



Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
Institut für Sportwissenschaft

K. Hottenrott (Hrsg.)

Abstracts zu den Vorträgen

3. Int. Symposium

Herzfrequenzvariabilität: Methoden und Anwendungen in Sport und Medizin

5. November 2005 in Halle (Saale)

Tagungsort:

Audimax der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Universitätsplatz)

Veranstalter:

Institut für Sportwissenschaft
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Polar Electro GmbH Deutschland

POLAR®
LISTEN TO YOUR BODY

Herzfrequenzvariabilität: Methoden und Anwendungen in Sport und Medizin

Die spezifischen Rahmenbedingungen der sportlichen und therapeutischen Anwendungsfelder Herzfrequenzvariabilität erfordern eine besondere methodische Sorgfalt der Erfassung und Analyse, um eine bedeutsame Interpretation für Trainer, Athlet, Arzt und Patient gewährleisten zu können. Das 3. Internationale Symposium zur Herzfrequenzvariabilität setzt deshalb die Schwerpunkte auf Analysemethoden der Herzfrequenzvariabilität mittels linearer und nicht-linearer Verfahren sowie deren spezielle Anwendungen im Sport und in der Therapie.

Im Rahmen von vier Hauptvorträgen und 18 Kurzvorträgen werden die state-of-the-art Analysemethoden und deren physiologische Hintergründe intensiv beleuchtet und anhand von aktuellen Studien aus den Anwendungsbereichen des Sports und der Therapie praxisnah diskutiert. Das wissenschaftliche Programm gliedert sich in drei Themenbereiche.

- Anwendung der Herzfrequenzvariabilität im Sport
- Methoden zur Analyse der Herzfrequenzvariabilität
- Anwendung der Herzfrequenzvariabilität in der Therapie

Anschließend an die Vorträge werden zwei Workshops angeboten, welche die vielfältigen Anwendungsbezüge der Herzfrequenzvariabilität für das sportliche Anwendungsfeld thematisieren und Möglichkeiten des praktischen Einsatzes von Herzfrequenz-Messgeräten aufzeigen.

Alle eingereichten Kurzvorträge sind im folgenden Abstractheft abgedruckt. Die Reihenfolge orientiert sich am zeitlichen Ablauf der Vorträge. Nicht enthalten sind die Abstracts zu den Hauptvorträgen des Symposiums:

Herzfrequenzvariabilität - etablierte Indikationen und neue Ansätze in der Medizin

Prof. Dr. med. Karl Werdan (Universitätsklinikum und Poliklinik für Innere Medizin III, Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg)

Autonome Funktion und kardiale Funktionsgrößen bei Lagewechsel und simulierter Schwerelosigkeit

Prof. Dr. med. Herbert Löllgen (Klinikum Remscheid GmbH, ALK der Ruhruniversität Bochum)

HRV – Analyse mittels nicht linearen Methoden: Grundlagen, Restriktionen und Anwendungen

PD Dr. med. Hans Dieter Esperer (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)

Alle Haupt- und Kurzvorträge werden anschließend in einer ausführlichen Fassung in einem Symposiumsband in den Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaften (Czwalina Verlag) veröffentlicht.

Wir danken allen, die zu diesem interessanten Programm des Symposiums beigetragen haben.

Halle (Saale) im November 2005

Prof. Dr. phil. Kuno Hottenrott

(Direktor: Institut für Sportwissenschaft)

Spektralanalyse der Herzfrequenzvariabilität (HRV) im Sport - Grundlagen, Restriktionen und Anwendungen

Hoos, O., Philipps-Universität Marburg, Institut für Sportwissenschaft und Motologie, Bereich Sportmedizin

Die Spektralanalyse der Herzfrequenzvariabilität (HRV) gilt seit Akselrod et al. (1981) als nicht-invasive quantitative Messgröße des autonomen Nervensystems (ANS) und der Funktionalität kardiovaskulärer Regelkreise und findet seither vielfältig Anwendung im Rahmen medizinischer und psychophysiologischer Fragestellungen (Jorna 1992, Task Force 1996, Berntson et al. 1997).

Die Spektralanalyse der HRV ist zunehmend auch in den Blickpunkt des wissenschaftlichen Interesses von Sportmedizin und Trainingswissenschaft gerückt. Nicht nur grundsätzliche Veränderungen des HRV-Spektrums während körperlicher Belastung sind dabei von wissenschaftlichem Interesse; es werden auch spektrale Größen der HRV genutzt, um kurz-, mittel- und langfristige Auswirkungen sportlichen Trainings auf das ANS zu quantifizieren, Wechselwirkungen zwischen Ermüdung, Übertraining, Höhentraining und ANS zu analysieren, sowie eine HRV-gestützte Stratifizierung unterschiedlicher Leistungsgruppen und eine Bestimmung leistungsrelevanter Schwellwerte vorzunehmen (Berbalk & Bauer 2001, Hottenrott 2002, Achten & Jeukendrup 2003, Aubert et al. 2003, Perini & Veicsteinas 2003).

Ein korrektes, physiologisch bedeutsames Frequenzspektrum der HRV ist jedoch nur kalkulierbar, wenn für die traditionellen Spektralanalyseverfahren der nicht-parametrischen Fast-Fourier-Transformation (FFT) und der parametrischen autoregressiven Modellierung (AR) strenge methodische Vorgaben eingehalten werden, die Restriktionen in Bezug auf Datenerfassung, -analyse und -interpretation bedingen (Casadei et al. 1995, Task Force 1996, Camman & Michel 2002) und aus dem Blickwinkel von Sportmedizin und Trainingswissenschaft besonderer Aufmerksamkeit bedürfen. In diesem Kontext haben insbesondere Signalstationarität, Detrending und Resampling der Rohdaten (Daskalov & Christov 1997, Laguna et al. 1998, Tarvainen et al. 2001, Friedman et al. 2002, Singh et al. 2004), die Messgenauigkeit der Rohdatenerfassung im Verhältnis zur Gesamtvariabilität (Merri et al. 1990, Pinna et al. 1994, Hilton et al. 1997, Kingsley et al. 2005) sowie die mathematisch-technischen Spezifikationen der spektralanalytischen Verfahren (Fagard et al. 1997, Boardman et al. 2002) wesentlichen Einfluss auf das resultierende HRV-Spektrum und erschweren zum Teil die Interpretierbarkeit und Vergleichbarkeit von Studienergebnissen.

Innovationen im Bereich der Spektralanalyse der HRV bieten Lösungsmöglichkeiten für manche der genannten Probleme der traditionellen Verfahren und ermöglichen zum Teil eine zeitkontinuierliche Betrachtung des HRV-Spektrums (Yamamoto & Hughson 1991, Laguna et al. 1998, Cerutti et al. 2001). Die zeitkontinuierlichen Verfahren besitzen durch eine instantane Frequenzbestimmung und eine kontinuierliche Frequenz-Zeit-Darstellung einen additiven Informationsgehalt (Akselrod et al. 2001, Mainardi et al. 2002), der insbesondere auch für den sportmedizinisch-trainingswissenschaftlichen Forschungsbereich bedeutsam erscheint (Bartels et al. 2004). Die kontinuierliche Wavelet-Transformation (CWT) ist in diesem Zusammenhang als besonderes Verfahren herauszustellen, da sie eine verbesserte und bereichsspezifisch adjustierbare Frequenzauflösung erlaubt (Stefanovska & Bracic 1999, Bracic-Lotric et al. 2000, Addison 2005) und somit ein gut lokalisiertes, zeitkontinuierliches Monitoring des HRV-Spektrums im Kontext von sportlicher Belastung und Erholung ermöglichen kann.

Literatur:

- ACHTEN J, JEUKENDRUP A.E (2003). Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports Medicine* 33(7), 517-38
- ADDISON P.S (2005). Wavelet transforms and the ECG: a review. *Physiological Measurement* 26(5), R155-R199
- AKSELROD S, GORDON D, UBEL FA, SHANNON D.C, COHEN R.C (1981). Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science* 213(4504), 220-222
- AKSELROD S, BARAK Y, BEN-DOV Y, KESELBRENER L, BAHARAV A (2001). Estimation of autonomic response based on individually determined time axis. *Autonomic Neuroscience* 90(1-2), 13-23
- AUBERT A.E, SEPS B, BECKERS F (2003). Heart rate variability in athletes. *Sports Medicine* 33(12), 889-919
- BARTELS M.N, JELIC S, NGAI P, GATES G, NEWANDEE D, REISMAN S.S, BASNER R.C, DE MEERSMAN R.E (2004). The effect of ventilation on spectral analysis of heart rate and blood pressure variability during exercise. *Respiratory Physiology & Neurobiology* 144(1), 91-98
- BERBALK A, BAUER S (2001). Diagnostische Aussage der Herzfrequenzvariabilität in Sportmedizin und Trainingswissenschaft. *Zeitschrift für Angewandte Trainingswissenschaft* 8(2), 156-176
- BERNTSON G.G, BIGGER J.T, ECKBERG D.L, GROSSMAN P, KAUFMANN P.G, MALIK M, NAGARAJA H.N, PORGES S.W, SAUL J.P, STONE P.H, VAN DER MOLEN M.W (1997). Heart rate variability: origins, methods and interpretive caveats. *Psychophysiology* 34(6), 623-648
- BOARDMAN A, SCHLINDWEIN F.S, ROCHA A.P, LEITE A (2002). A study on the optimum order of autoregressive models for heart rate variability. *Physiological Measurement* 23(2), 325-336
- BRACIC-LOTRIC M, STEFANOVSKA A, STAJER D, URBANCIC-ROVAN V (2000). Spectral components of heart rate variability determined by wavelet analysis. *Physiological Measurement* 21(4), 441-457
- CAMMANN H, MICHEL J (2002). How to avoid misinterpretation of heart rate variability power spectra? *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 68(1), 15-23
- CASADEI B, COCHRANE S, JOHNSTON J, CONWAY J, SLEIGHT P (1995). Pitfalls in the interpretation of spectral analysis of the heart rate variability during exercise in humans. *Acta Physiologica Scandinavica* 153(2), 125-31
- CERUTTI S, BIANCHI AM, MAINARDI LT (2001). Advanced spectral methods for detecting dynamic behaviour. *Autonomic Neuroscience* 90(1-2), 3-12
- DASKALOV I, CHRISTOV I (1997). Improvement of resolution in measurement of electrocardiogram RR intervals by interpolation. *Medical Engineering & Physics* 19(4), 375-379
- FAGARD R.H, PARDAENS K, STAESSEN J.A & THUIS L (1998). Power spectral analysis of heart rate variability by autoregressive modelling and fast Fourier transform: a comparative study. *Acta Cardiologica* 53(4), 211-8

FRIEDMAN B.H, ALLEN M.T, CHRISTIE I.C, SANTUCCI A.K (2002). Validity concerns of common heart-rate variability indices. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 21(4), 35-40.

HILTON M, RYAN P, BEATTIE (1997). Spectral analysis of heart rate variability: the impact of R-wave measurement error. *The American Journal of Cardiology* 79(6), 844-5

HOTTENROTT K (HRSG.) (2002). *Herzfrequenzvariabilität im Sport – Prävention – Rehabilitation – Training*. Hamburg, Czwalina

JORNA, P.G.A.M (1992). Spectral analysis of heart rate and psychological state: a review of its validity as a workload index. *Biological Psychology* 34(2-3), 237–257.

KINGSLEY M, LEWIS M.J, MARSON R.E (2005). Comparison of Polar 810s and an Ambulatory ECG System for RR-Interval Measurement During Progressive exercise. *International Journal of Sports Medicine* 26(1), 39-44

LAGUNA P, MOODY G.B, MARK R.G (1998). Power spectral density of unevenly sampled data by least-square analysis: performance and application to heart rate signals. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 45(6), 698-715

MAINARDI L.T, BIANCHI A.M, CERUTTI S. (2002). Time-frequency and time-varying analysis for assessing the dynamic responses of cardiovascular control. *Critical Reviews in Biomedical Engineering* 30(1-3), 175-217

MERRI M, FARDEN D.C, MOTTLEY J.G, TITLEBAUM E.L (1990). Sampling frequency of the electrocardiogram for spectral analysis of the heart rate variability. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 37(1), 99-106

PERINI R, VEICSTEINAS A (2003). Heart rate variability and autonomic activity at rest and during exercise in various physiological conditions. *European Journal of Applied Physiology* 90(3-4), 317–325

PINNA G.D, MAESTRI R, DI CESARE A, COLOMBO R, MINUCO G (1994). The accuracy of power-spectrum analysis of heart-rate variability from annotated RR lists generated by Holter systems. *Physiological Measurement* 15(2), 163-79

SINGH D, VINOD K, SAXENA S.C, DEEPAK K.K (2004). Effects of RR segment duration on HRV spectrum estimation. *Physiological Measurement* 25(3), 721–735

STEFANOVSKA A, BRACIC M (1999). Physics of the human cardiovascular system. *Contemporary Physics* 40(1), 31-55

TARVAINEN M.P, RANTA-AHO P.O, KARJALAINEN P.A (2001). An advanced detrending method with application to HRV analysis. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 49(2), 172–175

TASK FORCE OF THE EUROPEAN SOCIETY OF CARDIOLOGY AND THE NORTH AMERICAN SOCIETY OF PACING AND ELECTROPHYSIOLOGY (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation* 93(5), 1043-1065

YAMAMOTO Y, HUGHSON R.L (1991). Coarse-graining spectral analysis: new method for studying heart rate variability. *Journal of Applied*

Veränderung von Geschwindigkeit und Laktat bei einer 40-minütigen herzfrequenz-gesteuerten Laufbandbelastung

Hottenrott, K. & Schubert, S., Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Problemstellung:

In den 90er Jahren hat es einen Paradigmenwechsel von der primär belastungsorientierten Steuerung bis hin zur eher beanspruchungsorientierten Steuerung gegeben. Im Ausdauerleistungssport erfolgt die Belastungssteuerung vorwiegend nach definierten Herzfrequenzbereichen, die über eine biologische Eichung mittels Laktatstufentest evaluiert werden und nicht nach der physikalischen Leistung oder Geschwindigkeit. Bisher wurde nicht geprüft, zu welchen Verände-

rungen es bei der Laktatkonzentration und Geschwindigkeit kommt, wenn die Ausdauerbelastung nach Herzfrequenzvorgaben gesteuert wird und nicht nach der Geschwindigkeit oder Leistung.

Methodik:

Bei 22 Sportstudenten (Alter: $24,1 \pm 2,8$ Jahre, Größe: $1,82 \pm 0,08$ m, Gewicht: $79,0 \pm 9,8$ kg) und 22 Sportstudentinnen (Alter: $23,6 \pm 3,3$ Jahre, Größe: $1,67 \pm 0,04$ m, Gewicht: $61,4 \pm 7,1$ kg) wurde auf dem Laufband die OwnZone® „Hart“ mit dem Messgerät F11 (Polar) entsprechend den Vorgaben des Herstellers (Bedienungsanleitung zum Messgerät F11) bestimmt. Nach einer Pause von 15 min absolvierten die Probanden eine Dauerlaufbelastung über 40 min im ermittelten Herzfrequenzbereich der OwnZone® „Hart“ auf einem herzfrequenzgesteuerten Laufband (h/p cosmos pulsar 3.0). Die Laufbandgeschwindigkeit wurde automatisch im Bereich der programmierten Herzfrequenzgrenzen gesteuert und alle 5 sec gespeichert. In Ruhe sowie nach 10, 20, 30 und 40 min Laufbandbelastung wurde in einer einminütigen Pause die Laktatkonzentration aus dem hyperämisierten Ohrblut bestimmt und der Blutdruck (Messgerät) gemessen.

Statistik:

Die statistische Auswertung des Datenmaterials erfolgte mit der Software SPSS 11.0. Die Daten wurden auf der Grundlage des Allgemeinen Linearen Modells mit Messwiederholung varianzanalytisch ausgewertet, um die Veränderungen in Abhängigkeit von dem Haupteffekt Zeit beurteilen zu können.

Ergebnisse:

Beim OwnZone® Test wurden für die Frauen in der OwnZone® „Hart“ die Werte $160,7 \pm 7,5$ Schläge/min bis $176,6 \pm 7,7$ Schläge/min und für die Männer $155,2 \pm 6,2$ bis $171,3 \pm 6,7$ Schläge/min ermittelt. Bei den anschließenden Dauerbelastungen im Herzfrequenzbereich der OwnZone® „Hart“ verringerte sich bei den Frauen die Geschwindigkeit von der 10. bis zur 40. Laufminute hoch signifikant von $10,61 \pm 1,66$ km/h auf $9,29 \pm 1,64$ km/h und bei den Männern hoch signifikant von $11,28 \pm 1,64$ km/h auf $10,02 \pm 1,74$ km/h. Die Laktatkonzentration nahm in diesem Zeitraum hoch signifikant von $3,76 \pm 1,41$ mmol/l auf $2,74 \pm 0,93$ mmol/l bei den Frauen und bei den Männern von $3,85 \pm 1,32$ mmol/l auf $2,66 \pm 1,08$ mmol/l ab. Kein Proband brach den Test vorzeitig ab.

Diskussion:

Mit zunehmender Belastungsdauer steigen die Anforderungen u.a. an die Thermoregulation und als Folge steigt die Herzfrequenz an. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Laufgeschwindigkeit bei Erreichen des oberen Herzfrequenzwertes automatisch reduziert. Die Geschwin-

digkeitsabnahme im 30-minütigen Messbereich ist bei den Frauen mit 1,32 km/h vergleichbar hoch wie bei den Männern mit 1,26 km/h. Die Abnahme der Laktatkonzentration ist schließlich die Folge der niedrigeren Belastungsintensität. Bei einer beanspruchungsorientierten Intensitätssteuerung ist die Gefahr der Überforderung deutlich geringer als bei physikalischen bzw. belastungsorientierten Intensitätsvorgaben. Mit zunehmender Belastungsdauer gewinnt der aerobe Energiestoffwechsel an Bedeutung, vorausgesetzt die Anfangbelastung liegt nicht über der anaeroben Schwelle.

Verhalten der Herzfrequenzvariabilität während stufenförmiger fahrradergometrischer Belastung bei trainierten männlichen Jugendlichen im Alter von 14 – 16 Jahren

Röttger, H., Kuhn, K. & Platen, P., Institut für Kreislaufforschung und Sportmedizin, Deutsche Sporthochschule Köln

Einleitung und Fragestellung:

Die Messung der Herzfrequenzvariabilität (HRV) als kostengünstige und nicht-invasive Methode zur Trainings- und Belastungssteuerung sowie zur Bewertung der Ausdauer- und Regenerationsfähigkeit hat in der Sportmedizin im letzten Jahrzehnt zunehmend an Bedeutung gewonnen. Einige Untersuchungen an Erwachsenen unter Belastung konnten bereits auf einen Zusammenhang zwischen der HRV und klassischen metabolischen und respiratorischen Parametern der Leistungsphysiologie hinweisen (SHIN et al. 1995, GOLDSMITH et al. 1997, ANOSOV et al. 2000). Ein besonderes Interesse gilt gegenwärtig dem Verhalten der Parameter der Kurzzeitvariabilität, die bei ansteigender körperlicher Aktivität einen spontanen Abfall und eine plateauähnliche Phase mit minimaler Ausprägung bei moderater und einen Wiederanstieg bei höheren Belastungsintensitäten aufweisen.

Das Ziel der vorliegenden Studie war es daher, während stufenförmiger Belastung bei einer Fahrradergometrie das Verhalten der überwiegend vagal gesteuerten Anteile der Herzfrequenzvariabilität bei einem jugendlichen Probandenkollektiv zu untersuchen.

Methodik:

Als Probanden wurden trainierte männliche Jugendliche der leistungsorientierten 1. Jugend-Fußball-Schule Köln sowie des 1. Fußball-Internats Köln ausgewählt (n = 31, Alter: $15,0 \pm 0,9$ Jahre, Größe: $173,5 \pm 7,1$ cm, Gewicht: $63,3 \pm 9,7$ kg, Lean Body Mass: $55,9 \pm 8,2$ kg) und einer Fahrradergometrie unterzogen. Alle Probanden waren gesund (mit

normotonomem Blutdruck und unauffälligem EKG-Befund) und nahmen zum Zeitpunkt der Untersuchung keinerlei Medikamente ein. Die Fahrradergometrie fand nach dem HOLLMANN und VENRATH-Schema statt: beginnend bei 30 Watt wurde die Belastung nach jeweils 3 Minuten um 40 Watt bis zur subjektiven Ausbelastung gesteigert. Während der Belastung erfolgten eine kontinuierliche EKG-Registrierung sowie eine spiroergometrische Messung mit der Aufzeichnung respiratorischer Parameter. Am Ende jeder Belastungsstufe wurden 20 μ l Kapillarblut aus dem hyperämisierten Ohrläppchen zur Bestimmung der Laktatkonzentration entnommen. Das Verhalten der HRV während der Belastung wurde durch kontinuierliche Speicherung der RR-Intervalle mittels einer Pulsuhr (Polar S810) aufgezeichnet. Die Analyse der HRV-Daten erfolgte mit Hilfe der Polar Software Precision Performance 3.0. In die Auswertung wurden Parameter aus der Zeitbereichs- und Frequenzanalyse einbezogen. Zur Ermittlung des sog. „HRV-Minimums“ wurden die Parameter der Kurzzeitvariabilität (RMSSD, SD1), die überwiegend den Einfluss des parasympathischen Nervensystems darstellen, für jede Wattstufe determiniert. Die Leistung (Watt) am ermittelten „HRV-Minimum“ (Minimum der Werte von RMSSD und SD1 im Belastungsverlauf) wurde korreliert mit der maximalen Leistung (Pmax) und der Leistung, bei der ein Laktatwert (LA) von 2 mmol/l, 3 mmol/l und 4 mmol/l erreicht wurde sowie mit der Leistung am Knickpunkt des Atemäquivalents und dessen überproportionalen Anstieg zum Belastungsende.

Ergebnisse:

Während des Stufentests zeigten alle berücksichtigten HRV-Parameter im Bereich niedriger Belastungsintensitäten (bis 110 Watt) einen steilen Abfall mit einem nachfolgenden Übergang in eine Plateauphase mit nahezu unveränderten Werten. Bei 20 Probanden wurde ein HRV-Minimum mit einem zeitabhängigen Wiederanstieg der HRV-Parameter RMSSD und SD1 nachgewiesen. Der Beginn der Plateauphase konnte bei den Probanden mit HRV-Minimum zwischen 1,6 und 2,5 mmol/l LA bestimmt werden. Ausgehend von der dritten Belastungsstufe lag der Plateauphasenbeginn bei 71 % der maximalen Herzfrequenz (Hfmax), bei 52 % der absoluten maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}), ferner bei 52 % der gewichtsbezogenen maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max} rel.) und bei 45 % der Pmax. Das HRV-Minimum trat im Mittel bei etwa 76 % von Pmax, bei 90 % von Hfmax, 90 % von P4 und 78 % der VO_{2max} rel. auf. Korrelationsanalysen der Leistung am HRV-Minimum zeigten signifikante hohe Zusammenhänge mit der maximalen Leistung ($r = 0,86$, $p < 0,001$) und der Leistung am Knickpunkt des Atemäquivalents ($r = 0,81$, $p < 0,001$) sowie signifikante mittlere bis hohe Zusammenhänge mit Leistungen bei definierten Laktat-Werten (P2: $r = 0,69$, $p < 0,001$; P3

und P4: $r = 0,73$, $p < 0,001$). Die zweifaktorielle Varianzanalyse ergab keine signifikanten Unterschiede in den Leistungskennwerten für die Probanden mit und ohne HRV-Minimum unter Berücksichtigung des Alters.

Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse der durchgeführten fahrradergometrischen Untersuchung zeigen, dass die einfach durchzuführende Messung der Herzfrequenzvariabilität über die Bestimmung des HRV-Minimums eine wertvolle Ergänzung zur Evaluation der körperlichen Belastungssituation sowie zur Trainingssteuerung in aerob-anaeroben Stoffwechsellbereichen darstellen kann. In der vorliegenden Untersuchung konnte auch für ein trainiertes Probandengut männlicher Jugendlicher ein physiologisch begründeter neuer methodischer Ansatz in der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung über die HRV aufgezeigt werden. Ein Zusammenhang zwischen der Atmung und dem HRV-Minimum konnte in dieser Studie nachgewiesen, sollte jedoch bei einem größeren Probandenkollektiv weiter untersucht werden. Somit ist eine globale Anwendung der HRV in Bezug auf eine Optimierung von Belastung auch im Jugendsport denkbar.

Literatur:

ANOSOV O, PATZAK A, KONONOVICH Y, PERSSON PB: High-frequency oscillations of the heart rate during ramp load reflect the human anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol* 83 (4-5): 388-394, 2000.

GOLDSMITH RL, BIGGER T JR, BLOOMFIELD DM, STEINMANN RC: Physical fitness as a determinant of vagal modulation. *Med Sci Sports Exerc* 29 (6): 812-817, 1997.

SHIN K, MINAMITANI H, ONISHI S, YAMAZAKI H, LEE M: The power spectral analysis of heart rate variability in athletes during dynamic exercise-Part I. *Clin Cardiol* 18: 583-586, 1995.

SHIN K, MINAMITANI H, ONISHI S, YAMAZAKI H, LEE M: The power spectral analysis of heart rate variability in athletes during dynamic exercise-Part II. *Clin Cardiol* 18: 664-668, 1995.

Verhalten der Herzfrequenzvariabilität (HRV) vor und nach einer erschöpfenden fahrradergometrischen Belastung bei männlichen Jugendlichen zwischen 14 und 16 Jahren

Kuhn, K, Röttger, H. & Platen, P., Institut für Kreislaufforschung und Sportmedizin, Deutsche Sporthochschule Köln

Einleitung und Fragestellung:

Im Kinder- und Jugendsport gewinnt die Messung der Herzfrequenzvariabilität (HRV) zunehmend an Popularität, da in diesem Bereich invasive Methoden zum Einen zu kostenintensiv und zum Anderen aus ethischen und motivationalen Aspekten häufig nicht anwendbar sind.

Eine unvollständige Erholung nach körperlicher Belastung drückt sich in einer verringerten HRV aus (Hautala et al., 2001). In der vorliegenden Studie soll die Erholungsfähigkeit von jugendlichen Fußballspielern anhand eines standardisierten Tests nach einer Belastungssituation untersucht und der Einfluss der Ausdauerleistungsfähigkeit auf den Erholungszustand betrachtet werden.

Methodik:

Als Probanden dienten in der vorliegenden Studie 31 männliche jugendliche Fußballspieler (Alter: $15,0 \pm 0,9$ Jahre; Größe: $174,0 \pm 0,1$ cm; Gewicht: $63,3 \pm 9,7$ kg). Die Probanden absolvierten eine fahrradergometrische Belastungsuntersuchung nach dem Hollmann-Venrath-Schema bis zur subjektiven Ausbelastung. Unmittelbar vor und nach 10-minütigem Ausfahren bei 1 Watt/kg KG nach der Belastung fand ein Lagewechseltest zur Erfassung der vegetativen Steuerung des Herzens statt, dem sich die Probanden in Abfolge einer Liegephase von 5 Minuten, einer Standphase von 5 Minuten und einer erneuten Liegephase von ebenfalls 5 Minuten unterzogen. Während der Testdauer von 15 Minuten wurden Herzfrequenz und RR-Intervalle zur Beschreibung der HRV kontinuierlich mit Hilfe des Polar Herzfrequenz-Messgerätes S810i aufgezeichnet. Die Parameter der Kurzzeitvariabilität RMSSD, pNN50 und LF/HF-Ratio gingen zur Beurteilung der vagalen Aktivität in die Auswertung mit ein.

Ergebnisse:

28 störungsfreie Datensätze gingen in die Auswertung ein. Die untersuchten Kurzzeitvariabilitätsparameter nahmen in der Standphase gegenüber den Liegephasen in dem Test vor Belastung hochsignifikant ($p < 0,001$) ab. Die Unterschiede zwischen den Liegephasen und der Standphase waren vor der Belastung wesentlich größer (größere Steigungsamplitude). Im Lagewechseltest nach der fahrradergometrischen Belastung und dem Ausfahren von 10 Minuten bei 1W/kg KG zeigten sich RMSSD und pNN50 auf einem insgesamt hochsignifikant niedrigeren Niveau als vor der Belastung, was typischerweise für einen noch nicht vollständig wiederhergestellten vagalen Einfluss spricht. Die Werte der 2. Liegephase übertrafen nach der Belastung die Werte der 1. Liegephase. Insgesamt erreichte RMSSD nach der Belastung und der 10-minütigen Erholungsphase 31% des Ausgangswertes in der 1. Liegephase, 42% des Wertes in der Standphase und 52% des Ausgangswertes in der 2. Liegephase. PNN50 erreichte 5% des Ausgangswertes in der 1. Liegephase, 17% in der Standphase und 26% des Ausgangswertes in der 2. Liegephase. Der LF/HF Ratio, als Marker für die sympathovagale Balance betrug in der 1. Liegephase 205% des Ausgangswertes, in der Standphase 322% und in der 2. Liegephase 241% des Ausgangswertes.

Bei leistungsspezifischer Betrachtung durch eine Einteilung der Gesamtgruppe über die maximale Leistungsfähigkeit ($P_{\max/LBM} < 4,0$ Watt/kg ($n = 9$) (Gruppe 1) und $\geq 4,5$ Watt/kg ($n = 8$) (Gruppe 2)) konnten in der vorliegenden Untersuchung zwischen den beiden Gruppen nur Tendenzen, jedoch keine signifikanten Unterschiede bezüglich der untersuchten Parameter vor dem Belastungstest festgestellt werden. Die leistungsstärkere Gruppe 2 besaß akzentuiert für die 1. und 2. Liegephase und leicht für die Standphase höhere Werte für RMSSD und pNN50, sowie für die LF/HF-Ratio in allen drei Phasen niedrigere Werte. Dabei zeigten sich für RMSSD und pNN50 von der 1. Liegephase zur Standphase und von der Standphase zur 2. Liegephase höhere Steigungsamplituden, als bei der leistungsschwächeren Gruppe 1. Nach der Belastung wies die leistungsstärkere Gruppe niedrigere Werte in allen untersuchten Parametern auf als die leistungsschwächere Gruppe.

Schlussfolgerungen:

Die untersuchten Parameter nahmen im Lagewechseltest nach der Belastung und der 10-minütigen Erholungsphase hochsignifikant ab und dokumentieren dadurch einen noch nicht erreichten vollständigen Erholungszustand. Hieraus ist für die Praxis zu schließen, dass im Anschluss an eine sehr intensive Belastung auch bei trainierten Jugendlichen längere Erholungsphasen notwendig sind, um einen vegetativ regenerierten Zustand zu erreichen. Die leistungsstärkere Subgruppe weißt vor der Belastung einen höheren Vagotonus auf als die leistungsschwächere Gruppe. Nach der Belastung war dies jedoch nicht mehr zu beobachten. Hier zeigte sich eine unerwartete höhere parasympathische Aktivität in der leistungsschwächeren Gruppe. Möglicherweise war die Gruppe trotz des Versuchs der Differenzierung der Leistungen zu leistungshomogen, um einen verlässlichen Unterschied in der vegetativen Regulation nach einer Belastung erkennen zu können. Zukünftige Untersuchungen sollten zusätzlich die HRV im Vergleich bei leistungsheterogenen Gruppen bis hin zur vollständigen autonomen Kontrolle, also auch über längere Zeiträume nach Belastung, verfolgen.

Literatur:

HAUTALA A, TULPPONEN MP, MÄKIKALLIO TH, LAUKKANEN R, NISSILÄ S, HUIKURI HV. Changes in cardiac autonomic regulation after prolonged maximal exercise. *Clin Physiol* 21 (2): 238-245, 2001
KÖNIG BO, SCHUMACHER YO, SCHMIDT-TRUCKSÄSS A, BERG A. Autonome kardiovaskuläre Kontrolle und Herzfrequenzvariabilität bei Ausdauerathleten, Kraftsportlern und untrainierten Normalpersonen. In: Hottenrott K (Hrsg.). *Herzfrequenzvariabilität im Sport - Prävention, Rehabilitation und Training*. Marburg 2001

Adaptation der Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität beim Skilaufen in mittlerer Höhe und bei Rückkehr ins Flachland

Hottenrott, K., Walker, A. & Schwesig, R., Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Problemstellung:

Die veränderten klimatischen Bedingungen in mittleren Höhen und ungewohnte Ausdauerbelastungen (Skilaufen) stellen besondere Anforderungen an die Adaptation der Organ- und Funktionssysteme. So nimmt mit zunehmender Akklimatisierung das maximale und submaximale Herzzeitvolumen durch veränderte Innervierung in Höhe ab. Allerdings muss das rechte Herz wegen der hypoxischen Vasokonstriktion in den Lungengefäßen gegen höheren Widerstand arbeiten (Young & Young, 1988, Böning, 1996). In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie sich Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität in mittleren Höhen und bei Rückkehr ins Flachland verändern und inwieweit sich hieraus Ableitungen für die Gesamtbeanspruchung des Organismus treffen lassen?

Methodik:

An den Untersuchungen nahmen sieben Sportstudentinnen (Alter: $20,3 \pm 1,8$ Jahre; Gewicht: $62,7 \pm 2,1$ kg, Größe: $1,70 \pm 3,7$ m) und sieben Sportstudenten (Alter: $19,1 \pm 1,8$ Jahre; Größe: $1,81 \pm 4,2$ m; Gewicht: $72,6 \pm 3,3$ kg) teil, die alle erstmalig in der Höhe trainierten. Zur Validierung der Umstellungs- und Anpassungsvorgänge wurde die Schlag-zu-Schlag-Herzfrequenz täglich morgens zwischen 7.00 und 8.00 Uhr bei einem Lagewechseltest (Liegen 6 min; Stehen 3 min) mit dem Herzfrequenz-Messgerät Vantage (Polar) über 8 Tage in mittlerer Höhe (1850 üNN) und nach Rückkehr ins Flachland gemessen. Zusätzlich protokollierten die Studenten das subjektive Befinden entsprechend einer Skala von „1 = vollständig erholt“ bis „5 = vollständig erschöpft“. Um die tägliche Trainingszeit und körperlichen Beanspruchung zu erfassen, wurde bei allen Übungs- und Trainingseinheiten die Herzfrequenz gemessen und im 15 s-Intervall gespeichert. Unmittelbar nach der Rückkehr ins Flachland (65 m üNN) wurde in den folgenden acht Tagen der Lagewechseltest morgens zur gleichen Zeit fortgesetzt. Alle gespeicherten RR-Daten wurden in das Programm „Polar Precision Performance 4.01“ übertragen und mit dem Programm „HRV Analysis 1.1“ (Niskanen et al., 2004) ausgewertet. Die Zeitbereichs- und Frequenzanalyse erfolgte mit 256 s aus der Liegephase und 128 s aus der Stehendphase. Für die Frequenzanalyse wurde das AR-Modell zugrunde gelegt. Die qualitative Analyse der Herzfrequenz-Tachogramme zeigte bei einer Studentin und einem Studenten Unre-

gelmäßigkeiten und Artefakte in den RR-Aufzeichnungen, so dass diese von der weiteren Auswertung ausgeschlossen wurden.

Statistik:

Für die statistische Auswertung des Datenmaterials stand die Software SPSS 11.0 zur Verfügung. Die Daten wurden auf der Grundlage des Allgemeinen Linearen Modells mit Messwiederholung varianzanalytisch ausgewertet, um die Veränderungen in Abhängigkeit von den Haupteffekten Zeit und Höhe beurteilen zu können. Für die Haupteffekte Zeit und Höhe wurden varianzanalytisch die Parameter des Greenhouse-Geisser Tests verwendet (df; F; Signifikanz; Partielles Eta-Quadrat).

Ergebnisse:

Die durchschnittliche körperliche Aktivität auf Langlaufski betrug im Acht-Tages-Mittel $4:43 \pm 0:38$ h (Spanne: $2:34 \pm 0:18$ h am 4. Tag und $6:08 \pm 0:43$ h am 5. Tag). Die mittlere Herzfrequenz war am 1. Tag mit 148 ± 12 Schläge/min (Belastungsdauer: $2:50 \pm 0:28$ h) am höchsten und am 7. Tag mit 133 ± 11 Schläge/min (Belastungsdauer: $5:37 \pm 0:44$ h) am niedrigsten. Das subjektive Befinden beurteilten die Studenten am 4. und 7. Tag mit 2,3 (gut) und an den anderen Tagen im Mittel mit 2,7 (etwas müde). Die Herzfrequenzen nehmen in der Höhe vom ersten bis zum achten Tag signifikant im Liegen um ca. 10 Schläge/min und im Stehen um ca. 20 Schläge/min ab. Ein umgekehrtes Verhältnis zeigt sich nach Rückkehr ins Flachland. Die Herzfrequenzen steigen im Liegen und Stehen von Tag zu Tag an. Am 8. Tag sind die mittleren Herzfrequenzen in der Höhe und im Flachland gleich. Während die Differenz der Herzfrequenz im Stehen und Liegen in der Höhe um mehr als 10 Schläge während der achttägigen Messung abnimmt, bleibt sie im Flachland unverändert. Im Einzelfall reduziert sich die Differenz um mehr als 50 Schläge/min und in einem anderen Fall ist die Herzfrequenz im Stehen stets niedriger als im Liegen.

Die Analyse der RR-Daten zeigte für die Parameter des Zeitbereichs (SD, RMSSD, pNN50) eine Abnahme der Variabilität in den ersten drei Tagen und eine Zunahme in den letzten Tagen. Beim Vergleich der Werte zwischen Höhe und Flachland ergeben sich am Anfang und am Ende der beiden Messzeitreihen hoch signifikante Unterschiede. Nach 8 Tagen in der Höhe ist die Variabilität höher als am 8. Messtag im Flachland. Die Frequenzanalyse bestätigt die Trendumkehr vom ersten bis zum 8. Messtag für die LF- und HF-Werte im Liegen und Stehen.

Diskussion:

Der Frequenzanalyse zufolge nimmt der parasympathische Einfluss nach 8 Höhentagen zu und im Flachland von Tag-zu-Tag wieder ab. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die veränderten klimatischen Bedingungen und die körperliche Belastung durch das Skilaufen für den Organismus eine Stresssituation darstellen, was sich anfänglich in einer erhöhten Herzfrequenz und einer erniedrigten Herzfrequenzvariabilität äußerte. Durch den Aufenthalt in der Höhe ist die Herzfrequenz direkt nach der Rückkehr ins Flachland noch erniedrigt und die Herzfrequenzvariabilität erhöht. Nach den vorliegenden Daten sind zur Adaptation an Trainingsbelastungen in mittleren Höhen mindestens 8 Tage erforderlich. Die Readaptation nach Rückkehr ins Flachland vollzieht sich vergleichsweise schnell.

Literatur:

- BÖNING, D. (1996). Höhenttraining – was ist gesichert? Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 47, Sonderheft, S. 196-200.
- NISKANEN J.P., TARVAINEN M.P., RANTA-AHO P.O. & KARJALAINEN P.A. (2004). Software for advanced HRV analysis. Comput Meth Programs Biomed, 76(1), 73-81
- YOUNG, A.J. & YOUNG P.M. (1988). Human acclimatization to high terrestrial altitude. In: Pandolf, K.B. Sawaka, M.M. Gonzales, R.R. (eds.): Human performance physiology and environmental medicine at terrestrial extremes. Benchmark Press inc., Indianapolis p.497-543.

Welchen Einfluss hat das Aufzeichnungsintervall auf gängige Time – Domain – HRV – Indizes?

Hollenbach, P. & Esperer, H. D., Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Ziel:

Ziel der vorliegenden Studie war es, zu untersuchen, ob bei Gesunden von den aus Kurzzeit-EKG-Aufzeichnungen bestimmten Zeitbereichsindizes der Herzfrequenzvariabilität (HRV) auf die 24h-Langzeit-HRV geschlossen werden kann.

Methodik:

Bei 40 gesunden Personen (Alter: 27–76 Jahre) wurde jeweils ein 24h-Langzeitelektrokardiogramm mittels Tracker II oder III Rekordern (Reynolds Medical, Feucht) abgeleitet und auf einem Pathfinder 2000 (Reynolds Medical, Feucht) bezüglich folgender HRV-Parameter ausgewertet: SDNN (Kleiger-Index), SDANN, NN50 (Ewing-Index), sowie rMSSD (von Neumann-Index) ausgewertet. Die HRV-Indizes wurden als Kurzzeit-HRV-Indizes jeweils aus einem 4-stündigen Intervall zwischen 9:00h und 13:00 h sowie als 24h-Langzeit-HRV-Indizes jeweils aus

dem kompletten 4h-Intervall bestimmt. Bänder mit mehr als 15 Extrasystolen /h wurden für die weitere Untersuchung ausgeschlossen. Die Kurzzeit- und Langzeit-HRV-Indizes wurden jeweils mit einander korreliert.

Ergebnisse:

SDNN-4 war lose mit SDNN-24 korreliert: $r=0.455$ ($p=0.012$), SDANN-4 war nicht mit SDANN-24 korreliert: $r=0.130$ ($p=0.50$). Demgegenüber waren die, die instantane HRV messenden Kurzzeit-Parameter sehr straff mit den entsprechenden 24h-Parametern korreliert: NN50-4h vs. NN50-24: $r=0.85$ ($p<0.00001$) bzw. rMSSD-4 vs. rMSSD-24: $r=0.90$ ($p<0.00001$).

Konklusion:

Lediglich die Zeitbereichs- HRV- Kurzzeitparameter, die die Schlag-zu-Schlag-HRV erfassen lassen Rückschlüsse auf die 24h-HRV zu. SDNN und SDANN sind dagegen als aufzeichnungssensitiv (zeitabhängig) zu betrachten, und Kurzeitaufzeichnungen dieser Indizes erlauben keine Rückschlüsse auf die 24h-HRV.

Einfluss der Herzfrequenzvariabilität auf den OwnIndex® der Firma Polar

Schulz¹, H., Pecovnik², A., Bochmann¹, F.& Heck², H.

¹ Institut für Sportmedizin, Technische Universität Chemnitz

² Institut für Sportmedizin, Ruhr-Universität Bochum

Einleitung:

Mit besserer Ausdauerleistungsfähigkeit werden eine niedrige Ruheherzfrequenz (HF) und eine höhere Herzfrequenzvariabilität (HRV) gefunden. Diese Kenntnis wird von der OwnIndex®-Funktion des Herzfrequenzmessgerätes M52 der Firma Polar genutzt, um die maximale Sauerstoffaufnahme ohne Belastungstest zu bestimmen. Dabei wird der Anteil der HRV an der OI-Bestimmung in der Produktvermarktung besonders herausgestellt. Da der Bestimmungsalgorithmus von der Herstellerfirma nicht offen gelegt ist, war es Ziel der Studie, den quantitativen Einfluss derjenigen Größen, die in die Uhr eingegeben werden (Alter, Größe, Gewicht, Geschlecht und Aktivitätsniveau), und derjenigen, die von der Uhr gemessen werden (HF, HRV) zu bestimmen.

Methodik:

Es wurden insgesamt 1944 OwnIndex® Bestimmungen (OI) mit dem Herzfrequenz-Messgerätes M52 (Fa. Polar) durchgeführt. Bei den

Messungen wurde ein mittels PC generiertes RR-Signal mit bekannter HRV verwendet. Die Eingabekombinationen waren: Geschlecht (M, W), Größe (150, 170, 190 cm), Gewicht (50, 70, 90 kg), Aktivitätsniveau (AN low, AN middle, AN high), HF (40, 60, 80, 100) und herzfrequenzabhängig jeweils 3 unterschiedliche HRV-Signale (rMSSD von 6,9 bis 175,1 ms). Als statistisches Verfahren kam die Regressionsanalyse zur Anwendung.

Ergebnisse:

OI wies im Mittel für Männer ($39,5\pm 7,8$ ml min⁻¹ kg⁻¹) niedrigere Werte als für Frauen ($41,1\pm 12,7$ ml min⁻¹ kg⁻¹) auf bei insgesamt gleichen Vorgaben. Pro Aktivitätsstufe nahm OI bei den Männern im Mittel um 7 und bei den Frauen um 12,3 ml min⁻¹ kg⁻¹ zu. Die Abnahme des OI mit zunehmendem Alter war in den einzelnen Aktivitätsstufen unterschiedlich und betrug zwischen 0,1% und 0,7% pro Jahr. Bei einer mittleren Zunahme der HRV um 130 ms nahm OI um durchschnittlich 0,8 (M) bzw. 0,6 ml min⁻¹ kg⁻¹ (W) entsprechend 2,0 bzw. 1,5% ab. Mit einer HF 100/min war der OI bei AN high (W) und AN low (M) größer als mit HF 40/min.

Schlussfolgerungen:

Die OI-Bestimmung mit Hilfe der RR-Simulationen liefern zum großen Teil Ergebnisse, die deutlich von Literaturbefunden abweichen. Der Einfluss der HRV ist im Mittel mit steigender Höhe negativ und quantitativ bedeutungslos. Daher ist der OI als Alternativmethode zur indirekten Ermittlung der maximalen Sauerstoffaufnahme nicht zu empfehlen.

Variabilität und Reliabilität der Kurzzeit-Herzfrequenzvariabilität auf Populations- und Untersucherebene

Horn, A., Bundesinstitut für Sportwissenschaft, Bonn

Einleitung:

Für die Ruhe-Herzfrequenzvariabilität (HRV) gesunder, junger Männer ist eine mittlere Reliabilität (ICC 0,6-0,7) bei einer hohen Tag-zu-Tag-Variabilität (VK 18-22%) bekannt. Für die HRV-Analyse wählt der Untersucher ein „geeignetes“ Datenfenster definierter Dauer oder Länge aus der meist nicht stationären Aufzeichnung aus. Der Einfluss auf Untersucherebene für die Reliabilität und Objektivität der HRV-Befunde ist jedoch unbekannt. Ziel war, diesen zu ermitteln und im Vergleich zum Tag-zu-Tag-Verhalten auf Populationsebene darzustellen.

Methodik:

13 in der HRV-Analyse erfahrene Personen (VPN) werteten an 4 Tagen (UT) 12 15-minütige-Ruhe-Tachogramme (RRT) gesunder, junger Männer aus. Zwischen den UT lagen 2-7 Tage. Der Versuchsplan war vollständig randomisiert (VPN, RRT) und bzgl. Studienziel und Konstanz des Untersuchungsguts (RRT) für die VPN verblindet. Die Analyse erfolgte mit einer Excel-Prozedur des L.f. Sportmedizin, Bochum. Aus je 256 RR-Intervallen wurden die Herzfrequenz (HF) sowie die Poincaré-Plot-Indices spontaner und längerfristiger RR-Fluktuationen (SOL, SOW) kalkuliert. Zur Beurteilung der HRV-Varianzanteile auf Untersuchungsebene wurde die Reliabilität anhand der Innersubjektvariation (VK_{is} %) und des intrain-dividuellen ICC_{intra} über die 4 UT und die Objektivität anhand der Zwischen-subjektvariation (VK_{zw} %) und des interindividuellen ICC_{inter} über die 12 RRT ermittelt.

Ergebnisse:

Parameter	ICC _{intra}	Reliabilität			ICC _{inter}	Objektivität		
		VK _{is} (%)				VK _{zw} (%)		
		Med	25%	75% Perz		Med	25%	75% Perz
HF	0,97 **	1,01	0,57	2,63	0,96 **	2,23 **	1,45	3,42
SO _L	0,98 **	2,86	1,04	7,71	0,97 **	6,67 **	5,57	10,81
SO _w	0,94 **	6,16	1,78	10,42	0,94 **	9,55 *	7,33	12,44

*p<0,05; ** p<0,01; für VK_{is} vs. VK_{zw} geprüft mit Wilcoxon-Test

Die HF-Befunde über die 4 UT waren stabiler als die HRV-Befunde. Gemäß der ICC waren Reliabilität und Objektivität auf sehr hohem Niveau vergleichbar. Jedoch war für alle Parameter die Befunde der verschiedenen Untersucher (Median VK_{zw} über 12RRT) weniger konsistent als die wiederholten individuellen Befunde (Median VK_{is} über 13VPN).

Diskussion:

Gegenüber der biologischen war die untersucherbedingte Streuung von HF und HRV um ca. 2/3 geringer. Aufgrund der besseren Reliabilität als Objektivität sollte in Quer- und Längs-schnittstudien der Untersucher konstant sein. Besonders relevant ist diese Forderung bei HRV-Analysen junger, gesunder Personen aufgrund der ausgeprägten autonomen und besonders vagalen Aktivität sowie der damit gegebenen charakteristischen RR-Serien-Qualität.

Autonomic Information Flow - Parameter der komplexen autonomen Kommunikation schlagen prognostischen Impact der klassischen HRV

Hoyer, D., Tymiec, P.*, Müller-Werdan, U.*, Werdan, K.* & Schmidt, H.*
Institut für Pathophysiologie und Pathobiochemie, Friedrich-Schiller-Universität, Jena

*Universitätsklinik und Poliklinik für Innere Medizin III, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Die Analyse der HRV ist ein etabliertes Verfahren zur Bewertung gesunder und pathologisch gestörter Abstimmungen im Herzkreislaufsystem. Da diese wesentlich unter anderem durch das autonome Nervensystem vermittelt werden, spricht man von autonomer Kommunikation. Auf diese Weise ist der Informationsaustausch innerhalb und zwischen verschiedenen Organsystemen quantifizierbar, was zu signifikant verbesserten Prognosen bei verschiedenen Krankheitsbildern geführt hat.

Die etablierte Standardanalyse der HRV basiert auf Zeit- und Frequenzeigenschaften, die komplexe Interaktion nicht adäquat erfassen können. So werden beispielsweise im Leistungsspektrum Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Frequenzbereichen vollständig missachtet. Daher versprechen Eigenschaften der nichtlinearen Dynamik und der Komplexität, wie beispielsweise der Approximierte Entropy (ApEn), eine verbesserte Diagnostik und Prognostik. Hier besteht allerdings die Einschränkung, dass nur die kürzeste Zeitskala, also die Herzperiode, betrachtet wird. Längere Zeitskalen, die Auskünfte über die Komplexität vagaler, sympathischer, und langsamerer (z.B. humoralen) Prozesse, sowie deren Interaktionen geben könnten, werden nicht adäquat erfasst.

Der autonome Informationsfluss (Autonomic Information Flow, AIF) ermöglicht Komplexitätsschätzungen über verschiedenen Zeitskalen. Im vorgestellten Verfahren wurde AIF entsprechend der Standard HRV hinsichtlich Kurz- und Langzeitdynamik bestimmt. Diese Form der AIF Analyse wurde im Vergleich zur klassischen HRV auf verschiedene Patientengruppen angewandt und deren prognostische Wertigkeit verglichen.

Die beste Prognoseprädiktion der 28-Tage-Letalität von MODS Patienten ermöglichte die AIF über die Zeitskala der vagalen Rhythmen. Das Risiko eines Herzstillstandes bei Herzinfarktpatienten wurde am besten von AIF der Herzschlagperiode als Zeitskala erfaßt. Die Länge des Aufenthaltes auf der Intensivstation nach Operation an der abdominalen Aorta wurde am besten durch die AIF der Langzeitdynamik diskriminiert. Die klassische HRV war in allen Fällen unterlegen.

Wir schlussfolgern, dass AIF (Komplexität über physiologisch begründete Zeitskalen) sowohl die Standard HRV, als auch die auf einen Wert reduzierten Komplexitäts-schätzungen, wesentlich erweitert.

Untersuchung zur Ursache von Artefakten in der mobilen Erfassung der Herzfrequenzvariabilität (HRV) bei Laufbelastungen

Gläser, S., Hoos, O. & Sommer, H. M., Philipps-Universität Marburg, Institut für Sportwissenschaft und Motologie, Bereich Sportmedizin

Einleitung:

Artefaktidentifikation und -bereinigung sind wesentliche Grundlagen für eine physiologisch bedeutsame Analyse der Herzfrequenzvariabilität (Berntson et al. 1990, Friesen et al. 1990, Lippman et al. 1994). Die dazu notwendige exakte Datenerfassung des QRS-Komplexes bzw. der R-Zacke des EKGs wird durch technische und physiologische, endogene und exogene Faktoren stark beeinflusst (Moulder 1992, Task Force 1996, Ruha et al. 1997, Tikkanen 1999). Zu diesen zählt auch die bewegungsbedingte Verschiebung der Elektrodenableitfläche relativ zum Herzen, die bei diversen sportlichen Bewegungen als besonders problematisch zu erachten ist. Ziel dieser Studie war es, den Zusammenhang zwischen den relativen Verschiebungen eines Elektrodenbrustgurts und auftretenden Artefakten im RR-Tachogramm bei der Laufbewegung zu untersuchen.

Methodik:

Bei 12 herzkreislaufgesunden männlichen Sportstudierenden wurden die Herzfrequenzvariabilität (Polar S810i, beat-to-beat) und die relativen Bewegungen des Brustgurts (Polar WearLinkTM) während des Laufens auf dem Laufband bei zwei verschiedenen Geschwindigkeiten (10km/h, 14km/h je 3min, Bewegungsanalysesystem Simi Motion, 50Hz) erfasst. Anschließend wurden die in horizontaler und vertikaler Richtung auftretenden relativen Gurtverschiebungen im Zeit- und Frequenzbereich sowie die Anzahl der Artefakte in den RR-Tachogrammen (visuelle Begutachtung und relativer Threshold: rr_i ist Artefakt, wenn $1,3 * rr_{i-1} < rr_i$ oder $rr_i < 0,7 * rr_{i-1}$) analysiert. Der Zusammenhang zwischen der Artefakhäufigkeit im RR-Tachogramm und den Bewegungsparametern des Brustgurts wurde mittels der Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson geprüft.

Ergebnisse:

Grundsätzlich traten mit $6,65\% \pm 5,42\%$ (10km/h) und $7,83\% \pm 7,10\%$ (14km/h) sehr hohe, interindividuell stark streuende relative

Artefakhäufigkeiten auf bei gleichmäßig und periodisch oszillierenden relativen Gurtbewegungen. Aus Tabelle 1 wird deutlich, dass bei niedriger Laufgeschwindigkeit schwache bis mittlere Korrelationen mit unterschiedlichem Vorzeichen zwischen Artefakhäufigkeit und Parametern der relativen Gurtbewegung auftraten, die bei hoher Laufgeschwindigkeit sogar noch geringer ausfielen.

Artefakt-Häufigkeit (%)	Laufgeschwindigkeit 10 km/h				Laufgeschwindigkeit 14 km/h			
	MW \pm SD: 6,65 \pm 5,42							
	Horizontal		Vertikal		Horizontal		Vertikal	
Bewegungs-Parameter	MW \pm SD	r	MW \pm SD	r	MW \pm SD	r	MW \pm SD	r
Zentr. Frequenz (Hz)	1,33 \pm 0,07	0,29	2,62 \pm 0,13	0,25	1,39 \pm 0,1	0,08	2,78 \pm 0,17	0,13
Amplitude (cm)	1,28 \pm 0,4	0,43	0,74 \pm 0,2	-0,2	1,66 \pm 0,65	0,15	1,01 \pm 0,31	-0,28
Max. Geschw. (cm/s)	5,89 \pm 1,26	0,55	5,86 \pm 1,93	-0,48	7,02 \pm 2,56	0,07	9,01 \pm 2,37	-0,12
θ -Geschw. (cm/s)	3,57 \pm 1,04	0,41	3,79 \pm 1,14	-0,35	4,62 \pm 1,43	0,18	5,31 \pm 1,56	-0,22

Tabelle 1: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der Artefakhäufigkeiten und Bewegungsparameter und deren Korrelationskoeffizienten (r)

Diskussion/Schlussfolgerung:

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die relative Artefakhäufigkeit bei der Laufbewegung hoch ist, interindividuell stark streut und mit zunehmender Geschwindigkeit sogar noch steigt. Dennoch müssen den aufgetretenen Artefakten primär andere Ursachen zugeschrieben werden als die gleichmäßig oszillierende relative Verschiebung des Brustgurts in horizontaler und vertikaler Richtung, da die periodisch auftretenden Verschiebungen des Brustgurts nur sehr schwache bis mittlere, ungleichgerichtete Korrelationen mit der Artefakhäufigkeit aufwiesen. Es gilt hierbei allerdings zu diskutieren, dass zum einen nur ein kurzer Teilabschnitt der 3- minütigen Belastungsdauer kinematisch analysiert werden konnte und dass das Auftreten von Artefakten im RR-Tachogramm beim Laufen primär auf „Missing Beats“ zurückzuführen war, welche a-periodisch im RR-Tachogramm auftraten und generell durch unterschiedliche Faktoren verursacht werden können (Moulder 1992). In zukünftigen Studien könnte eine umfassende, nicht-lineare Analyse der Gurtbewegungen diesbezüglich neue Erkenntnisse liefern.

Literatur:

- BERNTSON G.G, QUIGLEY K.S, JANG J.F, BOYSEN S.T (1990). An Approach to Artifact Identification: Application to Heart Period Data. *Psychophysiology* 27(5), 586 – 598
- FRIESEN G.M, JANNETT T.C, JADALLAH M.A, YATES S.L, QUINT S.R, NAGLE H.T (1990). A Comparison of the Noise Sensitivity of Nine QRS Detection Algorithms. *Transactions on Biomedical Engineering* 37(1), 85 – 98
- LIPPMAN N, STEIN K.M, LERMAN B.B (1994). Comparison of methods for removal of ectopy in measurement of heart rate variability. *American Journal of Physiology* 267(36), H411 - H418
- MULDER L.J.M (1992). Measurement and analysis methods of heart rate and respiration for use in applied environments. *Biological Physiology* 34(2-3), 205–236
- RUHA A, SALLINEN S, NISSILÄ S (1997). A Real-Time Microprocessor QRS-Detector System with a 1-ms Timing Accuracy for the Measurement of Ambulatory HRV. *Transactions on Biomedical Engineering* 44(3), 159–157
- TASK FORCE OF THE EUROPEAN SOCIETY OF CARDIOLOGY AND THE NORTH AMERICAN SOCIETY OF PACING AND ELECTROPHYSIOLOGY (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation* 93(5), 1043-1065
- TIKKANEN P (1999). Characterisation and Application of Analysis Methods for ECG and Time Interval Variability Data. Dissertation Universität Oulu/Finnland. Online-Ressource: Zugriff am 15.02.2005 unter: <http://herkules.oulu.fi/isbn9514252144>

Einfluss eines mittelfristigen Ausdauertrainings mit gekoppelter Ernährungsintervention auf Herzfrequenzvariabilität, subjektives Wohlbefinden und Ausdauerleistungsfähigkeit bei übergewichtigen Erwachsenen

Künkel, L., Hoos, O., Betz, M. & Sommer, H. M., Philipps-Universität Marburg, Institut für Sportwissenschaft und Motologie, Bereich Sportmedizin

Einleitung:

Übergewicht und Adipositas prädisponieren für zahlreiche Herz-Kreislaufkrankungen und verursachen massive Gesundheitskosten. Adipöse Personen weisen eine reduzierte HRV im Vergleich zu normalgewichtigen Personen auf (Zahorska-Markiewicz et al. 1993, Karason et al. 1999, Rabbia et al. 2003), die im Rahmen von geeigneten Therapiemaßnahmen mit Bewegungs- und Ernährungsintervention zumindest teilweise reversibel erscheint (Karason et al. 1999, Amano et al. 2001, Ito et al. 2001, Nishioka 2001).

Ziel dieser Studie war es deshalb, den Einfluss einer krankenkassenunterstützten Ausdauertrainings- und Ernährungsintervention auf die Herzfrequenzvariabilität, das subjektive Wohlbefinden und die Ausdauerleistungsfähigkeit bei übergewichtigen/adipösen Personen zu erfassen und zu bewerten.

Methodik:

n=24 übergewichtige/adipöse Probanden (BMI $29,7 \pm 3,1$; Alter $41,2 \pm 11,9$ a) nahmen an einem krankenkassenunterstützten zwölfwöchigen Ausdauertrainingsprogramm (3-4x 45-60min Walking pro Woche) mit gekoppelter Ernährungsberatung (1x pro Woche) teil. In einem Prä-Post-Testdesign wurden anthropometrische Daten (BMI, Körperfettgehalt), Blutdruck, Ausdauerleistungsfähigkeit (2km-Walkingtest) und subjektives Wohlbefinden (SF-12) sowie die HRV innerhalb eines Orthostase-Tests (3min liegend/3min stehend, Polar S810i, beat-to-beat Modus) erhoben. Nach Artefaktprüfung und -bereinigung wurden die RR-Rohdaten mittels HRV-Analyse 1.1 (Niskanen et al. 2004) in Zeit- (Mean RR, RMSSD, SD 1) und Frequenzbereich (HF und LF absolut (ms^2) und relativ (%), Total Power (ms^2)) deskriptiv (MW und SD) und mittels student'schem T-Test analysiert.

Ergebnisse:

Die zwölfwöchige Intervention induziert eine hochsignifikante ($p < 0,01$) Reduktion des BMI (von $29,7 \pm 3,1$ auf $27,2 \pm 2,79$) und des Blutdrucks (syst. von $122,3 \pm 11,4$ auf $119,0 \pm 8,3$; diast. von $86,3 \pm 6,5$ auf $81,7 \pm 6,2$) sowie eine hochsignifikante Verbesserung der Ausdauerleistungs-

fähigkeit (Ausdauerindex von $70,7 \pm 23,9$ auf $86,9 \pm 13,9$) und des psychophysischen Wohlbefindens (SF12, körperlicher und psychischer Summenscore). Bei den HRV-Parametern der Zeitbereichsanalyse konnten im Prä-Post-Test liegend und stehend keine statistisch signifikanten Unterschiede festgestellt werden (Tab. 1).

	Liegend		Stehend	
	vorher	nachher	Vorher	Nachher
Mean RR (ms)	$907,2 \pm 105,6$	$944,1 \pm 140,5$	$776,8 \pm 125,4$	$779,6 \pm 135,3$
RMSSD (ms)	$34,5 \pm 23,9$	$36,1 \pm 23,6$	$21,4 \pm 11,6$	$18,8 \pm 9,8$
SD1 (ms)	$24,6 \pm 17,0$	$25,7 \pm 16,8$	$15,3 \pm 8,2$	$13,5 \pm 7,0$

Tabelle 1: Mean RR, RMSSD und SD1 vor und nach dem Programm (MW \pm SD)

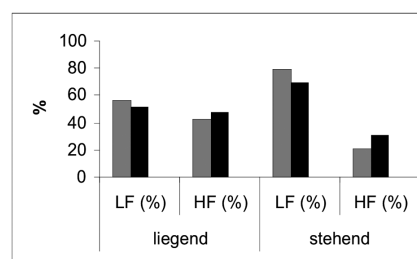


Abb. 1: LF und HF (%) vor (grau) und nach (schwarz) dem Interventionsprogramm (liegend links, stehend rechts)

Die Spektralanalyse zeigte ebenfalls keine signifikante Veränderung, jedoch einen statistischen Trend ($p < 0,10$, Abb. 1), der auf eine Zunahme der HF (%) und Abnahme LF (%) bei gleichzeitig reduzierter Total Power (ms^2) (liegend von $347,8 \pm 390,7$ auf $278,8 \pm 268,8$; stehend $205,8 \pm 133,5$ auf $165,5 \pm 129,4$) hindeutet.

Diskussion/Schlussfolgerung:

Die Ergebnisse dieser Studie belegen eindeutig den gesundheitlich-positiven Effekt der Interventionsmaßnahme durch die statistisch verifizierbaren positiven Entwicklungen der Parameter BMI, Blutdruck, Ausdauerleistungsfähigkeit und subjektives Wohlbefinden. Ein signifikanter Nachweis für den positiven Einfluss des zwölfwöchigen Ausdauertrainings- und Ernährungsprogramms auf die HRV konnte jedoch nicht erbracht werden, auch wenn die Ergebnisse für eine tendenzielle Zunahme des vagalen Einflusses bei gleichzeitiger Reduktion des sympathischen Einflusses sprechen und somit einen Effekt andeuten wie er in anderen Studien (Karason et al. 1999, Amano et al. 2001, Ito et al. 2001, Nishioka 2001) für stark adipöse Personen deutlicher belegt werden konnte. Als mögliche Ursachen für die nicht signifikanten HRV-Parameter sind in dieser Studie die stark heterogenen Ausgangsbedingungen der Probanden in Bezug auf Lebensalter, Leistungsfähigkeit und HRV-Baseline sowie deren im Vergleich zu den anderen Studien relativ geringes Übergewicht zu diskutieren.

Literatur

AMANO M., KANDA T, UE H, MORITANI T (2001). Exercise training and autonomic nervous system activity in obese individuals. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 33(8), 1287–1291

ITO H, OHSHIMA A, TSUZUKI M, OHTO N, YANAGAWA M, MARUYAMA T, KAJI Y, KANAYA S, KARASON K, MØLGAARD H, WIKSTRAND J, SJÖSTRÖM L (1999). Heart Rate Variability in Obesity and the Effect of Weight Loss. *The American Journal of Cardiology* 83(8), 1242-1247

NISHIOKA K (2001). Effects of increased physical activity and mild calorie restriction on heart rate variability in obese women. *Japanese Heart Journal* 42(4), 459-469

NISKANEN J.P, TARVAINEN M.P, RANTA-AHO P.O, KARJALAINEN P.A (2004). Software for advanced HRV analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 76(1), 73–81

RABBIA F, SILKE B, CONTERNO A, GROSSO T, DE VITO B, RABBONE I, CHIANDUSSI L, VEGLIO F (2003). Assessment of cardiac autonomic modulation during adolescent obesity. *Obesity Research* 11(4), 541-548

ZAHORSKA-MARKIEWICZ B, KUAGOWSKA E, KUCIO C, KLIN M (1993). Heart rate variability in obesity. *International Journal of Obesity and Related Metabolic Disorders* 17(1), 21-23

Einfluss der Laserakupunktur auf die Herzfrequenzvariabilität

Vockeroth, E., Hoos, O., Scharler, D. & Sommer H. M., Philipps-Universität Marburg, Institut für Sportwissenschaft und Motologie, Bereich Sportmedizin

Einleitung:

Die Herzfrequenzvariabilität (HRV) gilt seit langem als quantitativer Marker des autonomen Nervensystems (ANS) und gewährt Einblick in das Zusammenspiel von Sympathikus und Parasympathikus. Jüngste Studien konnten mittels HRV-Parametern neben Entspannungsinterventionen (Vempati & Telles 2002, Lu & Kuo 2003) auch bei Akupunkturmaßnahmen (Nishijo 1997, Wang et al. 2002, Agelink et al. 2003) eine positive Stimulation des ANS mittels HRV nachweisen. Ziel dieser Studie war es, den Einfluss einer in der physiotherapeutischen Praxis eingesetzten nicht-invasiven Laserakupunktur auf die HRV erfassen und bewerten zu können.

Methodik:

n=20 herzkreislaufgesunde Probanden (10_, 10_; 24,9a ± 2,0a) nahmen an einem einfach verblindeten randomisiert-kontrollierten Testdesign teil. Die 20 Probanden wurden zufällig in zwei Gruppen mit je fünf weiblichen und fünf männlichen Probanden eingeteilt, von denen eine Gruppe als Laser-Interventionsgruppe (LG) und eine als Kontrollgruppe (KG) diente. LG erhielt eine Akupunkturbehandlung mittels eines Diodenlasers (Pocketlaser Med 130, Lasotronic AG) am Akupunkturpunkt EX HN3 (Yintang) oberhalb der Nasenwurzel (Focks 1997), während bei den Probanden der KG eine Pseudo-Intervention desselben Punktes ohne Lasereinwirkung vorgenommen wurde. Die Behand-

lung erfolgte in Rückenlage mit einer Gesamtlasereinwirkung von 5 Joule bei einer Dauer von 3:10 min (Laasko et al. 1994). Vor, während und nach der Behandlung wurde die Herzfrequenzvariabilität mittels eines R-Zacken gestützten Messsystems aufgezeichnet (Polar S810i; beat-to-beat Modus). Nach Artefaktprüfung und -bereinigung wurden die RR-Rohdaten mittels HRV-Analyse 1.1 (NISKANEN et al. 2004) in Zeit- (Mean RR, RMSSD, SD 1) und Frequenzbereich (%Hf, %LF) deskriptiv (MW und SD) und mittels Varianzanalyse mit Tukey Post-hoc Test analysiert.

Ergebnisse:

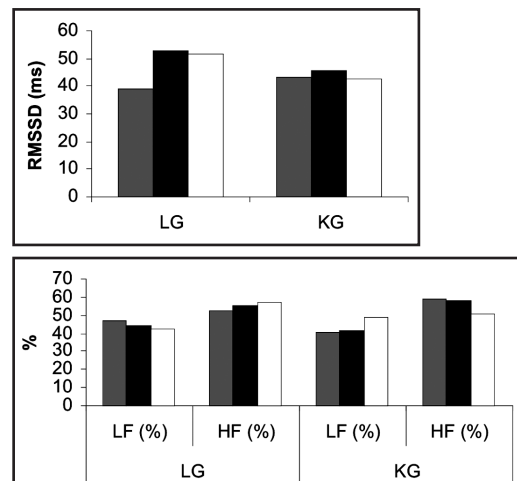


Abb. 1: RMSSD (in ms; oben) sowie LF und HF (in %; unten) vor (blau), während (violett) und nach (gelb) der Laserakupunktur

Bei den HRV-Parametern der Zeitbereichsanalyse wurde in der Laserakupunktur- (LG) und der Kontrollgruppe (KG) ein vergleichbarer, jedoch nicht-signifikanter ansteigender Trend während der Akupunkturbehandlung ermittelt, der in LG stärker ausfiel als in KG und stellvertretend für RMSSD in Abb.1 links dargestellt ist. Die Spektralanalyse lieferte ebenfalls keine signifikante Veränderung. Bei vergleichsweise hoher interindividueller Streuung konnte bei einigen Probanden der LG während und nach der Intervention eine deutlich Zunahme des HF-Anteiles bei gleichzeitiger Abnahme des LF-Anteiles festgestellt werden, der bei Probanden der KG nicht vorhanden war.

Diskussion/Schlussfolgerung:

Die Ergebnisse dieser Studie können keinen signifikanten Nachweis für eine gleichgerichtete positive Modulation der HRV durch Laserakupunktur erbringen. Allerdings deutet die bei einzelnen Probanden sehr deutliche Zunahme des vagalen Einflusses bei einer gleichzeitigen Reduktion des sympathischen Einflusses in der LG, welche in der KG nicht vorhanden waren, auf potentielle Modulationseffekte hin wie sie in den Nadelakupunkturstudien von Nishijo (1997), Wang et al. (2002) und Agelink et al. (2003) eindeutig belegt werden konnten.

Der Vorteil der nicht-invasiven Laserbehandlung im Vergleich zur invasiven Nadelung birgt somit scheinbar den Nachteil eines interindividuell sehr unterschiedlichen Modulationseffektes für das ANS. In Folgestudien gilt es diesbezüglich zu überprüfen, inwiefern die Auswahl von Laserleistung, -eindringtiefe und Lokalisationspunkt eine verbesserte Wirkungsweise ermöglichen können.

Literatur

AGELINK M.W, SANNER D, EICH H, PACH J, BERTLING R, LEMMER W, KLIESER E, LEHMANN E (2003). Does acupuncture influence the cardiac autonomic nervous system in patients with minor depression or anxiety disorders? Fortschritte der Neurologie-Psychiatrie 71 (3), 141-149

FOCKS C (1987). Leitfaden Traditionelle Chinesische Medizin. Thieme, Stuttgart

LAASKO E.L, CRAMOND T, RICHARDSON C, GALLIGAN J.P (1994). Plasma ACTH and β -endorphin levels in response to low level laser therapy (LLLT) for myofascial trigger points. Laser Therapy 6, 133-142

LU W.A, KUO C.D (2003). The effect of Tai Chi Chuan on the autonomic nervous modulation in older persons. Medicine & Science in Sports & Exercise 35(12), 1972-1976

NISHIJO K, MORI H, YOSIKAWA K, YAZAWA K (1997). Decreased heart rate by acupuncture stimulation in humans via facilitation of cardiac vagal activity and suppression of cardiac sympathetic nerve. Neuroscience Letters 227(3), 165-168

NISKANEN J.P, TARVAINEN M.P, RANTA-AHO P.O, KARJALAINEN P.A (2004). Software for advanced HRV analysis. Computer Methods and Programs in Biomedicine 76(1), 73-81

VEMPATI R.P, TELLES S (2002). Yoga-based guided relaxation reduces sympathetic activity judged from baseline levels. Psychological Reports 90(2), 487-494

WANG J.D, KUO T.B.J, YANG C.C.H (2002). An alternative method to enhance vagal activities and suppress sympathetic activities in humans. Autonomic Neuroscience 100(1-2), 90-95

Einfluss körperlicher Aktivität auf die Herzfrequenzvariabilität bei Herzerkrankungen

Ringel, K., Montanus, H.* & Hottenrott, K., Institut für Sportwissenschaft, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

* Elbe-Saale-Klinik, Barby

Problemstellung:

Über die Analyse der Schlag-zu-Schlagfrequenzen des Herzens lassen sich Informationen zur sympatho-vagalen Balance des autonomen Systems gewinnen (Eckberg, 1997). Eine reduzierte HRV ist assoziiert mit einer gesteigerten Inzidenz sowohl der Gesamtsterblichkeit als auch kardialer Ereignisse (Nolan et al, 1998; Tsuji et al, 1994 u. 1996). Daneben wurde eine erhöhte Inzidenz der Koronaren Herzkrankheit (KHK) und der Herzinsuffizienz bei Personen mit eingeschränkter HRV dokumentiert (Liao et al, 1997; Tsuji et al, 1996). Des Weiteren hat die HRV in Verbindung mit der LVEF und den NYHA-Stadium die größte Vorhersagekraft von kardialen Ereignissen (Lahm, 2002). Die Auswirkungen sport- und bewegungstherapeutischer Interventionen in Prävention und Rehabilitation auf die HRV wurden in einer Vielzahl von Untersuchungen aufgezeigt (Fromme et al, 2002; Hottenrott, Lauen-

roth & Schwesig, 2004; Schuit et al, 1999; Boutcher & Stein, 1995; Melanson & Fredson, 2001). Bisher ist allerdings unklar, ob sich unter den Rahmenbedingungen der stationären Rehabilitation Effekte auf die HRV nachweisen lassen. Deshalb ist es Ziel der Untersuchung, zu prüfen inwiefern der gesetzlich vorgegebene Zeitraum von drei Wochen ausreicht, um mit Hilfe eines gezielten und individualisierten sporttherapeutischen Programms, Veränderungen der HRV zu erreichen. Zusätzlich soll eine vergleichende Untersuchung zwischen Herzgesunden und Herzerkrankten durchgeführt werden, um Hinweise auf das Adaptationspotentials für diesen Zeitraum zu gewinnen.

Methodik:

In zwei unabhängigen Untersuchungsgruppen wurden 30 Probanden (15 Herzgesunde, 15 Herzerkrankte) im Zeitraum der stationären Rehabilitation in der Elbe-Saale-Klinik Barby betreut. Die Gruppe der herzgesunden Probanden wurde aus 40 interessierten Personen ($58,3 \pm 4,5$ Jahren), die die medizinischen Kriterien der Herzgesundheit (Werdan, 2004) erfüllten, gezielt zusammengestellt. Die Patienten mit Herzerkrankungen ($EF=28,5 \pm 6,2\%$, $Alter=54,4 \pm 4,2$ Jahre) wurden in der Elbe-Saale-Klinik rekrutiert ($EF \leq 40\%$, kein Diabetes mellitus etc.). Alle Probanden absolvierten vor und nach der dreiwöchigen Betreuung, mit kontrollierter sporttherapeutischer Intervention, einen Ausbelastungstest auf dem Fahrradergometer mit Bestimmung von Herzfrequenz- und Atemgaswerten sowie der Laktatkonzentration nach jeder Belastungsstufe. Das Belastungsprotokoll sah beginnend bei 20 Watt eine Steigerung um 20 Watt pro Minute vor. Die IAS wurde mit dem Softwareprogramm „Winlaktat“ nach dem Verfahren Basislaktat plus $1,5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ bestimmt. Aus den Ergebnissen wurden individuelle Herzfrequenzbereiche für die Belastungssteuerung des Ausdauertrainings ermittelt. Zusätzlich wurde täglich, mittels des Messgerätes S810i der Firma Polar, die morgendliche Schlag-zu-Schlagfrequenz des Herzens in Ruhe über einen Zeitraum von zehn Minuten gemessen. Die Datenanalyse erfolgte mit dem Programm „HRV Analysis 1.1“ (Niskanen et al., 2004). Die Länge des auszuwertenden Intervalls wurde auf 512s festgelegt.

Statistik:

Für die statistische Auswertung des Datenmaterials stand die Software SPSS 11.0 zur Verfügung. Die Daten wurden auf der Grundlage des Allgemeinen Linearen Modells mit Messwiederholung varianzanalytisch ausgewertet, um die Leistungsentwicklung in Abhängigkeit vom Haupteffekt Zeit beurteilen zu können. Für den Haupteffekt Zeit wurden varianzanalytisch die Parameter des Greenhouse-Geisser Tests verwendet (df; F; Signifikanz; Partielles Eta-Quadrat). Des Weiteren wurden multiple Vergleiche der Messzeitpunkte nach Bonferoni durchgeführt.

Ergebnisse:

Die Probanden beider Gruppen konnten im Interventionszeitraum die maximale Wattleistung und ihre $VO_2\text{max}$ signifikant steigern ($p < 0.05$).

• Herzgesund:

$VO_2\text{max}$: $21,4 \pm 4,5 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ vs. $24,5 \pm 5,0 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,
Leistung: $164,0 \pm 32,8 \text{ Watt}$ vs. $185,3 \pm 41,0 \text{ Watt}$

• Herzkrank:

$VO_2\text{max}$: $16,9 \pm 3,30 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ vs. $19,4 \pm 3,25 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,
Leistung: $129,3 \pm 33,9 \text{ Watt}$ vs. $148,0 \pm 34,5 \text{ Watt}$

Zu beiden Messzeitpunkten lag eine Ausbelastung bei allen Probanden, gemessen an subjektiven und objektiven Kriterien, vor. Beide Gruppen entwickelten sich im Untersuchungszeitraum gleichermaßen (keine Interaktionseffekte). Die Untersuchungsgruppen unterscheiden sich in den zentralen Parametern der Frequenz- und Zeitbereichsdomain nicht signifikant voneinander ($p < 0.05$). Der Prä-Posttest-Vergleich der Zeitbereichsparameter (SD 1, SD 2, RMSSD, pNN50%) lässt einen positiven Trend bei beiden Untersuchungsgruppen erkennen. Jedoch ergaben sich nur für die Herzgesundengruppe signifikante Mittelwertdifferenzen ($p < 0.05$). Interaktionseffekte zwischen den beiden Gruppen konnten für die genannten Zeitbereichsparameter nicht gefunden werden. Die Frequenzbereichsanalyse zeigte für die Gruppe der Herzkranken eine Rechtsverschiebung der zentralen Frequenzen, die sich allerdings nicht in der prozentualen Verschiebung der Frequenzanteile des Gesamtspektrums widerspiegelt. Keine Veränderungen der Frequenzdomain konnte für die Herzgesundengruppe ermittelt werden. Statistische Signifikanzen konnten nur für wenige HRV-Parameter festgestellt werden, dennoch spiegeln sich relevante Effekte im partiellen Eta-Quadrat ($> 5\%$) wieder.

Schlussfolgerung:

Die vorliegende Untersuchungen zur Trainierbarkeit von untrainierten Herzgesunden und Herzkranken im Alter zwischen 50-65 Jahren zeigte, dass bereits in einem Zeitraum von drei Wochen bei einem auf die Leistungsfähigkeit abgestimmtem individuellem Trainingsprogramm beachtliche Veränderungen in relevanten Leistungskenngrößen bei der Fahrradergometrie erzielbar sind. Unabhängig davon, ob eine kardiale Erkrankung vorliegt oder nicht, ist eine Plastizität der kardialen Leistungsreserve und Leistungsfähigkeit gegeben.

Literatur

BOUTCHER, S.H. & STEIN, P. (1995). Association between heart rate variability and training response in sedentary middle-aged men. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 70, 75-80.
ECKBERG, D.L. (1997). Sympathovagal balance . A critical appraisal. *Circulation*, 96, 3224-3232.

FROMME, A., GESCHWINDE, C., MOOREN, F.C., THORWESTEN, L., VÖLKNER, K. (2002). Auswirkungen eines zehnwöchigen Ausdauertrainings auf die Herzfrequenzvariabilität bei Laufeinsteigern. In K. Hottenrott (Hrsg.) *Herzfrequenzvariabilität in Sport* (S.89-94). Hamburg: Czwalina.
HOTTEIROTT, K., LAUENROTH, A. & SCHWESIG, R. (2004). Einfluss eines achtwöchigen Walkingtrainings auf die Herzfrequenz und die Herzfrequenzvariabilität bei über 60jährigen. In K. Hottenrott (Hrsg.) *Herzfrequenzvariabilität im Fitness- und Gesundheitssport*. Hamburg: Czwalina.
LAHM, T. (2002). Herzfrequenzvariabilität: Ein unabhängiger prognostischer Parameter bei chronischer Herzinsuffizienz. Dissertation Uni Heidelberg.
LIAO, D., CAI, J., ROSAMOND, W.D., BARNES, R.W., HUTCHINSON, R.G., WHITSEL, E.A., RAUTAHARJU, P., HEISS, G. (1997). Cardiac autonomic function and incident coronary heart disease: a population-based case-cohort study. The ARIC Study. *Atherosclerosis Risk in Communities Study*. *Am.J.Epidemiol.*, 145, 696-706.
MELANSON, E.L., FREDSON, P.S. (2001). The effects of endurance training on resting heart rate variability in sedentary adults male. *Eur J Appl Physiol*, 84, 442-449
NOLAN, J., BATIN, P.D., ANDREWS, R., LINDSAY, S.J., BROOKSBY, P., MULLEN, M., BAIG, W., FLAPAN, A.D., COWLEY, A., PRESCOTT, R.J., NEILSON, J.M.M. & FOX K.A.A. (1998). Prospective Study of heart rate variability and mortality in chronic heart failure – results of the United Kingdom Heart Evaluation and Assessment of Risk Trial (UK-Heart). *Circulation*, 98, 1510-1516.
NISKANEN J.P., TARVAINEN M.P., RANTA-AHO P.O. & KARJALAINEN P.A. (2004). Software for advanced HRV analysis. *Comput Meth Programs Biomed*, 76(1), 73-81.
SCHUIT, A.J., VAN AMELSVOORT, L.G., VERHEIJ, T.C., RIJNEKE, R.D., MAAN, A.C., SWENNE, C.A., SCHOUTEN, E.G. (1999). Exercise training and heart rate variability in older people. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 31, 816-821.
TSUJI, H., VENDITTI, F.J. JR., MANDERS, E.S., EVANS, J.C., LARSON, M.G., FELDMAN, C.L., LEVY, D. (1994). Reduced heart rate variability and mortality risk in an elderly cohort. The Framingham Heart Study. *Circulation*, 90,878-883.
TSUJI, H., VENDITTI, F.J. JR., MANDERS, E.S., EVANS, J. C., LARSON, M.G., FELDMAN, C.H.L. & LEVY, D. (1996). Determinants of heart rate variability. *J Am Coll Cardiol*, 28, 1539-1546.
WERDAN, K. (Hrsg.) (2003). *Das Herz-Buch: praktische Herz-Kreislauf-Medizin*. München: Urban & Fischer.

Vorhersage der 28-Tage-Letalität von Intensivpatienten mit Multiorgandysfunktionssyndrom durch Analyse der Herzfrequenzvariabilität

*Tymiec, P., Hennen, R., Prondzinsky, R., Müller-Werdan, U., Hoyer, D., Werdan, K., & Schmidt, H., Universitätsklinik und Poliklinik für Innere Medizin III, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Institut für Pathophysiologie, Friedrich-Schiller-Universität, Jena

Hintergrund:

Das Multiorgandysfunktionssyndrom (MODS) ist charakterisiert durch den konsekutiven Ausfall verschiedener Organe nach einem Triggerereignis (z.B. kardiogener Schock, Pneumonie, Nierenversagen) mit einer hohen Letalität bis zu 70%. Die autonome Dysfunktion (AD) kann substanzial zur Entwicklung eines MODS beitragen. Das Ziel unserer Studie war es, die AD durch verschiedene Techniken zu charakterisieren und zu untersuchen, ob die eingeschränkte autonome Funktion zur Vorhersage der 28-Tage- (28DM) Letalität beitragen kann.

Methodik:

Wir haben 90 konsekutive MODS-Patienten in die vorliegende Studie eingeschlossen und die Herzfrequenzvariabilität (HRV), die Baroreflexsensitivität (BRS) and die Chemoreflexsensitivität (CRS) als Marker der AD gemessen. Alle Patienten wurden bis zum Ende des Krankenhausaufenthaltes hinsichtlich des Outcomes nachverfolgt. 5 Patienten wurden aufgrund eines technisch inadäquaten Holter-EKGs von der Analyse ausgeschlossen.

Ergebnisse:

Die Gesamtletalität betrug nach 28 Tagen 34% (29/85, Spannweite 3-28 Tage). Die HRV-Parameter lnTP (28DM: $\chi^2=5,1$, $p=0,03$), lnSDNN ($\chi^2=4,0$, $p=0,04$) und lnVLF ($\chi^2=7,6$, $p=0,006$) waren die besten Vorhersageparameter für die 28-Tageletalität. Die Sensitivität (SE) and Spezifität (SP) des HRV-Parameters lnVLF, die 28-Tageletalität vorherzusagen, wurden über eine Reihe von Cutoff-Punkten (Receiver-Operator-Curves) geprüft. Der Cutoff-Punkt, der am besten die 28-Tageletalität vorhersagte, wurde als maximales Produkt von SE \times SP definiert. Dieser lag für den HRV Parameter lnVLF bei 3,9 Inms². Die Kaplan-Meier-Analyse zeigte, dass MODS Patienten mit einem Aufnahmewert der lnVLF unterhalb dieses Cutoff-Punktes eine erhöhte 28-Tage-Sterblichkeit gegenüber Patienten mit höherer HRV aufwiesen ($p=0,006$ [Logrank]).

Schlussfolgerung:

Diese prospektive Studie zeigt erstmals, dass die autonome Funktion bei MODS-Patienten vermindert ist und dass diese Einschränkung prognosebestimmend sein kann.

Unterstützung:

HS, UMW und DH (DFG SCHM 1398/3-1,-2; HOY 1634/8-1,2). HS und KW (DFG Sonderforschungsbereich 598 „Herzversagen im Alter: zelluläre Mechanismen und therapeutische Einflussnahme“ [Projekt A7]).

Herzfrequenzvariabilität, Therapie und Überleben von MODS-Patienten

Schmidt H., Hennen R., Keller A., Hottenrott K.*, Hoyer D.+, Prondzinsky R., Müller-Werdan U. & Werdan K., *Universitätsklinik und Poliklinik für Innere Medizin III, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, *Institut für Trainingswissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, +Institut für Pathophysiologie, Friedrich-Schiller-Universität, Jena*

Hintergrund:

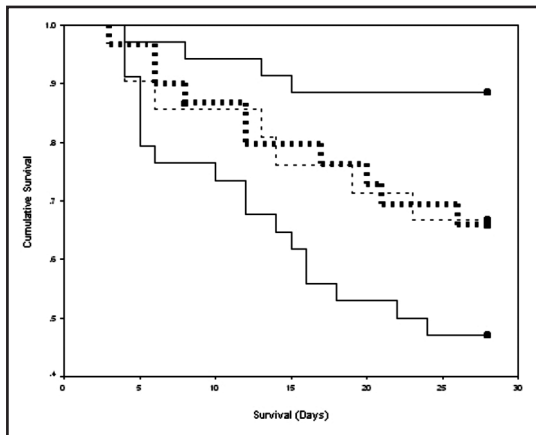
Das Multi-Organ dysfunktions-Syndrom (MODS), ein nachfolgendes Versagen von 2 oder mehreren vitalen Organen, ist der Endpunkt eines initialen Triggerereignisses, wie das akute Koronarsyndrom, das dekompensierte Herzversagen, Endokarditis, Sepsis, Pneumonie und andere. Die Mortalität ist hoch – bei ca. 60%. Wie zeigten kürzlich, dass eine verminderte Herzfrequenzvariabilität ([HRV], Parameter lnVLF) eine Subgruppe mit schlechterer Prognose identifizieren kann. Ein parasympathischer Stimulus kann eine Entzündung unterdrücken und das Überleben verbessern. Das Ziel der vorliegenden Studie ist zu zeigen, ob β -Blocker, als ein potenter Modulator des Parasympathikus, einen positiven Effekt auf die Prognose hat.

Methode:

Wir analysierten retrospektiv die Daten von 120 konsekutiv eingeschlossenen Intensivpatienten mit MODS. Die HRV wurde in Übereinstimmung zu den internationalen Standards durch Nutzung eines 24-Stunden-EKG innerhalb 48 nach Diagnose des MODS bestimmt. Alle Patienten wurden für eine β -Blockertherapie ausgewählt und das 28-Tage-Überleben geprüft. Wir berechneten einen Schnittpunkt (Maximum der Spezifität \times Sensitivität in der ROC-Analyse) für den HRV-Parameter lnVLF, welches das 28-Tage-Überleben am Besten vorher sagt. Der APACHE-II- Score (APII) wurde bestimmt um den Schweregrad der Erkrankung zu bestimmen; ein MODS wurde durch einen APII \geq 20 Punkten definiert.

Ergebnisse:

Folgende demographische Daten der Patienten wurden erhoben: Alter 59.8 ± 13 Jahre, Gewicht 76.5 ± 14.9 kg, Größe 170.4 ± 10.0 cm, APACH-II-Score 26.9 ± 7.6 . 35 der 120 eingeschlossenen Patienten hatten eine β -Blockertherapie am Tag 1 und, zusätzlich, 21 erhielten β -Blocker während ihres Aufenthaltes auf der Intensivstation. Patienten mit β -Blocker hatten eine signifikant höhere HRV als Patienten ohne β -Blocker (3.4 vs. 4.5 Inms², $p < 0.0001$). Nach Teilung der Patientenkohorte in vier Subgruppen fanden wir, dass Patienten mit β -Blockerbehandlung and einer höheren HRV (obere Linie in der Abbildung) ein besseres Überleben im Vergleich zu Patienten 1) mit einer erhöhten HRV und ohne β -Blocker-Therapie (gepunktete fette Linie in der Abbildung, log rank [LR] 4.6, $p=0.03$), 2) Patienten mit einer geringen HRV und β -Blocker (gepunktete dünne Linie, LR=3.9, $p=0.047$) und 3) Patienten mit geringer HRV und ohne β -Blocker (untere dünne durchgezogene Linie, LR= 13.4, $p=0.0003$) hatten.



Zusammenfassung:

Eine β -Blockertherapie kann das Überleben der MODS-Patienten verbessern. Dieser günstige Effekt könnte durch ein Wiederherstellen einer gestörten HRV vermittelt werden.

Prädiktiver Wert der Ausdauerleistungsfähigkeit und Herzfrequenzvariabilität in der kardialen Risikostratifizierung

M. Bürklein¹, L. Vogt¹, A. Rosenhagen², R. Hofstetter², W. Banzer¹
¹ J. W. Goethe-Universität Frankfurt/Main, Abt. Sportmedizin
² Universitätsklinikum Frankfurt/Main, Pädiatrische Kardiologie

Einleitung:

Der PROCAM (Prospective Cardiovascular Münster)-Score gilt als anerkanntes Instrument zur Ermittlung des individuellen Zehnjahresrisikos eines akuten Koronarereignisses (Assmann et al. 2002). Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit und der autonomen Funktions- und Regulationsfähigkeit mit dem globalen Risikoprofil sind bislang nur unzureichend evaluiert worden. Die vorliegende Studie untersucht die maximale Ausdauerleistungsfähigkeit (VO_{2max}) und Herzfrequenzvariabilität (HRV) bei untrainierten Älteren in Abhängigkeit des individuellen kardialen Risikos.

Methodik:

Bei 11 Probanden (61.3 ± 4.8 Jahre) mit einem klinisch relevanten PROCAM-Globalrisiko von über 10% (49.1 ± 3.6 Risikopunkte) und 12 Probanden (55.3 ± 8.1 Jahre) mit einem PROCAM-Risiko unter 10% (29.3 ± 7.9 Punkte) erfolgte die fahrrad-ergometrische Ermittlung der VO_{2max} sowie die Bestimmung von Zeit (RRinter, SDNN, RMSSD)- und Frequenzparametern (LF, HF, TP, LF/HF-Ratio) der HRV in Ruhe. Für Gruppenvergleiche kamen nichtparametrische U-Tests zum Einsatz.

Ergebnisse:

Mit Ausnahme von RRinter und dem LF/HF-Ratio lassen sich signifikante Unterschiede zwischen den Risikogruppen erkennen (Tab.1). Insbesondere für die Parameter VO_{2max} und TP als Globalmaß der autonomen Funktion zeigen sich hochsignifikante Ergebnisse.

Schlussfolgerung:

Die Ergebnisse deuten auf eine parallel zum individuell erhöhten kardialen Risiko reduzierte Leistungsfähigkeit bei eingeschränkter autonomer Funktion hin. Die Resultate unterstreichen den beschriebenen prädiktiven Wert einzelner HRV-Parameter in der Risikostratifizierung (Bigger et al. 1995; Huikuri et al. 1999; Klingenheben et al. 1999). Zukünftige Untersuchungen sollten Kenngrößen der Ausdauerleistungsfähigkeit und HRV in erweiterten kardialen Risikomodellen berücksichtigen.

	PROCAM-Score (Zehnjahresrisiko eines Koronarereignisses)	
	<10% (n=12)	>10% (n=11)
VO_{2max} [ml/min/kg]	31.73 ± 4.47	$24.36 \pm 4.15^{**}$
RRinter [ms]	925 ± 128	898 ± 100 n.s.
SDNN [ms]	42 ± 13	$28 \pm 12^*$
RMSSD [ms]	35.82 ± 15.51	$22.16 \pm 11.03^*$
LF [ms^2]	436.75 ± 288.86	$182.73 \pm 171.76^*$
HF [ms^2]	217.58 ± 197.72	$85.55 \pm 84.12^*$
TP [ms^2]	796.08 ± 429.73	$354.91 \pm 310.48^{**}$
LF/HF	2.86 ± 2.17	2.41 ± 1.58 n.s.

Tab.1: Kardiales Risiko, Leistungsfähigkeit und HRV: Mittelwerte \pm Standardabweichungen (**= $p < .01$, *= $p < .05$)

Literatur

Assmann et al (2002). Circulation 105: 310-315
 Bigger et al (1995). Circulation 91: 1936-1943
 Huikuri et al (1999). Arterioscler Thromb Vasc Biol 19: 1979-1985
 Klingenheben et al (1999). Z Kardiol 88: 400-409
 Bürklein et al (2005). Dtsch Z Spomed 56 (7/8): 200

Individuelle Beanspruchungskontrolle beim Radsportcamp mit der Herzfrequenzvariabilität bei über 40-jährigen Freizeitsportlern

*Hottenrott, K. & Haubold, T., Institut für Sportwissenschaft,
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg*

Problemstellung:

Zur individuellen Steuerung von Trainingsbelastungen sind Kenntnisse zum Regenerationsverlauf sowie zur Belastbarkeit und zum Gesundheitszustand des Sportlers von immenser Bedeutung. Die Herzfrequenzvariabilität (HRV) ist eine Messgröße der neurovegetativen Aktivität und autonomen Funktion des Herzens und reagiert sensibel auf psychophysische Belastungsanforderungen. Im Rahmen eines ein- und zweiwöchigen Radsportcamps soll überprüft werden, inwieweit sich aus unterschiedlichen Zuständen des autonomen Nervensystems Ableitungen für die individuelle Beanspruchung und Belastungssteuerung treffen lassen.

Methodik:

An den trainingsbegleitenden Untersuchungen nahmen 40 Radsportler im Alter von 40 bis 72 Jahren teil. Täglich wurde morgens ein Lagewechseltest (6 min Liegen und 4 min Stehen) mit Schlag-zu-Schlag-Messung der Herzfrequenz (Polar, S810i) durchgeführt und das subjektive Beanspruchungsempfinden protokolliert. Bei hohen Trainingsbelastungen erfolgten zusätzlich Harnstoffmessungen.

Statistik:

Für die statistische Auswertung des Datenmaterials stand die Software SPSS 11.0 zur Verfügung. Die Daten wurden auf der Grundlage des Allgemeinen Linearen Modells mit Messwiederholung varianzanalytisch ausgewertet, um die Leistungsentwicklung in Abhängigkeit vom Haupteffekt Trainingsumfang beurteilen zu können. Für den Haupteffekt wurden varianzanalytisch die Parameter des Greenhouse-Geisser Tests verwendet.

Ergebnisse und Diskussion:

Für den Haupteffekt Trainingsumfang zeigen sich varianzanalytisch keine Signifikanzen. Ursächlich hierfür sind u.a. die hohe Standardabweichung bei den einzelnen HRV-Parametern, die Altersheterogenität der Untersuchungsgruppe, die unterschiedlichen Trainingsumfänge und -intensitäten, sowie auftretende gesundheitliche Störungen bei einigen Probanden.

Einzelfallanalysen der erhobenen Messwerte ermöglichten eine differenzierte Beurteilung der Beanspruchungssituation und gaben Auf-

schluss über die individuelle Reaktion des Organismus auf sich ändernde Belastungen.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die untersuchten Freizeitradsportler meist zu hohe Trainingsbelastungen absolvierten und der Organismus infolgedessen teilweise überbeansprucht wurde. Dies kann vor allem im höheren Alter ein gesundheitliches Risiko darstellen.

Auf der Grundlage dieser Einzelfallanalysen konnten charakteristische Reaktionsmuster in einzelnen Parametern der HRV ermittelt werden, die eine individuelle Belastungssteuerung unterstützen.