die Tagebücher wurden in Print zur Verfügung gestellt und forderten die Angaben: Sportart, Inhalte, Trainingsdauer und Intensität (Session-RPE, sRPE; Foster et al., 2001) mittels CR-10 Skala (Borg, 1982). Um eine möglichst hohe Compliance zu realisieren, wurde das Trainingstagebuch zusätzlich als MS Excel Datei online via Dropbox zur Verfügung gestellt. Die Beurteilung der Belastungsintensität (sRPE) sollte ca. 30 min nach Trainingsende erfolgen, um eine globale Angabe zur Gesamttrainingsbeanspruchung zu gewährleisten (Brink et al., 2010). Aus den Angaben zu Trainingsumfang und Intensität wurde entsprechend der Methode nach Foster et al. (2001) die interne Beanspruchung aller Untersuchungstage quantifiziert (*training load* (TL) = Trainingsdauer [min] x sRPE [0-10]). Generell sind Selbstangaben im Rahmen des Trainingsmonitorings die am stärksten verbreitete Methode (Halson, 2014). Diese TL-Methode wird verstärkt in Sportarten eingesetzt, welche durch eine Vielzahl variierender Trainingsinhalte eine objektive Quantifizierung der Beanspruchung erschweren (Brink et al., 2010; Foster et al., 2001; Halson, 2014; Lambert, 2012). Es ist lediglich eine Untersuchung bekannt, welche vergleichend die Selbstangaben von Athleten im Rahmen einer Trainingsdokumentation mit denen der

verantwortlichen Trainer gegenüberstellte. Bei den untersuchten Elite-Ausdauersportlern wurde eine hohe Präzision und Validität der Angaben beobachtet (Sylta, Tønnessen & Seiler, 2014).

Psychometrie. Vor jeder Trainingseinheit, sowie vor den Leistungstests (Baseline, Post 1, Post 2) erfolgte eine differenzierte Bewertung des Erholungs- und Beanspruchungsstatus mittels KEB (Kurzskala für Erholung und Beanspruchung; Kellmann, Kölling & Hitzschke, in Druck). Der KEB besteht aus jeweils vier Items der Subskalen *Erholung* und *Beanspruchung*. Die Einschätzung der Befindlichkeit erfolgt mittels 7-stufiger Likert-Skala (0: *trifft gar nicht zu*, 6: *trifft voll zu*). Zur Reduktion der Komplexität erfolgte im Rahmen dieser Arbeit lediglich die Analyse des Items *Allgemeiner Erholungszustand*.

Leistungs- und Trainingsmonitoring. An jedem HIT-Trainingstag absolvierten die Probanden drei CMJs im Anschluss an das Warm-up. Begleitend wurden alle gelaufenen Distanzen dokumentiert, um retrospektiv die mittleren Laufgeschwindigkeiten der Trainingseinheiten zu berechnen. Ergänzend wurden bei allen HIT-Trainingseinheiten Herzfrequenzaufzeichnungen durchgeführt, um eine objektive Gesamtbeanspruchungsgröße zu erheben. Die Beanspruchung wurde mittels *Edwards' TRIMP (training impulse;* Lambert, 2012) quantifiziert. Hierbei wird die Herzfrequenzantwort in Abhängigkeit der individuellen HR_{max} (maximale Herzfrequenz) in fünf gleichgroße, trainingsrelevante Zonen eingeteilt und die darin verbrachten Zeiten entsprechend eines Gewichtungsfaktors über die gesamte Trainingseinheit summiert ($TRIMP = (TDZ1 \times 1) + (TDZ2 \times 2) + (TDZ3 \times 3) + (TDZ4 \times 4) + (TDZ5 \times 5)$, TD entspricht der Trainingsdauer und Z der Herzfrequenzzone (10% breite Herzfrequenzzonen, Z1 = 50-60 % der HR_{max} , usw.). Aus methodischen Gründen wurde der TRIMP ausschließlich über die Dauer der Intervalle (inkl. Wiederholungspausen) berechnet. Die HR_{max} wurde nach manueller Artefaktbereinigung als höchster gemessener Wert (1 s-Durchschnitt) aller Trainingseinheiten und Laufbandtests ermittelt. Eine Einschätzung zur metabolischen Beanspruchung des Trainings erfolgte mittels Blutlaktatkonzentrationsbestimmung. Die Abnahmen erfolgten in Ruhe vor dem Warm-up und nach Belastungsende (durchschnittlich 1-3 min nach Trainingsende).

2.4.4 Reliabilität

Die Auswahl der Messverfahren und der verwendeten Leistungs- und HR(V)-Parameter wurde auf Grundlage der Reproduzierbarkeit getätigt (Tab. 2). Angaben zur Reliabilität wurden entsprechend der Literaturempfehlungen auf den Messfehler (*typical error*, TE) und die Test-Retest Differenz beschränkt, da sich diese Werte parameterübergreifend als Vergleichsgrößen eignen und bei entsprechender Berechnung unabhängig von der Stichprobengröße sind (Hopkins, 2000a, 2015b; Hopkins et al., 2001).

Tab. 2 Reliabilität der Messverfahren hinsichtlich der verwendeten Parameter (Messfehler und Test-Retest-Differenzen in %, 90% Konfidenzintervall und qualitativem Rating der Variationsgröße)

Parameter	Stichprobe	Testanzahl, Zeitabstand	Methode [#]	TE [%] (90% CI) Rating ^a	Δ Test-Retest [%] (90% CI), Rating ^a	Referenz
<i>Herzfrequenzvariabilitätsmessung</i>						
HR	n = 23	2, 7 d	SD _{diff}	2,9% (2,3; 3,9%) klein	-1,6% (-3,0; -0,2%) trivial	Pilot (unveröffentlicht)
Ln rMSSD				2,7% (2,2; 3,7%) moderat	0,5% (-0,9; 1,9%) trivial	
Ln rMSSD-RR				2,2% (1,7; 2,9%) klein	-1,0% (-2,1; 0,1%) trivial	
<i>Stufentest</i>						
<i>maximale Leistung</i>						
V _{inc}	n = 15	2, 7 d	r&SD	1,4%	1,0%	Weltman et al. (1990) ^b
VO _{2peak} *	n = 45	2, >48 h; 7 d; <6 wk	r&SD	~2,8%	~1,5%	Kohrt et al. (1987) ^b , Rivera-Brown et al. (1995) ^b , Weltman et al. (1990) ^b
<i>submaximale Leistung</i>						
V _{Dickhuth}	n = 11	2, 7 d	r&SD	2,8% trivial	2,3% trivial	Dickhuth et al. (1999) ^b
V _{4mmol/l}	n = 12	3, >48 h	mean SD	1,4%	~0,6%	Pfitzinger & Freedson (1998) ^b
<i>Wiederholungssprinttest</i>						
v _{peak}	n = 17	2, 7 d	SD _{diff}	1,7% (1,3; 2,4%) klein	-0,8% (-1,8; 0,2%) trivial	Kirbschus (2013) ^c
mean v _{peak}				1,0% (0,8; 1,4%) klein	0,4% (-0,2; 1,0%) trivial	
Fatigue Index				1,2% (0,9; 1,7%) sehr groß	-1,3% (-1,9; -0,6%) moderat	
<i>Sprungtests</i>						
Sprunghöhe	n = 38	2, ~1 wk	SD _{diff}	4,8% (4,0; 6,1%) moderat	-0,4% (-2,3; 1,6%) trivial	Pilot (unveröffentlicht)
RSI			SD _{diff}	7,8% (6,4; 9,9%) moderat	-2,2% (-5,2; 0,9%) trivial	
<i>Kurzskala - Erholung und Belastung</i>						
Allg. Erholung	n = 26	2, ~8-10 d	SD _{diff}	15,8% (12,7; 21,1%) sehr groß	1,0% (-5,7; 8,3%) trivial	Pilot (unveröffentlicht)

TE: *typical error* (Messfehler); 90% CI: 90%-iges Konfidenzintervall; HR: Herzfrequenz; Ln rMSSD: natürlicher Logarithmus des square root of the mean of the sum of the squares of differences between adjacent normal R-R intervals; Ln rMSSD/RR: Ln rMSSD relativiert am mittleren RR-Intervall; VO_{2peak}: maximale Sauerstoffaufnahme; v_{inc}: Abbruchgeschwindigkeit des Stufentests; V_{Dickhuth}: Geschwindigkeit bei der individuellen Laktatschwelle nach Dickhuth et al. 1991 (Dörr, 2010); v_{4mmol/l}: Geschwindigkeit bei 4 mmol/l; v_{peak}: maximale Sprintgeschwindigkeit; mean v_{peak}: mittlere Spitzengeschwindigkeit der sechs Sprints; Fatigue Index: Ermüdungsindex (v_{peak}/mean v_{peak} * 100); RSI: Reaktivkraftindex (Sprunghöhe [m] / Kontaktzeit [s]); Allg. Erholung: Item *Allgemeine Erholung*

[#]Berechnungsmethoden: SD_{diff}: Standardabweichung (SD) der Differenzen / $\sqrt{2}$ am Stichprobenmittelwert relativiert; r&SD: SD * $\sqrt{1-r}$, r: Retestkorrelation (ICC); mean SD: Mittelwert der individuellen Variationskoeffizienten (CV = SD/Mittelwert) bei >3 Tests (Hopkins et al., 2001)

*Keine expliziten Ergebnisse für die Reliabilität der vVO_{2peak}: (minimale Geschwindigkeit bei Erreichen der VO_{2peak}). Nach Hopkins et al. (2001) ist der TE der VO_{2peak} durchschnittlich um den Faktor 1.5 (95% CI: Faktor 1.1-2.0) größer als der der vVO_{2peak}

^aRating: Schwellen für standardisierten Messfehler (TE): 0.1, 0.3, 0.6, 1.0 für klein, moderat, groß, sehr groß; Schwellen für standardisierte Test-Retest Differenzen: 0.2, 0.6, 1.2, 2.0 für klein, moderat, groß, sehr groß (Hopkins, 2015b)

^bAngaben wurden einer Meta-Analyse entnommen (Hopkins et al., 2001)

^cBerechnungen wurden anhand der Rohdaten mittels SD_{diff} Methode durchgeführt

In Pilotstudien wurde die Reliabilität für die HR(V)-Indizes, Sprungparameter und den allgemeinen Erholungszustand (KEB) ermittelt. Die Werte für die Parameter des Wiederholungssprinttests und des Stufentests wurden der Literatur entnommen (Hopkins et al., 2001) bzw. auf Grundlage der Rohdaten berechnet (Kirbschus, 2013). Die durchgeführten Berechnungen erfolgten in einem speziellen *MS Excel Spreadsheet (xrely.xls)*, welches unter www.sportsci.org kostenlos und freizugänglich verfügbar ist (Hopkins, 2015b).

2.5 Apparaturen

Die Atemgasanalyse erfolgte breath-by-breath mittels Spirometrie der Firma VIASYS Healthcare (MasterScreen CPX, VIASYS Healthcare GmbH, Höchberg, Deutschland) bei einer vom Hersteller angegebenen Genauigkeit von 2% bzw. 3% bei der Volumenmessung bzw. bei O₂-Aufnahme und CO₂-Abgabe (entspricht jeweils 0,05 l/min). Der Datenexport enthielt die über 5 s gemittelten Rohdaten. Zur Bestimmung der Blutlaktatkonzentration wurden jeweils 20 µl Kapillarblut am Ohrläppchen entnommen und im Anschluss laboranalytisch analysiert (BIOSEN S_line, EKF Diagnostic, Barleben, Deutschland; Messgenauigkeit: CV ≤ 1,5% bei 12 mmol/l).

Der Wiederholungssprinttest wurde auf einem nicht-motorisierten Laufband (Force 3.0, Woodway GmbH, Weil am Rhein, Deutschland) durchgeführt. Die Aufzeichnung der Laufbandgeschwindigkeiten erfolgte mit einer speziellen Software (Pacer Performance System, Version 2013.1.1) bei einer Frequenz von 200 Hz. Sprunghöhen und Reaktivkraftindizes wurden mittels Bodenkontakplatte (Sportservice, Doberschütz, Deutschland) und entsprechender Software (Haynl Tapping-Software Version 2.5.0.30, Haynl-Elektronik GmbH, Schönebeck, Germany) auf Grundlage von Flug- und Stützzeiten berechnet.

Die HR(V) Messungen wurden mithilfe portabler Herzfrequenzmonitore (RS800 und V800, Polar Electro GmbH, Büttelborn, Deutschland) durchgeführt, welche nach Herstellerangaben eine Messgenauigkeit von ± 1% bzw. 1 S/min (der größere Wert gilt) bei Herzfrequenzaufzeichnungen besitzen. Die Genauigkeit im Rahmen der RR-Aufzeichnung ist mit ± 1 ms angegeben. Für die Genauigkeit des neueren Modells (V800) konnten keine spezifischen Angaben zur Genauigkeit der RR-Aufzeichnung gefunden werden, es wird jedoch davon ausgegangen, dass die beiden Modelle vergleichbare Ergebnisse liefern. Die psychometrischen Messungen erfolgten zu jedem Zeitpunkt unter Vorlage der ausgedruckten Skalen (RPE, sRPE) oder Fragebögen (KEB).

2.6 Statistik

Die Daten im Text und in den Tabellen sind als Gruppenmittelwerte $\pm$ Standardabweichung (MW $\pm$ SD) angegeben, sowie als Veränderungen zwischen den Messzeitpunkten (Δ) in relativen ($\Delta\%$) oder standardisierten Einheiten (d) einschließlich der 90% Konfidenzintervalle (90% CI: Δ (Untergrenze; Obergrenze)). Angaben zur Größe sowie zur Präzision der Schätzung der Effekte sind im Text *kursiv* hervorgehoben (z. B.: *kleiner* Effekt (Größe), *bedeutsame* Veränderung (Präzision der Effektschätzung)). Die Analyse der Herzfrequenzvariabilität und der Leistungsparameter wurde entsprechend der Literaturempfehlungen auf Grundlage der Log-transformierten Daten durchgeführt (Buchheit, 2014; Hopkins, Marshall, Batterham & Hanin, 2009; Plews, 2013).

Die Auswertung hinsichtlich der praktischen Bedeutsamkeit der Veränderungen erfolgte mittels Effektstärken-basierter Inferenzstatistik (MBI: *magnitude-based inferences*; (Batterham & Hopkins, 2006; Hopkins et al., 2009). Dieser Ansatz hat sich in der jüngeren angewandten HRV-Trainingsforschung etabliert (Buchheit, 2014; Le Meur et al., 2013; Plews, 2013; Stanley et al., 2015) und soll hier u. a. die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleisten. Die Berechnung der standardisierten Mittelwertsdifferenzen (Cohen's d), der 90% Konfidenzintervalle sowie der Likelihood, der Wahrscheinlichkeiten für positive/triviale/negative Effekte, erfolgen mit einem online verfügbaren (www.sportsci.org) speziellen *MS Excel Spreadsheet* (*xParallelGroupsTrail.xls*; Hopkins, 2006). Die Berechnungen der Likelihood basieren auf der Spannweite der 90% CI sowie des kleinsten nennenswerten Effekts (*smallest worthwhile effect*, SWC) und spiegeln die Wahrscheinlichkeiten wieder, dass der *wahre Effekt* (Populationseffekt) positiv ($\geq$ positiver SWC), trivial (positiver SWC > Effekt > negativer SWC), oder negativ ($\leq$ negativer SWC) ist.

Zentraler Angelpunkt der MBI-Statistik ist die Definition des Schwellenwerts des kleinsten praktisch-bedeutsamen Effekts (SWC). Die klassische Statistik (Null-Hypothesen-Signifikanz-Testung, NHST) bezieht sich auf die Wahrscheinlichkeit zur Ablehnung des Null-Effekts/ Null-Hypothese (der *wahre Effekt* ist null; Cumming, 2012). Bereits Jacob Cohen schlug die Festlegung von „neuen Schwellenwerten“ vor und definierte einen standardisierten Effekt von $d = 0,2$ als kleinsten nennenswerten Effekt (trivialer Effekt: $d < 0,2$), welcher unabhängig von der statistischen Signifikanz mit $p < 0,05$ zu sehen ist (Cohen, 1994; Cumming, 2012). Entsprechend dieser Festlegung wurde der kleinste bedeutsame Effekt (SWC) der Leistungsparameter, der Trainingsbeanspruchung (TRIMP, HR_{peak} , Laktat, sRPE) sowie der psychometrischen Messgrößen als 0,2-fache SD der Baseline bzw. der Woche 1 definiert (entspricht $d = 0,2$; Hopkins et al., 2009; Stanley et al., 2015). Die standardisierten Differenzen ($\Delta\%$ und d) der Leistung, der Beanspruchung sowie der Psychometrie wurden an die Stichprobengröße und die Baselinewerte adjus-

tiert (Hopkins, 2006; vgl. auch Cumming, 2014, S. 294-295). Für den SWC der Psychometrie wurden die gepoolte SD der ersten beiden Messungen (Baseline und Trainingseinheit 1) verwendet. Beide Messzeitpunkte lagen vor dem Interventionsbeginn und die Mittelwertbildung diente entsprechend aktueller Empfehlungen zur Analyse von Zeitreihen (Hecksteden et al., 2015; Hopkins, 2015a; Kinugasa, Cerin & Hooper, 2004) der Bias-Reduzierung (*random variation*). Aufgrund der hohen inter- und intraindividuellen Tag-zu-Tag-Schwankungen wurde der SWC der HR(V)-Indizes als 0,5-facher Variationskoeffizient (*coefficient of variation*, CV) berechnet (Buchheit, 2014; Le Meur et al., 2013; Plews, 2013), was einem d von 0,5 auf individueller Ebene entspricht (Stanley et al., 2015, vgl. Barker, McCarthy, Jones & Moran, 2011, p. 161). Der CV für die Stichprobe ergibt sich aus dem Gruppenmittelwert der individuellen CVs der 14-tägigen Referenzphase ($CV = SD_{\text{Referenz}} / MW_{\text{Referenz}}$; Hopkins, Hawley & Burke, 1999). Diese Methode wurde in einer aktuellen Untersuchung zum Einfluss der SWC-Berechnung auf die inferenzstatistische Entscheidungsfindung bei Leistungsparametern als Berechnungsmethode der Wahl beschrieben, sofern die Möglichkeit der individuellen CV-Bildung während einer Referenzphase realisierbar ist (Buchheit, Rabbani & Beigi, 2014).

Die qualitative Bewertung der standardisierten Effekte (d) erfolgte anhand der vorgeschlagenen Schwellenwerte von 0,2 *klein*, 0,6 *moderat*, 1,2 *groß*, 2,0 *sehr groß* und 4,0 *extrem groß*. Die qualitative Bewertung Likelihood wurde wie folgt getätigt: < 0,5% *most unlikely* (höchst unwahrscheinlich), 0,5-5% *very unlikely* (sehr unwahrscheinlich), 5-25% *unlikely* (unwahrscheinlich), 25-75% *possibly* (möglicherweise), 75-95% *likely* (wahrscheinlich), 95-99,5% *very likely* (sehr wahrscheinlich) und > 99,5% *most likely* (höchstwahrscheinlich). Sobald die Wahrscheinlichkeiten für positive *und* negative Effekte > 5% sind, wird der Effekt als *unclear* (unklar: unzureichende Genauigkeit der Effektschätzung) eingestuft (Hopkins et al., 2009).

Die Auswertung der Einzelfallanalysen wurde ebenfalls mit MBI-statistischen Ansätzen und mithilfe eines speziellen *MS Excel Spreadsheets (xprecisionsubject.xls)* (Hopkins, 2000b) durchgeführt. Die Quantifizierung der individuellen Parameterveränderungen erfolgte ähnlich wie bei den Gruppenauswertungen auf Grundlage des definierten kleinsten nennenswerten Effekts (SWC) sowie der Messfehler (TE, s. *Reliabilität*) der entsprechenden Parameter (HR(V): $SWC = 0,5 \times \text{individueller } CV_{\text{Referenz}}$, Leistung und Psychometrie: $SWC = 0,2 \times SD_{\text{Baseline}}$ der Gruppe). Bedeutsame Parameterveränderungen wurden angenommen, wenn Likelihoods für *wahre* Veränderungen > 75% (*likely*) gefunden wurden (Hopkins, 2004). Trivial wurden Veränderungen < SWC bezeichnet.

3 Ergebnisse

3.1 Gruppenstatistische Auswertung

Trainingsbelastung und -beanspruchung. Eine detaillierte Zusammenfassung der Daten zu Trainingsbelastung und Akutreaktionen befindet sich in Tab. 3. Die durchschnittliche Laufleistung stieg bei allen drei Intervallprotokollen von Woche 1 zu Woche 2 an und war in der Entlastungswoche (Woche 4) am höchsten (*very likely* bis *most likely*, Likelihood > 96% für bedeutsame Veränderungen zu Woche 1). Mit durchschnittlich 97,7% und 91,6% der $\dot{V}O_{2peak}$ bei den 2 bzw. 3 min-Intervallen wurden die Zielgeschwindigkeiten (100% bzw. 95% $\dot{V}O_{2peak}$) nicht erreicht. Die 4-min Intervalleinheiten hingegen (Ziel: 90% $\dot{V}O_{2peak}$) wurden im Mittel über die vier Wochen mit 90,1% $\dot{V}O_{2peak}$ bewältigt. *Training impulse* (TRIMP) zeige bei allen Trainingsprotokollen steigende Verläufe von Woche 1 bis Woche 3 (*likely* bis *most likely*) und eine *sehr starke* bis *extrem starke* Reduktion ($d = -2,40$ bis $-5,07$) in der Entlastungswoche (*very likely* bis *most likely*). Die maximalen Herzfrequenzen der Trainingseinheiten (HF_{peak}) reduzierten sich im Mittel *gering* bis *moderat* ($d = -0,33$ bis $-0,78$) von Woche 1 bis Woche 4 (*likely* bis *very likely*). Die Blutlaktatkonzentrationen zeigten keine auffälligen Schwankungen. Das globale Beanspruchungsempfinden der Trainingseinheiten (sRPE) zeigte keine eindeutigen Veränderungen zu Woche 1. Deskriptiv kam es allerdings zu einer Reduktion der sRPE zwischen Woche 1 und 2, gefolgt von einem Anstieg in Woche 3. Von Woche 3 auf 4 reduzierte sich das Beanspruchungsempfinden erneut und zeigte die geringsten Mittelwerte über alle Wochen hinweg.

HRV-Monitoring. Wochenmittelwerte der HR(V)-Parameter sowie die Verläufe der gleitenden 7 Tage-Mittelwerte sind in Abb. 2 dargestellt. Auf Gruppenebene kam es in der Referenzphase (Woche 1 zu Woche 2) lediglich zu *trivialen* Veränderungen von Herzfrequenz (HR: *most likely*, 0/100/0% für positive/triviale/negative Veränderungen) und Herzfrequenzvariabilität (Ln rMSSD: *very likely*, 0/98/2%, Ln rMSSD/RR: *very likely*, 0/97/3%). Die HR(V)-Parameter wiesen in der Referenzphase eine ähnliche Tag-zu-Tag-Variabilität auf (Variationskoeffizienten: HR $6,6 \pm 1,9\%$, Ln rMSSD $6,1 \pm 2,8\%$, Ln rMSSD/RR $5,4 \pm 2,1\%$). Die HR zeigte einen *bedeutsamen* Anstieg nach der ersten Trainingswoche (*likely*, 78/22/6%) und blieb im restlichen Interventionsverlauf im trivialen Referenzbereich. Am Ende von Woche 7 waren HR (*possibly*, 0/39/61%) und Ln rMSSD (*possibly*, 0/27/73%) *möglicherweise* zur Referenzphase reduziert.

Trainingsdokumentation und -monitoring. Eine Auswahl der erhobenen Monitoring-Parameter befindet sich in Abb. 3. Die wöchentliche Gesamttrainingsbeanspruchung (*training load*, TL) stieg in der Referenzphase zwischen Woche 1 und 2 *möglicherweise* (*possibly*, 52/46/2%) *gering* ($d = 0,21$) an. Der TL

war in der dritten Interventionswoche *deutlich* (*likely*, 84/13/3%) bei einer *kleinen* Effektstärke ($d = 0,57$) erhöht. Die Sprungleistung im CMJ schwankte fast zu allen Messzeitpunkten im trivialen Referenzbereich und blieb somit überwiegend konstant auf Baselinenniveau. Am letzten Trainingstag (T; T9) der Interventionswoche 3 war die Sprungleistung *sehr wahrscheinlich* (*very likely*, 97/3/0%) *gering* erhöht ($d = 0,45$). Der allgemeine Erholungszustand nahm in der ersten Interventionswoche an den T2 und T3 *deutlich* (*likely*, 3/8/90% bzw. 1/4/94%) auf *moderatem* Niveau ($d = -0,87$ bzw. $-1,00$) ab. In Woche 3 waren die Differenzen zum Referenzniveau *moderat* bis *stark* ($d = -1,12$ bis $-1,25$) reduziert (Likelihood $\geq 93\%$, *likely* bis *most likely*). Anschließend konnten keine eindeutigen Veränderungen der allgemeinen Erholung beobachtet werden.

Tab. 3 Durchschnittliche Laufleistung und Akutreaktionen im Rahmen des High-Intensity Intervalltrainings (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung)

Parameter	Trainingsintervalle	High-Intensity Intervalltraining			
		Woche 1	Woche 2	Woche 3	Woche 4
v [km/h]	2 min	16,2 $\pm$ 1,3	16,6 $\pm$ 1,1	16,6 $\pm$ 1,2 ^L	17,1 $\pm$ 1,0 ^{ML}
	3 min	15,3 $\pm$ 1,3	15,7 $\pm$ 1,0 ^L	15,6 $\pm$ 1,0	15,9 $\pm$ 1,2 ^L
	4 min	15,1 $\pm$ 1,0	15,4 $\pm$ 1,1 ^L	14,8 $\pm$ 1,1	16,1 $\pm$ 1,0 ^{ML}
v [% $\dot{V}O_{2peak}$]	2 min	95,3 $\pm$ 3,6	97,3 $\pm$ 1,5 ^{ML}	97,5 $\pm$ 2,5 ^{VL}	100,6 $\pm$ 3,7 ^{ML}
	3 min	89,7 $\pm$ 3,4	91,9 $\pm$ 1,9 ^{ML}	91,7 $\pm$ 2,5 ^{VL}	93,2 $\pm$ 5,1 ^{VL}
	4 min	88,4 $\pm$ 2,3	90,3 $\pm$ 1,3 ^{ML}	87,5 $\pm$ 3,6 ^L	94,3 $\pm$ 2,0 ^{ML}
TRIMP* [AU]	2 min	111 $\pm$ 10	111 $\pm$ 15	122 $\pm$ 5 ^{VL}	81 $\pm$ 6 ^{ML}
	3 min	125 $\pm$ 10	129 $\pm$ 10 ^L	154 $\pm$ 11 ^{ML}	90 $\pm$ 9 ^{ML}
	4 min	101 $\pm$ 6	120 $\pm$ 4 ^{ML}	152 $\pm$ 11 ^{ML}	65 $\pm$ 5 ^{ML}
HR _{peak} * [S/min]	2 min	193 $\pm$ 8	187 $\pm$ 7 ^{VL}	185 $\pm$ 6 ^{VL}	187 $\pm$ 6 ^{VL}
	3 min	192 $\pm$ 8	187 $\pm$ 7 ^{VL}	188 $\pm$ 8 ^L	186 $\pm$ 9 ^{VL}
	4 min	191 $\pm$ 8	188 $\pm$ 7 ^L	187 $\pm$ 10 ^L	186 $\pm$ 6 ^{VL}
Laktat [mmol/l]	2 min	11,72 $\pm$ 3,13	12,59 $\pm$ 3,48	10,83 $\pm$ 3,12	12,49 $\pm$ 4,10
	3 min	10,67 $\pm$ 2,86	11,02 $\pm$ 3,05	10,00 $\pm$ 2,87	10,54 $\pm$ 3,28
	4 min	11,18 $\pm$ 2,46	10,53 $\pm$ 2,68	8,98 $\pm$ 3,07 ^L	11,30 $\pm$ 2,67
sRPE [0-10]	2 min	8,3 $\pm$ 1,2	7,7 $\pm$ 1,2 ^L	8,5 $\pm$ 1,1	6,9 $\pm$ 2,0 ^{VL}
	3 min	8,0 $\pm$ 1,2	7,8 $\pm$ 1,5	9,0 $\pm$ 0,4 ^{ML}	7,5 $\pm$ 1,3
	4 min	6,8 $\pm$ 1,7	7,2 $\pm$ 1,4	8,0 $\pm$ 1,5 ^L	6,2 $\pm$ 1,9

v: durchschnittliche Laufgeschwindigkeit; $\dot{V}O_{2peak}$: minimale Geschwindigkeit bei Erreichen der $\dot{V}O_{2peak}$; TRIMP: *training impulse* der Intervalle (TRIMP = (TDZ1 $\times$ 1) + (TDZ2 $\times$ 2) + (TDZ3 $\times$ 3) + (TDZ4 $\times$ 4) + (TDZ5 $\times$ 5), TD entspricht der Trainingsdauer und Z der Herzfrequenzzone (Z1 = 50-60 % der HR_{max}, usw.)); AU: *arbitrary units*; HR_{peak}: maximale Herzfrequenz der Trainingseinheit; sRPE: Session-RPE (*rating of perceived exertion*)

*Artefaktbedingt n = 7

^L likely: Likelihood für bedeutsame Differenzen zu Woche 1 (> SWC: $d > 0,2$) 75-95%

^{VL} very likely: Likelihood für bedeutsame Differenzen zu Woche 1 (> SWC: $d > 0,2$) 95-99,5%

^{ML} most likely: Likelihood für bedeutsame Differenzen zu Woche 1 (> SWC: $d > 0,2$) > 99,5%

Abb. 2 Durchschnittliche Herzfrequenz (HR) und Herzfrequenzvariabilität (Ln rMSSD, Ln rMSSD/RR) $\pm$ Standardabweichung der morgendlichen Ruhemessungen über den gesamten 8-wöchigen Untersuchungszeitraum. HR: Herzfrequenz; Ln rMSSD: *natural logarithm of square root of the mean of the sum of the squares of differences between adjacent normal R-R intervals*; Ln rMSSD/RR: Ln rMSSD relativiert am mittleren RR-Intervall; SWC: kleinste bedeutsame Veränderung (*smallest worthwhile change*). Die schwarzen Linien repräsentieren den gleitenden 7 Tage-Mittelwert der Parameter (s. Messverfahren), die Dreiecke den Wochenmittelwert. Der gestrichelte Bereich entspricht dem durchschnittlichen SWC (s. Statistik) und stellt, auf Grundlage der Tag-zu-Tag-Schwankungen während der Referenzphase, den Bereich der trivialen Veränderungen dar. Die Kreise zeigen bedeutsame Veränderungen mit einer Likelihood von > 75% (likely) an.

Abb. 3 Durchschnittliche Trainingsbeanspruchung, Sprunghöhe und Allgemeiner Erholungszustand $\pm$ Standardabweichung über den gesamten 8-wöchigen Untersuchungszeitraum, bzw. die Trainings- und Testtage. Training Load: wöchentliche Trainingsbeanspruchung (Trainingsdauer [min] x Session-RPE [0-10]; Foster et al., 2001); Sprunghöhe: höchste Sprungleistung von drei Countermovement Jumps; Allgemeine Erholung: Item des KEB (Kurzskala – Erholung und Beanspruchung; 0: trifft gar nicht zu; 6: trifft voll zu) SWC: kleinste bedeutsame Veränderung (*smallest worthwhile change*). Die *Dreiecke* repräsentieren den Wochenmittelwert. Der *gestrichelte Bereich* entspricht dem durchschnittlichen SWC (s. Statistik) und stellt den Bereich der trivialen Veränderungen dar. Die *Kreise* zeigen bedeutsame Veränderungen mit einer Likelihood von > 75% (likely) an.

Ergebnisse

Tab. 4 Veränderung der Herzfrequenzvariabilität und der Leistungsparameter zwischen Baseline, Post 1 und Post 2 (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, 90% Konfidenzintervall, qualitative Inferenz und Likelihood (positiv/trivial/negativ)) – Teil 1

		Baseline	Post 1	Post 2	Δ BL-Post1				Δ BL-Post2				
		(MW ± SD)	(MW ± SD)	(MW ± SD)	(Δ MW ± SD)	Δ %(90% CI) ^a	ES (d) Inferenz ^{a,b} , Likelihood ^{a,c} (+/0/-)	(90% CI) ^a	(Δ MW ± SD)	Δ %(90% CI) ^a	ES (d) Inferenz ^{a,b} , Likelihood ^{a,c} (+/0/-)	(90% CI) ^a	
Herzfrequenzvariabilitätsmessung*													
HR	[S/min]	54 ± 5	53 ± 6	52 ± 7	-1 ± 2	-2,7%(-4,9; -0,5%)	-0,24	(-0,46; -0,03) possibly -, (0/69/31)	-2 ± 3	-4,2%(-7,4; -0,9%)	-0,35	(-0,66; -0,05) possibly -, (0/38/62)	
Ln rMSSD	[ms]	4,42 ± 0,36	4,46 ± 0,38	4,42 ± 0,35	0,04 ± 0,13	1,0%(-0,7; 2,6%)	0,11	(-0,07; 0,29) very likely trivial, (2/98/0)	0,00 ± 0,20	0,1%(-2,3; 2,5%)	0,01	(-0,26; 0,28) very likely trivial, (3/95/2)	
Ln rMSSD/RR [x10 ³]		3,93 ± 0,34	3,87 ± 0,37	3,78 ± 0,40	-0,06 ± 0,10	-1,7%(-3,0; -0,3%)	-0,17	(-0,32; -0,03) likely trivial, (0/91/9)	-0,15 ± 0,15	-3,9%(-5,8; -1,9%)	-0,40	(-0,61; -0,19) likely -, (0/18/82)	
Stufentest													
maximale Leistung													
ṀO _{2peak}	[ml/min/kg]	55,6 ± 4,4	57,7 ± 4,4	54,8 ± 3,8	2,0 ± 2,6	3,7%(1,1; 6,5%)	0,41	(0,12; 0,69) likely +, (89/11/0)	-0,8 ± 2,2	-1,3%(-3,2; 0,7%)	-0,14	(-0,36; 0,08) possibly -, (1/67/32)	
ṀO _{2peak}	[ml/min]	4386 ± 382	4532 ± 372	4304 ± 387	122 ± 232	2,8%(0,0; 5,8%)	0,29	(-0,01; 0,59) possibly +, (71/28/1)	-83 ± 221	-1,9%(-4,4; 0,7%)	-0,20	(-0,48; 0,07) possibly -, (1/48/51)	
vṀO _{2peak}	[km/h]	17,0 ± 1,2	17,7 ± 1,1	17,6 ± 0,9	0,6 ± 0,6	3,6%(1,6; 5,7%)	0,46	(0,20; 0,71) likely +, (95/5/0)	0,5 ± 0,4	3,2%(1,8; 4,6%)	0,41	(0,23; 0,58) very likely +, (97/3/0)	
v _{inc}	[km/h]	17,2 ± 1,0	17,8 ± 1,0	17,8 ± 0,9	0,6 ± 0,5	3,7%(2,0; 5,5%)	0,55	(0,30; 0,80) very likely +, (98/2/0)	0,7 ± 0,4	3,9%(2,8; 5,1%)	0,58	(0,41; 0,74) most likely +, (100/0/0)	
submaximale Leistung													
v _{Dickhuth}	[km/h]	12,6 ± 1,1	12,8 ± 1,5	12,9 ± 1,3	0,2 ± 0,7	1,6%(-1,5; 4,8%)	0,15	(-0,15; 0,45) possibly +, (39/58/3)	0,3 ± 0,6	2,4%(0,1; 4,7%)	0,23	(0,01; 0,45) possibly +, (59/41/0)	
v _{4mmol/l}	[km/h]	12,8 ± 2,0	13,2 ± 2,0	13,4 ± 2,2	0,4 ± 0,7	3,3%(0,3; 6,4%)	0,17	(0,02; 0,31) possibly +, (34/66/0)	0,5 ± 0,7	4,2%(1,1; 7,3%)	0,21	(0,06; 0,35) possibly +, (53/47/0)	

Ergebnisse

Tab. 4 (Fortsetzung) Veränderung der Herzfrequenzvariabilität und der Leistungsparameter zwischen Baseline, Post 1 und Post 2 (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, 90% Konfidenzintervall, qualitative Inferenz und Likelihood (positiv/trivial/negativ)) – Teil 2

		Baseline	Post 1	Post 2	Δ BL-Post1				Δ BL-Post2				
		(MW ± SD)	(MW ± SD)	(MW ± SD)	(Δ MW ± SD)	Δ %(90% CI) ^a	ES (d)	(90% CI) ^a Inferenz ^{a,b} , Likelihood ^{a,c} (+/0/-)	(Δ MW ± SD)	Δ %(90% CI) ^a	ES (d)	(90% CI) ^a Inferenz ^{a,b} , Likelihood ^{a,c} (+/0/-)	
Wiederholungssprinttest													
v _{peak}	[m/s]	5,80 ± 0,25	5,81 ± 0,18	5,76 ± 0,29	0,00 ± 0,10	0%(-1,0; 1,0%)	-0,01	(-0,22; 0,21) unclear, (6/88/7)	-0,04 ± 0,17	-0,7%(-2,4; 1,0%)	-0,16	(-0,53; 0,21) unclear, (5/53/42)	
mean v _{peak}	[m/s]	5,61 ± 0,24	5,62 ± 0,21	5,58 ± 0,25	-0,01 ± 0,07	-0,1%(-0,9; 0,6%)	-0,03	(-0,19; 0,13) likely trivial, (2/95/4)	-0,02 ± 0,11	-0,4%(-1,6; 0,7%)	-0,10	(-0,34; 0,15) unlikely -, (3/74/23)	
Fatigue Index[%]		103,4 ± 1,5	103,4 ± 1,2	103,2 ± 1,3	0,0 ± 1,2	0%(-0,7; 0,7%)	0,01	(-0,41; 0,43) unclear, (21/60/19)	-0,3 ± 1,2	-0,3%(-0,9; 0,4%)	-0,18	(-0,59; 0,22) unclear, (6/47/47)	
Sprungtests													
Sprunghöhe	[cm]	40,4 ± 4,3	39,2 ± 4,2	40,5 ± 4,0	-1,2 ± 3,0	-2,9%(-6,7; 1,0%)	-0,27	(-0,63; 0,09) possibly -, (2/35/63)	0,1 ± 3,1	0,2%(-3,5; 4,1%)	0,02	(-0,32; 0,36) unclear, (18/68/13)	
RSI	[m/s]	1,65 ± 0,29	1,76 ± 0,31	1,71 ± 0,43	0,11 ± 0,19	6,5%(0,2; 13,3%)	0,34	(0,01; 0,66) likely +, (77/23/1)	0,06 ± 0,29	2,0%(-7,4; 12,3%)	0,10	(-0,41; 0,62) unclear, (37/47/15)	

MW $\pm$ SD: Mittelwert $\pm$ Standardabweichung; 90% CI: 90%-iges Konfidenzintervall; ES (d): Effektstärke (Cohen's d, SD adjustiert für kleine Stichproben); HR: Herzfrequenz; Ln rMSSD: *natural logarithm of square root of the mean of the sum of the squares of differences between adjacent normal R-R intervals*; Ln rMSSD/RR: Ln rMSSD relativiert am mittleren RR-Intervall; $\dot{V}O_{2\text{peak}}$: maximale Sauerstoffaufnahme; $v\dot{V}O_{2\text{peak}}$: minimale Geschwindigkeit bei Erreichen der $\dot{V}O_{2\text{peak}}$; v_{inc} : Abbruchgeschwindigkeit des Stufentests; v_{Dichhuth} : Geschwindigkeit bei der individuellen Laktatschwelle nach Dichhuth et al. 1991 (Dörr, 2010); $v_{4\text{mmol/l}}$: Geschwindigkeit bei 4 mmol/l; v_{peak} : maximale Sprintgeschwindigkeit; mean v_{peak} : mittlere Spitzengeschwindigkeit der sechs Sprints; Fatigue Index: Ermüdungsindex ($v_{\text{peak}}/\text{mean } v_{\text{peak}} \cdot 100$); RSI: Reaktivkraftindex (Sprunghöhe [m] / Kontaktzeit [s])

^aEffektberechnungen der Leistungsparameter (Δ , d, 90% CI, Inferenz, Likelihood) basieren auf Log-transformierten Daten und wurden an der Eingangsleistung (Baseline) adjustiert

^bInferenz: <0,5% most unlikely, 0,5-5% very unlikely, 5-25% unlikely, 25-75% possibly, 75-95% likely, 95-99,5% very likely, >99,5% most likely; +: positive Differenz; -: negative Differenz

^cLikelihood (+/0/-): Wahrscheinlichkeiten für positive/triviale/negative Differenzen (trivial: $\leq 0,2 \times \text{SD}_{\text{Baseline}}$ für Leistung, $\leq 0,5 \times \text{CV}_{\text{Referenz}}$ für Herzfrequenzvariabilität, s. Statistik)

*Parameter der Herzfrequenzvariabilität: 7 Tage-Mittelwert

HRV und Leistungsdiagnostik. HR(V)-Veränderungen zwischen Baseline (Woche 1) und Post 1 waren *trivial*. Der Ln rMSSD/RR war bei Post 2 *bedeutsam* reduziert (*likely*, 0/18/82%). HR war bei Post 2 *tendenziell* (*possibly*, 0/38/62%) verringert, wobei der Ln rMSSD mit *sehr hoher* Wahrscheinlichkeit (*very likely*, 3/95/2%) *trivial* ausgelenkt blieb (Tab. 4). Die größten Schwankungen der individuellen Veränderungen fanden sich bei Post 2 mit Schwankungsbreiten von Δ HR 20%, Δ Ln rMSSD 19%, Δ Ln rMSSD/RR 11%. Die maximale Sauerstoffaufnahme war bei Post 1 *tendenziell gering* (*kleiner* Effekt) gesteigert (Likelihood > 71%, absolut: *possibly* bzw. relativ: *likely*) nahm jedoch zu Post 2 *bedeutsam* ab (Likelihood > 96%; *very likely*). Die maximale Leistungsfähigkeit im Stufentest war bei Post 1 mit *hoher* Wahrscheinlichkeit (Likelihood > 94%; *likely* bis *very likely*) um ca. 3,7% erhöht und stieg bei Post 2 auf insgesamt 3,9% bei v_{inc} an (*most likely*, 100/0/0%). Veränderungen auf submaximaler Ebene zeigten eine unpräzise Datenlage, wobei die $v_{4mool/l}$ *möglicherweise* (*possibly*) um 4,2% bei Post 2 erhöht war. Die individuellen Leistungsveränderungen zeigten zu den HR(V)-Parametern vergleichbare Schwankungsbreiten ($\Delta\dot{V}O_{2peak}$ (absolut) 19% bei Post 2, $\Delta v\dot{V}O_{2peak}$ 14% und $\Delta v_{Dichhuth}$ 20% bei Post 1). *Unklar* (v_{peak} , Fatige Index; *unclear*) bzw. *trivial* (mean v_{peak} ; *likely*) sind die Veränderungen im Wiederholungssprinttest. Die Sprungleistung bei Post 1 im CMJ war *möglicherweise* (*possibly*) *gering* ($d = -0,27$) verschlechtert, der RSI jedoch *gering* ($d = 0,34$, *likely*) erhöht. Beide Sprungparameter zeigten eine *unklare* Datenlage bei Post 2 (*unclear*).

3.2 Einzelfallanalysen

Quantitative Verlaufsanalysen des HRV- und des Trainingsmonitorings von drei exemplarischen Spielern sind in Abb. 4 und Abb. 5 dargestellt. Die Ergebnisse der leistungsdiagnostischen Untersuchungen und der entsprechenden HR(V)-Daten sind in Tab. 5 und Tab. 6 zusammengefasst.

Spieler A. Spieler A zeigt eine *deutliche* trainingsinduzierte Steigerung der Ruheherzfrequenz in den Trainingswochen 1-3 (Likelihood > 75% an den Trainingstagen (T) T3-5 und > 95% an den T7-9) sowie eine *deutliche* Reduktion des Ln rMSSD in der 3. Trainingswoche (Abb. 4). Der Ln rMSSD/RR war ebenfalls in den Wochen 1-3 oberhalb des trivialen Referenzbereichs, jedoch nur an T4 und T7 *erheblich* (Likelihood > 75%) erhöht. HR und Ln rMSSD fielen zu den Posttests wieder auf das Eingangsniveau ab, wobei Ln rMSSD/RR beim zweiten Ausgangstest *deutlich* reduziert war (*likely*, 83/16/1%). Die Trainingsbeanspruchung (*training load*, TL) erhöhte sich kontinuierlich während den Interventionswochen 1-4 bei einer gleichzeitig ansteigenden Sprungleistung im CMJ (Likelihood > 75% an T3, 4, 6, 9 und 10). Entgegengesetzt zur Sprungleistung verhielt es sich mit dem allgemeinen Erholungszustand. Die Leistungssteigerungen bei den Posttests sind mit *hoher* bis *sehr hoher* Wahrscheinlichkeit (Likelihood 78-99%) bei v_{inc} und

den Wiederholungssprints überdurchschnittlich. Die submaximale Leistungsfähigkeit war lediglich bei Post 1, die Sprungleistung bei Post 2 erhöht (Likelihood 78-84%, Tab. 5).

Abb. 4 Einzelfallstudien Spieler A und B (Messwert $\pm$ Messfehler (TE, s. Reliabilität)). Herzfrequenz (HR) und Herzfrequenzvariabilität (Ln rMSSD, Ln rMSSD/RR; rollender 7 Tage-Mittelwert), wöchentlicher Training Load, Sprungleistung (Countermovement Jump) und allgemeiner Erholungszustand (0: trifft gar nicht zu; 6: trifft voll zu). Gestrichelter Bereich: kleinste bedeutsame Veränderung (SWC, s. Statistik). Kreise: Likelihood für eine wahre bedeutsame Veränderung ($> \text{SWC}$) $> 75\%$ (likely, s. Statistik)

Abb. 5 Einzelfallstudie Spieler C (Messwert $\pm$ Messfehler (TE, s. *Reliabilität*)). Herzfrequenz (HR) und Herzfrequenzvariabilität (Ln rMSSD, Ln rMSSD/RR; rollender 7 Tage-Mittelwert), wöchentlicher Training Load, Sprungleistung (Countermovement Jump) und allgemeiner Erholungszustand (0: trifft gar nicht zu; 6: trifft voll zu). Gestrichelter Bereich: kleinste bedeutsame Veränderung (SWC, s. *Statistik*). Kreise: Likelihood für eine wahre bedeutsame Veränderung ($> \text{SWC}$) $> 75\%$ (*likely*, s. *Statistik*)

Spieler B. Ruheherzfrequenz und HRV zeigten in Trainingswoche 2 *deutliche* negative (HR, T5, 6) bzw. positive (Ln rMSSD, T6) Schwankungen sowie kontinuierliche negative bzw. positive Trends ab der Entlastungswoche (Likelihood $> 75\%$ HR ab T10, Ln rMSSD ab Post 2; Abb. 4). TL und Sprungleistung waren im Interventionsverlauf vergleichbar zu Spieler A erhöht, wobei die Erholtheit lediglich jeweils am zweiten Trainingstag der Interventionswochen 2, 3 und 4 *nennenswert* abfiel (T5, 8, 11). Die Leistungsentwicklung war auch bei Spieler B *eindeutig* (Likelihood 81-100%) überdurchschnittlich, mit der stärksten Verbesserung der submaximalen Leistungsfähigkeit ($v_{4\text{mmol/l}}$: 15,6%; Tab. 5).

Spieler C. Auf Ebene der kardial parasymphatischen Marker (HR(V)) ließen sich nur eine *tendenziell* reduzierte HR (Differenzen $> \text{SWC}$, Likelihood $< 75\%$) in Interventionswoche 3 und 4 beobachten (Abb. 5). Innerhalb der Interventionsperiode lag der TL unterhalb der Beanspruchungshöhe der Referenzwoche 2 und der beiden Erholungswochen. Der allgemeine Erholungszustand war gegen Interventionsende vereinzelt *erheblich* reduziert (T9 und T11). Maximale und submaximale Laufleistung waren *substanziell* (Likelihood 83-97%) und überdurchschnittlich ($\dot{V}\text{O}_{2\text{peak}}$: 5,1%, $\dot{V}\text{O}_{2\text{Dichthuth}}$: 10,5%) erhöht (Tab. 6).

Ergebnisse

Tab. 5 Fallstudie A und B: Veränderung der Herzfrequenzvariabilität und der Leistungsparameter zwischen Baseline, Post 1 und Post 2 (Messwert, qualitative Inferenz und Likelihood (positiv/trivial/negativ))

		Baseline	Post 1	Post 2		Δ BL-Post1		Δ BL-Post2
					Δ	Inferenz ^a , Likelihood ^{a,b} (+/0/-)	Δ	Inferenz ^a , Likelihood ^{a,b} (+/0/-)
Spieler A								
Herzfrequenzvariabilitätsmessung*								
HR	[S/min]	53	52	50	-1	trivial, (15/48/37)	-3	possibly -, (3/23/74)
Ln rMSSD	[ms]	4,66	4,71	4,64	0,05	trivial, (41/37/22)	-0,03	trivial, (26/37/37)
Ln rMSSD/RR	[x10 ³]	4,07	4,09	3,85	0,02	trivial, (29/52/19)	-0,22	likely -, (1/13/86)
Stufentest								
maximale Leistung								
vVO _{2peak}	[km/h]	16,8	16,8	17,5	0,0	trivial, (37/26/37)	0,7	possibly +, (74/16/10)
v _{inc}	[km/h]	16,8	17,4	18,0	0,6	likely +, (87/11/2)	1,2	most likely +, (99/1/0)
submaximale Leistung								
v _{Dickhuth}	[km/h]	12,3	12,9	12,7	0,6	likely +, (78/15/7)	0,4	possibly +, (65/22/12)
v _{4mmol/l}	[km/h]	13,1	13,7	13,1	0,6	likely +, (84/16/0)	0,0	trivial, (11/78/11)
Wiederholungssprinttest								
v _{peak}	[m/s]	5,70	5,95	5,96	0,26	likely +, (91/7/2)	0,26	likely +, (92/7/2)
mean v _{peak}	[m/s]	5,60	5,72	5,70	0,12	likely +, (78/20/2)	0,10	possibly +, (68/29/3)
Fatigue Index	[%]	101,8	104,1	104,6	2,3	likely +, (88/4/8)	2,8	likely +, (93/3/4)
Sprungtests								
Sprunghöhe	[cm]	38,5	40,0	41,3	1,5	possibly +, (68/6/25)	2,8	likely +, (83/4/13)
RSI	[m/s]	2,10	2,13	2,38	0,03	trivial, (43/24/33)	0,29	likely +, (81/12/7)
Spieler B [#]								
Herzfrequenzvariabilitätsmessung*								
HR	[S/min]	59	51	49	-7	very likely -, (0/3/97)	-10	most likely -, (0/0/100)
Ln rMSSD	[ms]	4,04	4,31	4,47	0,27	possibly +, (52/4/0)	0,43	likely +, (85/15/0)
Ln rMSSD/RR	[x10 ³]	3,89	3,66	3,60	-0,23	likely -, (0/15/85)	-0,29	likely -, (0/7/93)
Stufentest								
maximale Leistung								
vVO _{2peak}	[km/h]	17,1	17,1	18,0	0,0	trivial, (37/26/37)	0,9	likely +, (85/10/5)
v _{inc}	[km/h]	17,2	17,2	18,0	0,0	trivial, (28/43/28)	0,8	likely +, (95/5/1)
submaximale Leistung								
v _{Dickhuth}	[km/h]	13,5	14,4	14,2	0,9	likely +, (88/8/3)	0,7	likely +, (81/18/6)
v _{4mmol/l}	[km/h]	12,8	14,5	14,8	1,7	most likely +, (100/0/0)	2,0	most likely +, (100/0/0)
Sprungtests								
Sprunghöhe	[cm]	38,9	43,2	42,8	4,3	likely +, (93/2/5)	3,9	likely +, (91/3/7)
RSI	[m/s]	1,44	1,83	1,57	0,39	very likely +, (96/3/0)	0,13	possibly +, (64/25/11)

HR: Herzfrequenz; Ln rMSSD: *natural logarithm of square root of the mean of the squares of differences between adjacent normal R-R intervals*; Ln rMSSD/RR: Ln rMSSD relativiert am mittleren RR-Intervall; v $\dot{V}O_{2peak}$: maximale Geschwindigkeit bei Erreichen der $\dot{V}O_{2peak}$ (maximale Sauerstoffaufnahme); v_{inc}: Abbruchgeschwindigkeit des Stufentests; v_{Dickhuth}: Geschwindigkeit bei der individuellen Laktatschwelle nach Dickhuth et al. 1991 (Dörr, 2010); v_{4mmol/l}: Geschwindigkeit bei 4 mmol/l; v_{peak}: maximale Sprintgeschwindigkeit; mean v_{peak}: mittlere Spitzengeschwindigkeit der sechs Sprints; Fatigue Index: Ermüdungsindex (v_{peak}/mean v_{peak}*100); RSI: Reaktivkraftindex (Sprunghöhe [m] / Kontaktzeit [s])

^aInferenz: Differenz (Δ) < SWC (kleinste bedeutsame Veränderung) trivial, 25-75% possibly, 75-95% likely, 95-99,5% very likely, >99,5% most likely; +: positive Differenz; -: negative Differenz

^bLikelihood (+/0/-): Wahrscheinlichkeiten für positive/triviale/negative Differenzen (trivial: ≤ 0,2 x SD_{Baseline} der Stichprobe für Leistung, ≤ 0,5 x individueller CV_{Referenz} für Herzfrequenzvariabilität, s. Statistik)

*Parameter der Herzfrequenzvariabilität: 7 Tage-Mittelwert

[#]Wiederholungssprint bei Spieler B aufgrund von Messfehlern nicht analysierbar

Ergebnisse

Tab. 6 Fallstudie C: Veränderung der Herzfrequenzvariabilität und der Leistungsparameter zwischen Baseline, Post 1 und Post 2 (Messwert, qualitative Inferenz und Likelihood (positiv/trivial/negativ))

			Baseline	Post 1	Post 2	Δ BL-Post1		Δ BL-Post2	
						Δ	Inferenz ^a , Likelihood ^{a,b} (+/0/-)	Δ	Inferenz ^a , Likelihood ^{a,b} (+/0/-)
Spieler C									
<i>Herzfrequenzvariabilitätsmessung*</i>									
HR	[S/min]		54	53	55	-1	possibly -, (12/36/52)	1	trivial, (36/43/21)
Ln rMSSD	[ms]		4,20	4,34	4,21	0,14	possibly +, (60/33/8)	0,01	trivial, (30/46/24)
Ln rMSSD/RR	[x10 ³]		3,78	3,80	3,83	0,02	trivial, (40/33/27)	0,05	trivial, (50/30/20)
<i>Stufentest</i>									
<i>maximale Leistung</i>									
vVO _{2peak}	[km/h]		17,5	18,4	18,4	0,9	likely +, (94/5/1)	0,9	likely +, (94/5/1)
v _{inc}	[km/h]		17,6	18,4	18,4	0,8	likely +, (83/11/6)	0,8	likely +, (85/10/5)
<i>submaximale Leistung</i>									
v _{Dickhuth}	[km/h]		12,4	13,6	13,7	1,2	very likely +, (96/3/1)	1,3	very likely +, (97/2/1)
v _{4mmol/l}	[km/h]		13,0	13,6	13,9	0,6	likely +, (84/16/0)	0,9	very likely +, (98/2/0)
<i>Wiederholungssprinttest</i>									
v _{peak}	[m/s]		5,56	5,58	5,57	0,02	trivial, (39/34/26)	0,01	trivial, (34/35/31)
mean v _{peak}	[m/s]		5,45	5,47	5,48	0,02	trivial, (28/54/17)	0,03	trivial, (33/53/14)
Fatigue Index	[%]		102,0	102,2	101,6	0,2	trivial, (48/11/41)	-0,3	possibly -, (36/11/53)
<i>Sprungtests</i>									
Sprunghöhe	[cm]		34,8	34,3	34,1	-0,5	possibly -, (37/8/55)	-0,7	possibly -, (34/8/58)
RSI	[m/s]		1,18	1,28	1,23	0,10	possibly +, (59/31/10)	0,05	trivial, (43/39/18)

HR: Herzfrequenz; Ln rMSSD: *natural logarithm of square root of the mean of the sum of the squares of differences between adjacent normal R-R intervals*; Ln rMSSD/RR: Ln rMSSD relativiert am mittleren RR-Intervall; vVO_{2peak}: minimale Geschwindigkeit bei Erreichen der VO_{2peak} (maximale Sauerstoffaufnahme); v_{inc}: Abbruchgeschwindigkeit des Stufentests; v_{Dickhuth}: Geschwindigkeit bei der individuellen Laktatschwelle nach Dickhuth et al. 1991 (Dörr, 2010); v_{4mmol/l}: Geschwindigkeit bei 4 mmol/l; v_{peak}: maximale Sprintgeschwindigkeit; mean v_{peak}: mittlere Spitzengeschwindigkeit der sechs Sprints; Fatigue Index: Ermüdungsindex (v_{peak}/mean v_{peak}*100); RSI: Reaktivkraftindex (Sprunghöhe [m] / Kontaktzeit [s])

^aInferenz: Differenz (Δ) < SWC (kleinste bedeutsame Veränderung) trivial, 25-75% possibly, 75-95% likely, 95-99,5% very likely, >99,5% most likely; +: positive Differenz; -: negative Differenz

^bLikelihood (+/0/-): Wahrscheinlichkeiten für positive/triviale/negative Differenzen (trivial: $\leq 0,2 \times SD_{\text{Baseline}}$ der Stichprobe für Leistung, $\leq 0,5 \times$ individueller CV_{Referenz} für Herzfrequenzvariabilität, s. Statistik)

*Parameter der Herzfrequenzvariabilität: 7 Tage-Mittelwert

4 Diskussion

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden keine einheitlichen Ergebnisse gefunden, welche die globale Nutzung eines HRV-Monitorings während eines intensiven Ausdauertrainingsblocks zur Überwachung von Belastungs- und Erholungsreaktionen oder Leistungsentwicklungen auf Gruppenebene befürworten. Die exemplarische Darstellung der drei Einzelfallanalysen zeigt stark divergierende HR(V)-Verläufe der Athleten bei vergleichbar überdurchschnittlichen Verbesserungen in den Hauptparametern der Ausdauerleistungsfähigkeit (maximale und submaximale Laufleistung).

4.1 Gruppenstatistische Auswertung

Trainingsbelastung und -beanspruchung. Die durchschnittliche Laufleistung war bei gesteigertem Umfang in Woche 2 sowie nach deutlicher Umfangsreduzierung in Woche 4 auf *gering bis moderatem* Niveau zu Woche 1 erhöht. Die Zielgeschwindigkeiten wurden im Mittel lediglich bei den 4 min-Intervalleinheiten realisiert. Die Ergebnisse deuten auf Gewöhnungseffekte im Sinne einer optimierten Pacingstrategie in Trainingswoche 2 hin und lassen akkumulierte Ermüdungsreaktionen in Woche 3 vermuten. Hinsichtlich der Periodisierung zeigt die kardiovaskuläre Beanspruchung (TRIMP) über den Interventionsverlauf hinweg identische Verläufe zur Umfangsgestaltung bei sich gleichzeitig stetig reduzierender HR_{peak} . HR_{peak} zeigt vergleichbare Effektstärken zu einer aktuellen Meta-Analyse auf (Bosquet, Merkari, Arvisais & Aubert, 2008). Die Abnahme der maximalen Herzfrequenz wird häufig bei trainingsinduzierter Ermüdungsaufstockung beobachtet ((Meeusen et al., 2013) und könnte auf ein (funktionelles) Overreaching hindeuten (Achten & Jeukendrup, 2003; Bosquet et al., 2008; Hedelin, Kenttä, Wiklund, Bjerle & Henriksson-Larsén, 2000). Die mittleren Blutlaktatkonzentrationen entsprechen den zu erwartenden Konzentrationshöhen intensiver Intervalleinheiten (Seiler & Tønnessen, 2009; Zintl & Eisenhut, 2009, S. 123) und zeigen kaum nennenswerte Schwankungen im Trainingsverlauf. sRPE lag in 9/12 Fällen mit Angaben ≥ 7 (*sehr schwer*) im Intensitätsbereich oberhalb der zweiten ventilatorischen Schwelle (Seiler & Kjerland, 2006). Dies bestätigt die beabsichtigte Beanspruchungshöhe innerhalb der Belastungswochen, welche in Kombination mit den anderen Beanspruchungsmarkern als ausreichend hoher Trainingsstimulus gedeutet werden kann (Buchheit & Laursen, 2013b; Laursen, 2012).

HRV-Monitoring. Die Breite der Referenzbereiche (SWC) der HR(V)-Parameter spiegelt mit den beobachteten CVs von 5,4-6,6% eine akzeptable Tag-zu-Tag-Variabilität wieder (Buchheit, 2015). Diese ermöglicht eine adäquate Beurteilung kardial-parasympathischer Veränderungen im Untersuchungsverlauf (Buchheit, 2014; Plews, 2013). Innerhalb der 14-tägigen Referenzphase schwankten die HR und HRV

lediglich *trivial* (Woche 1 zu Woche 2) und wiesen in allen drei Parametern eine vergleichbare Tag-zu-Tag-Variabilität auf. Die sich hieraus ergebenden Referenzbereiche, welche die Entscheidungsfindung über *substanzielle* Veränderungen ($> \text{SWC}$) leiten, entsprechen für den Ln rMSSD, den zuvor beschriebenen Abgaben und sind für die HR leicht erhöht (Buchheit, 2015). Trainingsinduziert schwankten HR und HRV im Interventionsverlauf überwiegend in *triviale*m Maße und zeigten auch in der Erholungsphase keine *klaren* Auslenkungen. Am Ende der ersten Interventionswoche war die Ruheherzfrequenz *nennenswert* erhöht und zeigte zusammen mit dem Ln rMSSD/RR *möglicherweise* eine relevante Reduktion am Ende der ersten Erholungswoche. Der Ausschlag in Trainingswoche 1 kann als Beanspruchungsreaktion hinsichtlich akut gesteigertem TL interpretiert werden, welche eine Auslenkung der Regenerationsprozesse darstellt (Horn, 2003; Weippert, Kreuzfeld, Rieger, Behrens & Stoll, 2014).

Für die geringen und überwiegend *unbedeutenden* Veränderungen scheint u. a. die große interindividuelle Variabilität der HR(V)-Reaktionen verantwortlich zu sein (steigende Zwischensubjektvariabilität gegen Ende der Untersuchungsphase, Abb. 2). Vor dem Hintergrund des methodischen Vorgehens sowie der aktuellen Interpretationsleitlinien (Buchheit, 2014; Plews, 2013) lassen sich keine eindeutigen Reaktionen des kardial-autonomen Nervensystems identifizieren, welche auf eine einheitliche Auslenkung von vagalem Tonus (HR) oder vagaler Modulation (HRV) schließen lassen. Buchheit et al. (2010) sprechen von einer minimalen Interventionsdauer von vier Wochen um Veränderungen der kardial parasympathischen Funktion zu beobachten. Dies könnte ergänzend zur Zwischensubjektvariabilität die unzureichenden Effektgrößen auf Gruppenniveau erklären.

Trainingsdokumentation und -monitoring. Im Rahmen der Trainingsintervention kam es zu einem *geringen*, aber *bedeutsamen* Anstieg der wöchentlichen Gesamttrainingsbeanspruchung (TL, *training load*) verglichen mit der Trainingsroutine vor Interventionsbeginn. Der Grad der allgemeinen Erholtheit war in Belastungswoche 1 *moderat* und in Belastungswoche 3 *stark* reduziert, blieb jedoch im Gruppenmittel im oberen, positiven Bewertungsbereich der Skala (> 3). Das spricht für eine lediglich mäßig ausgeprägte Ermüdungsaufstockung durch das Training. Die *klaren* Differenzen in Interventionswoche 1 lassen akute Ermüdungserscheinungen infolge der spezifischen Trainingsbelastung vermuten, da es im Vergleich zur Referenzphase nicht zu einer erhöhten Gesamtbeanspruchung kam. Gestützt werden diese Schlussfolgerungen mit der Beobachtung der gesteigerten Ruhe-HR und einem Negativtrend der HRV in Trainingswoche 1. Diese Reaktion wurde bereits häufig im Zusammenhang mit gesteigerter Ausdauerbelastung in Verbindung gebracht (Bosquet et al., 2008), speziell auch mit intensiven Laufbelastungen (Horn, 2003; Pichot et al., 2000; Plews et al., 2014a). Trotz steigendem TL regulierte sich die allgemeine Erholung in Interventionswoche 2 in Richtung Referenzbereich und reduzierte sich erneut in Trainingswoche

3 *deutlich*. Die gesteigerte Beanspruchung und die reduzierte allgemeine Erholtheit zeigen keinen klaren Zusammenhang zur Sprungleistung. Die Sprungleistungen zeigen einen leicht positiven Trend und sind in T9 *deutlich* erhöht. Diese Entwicklung scheint vor dem Hintergrund der gewählten Trainingsinhalte (lange hochintensive Intervalle) eher auf eventuelle Testgewöhnungseffekte oder auf nicht im Rahmen der Studie kontrollierte Trainingsinhalte zurückzuführen zu sein. In jedem Fall sind Schwankungen von maximal 2,0 cm an T9, trotz ihrer Aussagekraft hinsichtlich messtechnisch relevanter Genauigkeit (> SWC), im Sinne der praktischen Bedeutsamkeit zu hinterfragen.

HRV und Leistungsdiagnostik. Der Vergleich von HR und HRV zwischen Baseline und Post 1 zeigt *triviale* Variationen, jedoch eine *nennenswerte* Reduktion des Ln rMSSD/RR bei Post 2 und *möglicherweise* eine reduzierte HR (Tab. 4). Die Art und Richtung der Beobachtungen deuten auf eine gesteigerte parasympathische Aktivität bei Post 2 hin (Arvay & Hofmann, 2001; Buchheit, 2014; Stanley et al., 2015). Diese Veränderung muss jedoch mit Vorsicht interpretiert werden, da die Aussagekraft der HR(V)-Parameter in Kombination, aufgrund der *geringen* statistischen Sicherheit, recht wage erscheint. Des Weiteren lassen sich diese Ergebnisse lediglich im direkten Wochenvergleich zwischen Baseline und Post 2 beobachten (Tab. 4), nicht im Vergleich zwischen Referenzphase und Post 2 (*Abb. 2*).

Vergleichbar *deutlich* ist die Entwicklung der maximalen Leistungsfähigkeit im Stufentest (Tab. 4). Mit *hoher* Sicherheit (Likelihood 95-100%) ist eine Leistungssteigerung der Athleten im Mittel in $\dot{V}O_{2peak}$ und v_{inc} auf *geringem* Niveau ausgeprägt, wobei das 90% CI *geringe bis moderate* Effekte einschließt. Die maximale Sauerstoffaufnahme zeigt weniger einheitliche Ergebnisse. Divergierende Resultate zwischen $\dot{V}O_{2peak}$ und den maximalen Leistungsparametern wurden jedoch an diversen Stellen vergleichbar beschrieben (Hopkins et al., 2001; Meyer, Scharhag & Kindermann, 2005) und decken sich mit Ergebnissen aus anderen Interventionsstudien im HRV-Kontext (Kiviniemi et al., 2010; Kiviniemi, Hautala, Kinnunen & Tulppo, 2007) sowie mit den Angaben zur Reliabilität (Tab. 2 in *Reliabilität*). Die Veränderung der submaximalen Leistungsparameter weist lediglich auf Tendenzen hinsichtlich positiver Adaptationen zu Post 2 hin. Bei vergleichbarer statistischer Sicherheit sind die standardisierten Effekte geringer (90% CI *triviale bis geringe* Effekte) als die der maximalen Leistung. Vor dem Hintergrund der implementierten Trainingsinhalte mit nahezu maximalen Belastungen (> 90% $\dot{V}O_{2peak}$) erscheinen geringere Anpassungseffekte auf submaximaler Leistungsebene, im Sinne einer Adaptationsspezifität, plausibel. Maximale Sprintfähigkeit, Wiederholungssprintfähigkeit sowie Sprungleistung zeigen erhebliche interindividuelle Unterschiede, welche sich mit einer großen Ungenauigkeit der Effektschätzungen darstellen, wobei die 90% CIs stellenweise *erheblich* positive und negative Effekte gleichzeitig überlappen (*unklare Effekte, unclear*). Des Weiteren befinden sich die mittleren Effekte der letztgenannten Parameter auf *triviale*

Niveau oder innerhalb des Messfehlers (TE, vgl. Tab. 2 in *Reliabilität*). Die Ergebnisse decken sich mit Befunden anderer Untersuchungen zum High-Intensity Training, in denen keine Abnahmen der Sprung- oder Wiederholungssprintleistung beobachtet wurden (Fernandez-Fernandez, Zimek, Wiewelhove & Ferrauti, 2012; Helgerud, Engen, Wisloff & Hoff, 2001). Somit können eventuelle Transfereffekte auf primär anaerob determinierte Leistungsgrößen ausgeschlossen werden.

Zusammenfassung – Gruppenstatistische Auswertung. Zusammenfassend lassen die Ergebnisse der gruppenstatistischen Auswertung schlussfolgern, dass das Intervalltraining einen intensiven und überschwelligen Trainingsstimulus darstellte (Tab. 3), welcher während der Interventionsphase merkliche Einschränkungen des allgemeinen Erholungszustands nach sich zog (Abb. 3) und belastungsspezifische Adaptationen auf Ebene der maximaler Leistungsfähigkeit auslöste (Tab. 4). Das HRV-Monitoring spiegelt mit den vorliegenden Daten weder die Beanspruchungs- und Erholungsverläufe wider, noch zeigen sich konsistente Trends hinsichtlich positiver Adaptationen bei den Ausgangstests. Als Ursache hierfür ist u. a. das hohe Maß an interindividuellen Schwankungen speziell auf HR(V)-Ebene zu sehen. Möglicherweise ist auch die Tatsache relevant, dass die verwendeten HR(V)-Parameter gegenseitig in mathematischen und physiologischen Wechselbeziehungen stehen (Horn, 2003; Sacha, 2013), welche bei den hochgradig individuellen Reaktionen nur schwer verallgemeinernde Aussagen auf Ebene der Belastungs- und Erholungsverläufe zulassen (Horn, 2003; Meeusen et al., 2013; Schwarz, Urhausen, Coen, Siekmann & Kindermann, 2001; Uusitalo, Uusitalo & Rusko, 2000). Des Weiteren lieferte die Analyse der HRV auf Gruppenebene keinen nennenswerten Informationsmehrgewinn im Vergleich zur HR.

4.2 Einzelfallanalysen

Die Auswahl der exemplarischen Einzelfallanalysen wurde bewusst vor dem Hintergrund getätigt, individuell variierende Reaktionen des kardial-autonomen Nervensystems darzustellen, welche in annähernd vergleichbaren, überdurchschnittlichen Leistungsverbesserungen resultierten (Tab. 5 und Tab. 6). Die maximale Laufleistung verbesserte sich bei Spieler A und C in beiden Post-Tests erheblich, Spieler B verbesserte sich deutlich bei Post 2. Auf submaximaler Ebene zeigten Spieler B und C zu beiden Messzeitpunkten eindeutige Verbesserungen, Spieler A lediglich bei Post 1.

Spieler A zeigt idealtypische HR(V)-Verläufe, welche sich mit den erwarteten Belastungsreaktionen überlagern. Mit ansteigendem TL (Gesamtbeanspruchung) kam es zu Anzeichen steigender Ermüdung in Form eines Anstiegs der Ruhe-HR sowie einer stetigen Reduktion des Ln rMSSD bei sich häufenden, subjektiv geäußerten Erholungsdefiziten (Abb. 4). Diese Reaktionen beschreiben eine Abnahme von parasympathischem Tonus (HR) bei einhergehender Einschränkung parasympathischer Modulationsfähigkeit

(Ln rMSSD; Arvay & Hofmann, 2001; Hottenrott et al., 2006). Übergreifend deuten die Befunde auf Ermüdung, Überforderung oder gar Maladaptation durch eine gesteigerte Sympathikusaktivität (SA) hin (Berbalk, Bauer & Neumann, 2001; Buchheit, 2014; Plews, 2013; Stanley et al., 2015). Mit Einsetzen der Entlastungswoche kommt es zu stark rückläufigen Entwicklungen in Richtung Referenzniveau bzw. einer überschießenden Reaktion im Ln rMSSD/RR bei Post 2, was als eine gesteigerte parasympathische Aktivität (PA) gedeutet werden kann (Buchheit, 2014).

Spieler B weist eine vergleichbare Entwicklung des TL wie Spieler A auf, allerdings auf einem geringeren Gesamtbeanspruchungsniveau im Trainingsverlauf (maximaler TL Spieler B: 3025 AU vs. Spieler A: 5103 AU). Entsprechend geringer und seltener sind negative ($< \text{SWC}$) Angaben zum Erholungszustand (*Abb. 4*). Dies resultiert bei Spieler B in einer gesteigerten PA in Trainingswoche 2 und in einer kontinuierlichen PA-Steigerung ab Interventionswoche 4. In der Summe der Ergebnisse zeigt sich hier ein besseres *Coping* der induzierten Trainingsbelastung im Vergleich zu Spieler A (Stanley et al., 2015) und es sind HR(V)-Dynamiken erkennbar, welche begleitende Adaptationen auf ANS-Ebene vermuten lassen (Buchheit, 2014; Hottenrott et al., 2006).

Konträr zu den beiden anderen Athleten sind die Ergebnisse von Spieler C. Auffällig ist hier der deutlich höhere TL vor Interventionsbeginn, welcher sich während der Intervention nicht nennenswert verändert (*Abb. 5*). Das sind Indizien für einen suboptimalen Interventionsverlauf (Plews, 2013), welcher einen erheblichen *Overload* in den Belastungswochen induzieren sollte, idealerweise gefolgt von Überkompensationsreaktionen. Erklärbar scheint vor diesem Hintergrund die Tatsache, dass es zu keinen klaren nennenswerten Auslenkungen der HR(V)-Parameter kam, da offensichtlich keine allgemeine Überbeanspruchung stattfand. Spieler C war somit in der Lage seinen kardial-parasympathischen Status während der Trainingsphase aufrechtzuerhalten, was in diesem Fall positiv gedeutet werden kann (Buchheit, 2015). Tendenziell zeigte Spieler C in Trainingswoche 3 und 4 eine nennenswert reduzierte HR bei gleichzeitiger Erhöhung der Ln rMSSD (außerhalb des SWC), allerdings bleiben diese Entwicklungen unter Berücksichtigung des Messfehlers (TE) mit einer gewissen Unsicherheit behaftet (Buchheit, Laursen, Millet, Pactat & Ahmaidi, 2008; Hopkins, 2004). Entsprechend der Entscheidungshilfen von Plews (2013) zur Optimierung der individuellen Trainingssteuerung, hätte bei Spieler C die Belastung weiter gesteigert werden können, was möglicherweise zu größeren Adaptationen geführt hätte. Somit scheint die Vermutung begründet, dass eine zeitnahe Manipulation der Trainingsinhalte auf Grundlage des HRV-Monitorings in diesem Fall sinnvoll zu einer optimierten Trainingsgestaltung beigetragen hätte.

Zusammenfassung – Einzelfallanalysen. Die Einzelfallanalysen, welche auf Grundlage der quantitativen Auswertung der individuellen Zeitreihen getätigt wurden, beleuchten die möglichen Stärken eines hochfrequenten HRV-Monitorings im Sinne einer differenzial-diagnostischen Überwachung des kardial-autonomen Vegetationsstatus. Die Auswahl der drei exemplarischen Einzelfälle, mit vergleichbar überdurchschnittlichen Leistungsverbesserungen in den Hauptparametern, zeigt völlig voneinander divergierende Reaktionen des ANS auf die implementierten Trainingsstimuli. Spieler A zeigte zu erwartende Ermüdungserscheinungen während der Belastungsphase mit anschließender Erholung während der Entlastungsphase. Spieler B wies bereits begleitend Anzeichen positiver Adaptationen im Sinne einer gesteigerten parasympathischen Aktivität auf. Bei Spieler C fanden sich keine eindeutigen, nennenswerten Schwankungen auf Ebene des ANS, womit das Training möglicherweise eine individuell suboptimale Reizhöhe darstellte.

5 Schlussfolgerung für die Praxis

Auf Grundlage der vorliegenden Befunde kann ein HRV-Monitoring auf Basis täglicher Ruhemessungen während eines intensiven Vorbereitungszyklus nicht empfohlen werden, um hierdurch globale Entscheidungshilfen auf Gruppenebene zu erhalten. Die beobachteten Beanspruchungs- und Ermüdungsreaktionen auf Ebene der klassischen Parameter wie HR_{peak} und sRPE oder im allgemeinen Erholungszustand (KEB) werden nicht in vergleichbaren HR(V)-Verläufen widergespiegelt. Ebenfalls zeigen die HR(V)-Veränderungen zwischen den Leistungstests weder eindeutige noch einheitliche Entwicklungen auf, welche die Leistungsverbesserungen auf maximaler und submaximaler Ebene abbilden.

Die exemplarisch durchgeführten Einzelfallanalysen verdeutlichen das Ausmaß der individuellen Reaktionen auf Ebene des ANS bei standardisierte Trainingsbelastungen im Rahmen eines vierwöchigen Vorbereitungszyklus. Spieler mit vergleichbaren Leistungssteigerungen können während einer Interventionsphase durchaus hochgradig unterschiedliche HR(V)-Profile ausweisen. In der vorliegenden Untersuchung kam es zu keinen offensichtlichen Engpässen zwischen Erholung und Belastung, was eine differenzierte Analyse der autonomen Funktion überflüssig erscheinen lässt. Denkbar wäre dennoch eine Implementierung im Leistungssport in vergleichbaren Phasen von ungewohnt hohen Belastungsspitzen, da hier stärkere Ermüdungserscheinungen zu vermuten sind und ein individualisiertes Monitoring u. a. des ANS-Status einen Beitrag zu einer optimierten Trainingsplanung und -steuerung liefern könnte.

Aufgrund des extrem hohen Analyseaufwands und dem hohen Maß an benötigter Fachexpertise scheint die flächendeckende Anwendung eines HRV-Monitorings im Spportsport ausgeschlossen, zumal die HRV im Vergleich zur HR global gesehen keinen deutlichen Mehrwert an Informationen lieferte. Aufwand und Nutzen stehen mit dem hier vorgestellten methodischen Vorgehen in keinem praxisrelevanten Verhältnis, auch wenn im Einzelfall der differenzierte Einblick in die physiologischen Reaktionen auf ANS-Ebene eine Möglichkeit bietet, individuelle Adaptationsverläufe zu beobachten und verstehen.

6 Methodenkritik

Im Rahmen der Untersuchung wurde nach jetzigem Kenntnisstand erstmalig ein HRV-Monitoring mit morgendlichen Ruhemessungen und Trendanalyse im Kontext eines Saisonvorbereitungszyklus durchgeführt. Die größten methodischen Einschränkungen werden in den angewandten Analysemethoden gesehen. Eine gleitende 7 Tage-Mittelwertsbildung gilt in der HRV-Trainingsforschung als Methode der Wahl, um die Reliabilität der HR(V)-Signale zu steigern (Buchheit, 2014; Le Meur et al., 2013). Folglich kommt es jedoch zu einer gleichzeitigen Reduktion der Signalthöhe, was die Identifizierung von Akut- und Kurzzeitreaktionen erschwert und einen erheblichen Datenverlust auf dieser Ebene nach sich zieht.

Die rein visuelle Begutachtung der HR-Tagesmittelwerte von Baseline und Post 2 lassen im Vergleich zu den 7 Tage-Mittelwerten die Vermutung zu, dass die Datenmittelung möglicherweise vorhandene Unterschiede „weggemittelt“ hat, was die mangelnden Effektstärken der HR(V)-Parameter erklären könnte. Diese Vermutung müsste in Folgeanalysen auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden. Denkbar wäre hier die Verwendung eines kürzeren Analysefensters von bspw. drei bis vier Tagen. Dies würde einerseits den Messfehler erheblich reduzieren (bereits vier Messungen halbieren den Messfehler, Hopkins, 2004) und böte andererseits die Möglichkeit Kurzzeitschwankungen sensibler abzubilden. Erstmalig kam die Anwendung eines gleitenden 4 Tage-Mittelwerts im Rahmen einer kürzlich durchgeführten Untersuchung zu Ermüdungserscheinungen während eines 6-tägigen intensiven Krafttrainings-Mikrozyklus erfolgreich zum Einsatz (Schneider, Schumbera, Raeder, Wiewelhove & Ferrauti, 2015) und stellt damit eine potenzielle Alternative dar. Vergleichende Analysen mit Analysefenstern von bspw. 1, 4 und 7 Tagen könnten einen Aufschluss über Sensitivität, Spezifität und prädiktive Wertigkeit der verschiedenen Analysemethoden liefern (Buchheit et al., 2008).

Die erfolgreiche Anwendung der gleitenden 7 Tage-Mittelwertsbildung erfolgte bislang primär bei Untersuchungen mit Elite-Ausdauersportlern (Plews et al., 2012, 2014a; Plews et al., 2013b; Stanley et al., 2015) oder im Kontext intensiver *Overload*-Perioden (Le Meur et al., 2013). In beiden Settings sind stärkere Auslenkungen auf Ebene des ANS zu erwarten als sie in dieser Untersuchung beobachtet wurden, was auch bei Wochenmittelwerten eine ausreichend hohe Signalstärke nach sich ziehen würde.

Ungeklärt bleibt weitergehend die Frage, ob die HR(V) in der vorliegenden Stichprobe zu irgendeinem Zeitpunkt die Leistungsfähigkeit oder Leistungsadaptationen hätten vorhersagen können. Hierfür wären umfangreiche Zusammenhangsprüfungen mit Adjustierung von Kovariablen wünschenswert. Positive Ergebnisse könnten den potenziellen Nutzen einer einmaligen *Statusbestimmung* beleuchten.

7 Zusammenfassung

Einleitung. Das Monitoring von Belastungs- und Erholungsreaktionen im Sport gilt mittlerweile als zentrales Instrument im Prozess der Optimierung und Individualisierung von Trainingsmaßnahmen. Die Messung der Herzfrequenz (HR) -variabilität (HRV) stellt hier ein vielversprechendes Monitoringtool dar, welches einen Einblick in Aktivität und Regulationsmechanismen des kardial-autonomen Nervensystems (ANS) liefert. Ziel der Studie ist die Evaluation eines HRV-Monitorings im Rahmen eines vierwöchigen High-Intensity Intervalltrainings (HIT) hinsichtlich der Fähigkeit Belastungs- und Erholungsreaktionen sowie Leistungsveränderungen abzubilden.

Methodik. 12 trainierte Probanden aus intermittierenden Sportarten absolvierten einen 4-wöchigen, periodisierten HIT-Zyklus mit jeweils 3 Trainingseinheiten pro Woche. Die maximale und submaximale Leistungsfähigkeit wurde mittels Stufentests auf dem Laufband vor (Baseline) sowie zwei (Post 1) und neun Tage (Post 2) nach der Interventionsphase ermittelt. Der allgemeine Erholungsstatus (KEB) wurde an allen Test- und Trainingstagen erfragt. Begleitend, sowie zwei Wochen vor und nach der Intervention, wurden täglich 6-minütige HRV-Ruhemessungen nach dem Aufstehen durchgeführt und anschließend mittels gleitendem 7 Tage-Mittelwert analysiert.

Ergebnisse. Das Training löste *moderate* bis *starke* (Cohen's $d = -1,12$ bis $-1,25$) Ermüdungserscheinungen (KEB) in den Interventionswochen 1 und 3 (*likely* bis *most likely*) aus. Die maximale Leistungsfähigkeit zeigte *klare* Verbesserungen ($d = 0,20$ bis $0,41$) an Post 1 und Post 2 (*likely* bis *most likely*), wobei die submaximale Leistungsfähigkeit *tendenziell* (*possibly*) an Post 2 *gering* ($d = 0,21$ bis $0,23$) erhöht war. Der HRV-Parameter Ln rMSSD/RR war an Post 2 *gering* ($d = -0,40$) verringert (*likely*). Die drei Einzelfallanalysen zeigten erheblich divergierende ANS-Reaktionen bei den betrachteten Athleten, welche sich vergleichbar überdurchschnittlich in ihrer submaximalen und maximalen Leistungsfähigkeit verbesserten.

Schlussfolgerung. Ein HRV-Monitoring auf Grundlage täglicher Ruhemessungen und gleitender 7 Tage-Mittelwertsbildung ist auf Gruppenebene nicht in der Lage die beobachteten Belastungs- und Erholungsreaktionen oder die Leistungsverbesserungen abzubilden. Im Rahmen von Einzelfallanalysen scheint die HRV potenziell nützliche Informationen hinsichtlich individueller Adaptationsverläufen liefern zu können, welche möglicherweise eine Individualisierung und Optimierung von Trainingsplanung und -steuerung ermöglichen. Dennoch stehen Aufwand und Nutzen, sowohl auf Gruppen- als auch auf Einzelfallebene, in einem deutlichen Defizitverhältnis. Ein HRV-Monitoring ist derzeit unter Anwendung der etablierten Methoden in vergleichbaren Settings nicht empfehlenswert.

8 Abstract

Introduction. Monitoring fatigue and recovery is a key component in optimizing and individualizing training programs. Measuring heart rate (HR) variability (HRV) is suggested to be of high value in monitoring training by offering insights into mechanisms of cardiac autonomic nervous system (ANS) activity and modulation. Aim of the study was to evaluate whether HRV monitoring is capable to display fatigue and recovery dynamics as well as performance adaptations during 4-weeks of high-intensity interval training.

Methods. 12 trained intermittent sport athletes completed a periodized 4-week high intensity interval training program based on 3 sessions per week. Maximal and submaximal performance capacity was conducted using an incremental treadmill test prior to (Baseline) as well as two (Post 1) and nine days (Post 2) following the training cycle. Overall recovery was assessed at the beginning of each training and testing session using a specifically designed questionnaire (KEB). HRV was measured daily upon awakening for 6 min under supine conditions two weeks preceding, during and two weeks following the intervention period. HRV was analyzed using a rolling 7-day average.

Results. Overall recovery (KEB) was *likely to most likely* decrease in training week 1 and 3 on *moderate to strong* level (Cohen's $d = -1.12$ to -1.25). Maximal running performance was *clearly* increased ($d = 0.20$ to 0.41) at Post 1 and Post 2 (*likely to most likely*), whereas submaximal capacity was *possibly slightly* ($d = 0.21$ to 0.23) increased. HRV (Ln rMSSDD/RR) was *likely* substantially ($d = -0.40$) reduced. Single-case analysis displayed substantially diverging ANS dynamics in three athletes with similar above-average performance enhancements.

Conclusion. HRV monitoring based on daily resting measures and analysis of rolling 7-day averages was not capable to display either the observed alterations in fatigue and recovery, or the performance adaptations on group level. When using single-case research methods, HRV monitoring seems to provide valuable information on individual responses and adaptations, which might enable program adjustments for further training optimization and individualization. However, the enormous amount of effort required on the one hand, seems not to be justifiable on the other regarding the possible benefits. Therefore, monitoring HRV in comparable settings using currently established methods is not recommended.

Literaturverzeichnis

- Achten, J. & Jeukendrup, A.E. (2003). Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports medicine*, 33 (7), 517–538.
- Al Haddad, H., Laursen, P.B., Chollet, D., Ahmaidi, S. & Buchheit, M. (2011). Reliability of resting and postexercise heart rate measures. *International journal of sports medicine*, 32 (8), 598–605.
- Alexandre, D., da Silva, Cristiano Diniz, Hill-Haas, S., Wong, D.P., Natali, A.J., De Lima, Jorge R P, Bara Filho, Mauricio G B, Marins, Joao J C B, Garcia, E.S. & Karim, C. (2012). Heart rate monitoring in soccer: interest and limits during competitive match play and training, practical application. *Journal of strength and conditioning research*, 26 (10), 2890–2906.
- Arvay, S. & Hofmann, P. (2001). Herzfrequenzvariabilität und Trainingssteuerung - Die Bestimmung der HFV als eine nicht invasive Methode zur Beurteilung der körperlichen Beanspruchung durch sportliches Training. *Spectrum der Sportwissenschaft*, 13 (Suppl.), 5–13.
- Aubert, A.E., Seps, B. & Beckers, F. (2003). Heart Rate Variability in Athletes. *Sports medicine*, 33 (12), 889–919.
- Ball, N.B. & Zanetti, S. (2012). Relationship between reactive strength variables in horizontal and vertical drop jumps. *Journal of strength and conditioning research*, 26 (5), 1407–1412.
- Barker, J., McCarthy, P., Jones, M. & Moran, A. (2011). *Single-case research methods in sport and exercise psychology*. London: Routledge.
- Batterham, A.M. & Hopkins, W.G. (2006). Making meaningful inferences about magnitudes. *International journal of sports physiology and performance*, 1 (1), 50–57.
- Berbalk, A., Bauer, S. & Neumann, G. (2001). Herzfrequenzvariabilität zur Belastbarkeitsdiagnostik im Ausdauertraining (Konferenzbeitrag). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 52 (7-8), S25.
- Borg, G.A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise*, 14 (5), 377–381.
- Borresen, J. & Lambert, M.I. (2009). The Quantification of Training Load, the Training Response and the Effect on Performance. *Sports medicine*, 39 (9), 779–795.
- Bosquet, L., Merkari, S., Arvisais, D. & Aubert, A.E. (2008). Is heart rate a convenient tool to monitor over-reaching? A systematic review of the literature. *British journal of sports medicine*, 42 (9), 709–714.
- Brink, M.S., Visscher, C., Arends, S., Zwerver, J., Post, W.J. & Lemmink, K.A. (2010). Monitoring stress and recovery: new insights for the prevention of injuries and illnesses in elite youth soccer players. *British journal of sports medicine*, 44 (11), 809–815.
- Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? *Frontiers in physiology*, 5 (73).
- Buchheit, M. (2015). Sensitivity of monthly heart rate and psychometric measures for monitoring physical performance in highly trained young handball players. *International journal of sports medicine*, 36 (5), 351–356.
- Buchheit, M., Chivot, A., Parouty, J., Mercier, D., Al Haddad, H., Laursen, P.B. & Ahmaidi, S. (2010). Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. *European journal of applied physiology*, 108 (6), 1153–1167.
- Buchheit, M. & Laursen, P.B. (2013a). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Part II: anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications. *Sports medicine*, 43 (10), 927–954.
- Buchheit, M. & Laursen, P.B. (2013b). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports medicine*, 43 (5), 313–338.

- Buchheit, M., Laursen, P.B., Millet, G.P., Pactat, F. & Ahmaidi, S. (2008). Predicting intermittent running performance: critical velocity versus endurance index. *International journal of sports medicine*, 29 (4), 307–315.
- Buchheit, M., Rabbani, A. & Beigi, H.T. (2014). Predicting Changes in High-Intensity Intermittent Running Performance with Acute Responses to Short Jump Rope Workouts in Children. *Journal of sports science and medicine*, 13 (3), 476–482.
- Buchheit, M., Racinais, S., Bilsborough, J.C., Bourdon, P.C., Voss, S.C., Hocking, J., Cordy, J., Mendez-Villanueva, A. & Coutts, A.J. (2013). Monitoring fitness, fatigue and running performance during a pre-season training camp in elite football players. *Journal of science and medicine in sport*, 16 (6), 550–555.
- Cohen, J. (1994). The earth is round ($p < .05$). *American psychologist*, 49 (10), 997–1003.
- Cumming, G. (2012). *Understanding the new statistics. Effect sizes, confidence intervals, and meta-analysis*. New York: Routledge.
- Cumming, G. (2014). The new statistics: why and how. *Psychological science*, 25 (1), 7–29.
- Deutsche Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention – Deutscher Ärztbund (DGSP). (2007). *S 1- Leitlinie Vorsorgeuntersuchung im Sport*. Zugriff am 20. September 2015 unter http://www.dgsp.de/_downloads/allgemein/S1_Leitlinie.pdf.
- Dörr, C. (2010). *Untersuchung der Validität verschiedener Laktatschwellenkonzepte an Ausdauersportlern*. Dissertation. Gießen: Justus-Liebig-Universität Gießen, Fachbereichs Psychologie und Sportwissenschaft.
- Fernandez-Fernandez, J., Zimek, R., Wiewelhove, T. & Ferrauti, A. (2012). High-intensity interval training vs. repeated-sprint training in tennis. *Journal of strength and conditioning research*, 26 (1), 53–62.
- Foster, C., Florhaug, J.A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L.A., Parker, S., Doleshal, P. & Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of strength and conditioning research*, 15 (1), 109–115.
- Halson, S.L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports medicine*, 44 (Suppl. 2), 139–147.
- Hautala, A.J., Kiviniemi, A.M., Mäkilallio, T.H., Kinnunen, H., Nissilä, S., Huikuri, H.V. & Tulppo, M.P. (2006). Individual differences in the responses to endurance and resistance training. *European journal of applied physiology*, 96 (5), 535–542.
- Hautala, A.J., Kiviniemi, A.M. & Tulppo, M.P. (2009). Individual responses to aerobic exercise: the role of the autonomic nervous system. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 33 (2), 107–115.
- Hecksteden, A., Kraushaar, J., Scharhag-Rosenberger, F., Theisen, D., Senn, S. & Meyer, T. (2015). Individual response to exercise training - a statistical perspective. *Journal of applied physiology*, 118 (12), 1450–1459.
- Hedelin, R., Bjerle, P. & Henriksson-Larsén, K. (2001). Heart rate variability in athletes: relationship with central and peripheral performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 33 (8), 1394–1398.
- 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.
- 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.
- Hopkins, W.G. (2000a). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports medicine*, 30 (1), 1–15.
- Hopkins, W.G. (2000b). Precision of the estimate of a subject's true value (Excel spreadsheet). *Sportscience*. Zugriff am 14. September 2015 unter sportsci.org/resource/stats/xprecisionsubject.xls.

- Hopkins, W.G. (2004). How to interpret changes in an athletic performance test. *Sportscience*, 8, 1–7. Zugriff am 01. August 2014 unter sportsci.org/jour/04/wghtests.htm.
- Hopkins, W.G. (2006). Spreadsheets for Analysis of Controlled Trials, with Adjustment for a Subject Characteristic. *Sportscience*, 10, 45–50. Zugriff am 01. Juli 2015 unter sportsci.org/2006/wghcontrial.htm.
- Hopkins, W.G. (2015a). Individual responses made easy (Editorial). *Journal of applied physiology*, 118 (12), 1444–1446.
- Hopkins, W.G. (2015b). Spreadsheets for Analysis of Validity and Reliability. *Sportscience*, 19, 36–42. Zugriff am 30. Juni 2015 unter sportsci.org/2015/ValidRely.htm.
- Hopkins, W.G., Hawley, J.A. & Burke, L.M. (1999). Design and analysis of research on sport performance enhancement. *Medicine and science in sports and exercise*, 31 (3), 472–485.
- Hopkins, W.G., Marshall, S.W., Batterham, A.M. & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and science in sports and exercise*, 41 (1), 3–12.
- Hopkins, W.G., Schabert, E.J. & Hawley, J.A. (2001). Reliability of Power in Physical Performance Tests. *Sports medicine*, 31 (3), 211–234.
- Horn, A. (2003). *Diagnostik der Herzfrequenzvariabilität in der Sportmedizin. Rahmenbedingungen und methodische Grundlagen*. Bochum: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Sportmedizin.
- Hottenrott, K. (2014). Parameter der HRV zur individuellen Regenerationssteuerung im Sport. In K. Hottenrott, T. Gronwald & H. Schmidt (Hrsg.), *Herzfrequenzvariabilität: Grundlagen - Methoden - Anwendungen* (S. 21–29). Hamburg: Feldhaus Verlag.
- Hottenrott, K., Hoos, O. & Esperer, H.D. (2006). Herzfrequenzvariabilität und Sport. Aktueller Stand. *Herz*, 31 (6), 544–552. unter <http://www.hottenrott.info/Publikationen/HRVSportHerz.pdf>.
- Israel, S. (1982). *Sport und Herzschlagfrequenz*. Leipzig: Johann Ambrosium Barth.
- Jeong, T.-S., Reilly, T., Morton, J., Bae, S.-W. & Drust, B. (2011). Quantification of the physiological loading of one week of "pre-season" and one week of "in-season" training in professional soccer players. *Journal of sports sciences*, 29 (11), 1161–1166.
- Kellmann, M., Kölling, S. & Hitzschke, B. (in Druck). *Das Akutmaß und die Kurzsкала zur Erfassung von Erholung und Beanspruchung im Sport - Manual*. Köln: Sportverlag Strauß.
- Kinugasa, T., Cerin, E. & Hooper, S. (2004). Single-Subject Research Designs and Data Analyses for Assessing Elite Athletes' Conditioning. *Sports medicine*, 34 (15), 1035–1050.
- Kirbschus, K. (2013). *Reliabilität von zwei unterschiedlichen All-Out Sprinttests auf einem nichtmotorisierten Laufband*. Masterarbeit. Bochum: Ruhr-Universität Bochum, Lehr- und Forschungsbereich Trainingswissenschaft.
- Kiviniemi, A.M., Hautala, A.J., Kinnunen, H., Nissilä, J., Virtanen, P., Karjalainen, J. & Tulppo, M.P. (2010). Daily Exercise Prescription Based on Heart Rate Variability among Men and Women. *Medicine and science in sports and exercise*, 42 (7), 1355–1363.
- Kiviniemi, A.M., Hautala, A.J., Kinnunen, H. & Tulppo, M.P. (2007). Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. *European journal of applied physiology*, 101 (6), 743–751.
- Lambert, M.I. (2012). Quantification of Endurance Training and Competition Loads. In I. Mujika (Hrsg.), *Endurance training. Science and Practice* (S. 23–28). Vitoria-Gasteiz: Iñigo Mujika.
- Laursen, P.B. (2012). Interval Training for Endurance. In I. Mujika (Hrsg.), *Endurance training. Science and Practice* (S. 43–50). Vitoria-Gasteiz: Iñigo Mujika.
- Le Meur, Y., Pichon, A., Schaal, K., Schmitt, L., Louis, J., Gueneron, J., Vidal, P.P. & Hausswirth, C. (2013). Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 45 (11), 2061–2071.
- Mann, T.N., Lamberts, R.P. & Lambert, M.I. (2014). High responders and low responders: factors associated with individual variation in response to standardized training. *Sports medicine*, 44 (8), 1113–1124.

- Manzi, V., Iellamo, F., Impellizzeri, F., D'Ottavio, S. & Castagna, C. (2009). Relation between individualized training impulses and performance in distance runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 41 (11), 2090–2096.
- Marées, H.d. (2003). *Sportphysiologie* (9. Aufl.). Köln: Sportverl. Strauß.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., Raglin, J., Rietjens, G., Steinacker, J. & Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine and science in sports and exercise*, 45 (1), 186–205.
- Meyer, T., Auracher, M., Heeg, K., Urhausen, A. & Kindermann, W. (2006). Does cumulating endurance training at the weekends impair training effectiveness? *European journal of cardiovascular prevention and rehabilitation*, 13 (4), 578–584.
- Meyer, T., Auracher, M., Heeg, K., Urhausen, A. & Kindermann, W. (2007). Effectiveness of low-intensity endurance training. *International journal of sports medicine*, 28 (1), 33–39.
- Meyer, T., Scharhag, J. & Kindermann, W. (2005). Peak oxygen uptake. Myth and truth about an internationally accepted reference value. *Zeitschrift für Kardiologie*, 94 (4), 255–264.
- Oliver, J.L. (2009). Is a fatigue index a worthwhile measure of repeated sprint ability? *Journal of science and medicine in sport*, 12 (1), 20–23.
- Penttilä, J., Helminen, A., Jartti, T., Kuusela, T., Huikuri, H.V., Tulppo, M.P., Coffeng, R. & Scheinin, H. (2001). Time domain, geometrical and frequency domain analysis of cardiac vagal outflow: effects of various respiratory patterns. *Clinical Physiology*, 21 (3), 365–376.
- Pichot, V., Roche, F., Gaspoz, J.M., Enjolras, F., Antoniadis, A., Minini, P., Costes, F., Busso, T., Lacour, J.R. & Barthélémy, J.C. (2000). Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 32 (10), 1729–1736.
- Plews, D.J. (2013). *The Practical Application of Heart Rate Variability - Monitoring Training Adaptations in World Class Athletes*. Dissertation. Auckland: Auckland University of Technology, Faculty of Health and Environmental Science.
- Plews, D.J., Laursen, P.B., Kilding, A.E. & Buchheit, M. (2012). Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training? A case comparison. *European journal of applied physiology*, 112 (11), 3729–3741.
- Plews, D.J., Laursen, P.B., Kilding, A.E. & Buchheit, M. (2013a). Evaluating training adaptation with heart-rate measures: a methodological comparison. *International journal of sports physiology and performance*, 8 (6), 688–691.
- Plews, D.J., Laursen, P.B., Kilding, A.E. & Buchheit, M. (2014a). Heart rate variability and training-intensity distribution in elite rowers. *International journal of sports physiology and performance*, 9 (6), 1026–1032.
- Plews, D.J., Laursen, P.B., Le Meur, Y., Hausswirth, C., Kilding, A.E. & Buchheit, M. (2014b). Monitoring training with heart rate variability: how much compliance is needed for valid assessment? *International journal of sports physiology and performance*, 9 (5), 783–790.
- Plews, D.J., Laursen, P.B., Stanley, J., Kilding, A.E. & Buchheit, M. (2013b). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports medicine*, 43 (9), 773–781.
- Roberts, R.A., Dwyer, D. & Astorino, T. (2010). Recommendations for improved data processing from expired gas analysis indirect calorimetry. *Sports medicine*, 40 (2), 95–111.
- Sacha, J. (2013). Why should one normalize heart rate variability with respect to average heart rate. *Frontiers in physiology*, 4, 306.
- Sandercock, G.R.H., Bromley, P.D. & Brodie, D.A. (2005). Effects of exercise on heart rate variability: inferences from meta-analysis. *Medicine and science in sports and exercise*, 37 (3), 433–439.

- Scharhag-Rosenberger, F., Meyer, T., Gässler, N., Faude, O. & Kindermann, W. (2010). Exercise at given percentages of VO₂max: heterogeneous metabolic responses between individuals. *Journal of science and medicine in sport*, 13 (1), 74–79.
- Scharhag-Rosenberger, F., Walitzek, S., Kindermann, W. & Meyer, T. (2012). Differences in adaptations to 1 year of aerobic endurance training: individual patterns of nonresponse. *Scandinavian journal of medicine and science in sports*, 22 (1), 113–118.
- Schneider, C., Schumbers, O., Raeder, C., Wiewelhove, T. & Ferrauti, A. (2015). Effect of an intensive strength training microcycle on resting heart rate variability. In European College of Sport Science (ECSS) (Hrsg.), *Book of Abstracts of the 20th Annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS), Malmö - Sweden, 24th -27th June 2015* (S. 198).
- Schwarz, L., Urhausen, A., Coen, B., Siekmann, T. & Kindermann, W. (2001). Verhalten der Herzfrequenzvariabilität während eines 14-tägigen Schwimmtrainingslagers (Konferenzbeitrag). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 52 (7-8), S56.
- Scott, B.R., Lockie, R.G., Knight, T.J., Clark, A.C. & Janse de Jonge, X.A.K. (2013). A Comparison of Methods to Quantify the In-Season Training Load of Professional Soccer Players. *International journal of sports physiology and performance*, 8 (2), 195–202.
- 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 and science in sports*, 16 (1), 49–56.
- Seiler, S. & Tønnessen, E. (2009). Intervals, Thresholds, and Long Slow Distance: the Role of Intensity and Duration in Endurance Training. *Sportscience*, 13, 32–53. Zugriff am 15. Februar 2014 unter sportsci.org/2009/ss.htm.
- Sleamaker, R. & Browning, R. (1996). *Serious training for endurance athletes* (2nd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Stanley, J., D'Auria, S. & Buchheit, M. (2015). Cardiac parasympathetic activity and race performance: an elite triathlete case study. *International journal of sports physiology and performance*, 10 (4), 528–534.
- Stone, N.M. & Kilding, A.E. (2009). Aerobic conditioning for team sport athletes. *Sports medicine*, 39 (8), 615–642.
- Sylta, Ø., Tønnessen, E. & Seiler, S. (2014). Do elite endurance athletes report their training accurately? *International journal of sports physiology and performance*, 9 (1), 85–92.
- Tarvainen, M.P. (2014). *Kubios HRV version 2.2. User's Guide*. Zugriff am 07. August 2015 unter http://kubios.uef.fi/media/Kubios_HRV_2.2_Users_Guide.pdf.
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology (Task Force). (1996). Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17 (3), 354–381.
- Uusitalo, A.L., Uusitalo, A.J. & Rusko, H.K. (2000). Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete. *International journal of sports medicine*, 21 (1), 45–53.
- Voss, A., Schroeder, R., Heitmann, A., Peters, A. & Perz, S. (2015). Short-term heart rate variability-influence of gender and age in healthy subjects. *PLoS One*, 10 (3), e0118308.
- Weippert, M., Kreuzfeld, S., Rieger, A., Behrens, K. & Stoll, R. (2014). Veränderungen der morgendlichen Herzratenvariabilität (HRV) als Reaktion auf erhöhte Trainingsbelastungen bei freizeitsportlich aktiven Ausdauersportlern. In K. Hottenrott, T. Gronwald & H. Schmidt (Hrsg.), *Herzfrequenzvariabilität: Grundlagen - Methoden - Anwendungen* (S. 135–138). Hamburg: Feldhaus Verlag.
- Zintl, F. & Eisenhut, A. (2009). *Ausdauertraining. Grundlagen, Methoden, Trainingssteuerung* (7. Aufl.). München: blv.

Anhang

Anhang A – PAR-Q Fragebogen

Leitlinie Vorsorgeuntersuchung im Sport

Anlagen

Erhebungsbogen (Anlage 1)

Zu 4.1.1. PAR-Q-Fragebogen

PAR-Q-Fragebogen

Dieser Fragebogen soll Ihnen helfen herauszufinden, ob Sie vor Beginn der körperlichen Aktivität oder Sport einen Arzt aufsuchen sollten. Bei einem Alter über 35 und unter 60 Jahren ist eine sportärztliche Vorsorgeuntersuchung sinnvoll. Bei einem Alter über 60 Jahren sollten Sie in jedem Fall eine solche ärztliche Untersuchung vornehmen lassen.

Beantworten Sie die unten stehenden Fragen nach bestem Wissen und Gewissen und mit etwas „gesundem“ Menschverstand.

Name : Vorname: Geburtsdatum:
Anschrift:

1.	Hat Ihnen jemals ein Arzt gesagt, Sie hätten "etwas am Herzen" und Ihnen Bewegung und Sport nur unter ärztlicher Kontrolle empfohlen?	☐ ja ☐ nein
2.	Hatten Sie im letzten Monat Schmerzen in der Brust in Ruhe oder bei körperlicher Belastung (Anstrengung)?	☐ ja ☐ nein
3.	Haben Sie Probleme mit der Atmung in Ruhe oder bei körperlicher Belastung?	☐ ja ☐ nein
4.	Sind Sie jemals wegen Schwindel gestürzt oder haben Sie schon jemals das Bewusstsein verloren?	☐ ja ☐ nein
5.	Haben Sie Knochen- oder Gelenkprobleme, die sich unter körperlicher Belastung verschlechtern könnten?	☐ ja ☐ nein
6.	Hat Ihnen jemals ein Arzt ein Medikament gegen hohen Blutdruck oder wegen eines Herzproblems oder Atemproblems verschrieben?	☐ ja ☐ nein
7.	Kennen Sie irgendeinen weiteren Grund, warum Sie nicht körperlich/sportlich aktiv sein sollten?	☐ ja ☐ nein

Falls Sie eine oder mehrere Fragen mit JA beantwortet haben, sollten Sie, bevor Sie sportlich aktiv werden, Ihren Arzt aufsuchen und sich untersuchen und beraten lassen.

Datum.....

Unterschrift.....

Anhang B – Trainingstagebuch

Proband XY - Trainingstagebuch (exemplarisch)

Datum	Sport	Inhalt	Dauer [min]	Intensität [0-10]
Mo, 29.06. Training REGman				
Di, 30.06.				
Mi, 01.07. Training REGman				
Do, 02.07.				
Fr, 03.07. Training REGman				
Sa, 04.07.				
So, 05.07.				

Beispiele: Basketball - Technik/Taktik - 60min - Intensität 3
Krafttraining - Rumpf - 30min - Intensität 4

Anmerkungen:

CR-10-Skala

- 0 Ruhe
- 1 Sehr einfach
- 2 Einfach
- 3 Mäßig
- 4 Etwas schwer
- 5 Schwer
- 6
- 7 Sehr Schwer
- 8
- 9
- 10 Extrem Schwer

Erklärungen

Erklärung

Name:	Schneider
Vorname:	Christoph

Hiermit erkläre ich mich damit einverstanden, Interessenten die Einsicht in meine Masterarbeit zu gewähren.

Bochum, 30. September 2015

Ort, Datum

Unterschrift

Erklärung

Name:	Schneider
Vorname:	Christoph

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe.

Bochum, 30. September 2015

Ort, Datum

Unterschrift