

**Astrid Simon & Joachim Mester**

## **Reaktion und Adaptation endokriner Parameter in Folge hoher Trainingsbelastungen anhand von Einzelfall-Zeitreihenanalysen**

REACTION AND ADAPTATION OF ENDOCRINE PARAMETERS AS A RESULT OF HIGH TRAINING LOAD USING SINGLE-CASE TIME SERIES ANALYSES

### *Zusammenfassung*

*Zur Erforschung von Anpassungsprozessen im Leistungssport empfehlen sich, über traditionelle Zugänge hinaus, auch Untersuchungsdesigns der explorativen Datenanalyse, da die Reaktionen auf Belastung individuell sehr unterschiedlich sind. So wurden in der vorliegenden Studie zwei Einzelfall-Zeitreihenanalysen mit einer Triathletin und einem Triathleten durchgeführt, um möglichst engmaschig und differenziert Belastungsreaktionen zu untersuchen. Über einen Zeitraum von fünf bzw. sechs Monaten wurde eine Vielzahl von Parametern (u.a. Energieumsatz, Hormonparameter, Leistungsdiagnostiken) bestimmt. Die Analyse der Parameter Testosteron und IGF-I in Zusammenhang mit dem Energieumsatz konnte zeitversetzte Trends, inphasische/gegenphasische Regulation in Abhängigkeit der Belastungshöhe und interindividuell annähernd identische Reaktionsmuster auf Belastung und Erholung aufdecken. In der Trainingspraxis ermöglicht die gezielte Verwendung derartiger Diagnostiken bessere individuelle Konzepte der Belastungssteuerung.*

### *Abstract*

*In addition to traditional approaches an experimental design of explorative data analysis is highly useful for the research of adaptation processes in high performance sport, as individual reactions to training load differ considerably from athlete to athlete. In this study two single-case time series analyses were conducted with a female and a male triathlete to analyse individual reactions to training load in as differentiating and precise ways as possible. To this end, many parameters such as energy expenditure, endocrine parameters and performance diagnostics were measured at short-time intervals over a period of 5 and 6 months respectively. The analyses of the parameters testosterone and IGF-I in relation to energy expenditure revealed time-lagged effects, inphase and counterphase regulations depending on training load and almost identical reactions to load and recovery of both subjects. The systematic application of these diagnostics in training would lead to better individual concepts of the regulation of the training load.*

## **1 Einleitung**

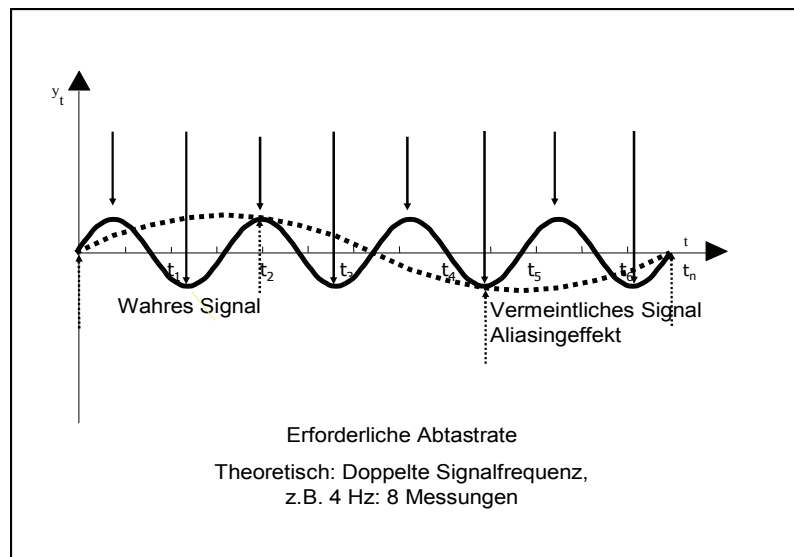
Die Gestaltung von Belastung und Erholung im Verlauf von Anpassungsvorgängen und den damit verbundenen Mechanismen stellt einen wichtigen Gegenstandsbereich der Forschung im Leistungssport dar und blickt inzwischen seit Roux (1895)

auf eine mehr als einhundertjährige Geschichte zurück. Die zeitliche Abfolge und die Quantität von Belastung und Erholung stellen den Kern von Trainingsperiodisierung dar und erlangen besondere Bedeutung bei der Vorbereitung auf einen Wettkampfhöhepunkt, wie z.B. bei Olympischen Spielen oder Weltmeisterschaften. Dabei ist immer noch nicht hinreichend geklärt, welche Belastungen im Sinne der Qualität und der Quantität welche Regenerationszeiten erfordern, wann mit der gewünschten Leistungssteigerung zu rechnen ist, wie groß diese ist und wie lange sie andauert. Es kommt hinzu, dass bei zeitverzögerten Reaktionen nicht von einem konstanten Lag ausgegangen werden kann. Werden Belastungs- und Erholungsprozesse nicht adäquat berücksichtigt, kann es zu einem Leistungsrückgang oder einer Leistungsstagnation in Folge zu geringer Belastung ebenso kommen wie in Folge zu hoher Belastung.

Die meisten Studien zur Untersuchung von Anpassungsvorgängen wenden sich im Allgemeinen einem stichprobenbasierten Ansatz zu. Wissenschaftlich wird jedoch die Situation dadurch weiter erschwert, dass wohl nicht nur im Grenzbereich der Belastung die Individualität der Reaktionen so groß ist, dass mittlere Belastungsschemata, wie sie in vielen Rahmentrainingsplänen niedergelegt sind, nicht zwangsläufig zum Erfolg führen und empirische Studien aufgrund geringer Stichprobengröße und großer Streuung entweder faktisch nicht signifikant sind oder zu einem Fehler Zweiter Art führen. Schließlich muss damit gerechnet werden, dass insbesondere Effekte von hohen Belastungen, möglicherweise erst nach viel länger dauernden Zeiträumen als bislang angenommen und zeitversetzt, zu biopositiven Reaktionen führen.

Dieser Aspekt hat sowohl für die Forschung im Bereich von Adaptationsprozessen als auch für die Trainingspraxis Konsequenzen. So sollte bei Untersuchungen zu Reaktionen des Organismus auf Trainingsreize auch noch nach Ende der Trainingsphase über einen Zeitraum von mehreren Wochen gemessen werden. Dies bedingt des Weiteren, dass nicht nur die traditionelle Forschungsmethodik des stichprobenbasierten Verifizierens bzw. Falsifizierens von Hypothesen angewandt, sondern ein Untersuchungsdesign in Form einer explorativen Datenanalyse gewählt werden sollte. Hierzu gehören unter anderem Einzelfall- und Zeitreihenanalysen, die das Ziel haben, ohne à priori Erwartungen, systematische Muster und Beziehungen zwischen Variablen zu identifizieren (Shumway & Stoffer, 2000).

Die intra- und die interindividuelle Basisvariabilität von vielen leistungsdiagnostischen Parametern sind ebenso wie der zeitgleiche oder zeitversetzte Zusammenhang bzw. die Kausalität zu Belastungsreizen nicht hinreichend bekannt. Um derartige Prozesse besser zu verstehen, eignen sich Modelle der Signaltheorie bzw. der Signalverarbeitung. Es ist hier gängiger Standard, dass die Abtastrate mindestens doppelt so hoch zu sein hat wie das zu messende Signal, z.B. 8 Messungen bei einer Signal-Frequenz von 4 Hz. Diesen Sachverhalt veranschaulicht Abbildung 1. Gezeigt werden unterschiedliche Abtastraten eines Signals. Ist die Abtastrate für das wahre Signal zu gering, sind Aliasingeffekte, also vermeintliche Frequenzmuster, die Folge.



**Abb. 1: Signalfrequenz und Abtastrate**

Die Übertragung derartiger technischer Verfahren auf biologische Parameter ist nicht einfach. Es ist eben in der normalen Praxis des Trainings unüblich oder vielfach noch nicht einmal möglich, die Tagesvarianz eines einzigen und einfachen Parameters (z.B. Sprungkraft) zu messen, obwohl die prinzipiellen Auswirkungen des Circadianrhythmus seit langem bekannt sind (de Marées, 2002). Die Reduktion komplexer Stoffwechselprozesse auf einen einzigen, derartigen Parameter ist ohnehin unrealistisch. Auch wenn moderne Messmethodik und biochemische Analytik eine Vielzahl von Messgrößen bereitstellen, liegt ein schlüssiges Modell von Belastung und Erholung, Trainingswirkung und Leistungsverbesserung immer noch in weiter Ferne.

Im Folgenden wird eine Einzelfall-Zeitreihenstudie im Ausdauerbereich (Triathlon) vorgestellt, die das Ziel hatte, möglichst differenziert und engmaschig Belastungsreaktionen und die Leistungsentwicklung zu untersuchen.

## 2 Einzelfall-Zeitreihenanalysen endokriner Parameter

### 2.1 Forschungsstand

Die Anfänge der Einzelfallanalyse reichen bis ins 19. Jahrhundert zurück und fanden damals in der Psychologie Anwendung. Mitte der 70er-Jahre des 20. Jahrhunderts wurde die Einzelfall-Zeitreihenanalyse vor allem von der klinischen Psychologie und der Medizin aufgegriffen. Auch heute noch sind es die Psychologie und die Medizin, in denen Einzelfallanalysen gegenüber anderen Wissenschaftsbereichen von großer Bedeutung sind. Die Anwendung von Einzelfall-Zeitreihenanalysen in der Medizin umfasst weite Forschungsbereiche. Zahlreiche Studien untersuchten den Zeitverlauf des Herzkreislaufsystems, insbesondere der Herzfrequenz (Ivanov, Rosenblum, Peng, Mietus, Havlin, Stanley, & Goldberger, 1996; Van Steenis & Tulen, 1996),

andere dienen der Identifikation pulsatile Elemente im endokrinen System (Normolle & Brown, 1994; Hermida, Fernandez, Alonso, Ayala & Garcia, 1997). Seit einigen Jahren werden diese Methoden auch zunehmend in der Sportwissenschaft angewandt. So werden in der Trainingslehre Einzelfall- und Zeitreihenanalysen benutzt, um die biologische Reaktion und Anpassung auf Trainingsreize zu untersuchen (Maas & Mester, 1996; Mester, 1998; Ahmadi, Sinclair, Foroughi & Davis, 2006; Di Michele & Merni, 2006; Suhr, Yue, de Marées, Achtzehn & Mester, 2006). Anhand von Einzelfall-Zeitreihenanalysen können individuelle Vorgänge im Grenzbereich von Adaptationsprozessen besser identifiziert und analysiert werden, als das durch herkömmliche gruppenstatistische Methoden möglich wäre (Mester & Perl, 2000).

## 2.2 Studiendesign

Um vor allem zeitversetzte Adaptationen als Reaktion auf hohe Trainingsbelastungen verfolgen zu können, wurden in der vorliegenden Studie zwei Einzelfall-Zeitreihenanalysen über einen Zeitraum von ca. fünf bzw. sechs Monaten durchgeführt. Eine Probandin (P1) und ein Proband (P2) wurden aus dem Spitzenbereich des Langdistanz-Triathlons (3,8 km Schwimmen, 180 km Radfahren, 42,2 km Laufen) gewählt, da hier sehr hohe Trainingsumfänge mit entsprechend hohen Belastungen absolviert werden (anthropometrische Daten siehe Tab. 1).

**Tab. 1: Probanden der Einzelfall-Zeitreihenstudie**

Parameter	P1	P2
Geschlecht	weiblich	männlich
Alter [Jahre]	26	27
Größe [cm]	168	188
Körpermasse [kg] ( $\bar{x} \pm SD$ )	57,46 $\pm$ 0,83	86,65 $\pm$ 1,17
BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	20,36	24,52

(BMI= Body Mass Index)

Es wurde eine Vielzahl an Parametern mit unterschiedlichen Messzeitintervallen bestimmt (siehe Tab. 2).

Täglich wurden physiologische Basisparameter (Ruheherzfrequenz, Ruhekörpertemperatur, Körpermasse, Schlafstunden) gemessen und der Energieumsatz wurde zur Quantifizierung der Trainingsbelastung in den drei Disziplinen des Triathlons bestimmt (siehe 2.3).

Darüber hinaus gaben die Athleten anhand eines Fragebogens täglich Auskunft über ihre *erlebte körperliche Verfassung* (nach Kleinert & Liesenfeld, 2001) zur Einschätzung der psychischen Befindlichkeit. Blutabnahmen zur Bestimmung von Stoffwechsel- und Hormonparametern wurden dreimal wöchentlich durchgeführt. Um die Reaktionen dieser physiologischen Parameter im Zusammenhang mit der Leistungsentwicklung analysieren zu können, wurden wöchentliche Leistungs-

diagnostiken alternierend im Radfahren und Laufen absolviert. Exemplarisch wurden bei der Probandin die Ernährung sowie hämatologische und immunologische Parameter analysiert. Vor Beginn der eigentlichen Zeitreihe erfolgte über einen Zeitraum von 2-3 Wochen mit täglichen Messungen die Bestimmung der Baseline. Beide Probanden absolvierten während der Zeitreihe ein Trainingslager mit sehr hohen Belastungen. P1 bewältigte am Ende der Zeitreihe einen Langdistanz-Triathlon.

**Tab. 2: Erhobene Parameter**

Täglich	3x/Woche	1x/Woche	Exemplarisch*
Ruheherzfrequenz	ACTH (Kortikotropin)**	Parameter der	Nährstoff- und
Ruhekörper- temperatur	Ammoniak*	Leistungsdiagnostik	Wasserzufuhr
Körpermasse	Androstenedion**	(aerobe, anaerobe	Blutbild
Schlafstunden	Angiotensin*	Schwelle)	Hämatologische und
Energieumsatz	Creatinkinase		immunologische
Erlebte körperliche Verfassung	DHE-S**		Parameter
	f-Testosteron**		
	IGF-I		
	Kortisol		
	Leptin*		
	Östradiol*		
	Progesteron*		
	Prolaktin		
	Renin*		
	T3 (Thyroxin)		
	T4 (Triiodothyronin)		
	Testosteron		
	TSH (Thyreotropin)		
	Urea		

\* nur Proband 1

\*\* nur Proband 2

### 2.3 Berechnung des Energieumsatzes

Der Gesamtenergieumsatz ( $E$ ) pro Tag ergibt sich aus der Summe des täglichen Energieumsatzes [kJ] im Schwimmen, Radfahren und Laufen:

$$E = E_{\text{Schwimmen}} + E_{\text{Rad}} + E_{\text{Lauf}} \quad (1)$$

Auf Grund der Unterschiede bezüglich Geschlecht und Leistung wurden bei  $E_{\text{Schwimmen}}$  für P1 und P2 unterschiedliche Methoden angewandt. Da keine Leistungsdiagnostik

gnostiken in dieser Disziplin durchgeführt wurden, ist hier nur eine Annäherung an die tatsächlichen Werte des Energieverbrauchs möglich. Bei P1 wurde  $E_{\text{SchwimmenP1}}$  [kJ] auf der Grundlage von Untersuchungen von Madsen (1982) mit folgenden Formeln (2-5) berechnet:

$$E_{\text{SchwimmenP1}} = k\ddot{A} \cdot VO_2 \cdot t \quad (2)$$

$$k\ddot{A} = 5,14 \cdot RQ + 15,99 \quad (3)$$

$$RQ = VCO_2 \cdot VO_2^{-1} \quad (4)$$

$$VO_2 = -0,014205 + 2,45972 \cdot v \quad (5)$$

wobei:  $k\ddot{A}$  = kalorisches Äquivalent [kJ/l],  
 $VO_2$  = Sauerstoffaufnahme [l/min],  
 $t$  = Zeit [min],  
 $RQ$  = Respiratorischer Quotient,  
 $VCO_2$  = Kohlendioxidabgabe [l/min],  
 $v$  = Schwimmggeschwindigkeit [m/s].

$k\ddot{A}$  und  $RQ$  wurden auf Grundlage der spirometrischen Daten von Madsen (1982) berechnet,  $t$  und  $v$  wurden den Trainingsaufzeichnungen von P1 entnommen.

Bei P2 erfolgte die Berechnung von  $E_{\text{SchwimmenP2}}$  [kJ] auf der Grundlage von Untersuchungen von di Prampero (1986) an College-Schwimmern, wobei die Körperoberfläche nach du Bois/du Bois (Pschyrembel, 1986) ermittelt wurde:

$$E_{\text{SchwimmenP2}} = 0,57 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1} \text{ pro m}^2 \text{ BSA} \quad (6)$$

$$\text{BSA} [\text{m}^2] = \text{kg}^{0,425} \cdot \text{cm}^{0,725} \cdot 0,007184 \quad (7)$$

wobei:  $m$  = zurückgelegte Strecke in Metern  
 $\text{BSA}$  = Körperoberfläche

Der Energieumsatz im Radfahren  $E_{\text{Rad}}$  [kJ] wurde für beide Probanden über die mechanische Energie, die bei jeder Trainingseinheit und jedem Wettkampf vom *SRM (Schoberer Radmesstechnik) Training System* gemessen wurde, ermittelt:

$$E_{\text{Rad}} = ME \cdot \eta^{-1} \cdot 100 \quad (8)$$

$$\eta = P \cdot AU^{-1} \cdot 100\% \quad (9)$$

wobei:  $ME$  = mechanische Energie [kJ],  
 $\eta$  = Nettowirkungsgrad [%],  
 $P$  = Leistung [Watt],  
 $AU$  = Arbeitsumsatz [kJ].

Der Nettowirkungsgrad wurde bei beiden Probanden individuell anhand eines Stufentests ermittelt und betrug im Durchschnitt für P1  $\eta_{P1} = 20,3\%$ , für P2  $\eta_{P2} = 23,5\%$ .

Der Energieumsatz im Laufen  $E_{\text{Lauf}}$  [kJ] wurde für beide Probanden auf Grundlage der mittleren Laufgeschwindigkeit und anhand der Daten aus den jeweiligen spirometrischen Untersuchungen mit den Formeln 2-4 ( $E_{\text{Lauf}}$  anstelle von  $E_{\text{SchwimmenP1}}$  bei (2)) berechnet.

## 2.4 Sportpraktische Bedeutung von Testosteron und IGF-I

Da im Ergebnisteil exemplarisch für die Vielzahl der Parameter die endokrinen Stoffe Testosteron und IGF-I in Beziehung zum Energieumsatz dargestellt werden, soll im Folgenden deren physiologische und sportpraktische Bedeutung aufgezeigt werden.

Das Sexualhormon Testosteron spielt bekanntlich eine wichtige Rolle für Wachstum, Entwicklung und Reifung des männlichen Skelettsystems. Seine anabolen Effekte werden durch eine Zunahme der Proteinsynthese und eine Abnahme des Anteils des Proteinkatabolismus in der Muskelfaser realisiert. Körperliche Belastung übt einen starken Einfluss auf die Sekretion von Testosteron aus. So führen unabhängig vom Geschlecht allgemein akute Kraft- und Ausdauerbelastungen zu einem Anstieg an Testosteron, unabhängig vom Trainingszustand (Keizer, Janssen, Menheere & Kranenburg, 1989; Bonen, Haynes & Graham, 1991; Arena & Maffulli, 1998; McArdle, Katch & Katch, 1996; Madelenat, Chuong, Driguez & Belaisch, 1997; Wilmore & Costill, 1999; Consitt, Copeland & Tremblay, 2002; Copeland, Consitt & Tremblay, 2002). Der Anstieg an Testosteron ist bei Trainierten größer als bei Untrainierten (Keizer, Beckers, de Haan, Janssen, Kuipers, van Kranenburg & Guerten, 1987) und korreliert mit Intensität und Dauer der Belastung (Consitt et al., 2002). Regelmäßiges Training führt sowohl beim Mann als auch bei der Frau zu einer Abnahme der Ruhetestosteronwerte (Hackney, Sinning & Bruot, 1988; Madelenat et al., 1997; Consitt et al., 2002; Fernández-García, Lucía, Hoyos, Chicharro, Rodriguez-Alonso, Bandrés & Terrados, 2002).

IGF-I (Insulin-like Growth Factor I) spielt eine große Rolle bei der Kontrolle von Wachstum und Stoffwechsel. So stimuliert es die DNA- und die Proteinbiosynthese und hat eine bedeutende Funktion bei der Vermehrung, Differenzierung und dem Überleben von Zellen. Des Weiteren gilt IGF-I als möglicher Marker für anabole Effekte von Training, da es die Verbreitung und die Differenzierung von Myoblasten *in vitro* stimuliert. Zusätzlich regt es die Synthese von Muskelprotein an, so dass ihm eine wichtige Rolle bei belastungsinduzierter Muskelhypertrophie zukommt (Anthony, Anthony, Lewitt, Donovan & Layman, 2001; Bamman, Shipp, Jiang, Gower, Hunter, Goodman, McLafferty & Randall, 2001; Chicharro, López-Calderon, Hoyos, Martín-Velasco, Villa, Villanúa & Lucía, 2001; Consitt et al., 2002; Eliakim, Nemet, Bar-Sela, Higer & Falk, 2002). Neben Insulin und GH, die das zirkulierende IGF-I steuern, gibt es weitere Faktoren, die den IGF-I-Spiegel beeinflussen, z.B. das Alter und den Trainingszustand (Chicharro et al., 2001; Consitt et al., 2002; Harridge, 2003; Eliakim et al., 2002). Aus der Literatur ist bekannt, dass IGF-I sowohl in Folge akuter kurzzeitiger Belastung (Bamman et al., 2001; Chicharro et al., 2001; Consitt et al., 2002; Manetta, Brun, Maimoun, Callis, Préfaut & Mercier, 2002) wie auch nach regelmäßigem Ausdauertraining (Anthony et al., 2001; Goldsprink & Yang, 2001; Jenkins, 2001; Lukanova, Toniolo, Akhmedkhanov, Hunt, Rinaldi, Zeleniuch-Jacquotte, Haley, Riboli, Stattin, Lundin & Kaaks, 2001; Consitt et al., 2002; Eliakim et al., 2002; Manetta et al., 2002) und regelmäßigem Krafttraining (Jenkins, 2001) ansteigt. Dagegen nimmt die Konzentration von IGF-I nach Langzeitbelastungen ab (Consitt et al., 2002). Über die Reaktion von IGF-I in intensiven Trainings- und Wett-

kampfphasen sind unterschiedliche Reaktionen bekannt. So zeigten Chicharro et al. (2001) einen Anstieg auf, Eliakim et al. (2002) eine Abnahme.

Im Folgenden sollen exemplarisch für die Vielzahl der Parameter die Zeitreihen des Energieumsatzes in Beziehung zu den endokrinen Parametern Testosteron und IGF-I aufgezeigt werden. Bei P1 gingen für den Energieumsatz 185 Daten, für P2 139 Daten in die Auswertungen ein. Für die endokrinen Parameter wurden bei P1 86 Werte erhoben, bei P2 50 Werte. Die für äquidistante Messungen fehlenden Datenpunkte wurden nach einem Modell von Yue und Mester (2002) berechnet.

Die Zeitreihen werden geglättet (je nach Anwendungsvoraussetzungen mit einem 4253H-Filter oder einem 10-Punkt gleitenden Mittelwert) dargestellt, um die jeweiligen Muster und Langzeittrends der Zeitreihen zu verdeutlichen.

## **2.5 Ergebnisse**

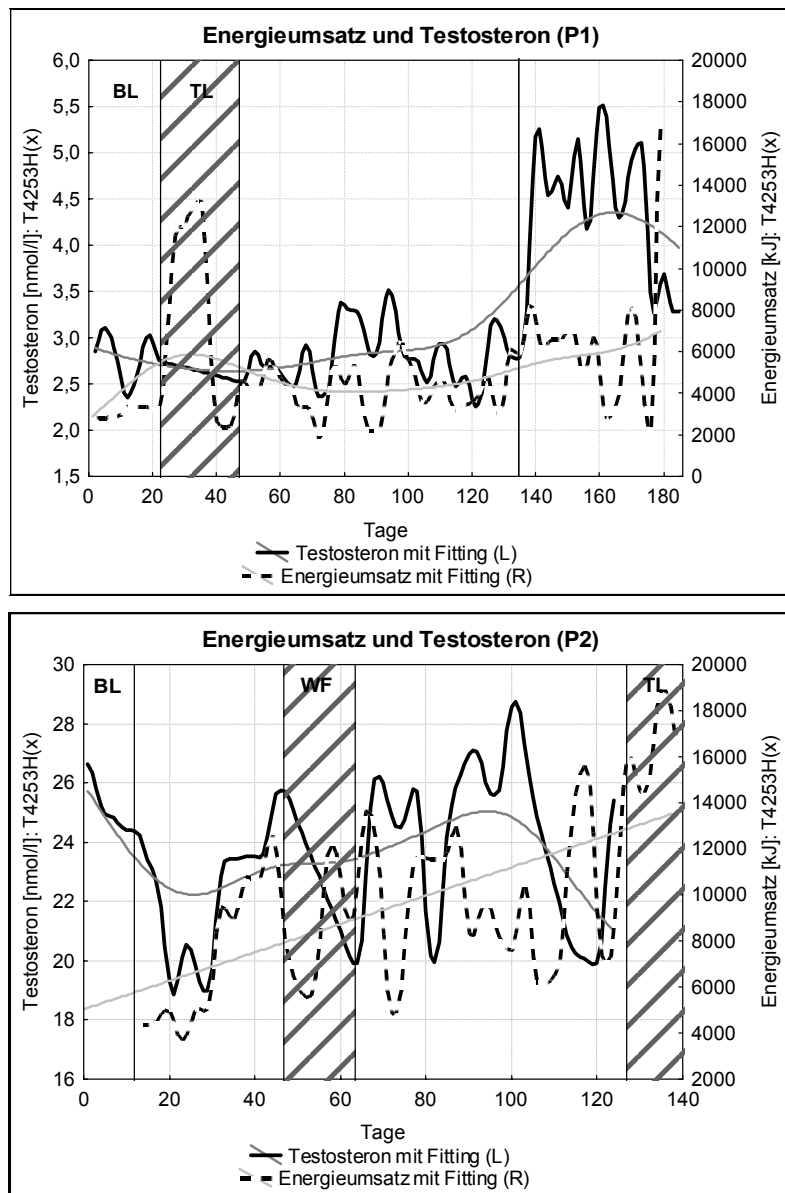
Die Zeitreihen von Testosteron und dem Energieumsatz von P1 und P2 werden in Abbildung 2 gezeigt. Bei P1 sind beide Zeitreihen mit einer distanzgewichteten Kleinste-Quadrate-Glättung dargestellt, bei P2 die Zeitreihe von Testosteron ebenfalls mit einer distanzgewichteten Kleinste-Quadrate-Glättung, die Zeitreihe des Energieumsatzes mit einem linearen Fitting. Diese Fittingverfahren wurden eingesetzt, um die jeweiligen Trends der Zeitreihen aufzuzeigen.

Während der schraffiert gekennzeichneten Phasen (TL = Trainingslager, WF = Weihnachtsferien) wurden bei beiden Probanden keine Blutabnahmen durchgeführt. Die Zeitreihen beginnen jeweils mit der Bestimmung der Baseline (BL).

Bei P1 lassen sich während der gesamten Trainingsphase (TP) von Tag 50-185 zwei verschiedene Phasen unterscheiden, die durch signifikante Mittelwertsunterschiede charakterisiert sind und ex post aufgrund der Werte des Energieumsatzes herausgestellt wurden. In der ersten Phase von Tag 50-135 mit einem relativ geringen Energieumsatz beträgt der Mittelwert der Testosteron-Konzentration  $2,8 \pm 0,5$  nmol/l. Anschließend steigen die Werte von Testosteron innerhalb von nur 7 Tagen von 2,2 nmol/l auf 6,1 nmol/l. Der Testosteronspiegel bleibt für gut 30 Tage auf einem recht hohen Niveau und sinkt erst gegen Ende der Zeitreihe wieder. Der Mittelwert für diese zweite Phase mit sehr hohem Energieumsatz beträgt  $4,2 \pm 1,2$  nmol/l.

Bei P2 ist von Beginn der TP (Tag 15) bis ca. Tag 100 ein Anstieg der Testosteronwerte zu beobachten, die Werte schwanken jedoch sehr stark (siehe Abb. 2). Während der Baseline (Tag 1-14) und mit Einsetzen sehr hoher Trainingsumfänge (ab Tag 110) nehmen die Testosteronwerte tendenziell ab. Der Mittelwert beträgt während der Baseline  $25,1 \pm 1,7$  nmol/l und während der Trainingsphase  $23,7 \pm 3,5$  nmol/l.





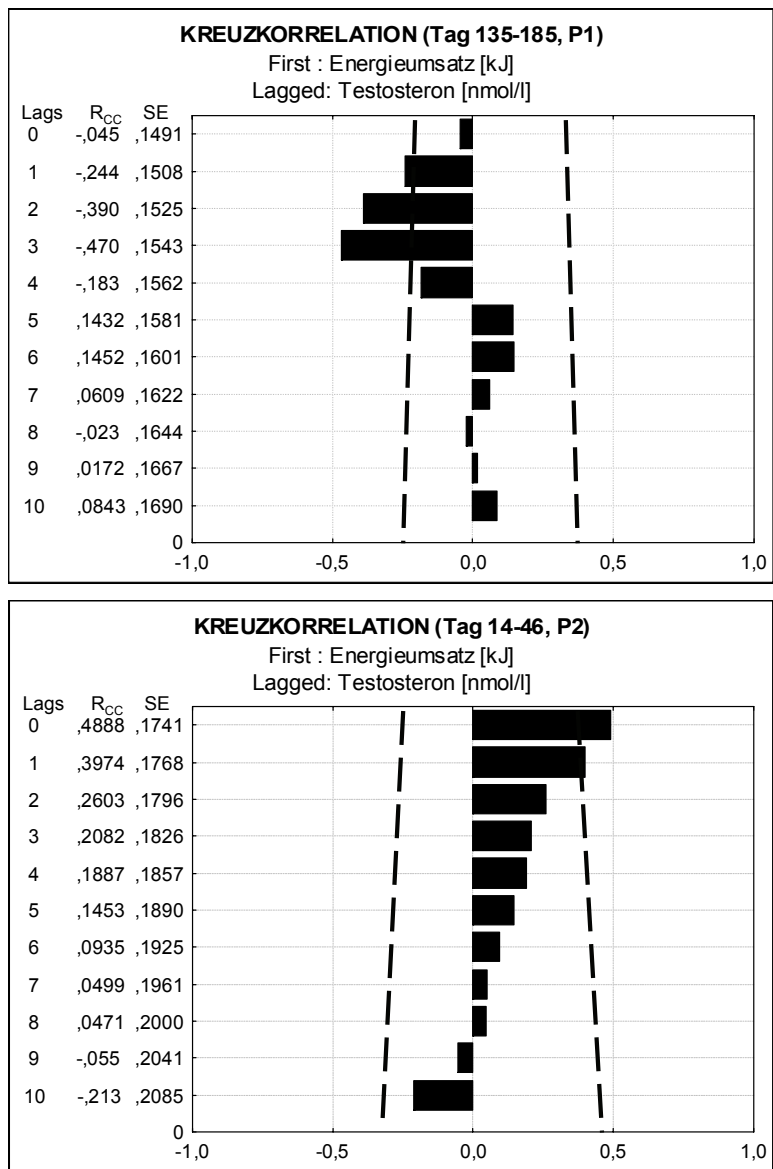
**Abb. 2: Zeitreihen von Energieumsatz und Testosteronkonzentration von Proband 1 (P1) und Proband 2 (P2)**

Abbildung 2 zeigt auch, dass bei P1 der Zusammenhang zwischen Testosteron und dem Energieumsatz je nach TP unterschiedlich ist. In der ersten Phase lässt sich eine inphasische Regulation erkennen, in der zweiten Phase eine leicht zeitversetzte kontraphasische Regulation. Dies wird durch Berechnungen der Kreuzkorrelationen zwischen Energieumsatz und Testosteron bestätigt. So besteht für die gesamte TP

eine positive Korrelation mit signifikanten Lags von 0, 5 und 6. Abbildung 3 zeigt die entsprechende Kreuzkorrelation für die TP mit hohem Energieumsatz (Tag 135-185), in der dagegen eine negative Kreuzkorrelation mit signifikanten Lags von 2 und 3 besteht. Der Kreuzkorrelationskoeffizient beträgt hier für Lag 2  $R_{CC2} = -.390$ , für Lag 3  $R_{CC3} = -.470$ . Bei P2 hingegen ist während der Haupttrainingsphase kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Energieumsatz und Testosteron vorhanden. Dagegen zeigt Abbildung 3 für die Phase geringen Energieumsatzes (Tag 14-46) eine signifikante positive Kreuzkorrelation mit signifikanten Lags von 0 mit  $R_{CC0} = .4888$  und 1 mit  $R_{CC1} = .3974$ .

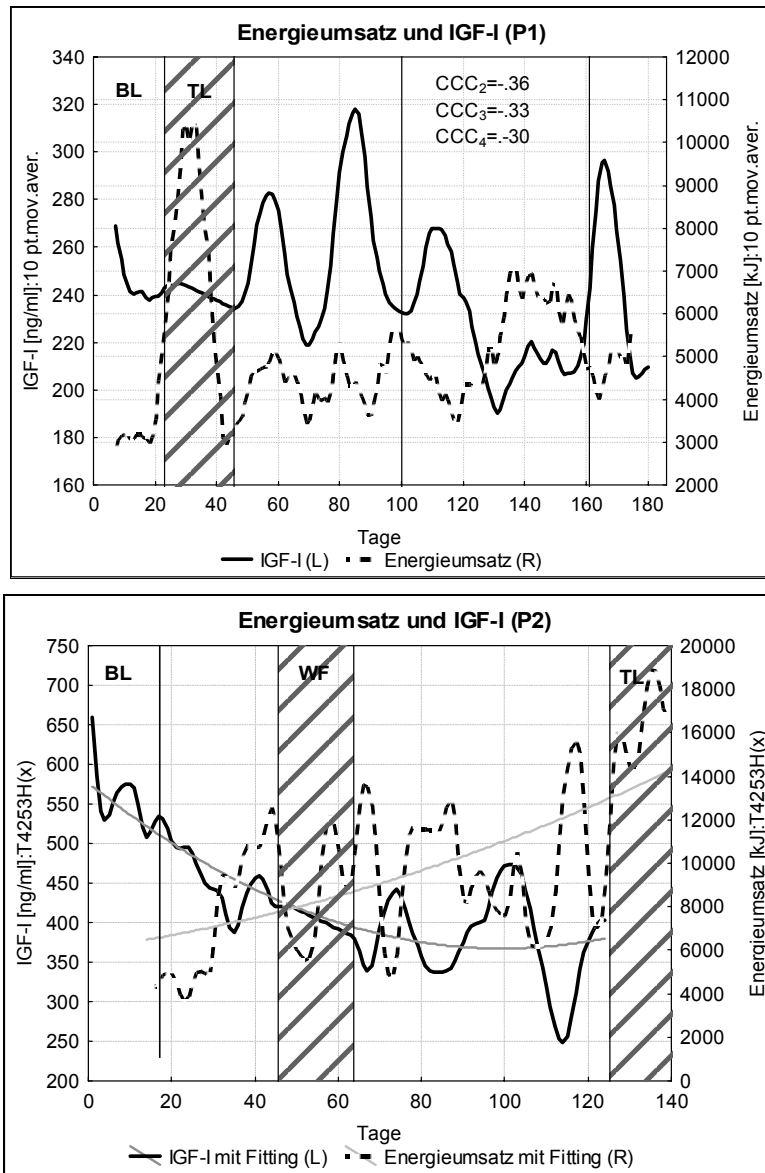
Ein Marker, der ebenfalls auf eine anabole Stoffwechselreaktion hindeutet, ist das IGF-I. In Abbildung 4 sind die Zeitreihen des Energieumsatzes und IGF-I für P1 bzw. P2 (jeweils mit polynomischem Fitting) dargestellt. Diese Abbildung zeigt, dass sich die gesamte TP von P1 (Tag 50-135) ex post in drei verschiedene Perioden mit unterschiedlicher Regulation unterteilen lässt. Die Identifizierung dieser Phasen erfolgte mittels der Technik des Moving Windows (Mester, Perl, Niessen & Hartmann, 2000). Hierbei wird ein Analysefenster über die gesamte Zeitreihe geschoben, so dass ein Vergleich unterschiedlicher Abschnitte einer Zeitreihe bezüglich Trends, Frequenzen und Korrelationen ermöglicht wird.

In der ersten Phase von Tag 50-100 besteht eine inphasische Regulation zwischen Energieumsatz und IGF-I, die dann ab ca. Tag 100 in ein kontraphasisches Muster übergeht, als der Energieumsatz weiter gesteigert wurde. In der dritten Phase, von Tag 160 bis zum Ende der Zeitreihe, die P1 mit der Teilnahme an einem Langdistanz-Triathlon an Tag 180 beendete, stiegen die Werte von IGF-I sprunghaft, als der Energieumsatz im Rahmen des Taperings reduziert wurde. Die Werte sinken dann zum Ende der Zeitreihe hin wieder ab. Nur für die zweite TP, in der der Energieumsatz sehr hoch ist, kann eine signifikante Kreuzkorrelation berechnet werden. Für alle Lags von 0-10 besteht eine negative Korrelation mit signifikanten Lags von 2-7, 9 und 10.



**Abb. 3: Kreuzkorrelationen zwischen Energieumsatz und Testosteronkonzentration von Proband 1 (P1) und Proband 2 (P2) (RCC = Kreuzkorrelationskoeffizient, SE = Standardfehler)**

Bei P2 fällt der entgegengesetzte Trend der Kurven von Energieumsatz und IGF-I auf, der jeweils durch das polynomische Fitting verdeutlicht wird (siehe Abb. 4). Bei zunehmendem Energieumsatz nehmen die IGF-I-Werte ab. Dieser Zusammenhang über die ganze Zeitreihe wird auch von einer negativen Kreuzkorrelation zwischen beiden Parametern mit signifikanten Lags von 0-5 ( $R_{CC0} = -.34$ ) bestätigt.



**Abb. 4:** Zeitreihen von Energieumsatz und Konzentration des IGF-I von Proband 1 (P1) und Proband 2 (P2) (10 pt.mov.aver. = 10-Punkt gleitender Mittelwert)

### 3 Diskussion

Sowohl bei der Probandin wie auch bei dem Probanden liegen die Mittelwerte von Testosteron sowohl während der Baseline als auch in der Trainingsphase über dem entsprechenden Referenzbereich (0-2,1 nmol/l bei Frauen, 5,2-22,9 nmol/l bei Män-

nern). Dieses Ergebnis widerspricht den Aussagen zahlreicher Untersuchungen (Hackney et al., 1988; Keizer et al., 1989; Gullledge & Hackney, 1996; Kjær, 1996; McArdle et al., 1996; Madelenat et al., 1997; Uusitalo, Huttunen, Hanin, Uusitalo & Rusko, 1998; Case, Baer & Subbiah, 1999; Consitt et al., 2002; de Marées, 2002; Fernández-García et al., 2002; Maimoun, Lumbroso, Manetta, Paris, Leroux & Sultan, 2003; Hackney, Szczepanowska & Viru, 2004; Väänänen, 2004; Ishigaki, Koyama, Tsujita, Tanaka, Hori & Oku, 2005), die bei ausdauertrainierten Männern und Frauen erniedrigte Testosteronwerte ermittelten. Bei Frauen kann jedoch ein geringer Körperfettanteil zu einem Anstieg des Testosteronspiegels im Blut führen (Appell & Stang-Voss, 1990). Sowohl bei P1 als auch bei P2 könnte die Körpermasse und damit indirekt der Körperfettanteil ein Grund für die Entwicklung der Testosteronwerte sein, da bei beiden Probanden eine signifikante negative Kreuzkorrelation zwischen Testosteron und Körpermasse ermittelt wurde. Während jeweils die Testosteronwerte im gesamten Trainingsprozess tendenziell ansteigen, nimmt gleichzeitig bei beiden Probanden die Körpermasse ab. Der Verlauf der Werte scheint somit bei beiden Athleten in Zusammenhang mit der Energiebilanz zu stehen. Der plötzliche Anstieg der Testosteronwerte innerhalb einer Woche von ca. 2 auf 6 nmol/l bei P1 (siehe Abb. 2) stimmt zeitlich genau mit dem Beginn der TP mit sehr hohem Energieumsatz überein und könnte auf die anabolen Effekte von Testosteron in Folge von Training hinweisen (Keizer et al., 1989; Wilmore & Costill, 1999; Consitt et al., 2002). Des Weiteren besteht nur in dieser Trainingsphase eine signifikante Kreuzkorrelation zwischen beiden Parametern. Die signifikante negative Kreuzkorrelation (siehe Abb. 3) mit signifikanten Lags von 2 und 3 steht in Übereinstimmung mit der in der Literatur beschriebenen Reaktion in Form einer Abnahme der Testosteronwerte nach Ausdauertraining (siehe 2.4). Bei P2 ist lediglich ein leicht signifikanter Zusammenhang zwischen Energieumsatz und Testosteron für die TP mit geringer Belastung vorhanden (siehe Abb. 3). Die positiven, signifikanten Lags von 0 und 1 könnten ein Zeichen für noch erhöhte Testosteronwerte als akute Reaktion auf Belastung sein.

Ein differenzierteres Bild ergibt sich bei dem als anabolen Marker geltenden IGF-I. Bei P1 lassen sich die drei verschiedenen Phasen mit der jeweiligen Trainingsbelastung und dem entsprechenden anabolen Effekt erklären. Aus der Literatur ist bekannt, dass IGF-I akut bei moderatem Ausdauertraining (Chicharro et al., 2001; Consitt et al., 2002; Manetta et al., 2002) und auch im langfristigen Trainingsprozess (Anthony et al., 2001; Goldsprink & Yang, 2001; Jenkins, 2001; Consitt et al., 2002; Eliakim et al., 2002; Manetta et al., 2002; Manetta, Brun, Maimoun, Fedou, Préfaut & Mercier, 2003) ansteigt. Dies ist in der ersten Trainingsphase (Tag 50-100) der Fall, als die Zeitreihe von IGF-I und die des Energieumsatzes parallel verlaufen. Ab Tag 100 stellt sich diese inphasische Regulation auf eine kontraphasische um, d.h. dass bei niedrigem Energieumsatz hohe IGF-I-Werte vorliegen und umgekehrt. Dieser Zusammenhang wird auch durch eine signifikante positive Kreuzkorrelation zwischen Energieumsatz und IGF-I belegt. Der Peak um Tag 110 von IGF-I kann als zeitversetzter anaboler Effekt auf die Belastungsspitze um Tag 100 gedeutet werden. Als von Tag 130 an die Trainingsbelastung signifikant gesteigert wurde, sinkt IGF-I wieder, möglicherweise als Zeichen einer katabolen Reaktion. Diese Ergebnisse stimmen mit Untersuchungen von Eliakim et al. (2002) überein, die zeigen konnten, dass am Anfang einer intensiven Trainingsphase, unabhängig vom Trainingszustand, der IGF-

I-Spiegel sinkt. In der letzten Phase, der Taperingphase vor dem Langdistanz-Triathlon, ist ein anaboler Peak von IGF-I zu sehen, der vermutlich zeitversetzt auf die hohen Belastungen von Tag 135-155 zurückzuführen ist und der sich jetzt in der Phase der Belastungsreduktion anabol auswirkt. Möglicherweise begann das Tapering etwas zu früh, da der starke Anstieg von IGF-I schon um Tag 165 zu beobachten ist und die Werte zum Wettkampf an Tag 180 wieder abnehmen.

Diese Ergebnisse von P1 zeigen für die Trainingspraxis, dass anabole Prozesse meist nur in Phasen verminderter Belastungen ablaufen können und somit für eine optimale Wettkampfleistung eine frühzeitige Reduktion des Trainings nötig zu sein scheint. Wie stark und zu welchem Zeitpunkt die Trainingsbelastung herabgesetzt werden sollte, kann jedoch individuell sehr unterschiedlich sein und sollte am jeweiligen Athleten/an der jeweiligen Athletin mittels Zeitreihentechniken analysiert werden. Zudem muss darauf hingewiesen werden, dass diese Ergebnisse und Ableitungen für die Trainingsgestaltung auch intraindividuell variieren können und auch nur für die untersuchten Parameter gelten.

Ein ähnlicher Effekt tritt auch bei P2 bezüglich IGF-I auf. Hier ist über die ganze Zeitreihe tendenziell eine Abnahme der Werte bei gleichzeitiger Zunahme der Belastung zu sehen (siehe Abb. 4). Diesen entgegengesetzten Zusammenhang belegt auch eine negative Kreuzkorrelation zwischen Energieumsatz und IGF-I mit signifikanten Lags von 0-5 ( $R_{CC0} = -.34$ ). Dies könnte bedeuten, dass P2, vor allem in der zweiten Hälfte der Studie, mit zu großen Belastungsumfängen und -intensitäten trainiert hat. So sinken in Phasen von Überbelastung oder Übertraining die IGF-I-Werte (Eliakim et al., 2002; Steinacker, Lormes, Reissnecker & Liu, 2004). Diese Annahme der zu hohen Trainingsbelastung wird auch durch einen abnehmenden Testosteron-Kortisol-Quotienten in dieser Trainingsphase bestätigt.

Es war zu erwarten, dass ab einer bestimmten Belastungshöhe die Stoffwechselprozesse von katabol in anabol umschlagen. Es war auch zu erwarten, dass diese Belastungshöhe individuell sehr unterschiedlich ist. Mit Zeitreihentechniken ist es jedoch möglich, diesen Prozess noch weiter aufzudecken. So sind die Tatsache der inphasischen Regulation auf niedrigen und mittleren Belastungshöhen und die Umkehr in gegenphasische Regulationen auch innerhalb ein und desselben Individuums unterschiedlich. So weisen gleichsinnige und synchronisierte Variationen der Trainingsbelastung (Energieumsatz) und des jeweiligen Markers (z.B. IGF-I) auf eine kompensierte Trainingsbelastung hin, die in der vorliegenden Studie noch eine Erholung innerhalb der Zyklisierung in der Trainingsperiode ermöglicht. Bei höheren Belastungen treten eine Desynchronisierung und eine gegensinnige Variation zwischen Belastung und Belastungsantwort auf, was darauf hindeutet, dass der Organismus einen größeren Zeitbedarf für die Regeneration aufweist. Die gewünschten anabolen Effekte treten erst bei einer Reduktion der Trainingsbelastung mit einer Zeitverzögerung von einigen Tagen ein. Wird jedoch die Trainingsbelastung zum Zwecke der Regeneration nicht vermindert, so kann es zu einer nicht-funktionalen Überbelastung oder sogar zum Übertrainingssyndrom kommen, da das für ein erfolgreiches Training nötige Gleichgewicht von Training und Erholung nicht eingehalten wurde (Meeusen, Duclos, Gleeson, Rietjens, Steinacker & Urhausen, 2006).

## 4 Anwendung in der Trainingspraxis

Aus Kosten- und Organisationsgründen kann naturgemäß in der Trainingspraxis nur eine begrenzte Anzahl von Messungen mit einer geringen Zahl an Parametern kontinuierlich eingesetzt werden. Andererseits ist aber aus Gründen der Abtastgesetzmäßigkeiten eine Zahl von Messungen anzustreben, die die Periodik der Belastungs- und Regenerationsvorgänge möglichst real wiedergibt. Wie unten gezeigt wird, können auch relativ einfach zu bestimmende Parameter wichtige Informationen über die Belastungs- und Erholungssituation enthalten.

Vor diesem Hintergrund sieht das Konzept eine Einteilung der Methoden und Parameter in unterschiedliche Ebenen vor, um für die Trainingspraxis und die wissenschaftliche Diagnostik eine Systematik zu haben (siehe Abb. 5). Dies erfolgt unabhängig vom explorativen Charakter des Gesamtkonzepts der Zeitreihenstudie.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass alle im Modell der diagnostischen Ebenen dargestellten Parameter auch in der Zeitreihenstudie bestimmt (siehe Tab. 2) und statistisch ausgewertet wurden. Aufgrund der Vielzahl der Parameter kann im Folgenden allerdings nur exemplarisch auf einzelne Ergebnisse, d.h. Reaktionen auf die Trainingsbelastung (Energieumsatz), hingewiesen werden.

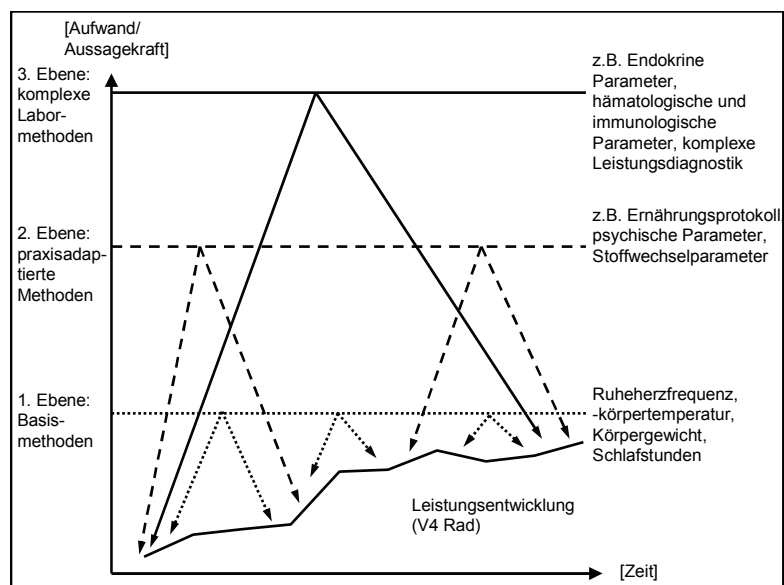


Abb. 5: Diagnostische Ebenen (V4 = anaerobe Schwelle)

Die in der untersten, auf der ersten Ebene dargestellten Parameter sind sehr einfach zu messen. Hierzu zählen Ruheherzfrequenz, -körpertemperatur, Körpermasse und Schlafstunden. Da die Bestimmung dieser Parameter mit nur geringem Aufwand verbunden ist, können sie in kurzen Zeitabständen, z.B. täglich, gemessen werden.

Aufgrund der häufigen Messungen können hier Informationen erzielt werden, die auf den anderen Ebenen in dieser zeitlichen Dichte nicht möglich sind. So zeigte sich z.B. in der Zeitreihenstudie bei P1 während des 14-tägigen Trainingslagers eine fast kontinuierliche Abnahme der Ruheherzfrequenz um 12 S/min von 61 S/min auf 49 S/min bei einem durchschnittlichen Energieumsatz von annähernd 10000 kJ/Tag (gegenüber ca. 5000 kJ/Tag während der sonstigen Trainingsphase). Darüber hinaus konnte bei Betrachtung der Einzelwerte der Ruheherzfrequenz in Relation zum Energieumsatz gezeigt werden, dass am Morgen nach fast vollständigen Ruhetagen die Ruheherzfrequenz niedriger als am Morgen des Ruhetags selbst war, was einen deutlichen Hinweis auf die parasympathische Funktionslage des Nervensystems nach Erholung gibt.

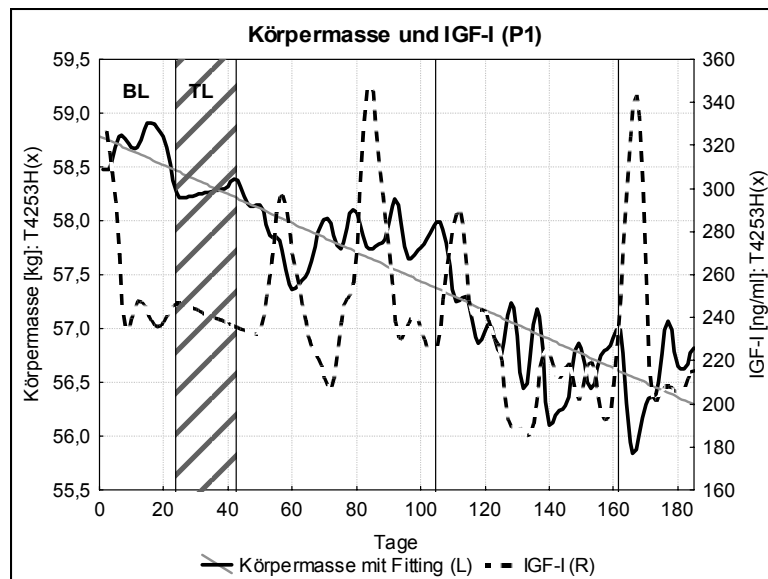
In der zweiten Ebene sind mit Ernährungsprotokollen, psychischen Parametern und Stoffwechselfparametern Beispiele für praxisadaptierte Methoden von Diagnostik gegeben. Die Analyse dieser Parameter ist aufwändiger als in der 1. Ebene, aber auch die Aussagekraft bezüglich des Belastungsstands eines Athleten/einer Athletin ist höher. Beispielsweise lässt die Analyse des subjektiven körperlichen Zustandes Rückschlüsse auf den aktuellen Belastungszustand eines Athleten/einer Athletin zu. So konnte bei P2 ein Zusammenhang zwischen dem Energieumsatz und subjektiv empfundenen Symptomen körperlicher Überbelastung (hier die Dimension „Beschwerden“) nachgewiesen werden, während für P1 eine signifikante positive Kreuzkorrelation ( $R_{CC0} = .56$ ) zwischen „Beschwerden“ und dem Parameter Creatinkinase, der auf hohe muskuläre Belastungen hinweist, bestand.

In der obersten, der dritten Ebene des diagnostischen Modells sind die Parameter mit dem größten Analyseaufwand und der gleichzeitig höchsten Differenzierungsfähigkeit dargestellt. Hierzu zählen endokrine Parameter, hämatologische und immunologische Parameter sowie komplexe Leistungsdiagnostiken. Während einige endokrine Parameter, wie z.B. Testosteron und IGF-I, in der vorliegenden Zeitreihenstudie Hinweise auf den aktuellen anabolen oder katabolen Funktionszustand auf Zellebene liefern, zeigen die komplexen Leistungsdiagnostiken die tatsächliche Leistungsfähigkeit eines Athleten/einer Athletin.

Für eine optimale, individuelle Trainingssteuerung ist es nötig, diese drei Ebenen mit unterschiedlichem Aussagegehalt und Aufwand zu kombinieren. Die Häufigkeit der Messungen nimmt von Ebene 1 bis Ebene 3 ab. Eine alleinige Analyse von Parametern der 1. Ebene kann keine direkte Aussage über den Leistungszustand eines Athleten/einer Athletin liefern, kann jedoch, vor allem bei täglichen Messungen, auf mögliche Veränderungen hinweisen. So zeigt in der vorliegenden Studie die Zeitreihe der Körpermasse von P1 (mit linearem Fitting, siehe Abb. 6) während des gesamten Untersuchungszeitraums eine lineare Abnahme. Die deutlichste Körpermassenreduktion ist im Zeitraum von Tag 107 (58,2 kg) bis Tag 165 (55,4 kg) zu erkennen. Diese Tatsache allein macht noch keine Aussage bezüglich des Trainingszustandes, da eine derartige Massenabnahme auch auf Flüssigkeitsverlust oder Fettabbau zurückgeführt werden könnte. Die Kombination dieses Parameters der 1. Ebene mit einem Parameter der 3. Ebene, hier IGF-I, lässt jedoch ganz andere Rückschlüsse zu. So zeigt Abbildung 6, dass parallel zu dieser deutlichen Körpermassenabnahme von P1 auch die Werte von IGF-I rapide abfallen. Die Körpermassenabnahme sollte hier



also als negative Energiebilanz gedeutet werden, die in dieser Trainingsphase mit sehr hohem Energieumsatz (siehe Abb. 4) zu katabolen Prozessen und somit zu einer Form von Überbelastung führt. Diese Annahme wird darüber hinaus durch eine leicht signifikante negative Kreuzkorrelation zwischen Energieumsatz und Körpermasse ( $R_{CC0} = .21$ ) bestätigt.



**Abb. 6: Zeitreihen von Körpermasse und IGF-I von Proband 1 (P1)**

Dieses Beispiel veranschaulicht, dass eine gleichzeitige Bestimmung von Parametern unterschiedlicher Ebenen in regelmäßigen Zeitabständen (z.B. monatlich) eine, im Vergleich zu traditionellen Ansätzen in der Leistungsdiagnostik, bessere Analyse physiologischer Veränderungen und Zusammenhänge im Zeitverlauf und somit mögliche Erklärungen für Leistungsentwicklungen bietet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Einzelfall-Zeitreihenanalysen durchaus geeignet sind, um individuelle Trends, zeitversetzte Effekte und Zusammenhänge zwischen Parametern zur Analyse von Belastung und Erholung, Reaktion und Adaptation in Folge von Trainingsbelastungen zu untersuchen und dann in der Folge auch besser zu steuern. Des Weiteren haben die Ergebnisse gezeigt, dass auch solche Parameter (z.B. IGF-I) identifizierbar sind, die interindividuell, wenn auch auf unterschiedlichem Niveau, annähernd identische Reaktionen auf Belastung und Erholung zeigen. Bei einer gezielten Verwendung derartiger Diagnostiken steigt die Wahrscheinlichkeit, dass bessere individuelle Konzepte für die Belastungssteuerung umgesetzt werden können. Neben traditionellen, stichprobenbasierten Ansätzen in der Trainingsforschung können Einzelfall-Zeitreihenanalysen hier einen wichtigen Beitrag leisten. Die Stärke dieser Methode liegt im Erstellen eines individuellen

„Fingerabdrucks“ für den einzelnen Athleten/die einzelne Athletin und die darauf aufbauende Periodisierung von Belastung und Erholung. Nur die Kenntnis über individuelle Anpassungserscheinungen ermöglicht im Hochleistungssport das Erreichen der individuell optimalen Leistungsfähigkeit.

## Literatur

- Ahmadi, S., Sinclair, P., Foroughi, N., & Davis, G.M. (2006). Electromyographic activity in biceps brachii after eccentric exercise-induced muscle soreness. In H. Hoppeler, T. Reilly, E. Tsolakidis, L. Gfeller, & S. Klossner (Hrsg.), *Book of Abstracts of the 11<sup>th</sup> Annual Congress of the European College of Sport Science – 5-8 July 2006 Lausanne-Switzerland* (S. 569). Cologne: Sportverlag Strauß.
- Anthony, T. G., Anthony, J. C., Lewitt, M. S., Donovan, S. M., & Layman, D. K. (2001). Time course changes in IGFBP-1 after treadmill exercise and postexercise food intake in rats. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, *280*, E650-E656.
- Appell, H.-J. & Stang-Voss, C. (1990). *Funktionelle Anatomie. Grundlagen sportlicher Leistung und Bewegung*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Arena, B., & Maffulli, N. (1998). Endocrinological changes in exercising women. *Sports Exercise and Injury*, *4*, 194-198.
- Bamman, M. M., Shipp, J. R., Jiang, J., Gower, B. A., Hunter, G. R., Goodman, A., McLafferty, C. L. Jr., & Randall, J. U. (2001). Mechanical load increases muscle IGF-I and androgen receptor mRNA concentrations in humans. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, *280*, E383-E390.
- Bonen, A., Haynes, F. W., & Graham, T. E. (1991). Substrate and hormonal responses to exercise in women using oral contraceptives. *J Appl Physiol*, *70* (5), 1917-1927.
- Case, D., Baer, J. T., & Subbiah, M. T. R. (1999). The effect of prolonged exercise on lipid peroxidation in eumenorrhic female runners. *Med Sci Sports Exerc*, *31*, 1390-1393.
- Chicharro, J. L., López-Calderon, A., Hoyos, J., Martín-Velasco, A. I., Villa, G., Villanúa, M. A., & Lucía, A. (2001). Effects of an endurance cycling competition on resting serum insulin-like growth factor I (IGF-I) and its binding proteins IGFBP-1 and IGFBP-3. *Br J Sports Med*, *35*, 303-307.
- Consitt, L. A., Copeland, J. L., & Tremblay, M. S. (2002). Endogenous anabolic hormone responses to endurance versus resistance exercise and training in women. *Sports Med*, *32*, 1-22.
- Copeland, J. L., Consitt, L. A., & Tremblay, M. S. (2002). Hormonal responses to endurance and resistance exercise in females aged 19-69 years. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, *57*, B158-B165.
- Di Michele, R., & Merni, F. (2006). Prediction of heart rate variability from training load time series. In H. Hoppeler, T. Reilly, E. Tsolakidis, L. Gfeller, & S. Klossner (Hrsg.), *Book of Abstracts of the 11<sup>th</sup> Annual Congress of the European College of Sport Science – 5-8 July 2006 Lausanne-Switzerland* (S. 87). Cologne: Sportverlag Strauß.
- di Prampero, P. E. (1986). The Energy of Human Locomotion on Land and in Water. *Int J Sports Med*, *7*, 55-70.
- Eliakim, A., Nemet, D., Bar-Sela, S., Higer, Y., & Falk, B. (2002). Changes in Circulating IGF-I and their Correlation with Self-Assessment and Fitness Among Elite Athletes. *Int J Sports Med*, *23*, 600-603.

- Fernández-García, B., Lucía, A., Hoyos, J., Chicharro, J. L., Rodríguez-Alonso, M., Bandrés, F., & Terrados, N. (2002). The Response of Sexual and Stress Hormones of Male Pro-Cyclists During Continuous Intense Competition. *Int J Sports Med*, *53*, 555-560.
- Goldsprink, G., & Yang, S.Y. (2001). Effects of Activity on Growth Factor Expression. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, *11*, S21-S27.
- Gulledge, T. P., & Hackney, A. C. (1996). Reproducibility of low resting testosterone concentrations in endurance trained men. *Eur J Appl Physiol*, *73*, 582-583.
- Hackney, A. C., Sinning, W. E., & Bruot, B. C. (1988). Reproductive hormonal profiles of endurance-trained and untrained males. *Med Sci Sports Exerc*, *20* (1), 60-65.
- Hackney, A. C., Szczepanowska, E., & Viru, A. M. (2004). Basal testicular testosterone production in endurance-trained men is suppressed. *Eur J Appl Physiol*, *89* (2), 198-201.
- Harridge, S. D. R. (2003). Ageing and local growth factors in muscle. *Scand J Med Sci Sports*, *13*, 34-39.
- Hermida, R. C., Fernandez, J. R., Alonso, I., Ayala, D. E., & Garcia, L. (1997). Computation of time-specified tolerance intervals for hybrid time series with nonequidistant sampling, illustrated for plasma growth hormone. *Chronobiol Int*, *14* (4), 409-425.
- Ishigaki, T., Koyama, K., Tsujita, J., Tanaka, N., Hori, S., & Oku, Y. (2005). Plasma leptin levels of elite endurance runners after heavy endurance training. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, *24* (6), 573-578.
- Ivanov, P. C., Rosenblum, M. G., Peng, C. K., Mietus, J., Havlin, S., Stanley, H. E., & Goldberger, A. L. (1996). Scaling behaviour of heartbeat intervals obtained by wavelet-based time-series analysis. *Nature*, *26*, 323-327.
- Jenkins, P. J. (2001). Growth Hormone and exercise: physiology, use and abuse. *Growth Horm IGF Res*, (Supplement A), S71-S77.
- Keizer, H. A., Beckers, E., de Haan, J., Janssen, G. M. E., Kuipers, H., van Kranenburg, G., & Guerten, P. (1987). Exercise-Induced Changes in the Percentage of Free Testosterone and Estradiol in Trained and Untrained Women. *Int J Sports Med*, *8*, S151-S153.
- Keizer, H., Janssen, G. M. E., Menheere, P., & Kranenburg, G. (1989). Changes in Basal Plasma Testosterone, Cortisol, and Dehydroepiandrosterone Sulfate in Previously Untrained Males and Females Preparing for a Marathon. *Int J Sports Med*, *10*, S139-S145.
- Kjær, K. (1996). Hormonelle und metabolische Regulation während körperlicher Arbeit und in der Regenerationsphase nach Trainings- und Wettkampfbelastungen. *Dtsch Z Sportmed*, *47* (Sonderheft), 211-215.
- Kleinert, J. & Liesenfeld, M. (2001). Dimensionen der erlebten körperlichen Verfassung (EKV). In J. R. Nitsch & H. Allmer (Hrsg.), *Denken, Sprechen, Bewegen*. (Bericht über die 32. Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Sportpsychologie vom 1. bis 3. Juni 2000 in Köln). Köln: bps-Verlag.
- Lukanova, A., Toniolo, P., Akhmedkhanov, A., Hunt, K., Rinaldi, S., Zeleniuch-Jacquotte, A., Haley, N. J., Riboli, E., Stattin, P., Lundin, E., & Kaaks, R. (2001). A cross-sectional study of IGF-I determinants in women. *Eur J Cancer Prev*, *10*, 443-452.
- Maas, S. & Mester, J. (1996). Diagnosis of individual physiological response in elite sport by means of time-series-analyses. In P. Marconnet et al. (Hrsg.), *Frontiers in Sport Science. The European Perspective* (S. 98-99). Nice: University of Nice.
- Madelenat, P., Chuong, T., Driguez, P., & Belaisch, J. (1997). La femme sportive: trop ou pas assez d'androgènes? *Science & Sports*, *12*, 46-50.
- Madsen, Ö. (1982). *Untersuchungen über Einflussgrößen auf Parameter des Energiestoffwechsels beim freien Kraulschwimmen*. Dissertation, Deutsche Sporthochschule Köln.

- Maimoun, L., Lombroso, S., Manetta, J., Paris, F., Leroux, J. L., & Sultan, C. (2003). Testosterone is significantly reduced in endurance athletes without impact on bone mineral density. *Horm Res*, 59 (6), 285-292.
- Manetta, J., Brun, J. F., Maimoun, L., Callis, A., Préfaut, C., & Mercier, J. (2002). Effect of training on the GH/IGF-I axis during exercise in middle-aged men: relationship to glucose homeostasis. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 283, E929-E936.
- Manetta, J., Brun, J. F., Maimoun, L., Fedou, C., Préfaut, C., & Mercier, J. (2003). The effects of intensive training on insulin-like growth factor I (IGF-I) and IGF binding proteins 1 and 3 in competitive cyclists: relationships with glucose disposal. *J Sports Sci*, 21 (3), 147-154.
- Marées, H. de (2002). *Sportphysiologie*. Köln: Sport und Buch Strauß.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (1996). *Exercise physiology: energy, nutrition, and human performance*. Baltimore (u.a.): Williams & Wilkins.
- Meeusen, R., Duclos, M., Gleeson, M., Rietjens, G., Steinacker, J., & Urhausen, A. (2006). Consensus statement on overtraining syndrome. In H. Hoppeler, T. Reilly, E. Tsolakidis, L. Gfeller, & S. Klossner (Hrsg.), *Book of Abstracts of the 11th Annual Congress of the European College of Sport Science - 5-8 July 2006 Lausanne-Switzerland* (S. 453-454). Köln: Sportverlag Strauß.
- Mester, J. (1998). Biological response to training load from a time course perspective. In A. J. Sargeant & H. Siddons (Hrsg.), *From Community Health To Elite Sport. Proceedings of the 3rd Annual Congress of the European College of Sport Science* (S. 55). Liverpool.
- Mester, J. & Perl, J. (2000). Grenzen der Anpassungs- und Leistungsfähigkeit aus systemischer Sicht. *Leistungssport*, 1, 43-51.
- Mester, J., Perl, J., Niessen, M., & Hartmann, U. (2000). Time Series Analyses and Metamodels for Analyses of Physiological Adaptation. In J. Avela, P.V. Komi, & J. Komulainen (Hrsg.), *Proceedings of the 5th Annual Congress of the European College of Sport Science* (S. 75). Jyväskylä.
- Normolle, D. P., & Brown, M. B. (1994). Identification of aperiodic seasonality in non-Gaussian time series. *Biometrics*, 50 (3), 798-812.
- Pschyrembel, W. (1986). *Medizinisches Wörterbuch*. Berlin (u.a.): de Gruyter.
- Roux, W. (1895). *Über Entwicklungsmechanik der Organismen. Heft I. Die Entwicklungsmechanik, ein neuer Zweig der biologischen Wissenschaft*. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann.
- Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2000). *Time series analysis and its applications*. New York: Springer.
- Steinacker, J. M., Lormes, W., Reissnecker, S., & Liu, Y. (2004). New aspects of the hormone and cytokine response to training. *Eur J Appl Physiol*, 91 (4), 382-391.
- Suhr, F., Yue, Z., de Marées, M., Achtzehn, S., & Mester, J. (2006). Time series of endocrine parameters indicate desynchronization of biological response in high training load situations. In H. Hoppeler, T. Reilly, E. Tsolakidis, L. Gfeller, & S. Klossner (Hrsg.), *Book of Abstracts of the 11th Annual Congress of the European College of Sport Science - 5-8 July 2006 Lausanne-Switzerland* (S. 82). Köln: Sportverlag Strauß.
- Uusitalo, A. L. T., Huttunen, P., Hanin, Y., Uusitalo, A. J., & Rusko, H. K. (1998). Hormonal Responses to Endurance Training and Overtraining in Female Athletes. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 8, 178-186.
- Väänänen, I. (2004). Physiological responses and mood states after daily repeated prolonged exercise. *Journal of Sports Science & Medicine*, 3 (Suppl. 6), 1-43.

- Van Steenis, H. G., & Tulen, J. H. (1996). The exponential distribution applied to nonequidistantly sampled cardiovascular time series. *Comput Biomed Res*, 29 (3), 174-193.
- Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (1999). *Physiology of sport and exercise*. Champaign: Human Kinetics.
- Yue, Z., & Mester, J. (2002). On the treatment of data missing time series in sport science. In M. Koskolou, N. Geladas, & V. Klissouras (Hrsg.), *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Annual Congress of the European College of Sport Science, Athens, Greece, 24-28 July, 2002* (P623). Athens: Pashalidis Medical Publisher.