

Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V.

Herzrhythmusanalyse in der Arbeitsmedizin

► Vorbemerkungen

Die vorliegende Leitlinie ist eine Überarbeitung der seit 2001 bestehenden und stellt einen Kompromiss zwischen Praxiserfordernis für den arbeitsmedizinischen Anwender und wissenschaftlichem Anspruch dar.

Die Herzschlagfolge ist einer mehr oder weniger ausgeprägten Variabilität unterworfen (Heart Rate Variability, HRV), deren Erfassung auch als Herzrhythmusanalyse bezeichnet wird. Einen relativ umfassenden Überblick über die Grundlagen der HRV-Analyse mit sehr vielen Literaturverweisen findet man bei Berntson et al. (1997). Die HRV-Generierung ist außerordentlich komplex, wobei das vegetative/autonome Nervensystem beteiligt ist.

Da die Funktion des autonomen Nervensystems mit verschiedenen Krankheiten und Normabweichungen verbunden ist, nutzen mehrere medizinische Disziplinen (Kardiologie, Diabetologie, Endokrinologie, Neurologie, Intensivmedizin, Sportmedizin, Geburtsmedizin, Pathopsychologie, Pharmakologie) die Herzrhythmusanalyse, jedoch mit ihren eigenen Fragestellungen.

Folgende Fragestellungen aus der Arbeitsmedizin können die Herzrhythmusanalyse betreffen, wobei die Liste nicht vollständig ist:

- Abschätzung des individuellen Herz-Kreislauf-Risikos eines Patienten im Rahmen von betriebsärztlichen Vorsorgeuntersuchungen,
- Nachweis der Neurotoxizität eines langfristig aufgenommenen Schadstoffes (Schwermetalle, organische Lösemittel, Pflanzenschutzmittel, Schwefelkohlenstoff u. a.) im Rahmen der Forschung und Begutachtung von entsprechenden Krankheitsbildern,
- Nachweis von Präventionsmaßnahmen, die langfristig die sympathikovagale Balance des vegetativen Nervensystems beeinflusst haben und
- Beanspruchungsanalysen an Arbeitsplätzen mit vorrangig psychischen Belastungen im Rahmen arbeits- bzw. psychophysiologischer Untersuchungen.

► Einführung

Die Entwicklung sensitiver, quantitativer und nichtinvasiver Methoden zur Charakterisierung neurovegetativer Zustände am Menschen sowie die Verfügbarkeit moderner Datenverarbeitungstechniken haben in den letzten Jahren zu einer breiten Anwendung der HRV-Analyse geführt (Kristal-Boneh et al. 2000; Massin et al. 2000; Melanson 2000; Sharpley et al. 2000; Hautala et al. 2001; Hedelin et al. 2001; Kuch et al. 2001; Parati et al. 2001; Terziotti et al. 2001; Zaza u. Lombardi 2001; James et al. 2002; Kouidi et al. 2002; Malfatto et al. 2002; Mandigout et al. 2002; Perkiomaki et al. 2002; Usitalo et al. 2002; Zhang et al. 2002; Kincaid 2003; Lee et al. 2003; Mück u. Mück-Weymann 2003; Recordati 2003; Rennie et al. 2003; Ueno u. Moritani 2003; Horn 2004) und liegt auch im arbeitsmedizinischen Interesse (Moser 2005; Pfister et al. 2004).

Die Herzzyklen folgen der zweizügigen Führung von efferenten Erregungen durch Zweige des N. sympathicus und N. vagus, wobei der Organismus nach Koepchen u. Huopaniemi (1991) stets eine Balance anstrebt, die man als Zustand der tonischen Aktivierung bezeichnet. In Körperruhe dominiert die vagale Stimulation der Vorhöfe des Herzens, wobei der autarke Rhythmus des Sinus- oder Keith-Flack-Knotens stark moduliert wird. Daraus resultiert eine ausgeprägte HRV, begleitet von geringer Herzfrequenz (Hf).

Sehr markant ist die sog. respiratorische Sinusarrhythmie (RSA) in Ruhe, die allerdings neben den neural bedingten Einflüssen auch peripheren (intrathorakale Druckänderungen in der Expirations- und Inspirationsphase) unterliegt. Infolge physischer und psychischer Belastung/Anspannung wird das Herz vor allem durch den N. sympathicus erregt, was sich in einer verminderten HRV und erhöhten Hf äußert (Eckoldt 1975; Schubert 1984; Esperer 1995a,b; Malik u. Camm 1995; Malik 1996). Hf und HRV sind teilweise unabhängige Variable, nur das Wertepaar

von beiden beschreibt die vegetative Tonelage des Menschen eindeutig (vegetatives Porträt). Die HRV besitzt eine individuelle Prägung, unterliegt einem Altersgang und kann sich als Folge sportlicher Aktivitäten aber auch bestimmter Erkrankungen (z. B. Diabetes mellitus) sowie aufgenommener Neurotoxika (z. B. Alkohol, Schwermetalle, organische Lösemittel) langfristig verändern. Kurzfristige Änderungen sind als Beanspruchungsantwort auf einwirkende Belastungen (physische, psychische, physikalische Umweltfaktoren u. a.) bekannt.

► Erfassungsverfahren der HRV

Zeitbereich („time domain“)

Aus einer lückenlosen Folge von HPD-Werten, im Weiteren wie in der Klinik NN-Abstände genannt, lassen sich Parameter berechnen, deren Gemeinsamkeit die Maßeinheit der Zeit bzw. eine Prozentangabe ist. Es wurde eine Vielfalt derartiger Rhythmusmaße veröffentlicht, die hier nicht vollständig wiedergegeben werden. Gebräuchliche (auch in der Klinik) sind:

- SDNN: Standardabweichung aller NN-Abstände,
- SDANN: Standardabweichung der alle 5 Minuten berechneten NN-Verteilungen,
- rMSSD (Root Mean Square of Successive Differences): Quadratwurzel des Mittelwertes der Summe aller Differenzen zwischen benachbarten NN-Abständen,
- SDDSD: Standardabweichung der Differenzen zwischen benachbarten NN-Abständen,
- NN50: Anzahl der Paare benachbarter NN-Abstände, die sich jeweils > 50 ms voneinander unterscheiden und
- pNN50: Prozentsatz der NN-Abstände mit > 50 ms Abweichung vom vorausgegangenen NN-Abstand.

Daneben wurde vor allem für leistungsphysiologische Untersuchungen die „Absolute Sinusarrhythmie“ (SA_a) eingeführt:

$$SA_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |NN_i - NN_{i-1}|$$

mit n = Zahl der aufeinanderfolgenden NN-Abstände.

Frequenzbereich („frequency domain“)

Frequenzbereichsanalysen der NN-Intervalle sind außerordentlich häufig in der Literatur zu finden. Es handelt sich dabei fast immer um die schnelle Fouriertransformation/Fast

Fourier Transformation (FFT), die aus einer scheinbar stochastischen NN-Folge eine Zusammensetzung von harmonischen (d. h. Sinus-)Schwingungen erzeugt. Bei der Auswertung interessieren dann die Frequenzen und Anteile dieser zugrunde liegenden Schwingungen, um einzelne Generatoren für das Schwingungsverhalten zu erkennen. Es wird eine lückenlose NN-Folge vorausgesetzt. Eine zu kurze Aufzeichnung kann möglicherweise eine langwellige Grundschwingung in dem Ensemble der Einzelschwingungen des Gesamtmusters nicht mehr erkennen. Angestrebt wird eine mindestens 5-minütige ununterbrochene Aufzeichnung, eine Erfassungszeit unter 2 min ist für die HRV-Analyse im Frequenzbereich sinnlos. Auch wird die Voraussetzung einer Quasistationarität gestellt, was für die Arbeitsphysiologie einen eingeschwungenen Herz-Kreislauf-Zustand („steady state“) bedeutet. Dies ist bei Belastungsänderungen (z. B. während des konkreten Arbeitsvollzuges von Probanden) nicht immer gegeben. Damit sind zwei Schwächen der FFT für die Herzrhythmusanalyse aufgezeigt (stillschweigende Voraussetzung harmonischer Einzelschwingungen, was bei Herz-Kreislauf-Reaktionen nur annähernd erfüllt ist und Bedingung der Quasistationarität des Grundmusters). Für die Bewertung der Rhythmizität ist nach erfolgter Spektralanalyse bzw. FFT sowohl der Flächeninhalt des gesamten Leistungsdichtespektrums LSP_{ges} (Maßeinheit ms^2), oft auch als Total Frequency Power (TFP) bezeichnet, als auch der Flächeninhalt in üblichen Frequenzbereichen (Bändern) bedeutsam.

Nach den Empfehlungen der Guidelines der Task Force 1996 werden unterteilt:

- 0,0001–0,003 Hz: ULF-Band („ultra-low-frequency band“)
- 0,0030–0,040 Hz: VLF-Band („very low frequency band“) bzw. A-Band
- 0,0400–0,150 Hz: LF-Band („low frequency band“) bzw. B-Band
- 0,1500–0,400 Hz: HF-Band („high frequency band“) bzw. C-Band
- 0,4000–1,000 Hz: UHF-Band („ultra high frequency band“)

Das nur bei sehr langen Aufzeichnungsdauern berechenbare ULF-Band wird mit der sympathischen Blutdruckregulation verbunden. Der VLF-Anteil unterliegt der sympathischen Thermoregulation (Fleisher et al. 1996) und der mittlere (LF) wird sowohl vom N. sympathikus als auch N. vagus determiniert. Das HF-Band (auch als C- oder Atmungsband bezeichnet) spiegelt die respiratorische Sinusarrhythmie wi-

der, es wird vor allem durch den N. vagus bestimmt. Das UHF- und ULF-Band spielen in der Arbeitsphysiologie keine Rolle. Der Quotient LF/HF kann als Kriterium der sympathovagalen Balance angesehen werden.

Es fehlt nicht an Versuchen, die Vorzüge der FFT zu nutzen, nämlich das Erkennen einzelner Schwingungsgeneratoren in dem überlagerten, komplexen Schwingungsgeschehen, und dabei die o. g. Mängel (notwendiger Sinuscharakter der Einzelschwingungen und Quasistationarität) zu umgehen. Die kontinuierliche Wavelet-Transformation (CWT) hat sich in den letzten Jahren zu einem solchen Instrument entwickelt. Die Beschränkung auf stationäre Zustände ist bei der CWT nicht mehr notwendig, was ihre Anwendbarkeit bei Untersuchungen mit Belastungsänderungen der Probanden erlaubt. Die CWT verwendet verschiedene Wavelet-Funktionen (nicht nur Sinusfunktionen), um das Originalsignal abzubilden. Es sei auf Addison (2005) und Verlinde et al. (2001) verwiesen.

Für die anzuwendenden Spektralanalysetechniken ist auch der Charakter der gewonnenen Daten wichtig. Periodische Signale können immer abgetastet und mittels FFT oder CWT in den Frequenzbereich transformiert werden. NN-Intervalle und „beat to beat“ erfasste Blutdruckwerte in Form eines Tachogramms bzw. Systogramms stellen jedoch keine abstastbaren Signale dar, so dass mathematisch streng nur statistische Spektralanalysen korrekt sind. Die Trigonometrisch Regressive Spektralanalyse (TRS) nach Rüdiger et al. (1999, 2006) bietet hier erste Erfolge. Einzelheiten dazu können aber im Rahmen dieser Leitlinie nicht ausgeführt werden, so dass der Interessierte auf die Primärliteratur zurückgreifen muss.

Poincaré- oder Lorenz-Plot („return map“)

Die Herzrhythmusanalyse ist auch vermittelt zwei- oder mehrdimensionaler Punktwolkendarstellungen möglich. Für die Darstellung sukzessiver NN-Abstände bestehen die Bezeichnungen Poincaré-, Lorenz-, Recurrence- und Scatter-Plot sowie Return Maps. Im einfachsten Fall, der 2-dimensionalen Darstellung, wird die NN-Zeitreihe auf sich selbst abgebildet. Das Wertepaar in dem Koordinatensystem ergibt sich aus NN_i (Abszisse) und NN_{i+1} (Ordinate). Die daraus gebildete Punktwolke liegt um die 450-Achse in dem Koordinatensystem verteilt, aus der Breite und Länge der Figur wird die HRV und die Regulationsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems abgeleitet.

Man findet für das Verfahren auch die Bezeichnung HRV-Analyse im Phasenbereich („phase domain“), wobei unter Phase ein ganz bestimmter Schwingungszustand verstanden wird, hier also das Wertepaar NN_i und NN_{i+1} . Schließlich kann man das Verfahren auch als eine Form der HRV-Analyse im Zeitbereich (s. oben) auffassen, da es sich bei den zugrunde liegenden Werten (HPD oder RR-Abstände) um Zeitgrößen mit der Maßeinheit ms handelt. Wegen der relativen Eigenständigkeit der Herzrhythmusanalyse mittels Plot-Darstellung und nachfolgender Vermessung sollte man es aber nicht in die übliche Autokorrelation (s. unten) oder Zeitbereichsanalyse (s. oben) einordnen. Die Bezeichnung Phasenbereichsanalyse betont die Sonderstellung.

Die Herzrhythmusanalyse mittels Poincaré-Plot hat nicht die strenge Voraussetzung einer völlig lückenlosen HPD-Zeitreihe. Aus diesem Grund eignet sie sich besonders, wenn das aufgezeichnete EKG bzw. Kardiotachogramm artefaktüberlagert ist und vor der Berechnung von Rhythmusmaßen z. B. einzelne Extrasystolen eliminiert wurden. Daher bietet sich diese Form der HRV-Analyse besonders bei Patienten/Probanden mit hoher Prävalenz ventrikulärer und/oder supraventrikulärer Extrasystolen an.

Charakteristisch ist für einen gesunden Menschen eine Punktwolke in dem Koordinatensystem in Torpedo-, Zigarren- bzw. Kometenform. Ein ausgeprägter Sinusrhythmus ist durch breite Streuung der Punkte um die 45-Grad-Mittelachse gekennzeichnet, ein eingeschränkter dagegen durch eine schlanke Punktwolke. Bestimmte kardiologische Erkrankungen fallen durch spezifische Abweichungen von der normalen Verteilungsform auf (Esperer 2002). Die Interpretation der Musterabweichungen sollten aber der Kardiologie überlassen werden, für den Arbeitsmediziner ist eine deutliche Abweichung von der normalen Torpedoform ein Grund für eine weiterführende internistische Spezialdiagnostik.

Für wissenschaftliche Ansprüche genügt nur eine quantitative Auswertung der Poincaré- oder Lorenz-Plots (LP). Folgende LP-Indices haben sich dafür bewährt:

- L_L : geometrische Länge (Lorenz-Länge),
- L_B : maximale Breite (Lorenz-Breite)
- L_{SD} : Differenz des geometrischen Mittelpunktes zu dem Massenschwerpunkt (dem physiologischen Normalverhalten entsprechen große L_{SD} -Werte, die Punktwolke ist nach höheren NN-Werten hin deutlich aufgeweitet).

Während L_L die Regulationsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems bei unterschiedlichen Aktivitätszuständen ausdrückt („long term variability“; große Werte entsprechen breitem Regulationsbereich) drückt L_B die HRV in einem bestimmten Aktivitätszustand (z. B. in Körperruhe) aus (short term variability; große Werte entsprechen großer HRV).

Die methodischen Vorzüge einer Herzrhythmusanalyse mittels Poincaré- oder Lorenz-Plot (Robustheit gegenüber Artefakten, hohe Dichte von SVES und VES für die Analyse unproblematisch, keine lückenlose HPD-Zeitreihe notwendig, anschauliche Grafik) werden gegenüber der HRV-Analyse im Frequenzbereich mit dem Nachteil erkaufte, dass nur das Gesamtschwingungsverhalten und nicht einzelne Schwingungsgeneratoren erkannt werden.

Autokorrelation

Für die Herzrhythmusanalyse werden auch autoregressive Methoden verwendet, deren Aussagekraft aber durch subjektive Faktoren bei der Wahl des zugrunde gelegten Modells eingeschränkt ist (Patzak et al. 2000). Mittels Autokorrelationsfunktionen wird geprüft, in welchem Maß ein beliebiger Messwert zum Zeitpunkt t von den Vorgängerwerten zum Zeitpunkt $t-1$, $t-2$ usw. abhängt.

Es wird zwischen zirkulären und nicht-zirkulären Autokorrelationen unterschieden. Im Fall einer zirkulären Autokorrelationsfunktion ist der Wert nach n weiteren Werten wieder identisch mit dem ersten. Die auf die Herzrhythmusanalyse zugeschnittenen Verfahren finden gegenwärtig eine Etablierung. Leicht verständliche Literatur zu Zeitreihen und Verlaufsanalysen findet man bei Metzler und Nickel (1986) und Hofer (1974). Es wurden auch Verfahren entwickelt, die rhythmische von nichtrhythmischen Informationen trennen (z. B. Trigonometrisch Regressive Spektralanalyse (TRS) nach Rüdiger et al. 1999). Die Methoden können sowohl für die HRV-Analyse als auch für die Analyse der Blutdruckschwankungen (Finapres/Portapres) angewendet werden. Dem Interessenten sei eine Übersicht von Rüdiger et al. 2006 empfohlen.

Neben den angeführten autoregressiven Methoden gibt es eine große Zahl weiterer Verfahren zur HRV-Ermittlung (Cluster-Spektralanalyse, Bestimmung der Lyapunov-Exponenten, der Chomogorov-Entropie und fraktaler Dimensionen der HRV bzw. Chaosforschung u. a.). Es handelt sich dabei um nichtlineare Indices der HRV, deren Berechtigung sich aus der in der Natur do-

minierenden Nichtlinearität bzw. aus den chaotischen Oszillationen biologischer Signale ableitet. Die praktische Anwendung steht aber weitgehend aus, so dass diese Methoden der HRV-Bestimmung nur im Forschungsbereich zu finden sind. Das Gleiche betrifft kombiniert grafisch-rechnerische Verfahren, wie die Auswertung der NN-Intervall-Histogrammen mit geometrischen Näherungsmethoden.

► Modifizierende Einflussfaktoren

Für die Herzrhythmusanalyse ist es sehr wichtig, wie auch bei der Nutzung der Herzschlagfrequenz für arbeitswissenschaftliche Untersuchungen (s. gleichnamige Leitlinie), modifizierende Einflüsse/Confounder zu beachten. Eine möglichst vollständige Einbeziehung ist dabei stets das Ziel.

Lebensalter

Unter Ruhebedingungen zeigt die HRV einen eingipfligen Altersgang. Die mehr sympathikotone vegetative Tonuslage des Kindes (straffer Herzrhythmus, HRV gering) wird im jungen Erwachsenenalter durch eine deutlich ausgeprägte HRV abgelöst (mehr vagale Tonuslage, „Luxus“-Variabilität des Herzrhythmus, Fähigkeit zur ausgeprägten regulativen Dynamik), um mit fortschreitendem Alter abzunehmen („Altersstarre“ des Herzens).

Geschlecht

Bedingt durch den unterschiedlichen hormonellen Haushalt sowie in den anatomischen Größenverhältnissen bestehen Geschlechtsunterschiede der Herzfrequenz. Hinsichtlich HRV sind aber geschlechtsbezogene Studienergebnisse uneinheitlich (Brüggemann et al. 1991; Umetani et al. 1998). Bei nur geringen Unterschieden in den Niveauebenen scheint das Geschlecht die relativen Parameter der Spektralanalyse und damit die sympathovagale Balance zu beeinflussen. HRV-Analysen im Frequenzbereich sind daher geschlechtsdifferenziert auszuwerten.

Anlagebedingte Interindividualität

Der Herzrhythmus eines gesunden Menschen unter Ruhebedingungen besitzt eine ausgeprägte, wahrscheinlich anlagebedingte, interindividuelle Prägung. Stark vereinfacht sind die beiden polaren Typen „Vagotoniker“ (I) von den „Sympathikotonikern“ (II) zu trennen, im Allgemeinen befindet sich das individuelle Herzrhythmusverhalten zwischen diesen beiden Polen. Die Ver-

schiebung der individuellen Ruhe-HRV ist unabhängig vom Altersgang durch die Wirkung endogener (Gesundheitszustand) oder exogener Bedingungen möglich (s. unten).

Zirkadianer Rhythmus, Tageszeit

Die HRV unterliegt wie die Hf und andere physiologische und biochemische Parameter einem Tagesgang, der im Allgemeinen jedoch durch körperliche und geistige Aktivitäten überdeckt wird. Im Verlauf eines 24-h-Tages wechseln ergotoper Zustand mit Sympathikusbetonung mit der nächtlichen trophotropen Phase, die vagusbetont ist. Vergleichende HRV-Untersuchungen sollten daher jeweils zur gleichen Tageszeit vorgenommen werden.

Trainingszustand, Leistungsvermögen des Herzens

Ausdauertrainierte haben nicht nur eine verminderte Ruhe-Hf (als Folge des größeren Sportlerherzens) sondern auch eine ausgeprägte HRV (Berbalk 1998). Daher stößt die Interpretation von zusammengefassten HRV-Ergebnissen aus Gruppen von Trainierten und Untrainierten auf prinzipielle Probleme.

Gesundheitszustand

Da die HRV die sympathikovagale Balance des autonomen Nervensystems widerspiegelt, beeinflusst jede Störung in diesem sensiblen Teil des Organismus die Herzrhythmusanalyse deutlich (Manthei et al. 1996). Das gilt sowohl für temporäre Gesundheitsstörungen als auch für manifeste; zu Letzteren gehört der Diabetes mellitus mit der bekannten Herzrhythmus einschränkung. Der Untersucher sollte wegen der möglichen starken Verzerrung der HRV-Ergebnisse aus diesem Einflusskreis Ein- und Ausschlusskriterien genau beachten.

Umgebungseinflüsse

Lärm, Mikroklima (besonders Lufttemperatur) und Luftdruck (vor allem bei großen geografischen Höhen aber auch in Überdruck, z. B. Tauchen) sowie weitere physikalische Faktoren beeinflussen das Hf- und das HRV-Verhalten. Diese Faktoren können entweder Gegenstand der Analyse sein oder sie treten bei der Untersuchung als zusätzliche Einflussgrößen auf. Daher sind sie mitzuerfassen und zu interpretieren.

Weitere Einflüsse

Psychische und physische Einflussfaktoren (Belastungen) haben Beanspruchungsfolgen, die gegebenenfalls durch die HRV-Analyse selbst ermittelt werden sollen. Bei anderen Fragestellungen sind die geistigen

und körperlichen Einflussfaktoren als Störgrößen zu erfassen und entsprechend zu bewerten.

Neben den genannten HRV-modifizierenden Faktoren sind zu nennen: Medikamente (wie z. B. β -Adrenoblocker, Antiarrhythmika, M-Cholinoblocker, Nifedipin, Diltiazem, Amiodaron, Amitriptylin, Fluoxetin, Tranquilizer, Clozapin, Propofol), Narkotika, neurotoxische Stoffe in Beruf und Hobby, Drogen, Alkohol, Nikotin, Atemform, Körperposition und vorausgegangene Belastung.

► Anwendung in der Arbeitsmedizin

Risikostratifizierung hinsichtlich Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Das klassische Risikofaktorenkonzept (PROCAM-Studie [Assmann et al. 2002]) erklärt das individuelle Herz-Kreislauf-Risiko nicht vollständig. Auch eine verminderte HRV oder pathologische Periodizität können als Indikatoren dienen (Tsuji et al. 1996). Dabei wissen wir nicht, ob die Verminderung der HRV Ursache oder Begleiterscheinung einer gestörten Herzfunktion ist. Unabhängig davon sollte sich aber der Betriebsarzt im Rahmen seiner Möglichkeiten für das HRV-Verhalten seiner Patienten/Versicherten interessieren (Pfister et al. 2006). Dabei ist eine Zusammenarbeit mit kardiologischen Kollegen anzustreben.

Nachweis einer neurotoxischen Wirkung durch berufliche Schadstoffe

Das autonome/vegetative Nervensystem ist gegenüber neurotoxischen Schadstoffen sehr empfindlich, wie man nicht nur bei Alkoholkranken gefunden hat. Mittels der HRV-Analyse kann es gelingen, eine neurologische Fröhschädigung zu erkennen, wobei andere Teile des Nervensystems (zentrales, peripheres) noch völlig unauffällig erscheinen (Pfister et al. 1996). Eine Verminderung der HRV kann Folge einer langjährigen Schadstoffexposition sein (Böckelmann 2006).

Beanspruchungsanalyse an Arbeitsplätzen

Mit dem Wandel der Arbeitswelt von betont physischen zu mehr psychischen Belastungen werden Beanspruchungsmaße benötigt, die über die unmittelbare Stoffwechselvermittlung (Energetik) hinaus determiniert werden. Die HRV bietet sich an, da sie die vegetative/autonome Balance des

Organismus widerspiegelt (Parameter der Aktivierung) Das qualifiziert sie für psychophysiologische Untersuchungen an Arbeitsplätzen mit psychischer Belastung (van Amelsvoort et al. 2000). Zu der teilweise berechtigten Kritik der Methode für diese Fragestellung (Nickel et al. 2002) haben aber auch beigetragen: HRV-Maße streuen inter- und intraindividuell sehr stark, keine ausreichende Probandenzahl für eine Fragestellung (ein Arbeitsplatz oder eine interessierte Tätigkeit) sowie unzureichende Beachtung von Confoundern (s. oben). Bei einer sorgfältigen Untersuchungsplanung sind aber auch für Felduntersuchungen an konkreten Arbeitsplätzen ausreichende Gütekriterien (Spezifität und Reliabilität) erreichbar. Schließlich soll darauf hingewiesen werden, dass HRV-Maße bei einer Beanspruchungsanalyse nicht isoliert einzubringen sind, sondern mindestens mit Herzfrequenz- und Blutdruckmesswerten gekoppelt werden sollten.

► Methodik der Erfassung und Auswertung

Auf die Methodik der EKG-Ableitung wird hier nicht eingegangen. Es sei auf einschlägige Handlungsempfehlungen und auf die Leitlinie „Nutzung der Herzschlagfrequenz bei arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen“ verwiesen, wo auf Lokalisation, Fixierung und Artefaktunterdrückung Bezug genommen wird. Bei der HRV-Analyse kommt es auf die exakte Erfassung der Herzaktions-Intervalle (R-Zacken-Abstände, NN-Intervalle) an, wobei eine Genauigkeit von ± 1 ms Standard ist. Die Aufzeichnung von NN-Abständen ist ebenfalls mit Herzfrequenzmonitoren möglich; diese Geräte gestatten gegenüber den üblichen EKG-Rekordern eine komfortablere Messung und zeichnen sich durch günstige Anschaffungs- und Betriebskosten aus.

Die NN-Intervalle können sowohl online (hier meist nur im Labor möglich) oder offline mittels einer portablen Speichertechnik am Patienten/Probanden bzw. über drahtlose Biotelemetrieanlagen erfasst werden. Es ist dringend zu empfehlen, vor einer rechentechnischen Verarbeitung der Rohdaten eine Plausibilitätsüberprüfung vorzunehmen. Das sollte visuell am Monitor geschehen. Entwickelte Software-Lösungen gestatten eine Artefaktbehandlung. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass eventuelle notwendige Korrekturen an den einzelnen HPD-Werten sehr sorgfältig zu erfolgen haben (z. B. durch Einsetzen des Mittelwertes von 2 benachbarten rich-

tigen Werten anstelle des Artefaktwertes) und nur die nötigsten, größten Artefakte geändert werden sollten. Ein einfaches Herausstreichen fehlerhafter HPD-Werte aus der Zeitfolge ohne Ersatz ist unzulässig; Änderungen der HPD-Zeitstruktur bewirken immer eine Veränderung des Frequenzmusters. Bei zeitlich ausgedehnten Artefakten muss ggf. die Messreihe an der Artefaktstelle aufgetrennt werden, die beiden plausiblen Messreihen sind dann gesondert zu analysieren, vorausgesetzt sie sind für die Herzrhythmusanalyse ausreichend lang genug.

► Möglichkeiten und Grenzen der Interpretation

So wie auch die momentane Herzfrequenz vielfältige Einflussfaktoren (endogene, exogene mit psychischer oder physischer Dominanz) widerspiegelt, ist es mit dem Herzrhythmusverhalten nicht anders. Daher besteht immer die Gefahr einer Überinterpretation eines Einflussfaktors, wenn man nicht ausreichend über die anderen informiert ist oder – noch schlimmer – wenn man sie bewusst nicht zur Kenntnis nimmt, weil sie das Bild verkomplizieren. Es sind also immer Confounder zu hinterfragen.

Die relativ schwierige Interpretation von HRV-Ergebnissen wird durch die relativ einfache Erfassung der Rohdaten abgewogen. Nichtinvasiv und rückwirkungsarm gewonnene thorakale Herzaktionspotenziale sollten für keinen Untersucher ein Problem darstellen. Mit den Möglichkeiten der modernen Datenverarbeitung ist es auch möglich, die Reihe der sukzessiven NN-Intervalle mit der notwendigen Genauigkeit abzuspeichern und entsprechend der genannten Analyseverfahren auszuwerten, wobei es dafür auch kommerzielle Lösungen (Software) gibt. Dem Arbeits- bzw. Betriebsmediziner sind dabei solche Verfahren zu empfehlen, die über das klinische Anliegen (z. B. Erkennung supraventrikulärer Extrasystolen) hinausgehen und in der Leistungsmedizin (z. B. Sportmedizin) Anwendung finden.

Richtet sich das Interesse des Untersuchers nicht auf herzhrythmische Besonderheiten eines konkreten Patienten sondern wie es meist in der Arbeitsmedizin der Fall ist auf die Wirkung von Einflüssen des Arbeitsplatzes (physische, psychische Arbeitsschwere, Schadstoffe usw.) auf das Herzrhythmusverhalten von dort beschäftigter Personen, ist neben der mehrfach angesprochenen Bedeutung der Confounder-Berücksichtigung eine für statistische

Aussagen notwendige Mindest-Probandenzahl eine notwendige Voraussetzung für die Interpretation der Ergebnisse. Wegen der sehr weit streuenden interindividuellen HRV-Muster auch gesunder Personen sollte man nicht aus dem Ergebnis nur eines oder sehr weniger Probanden auf die verursachende Belastung am Arbeitsplatz zurückschließen. Bei einer sehr beschränkten Probandenzahl an einem zu beurteilenden Arbeitsplatz sind Voruntersuchungen unter Laborbedingungen anzustreben, um daraus das individuelle HRV-Muster zu erkennen.

Mit der Entwicklung der „beat-to-beat“ erfassbaren Blutdruckschwankungen nach dem Prinzip von Penaz (1973) kann diese Leitlinie in gleicher Weise auf die peripheren Blutdruckfluktuationen und Schlagvolumenfluktuationen angewendet werden. Im englischen Sprachgebrauch hat sich für die Blutdruckvariabilität der Begriff „Blood Pressure Variability“ (BPV) durchgesetzt. Spektralanalysen der Herzschlagfolge und des peripheren Blutdruckes gemeinsam eröffnen völlig neue Möglichkeiten zur Beschreibung des zentralen Regelkreises.

Abschließend ist noch einmal zu betonen, dass HRV-Maße nicht isoliert, sondern stets in Kombination mit anderen Beanspruchungsparametern betrachtet werden sollten, besonders mit der Herzfrequenz und dem arteriellen Blutdruck (s. oben). Die Praxistauglichkeit der HRV-Analyse auch im Rahmen von Felduntersuchungen an Arbeitsplätzen ist durch langjährige eigene Erfahrung ausreichend erwiesen. Daher ist sie nicht nur Forschungseinrichtungen, sondern in einer zugeschnittenen Form auch interessierten Betriebsärzten zu empfehlen, zumal kardioassoziierte Aspekte in der modernen Arbeitsmedizin eine größere Bedeutung erlangen werden (Wandel der Arbeitswelt, demografische Situation der Erwerbstätigen).

► Literatur

- Addison PS: Wavelet transforms and the ECG: a review. *Physiol Meas* 2005; 26: 155–199
- Assmann G, Cullen P, Schulte H: Simple scoring scheme for calculating the risk of acute coronary events bases on the 10-year follow-up of the Prospective Cardiovascular Münster (PROCAM) Study. *Circulation* 2002; 105: 310–315
- Berbalk A: Herzfrequenzvariabilität – ein neuer Parameter zur Belastbarkeitsdiagnostik im Leistungssport? In: Engelhardt M, Franz B, Neumann G, Pfützner A (Hrsg): Triathlon und Sportwissenschaft. Hamburg 1998; 13: 79–98
- Berntson GG, Bigger T, Eckberg DL, Grossman P, Kaufmann PG, Malik M, Nagaraja HN, Porges SW, Saul JP, Stone PH, van der Molen MW: Heart rate variability: Origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiol* 1997; 34: 623–648
- Böckelmann I: Arbeitsmedizinische Fragen zur Neurotoxikologie beruflicher Blei- und Lösemittelexposition. Habilitation. Med. Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2006
- Brüggemann T, Andersen D, Völler H, Ziss W, Schröder R: Herzfrequenzvariabilität im Langzeit-EKG bei Normalpersonen. *Z Kardiol* 1991; 80 (Suppl 6): 48
- Eckoldt K: Untersuchungen über die Wirkungen der vegetativen Herznerven mit Hilfe von unblutigen Meßverfahren. Humboldt Univ Berlin, Biowiss Fak, Diss B/Habilschrift, 1975
- Eilers K: Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität als Indikatoren psychischer Beanspruchung: Zur Reliabilität und Validität von Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilitätsmaßen als Indikatoren psychischer Beanspruchung bei Daueraufmerksamkeitsbelastungen. In: Studien zur Arbeits- und Organisationspsychologie, Bd. 16, Peter Lang, Frankfurt am Main, 1999
- Esperer H-D: Analyse der Herzfrequenzvariabilität mittels Langzeit-EKG. *Herzschr Elektrolys* 1995a; 6: 172–194
- Esperer H-D: Physiologische Grundlagen und pathophysiologische Aspekte der Herzfrequenzvariabilität beim Menschen. *Herzschr Elektrolys* 1995b; 5 (Suppl II): 2–10
- Esperer HD: Neue Methode zur Detektion und Differenzierung von kardialen Arrhythmien. Habilschrift. Otto-v.-Guericke-Univ. Magdeburg, Med. Fakultät, 2002
- Fleisher LA, Frank SM, Sessler DI, Cheng C, Matsukawa T, Vannier CA: Thermoregulation and heart rate variability. *Clinical Science* 1996; 90: 97–103
- Hautala AJ, Tulppo MP, Makikallio TH, Laukkanen R, Nissila S, Huikuri HV: Changes in cardiac autonomic regulation after prolonged maximal exercise. *Clin Physiol* 2001; 21: 238–245
- Hedelin R, Bjerle P, Henriksson-Larsen K: Heart rate variability in athletes: relationship with central and peripher performance. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: 1394–1398
- Hofer E: Angewandte Statistik. Volk u Gesundheit, Berlin, 1974
- Horn A: Diagnostik der Herzfrequenzvariabilität in der Sportmedizin. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Sportmedizin, 2004
- James DV, Barnes AJ, Lopes P, Wood DM: Heart rate variability: response following a single bout of interval training. *Int J Sports Med* 2002; 23: 247–251
- Kincaid JC: The autonomic nervous system. In: Rodney AR, George AT: medical physiology. Lippincott, Williams and Wilkins, Philadelphia (USA), 2003, S 108–118
- Koepchen H-P, Huopaniemi T (eds): Cardiorespiratory and Motor Coordination. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1991
- Kouidi E, Haritonidis K, Koutlianos N, Deligiannis A: Effects of athletic training on heart rate variability triangular index. *Clin Physiol Funct Imaging* 2002; 22: 279–284
- Kreuter H, Klaes L, Hoffmeister H, Laaser U (1995) Prävention von Herz-Kreislauf-Krankheiten, Ergebnisse und Konsequenzen der Deutschen Herz-Kreislauf-Präventionsstudie. Juventa, Weinheim und München
- Krtstal-Boneh E, Froom P, Harari G, Malik M, Ribak J (2000) Summer-winter differences in 24 h variability of heart rate. *J Cardiovasc Risk* 7: 141–146
- Kuch B, Hense HW, Sinnreich R, Kark JD, von Eckardstein A, Sapoznikov D, Bolte HD (2001) Determinants of short-period heart rate variability in the general population. *Cardiology* 95: 131–138
- Lee CM, Wood RH, Welsch MA (2003) Influence of short-term endurance exercise training on heart rate variability. *Med Sci Sports Exerc* 35: 961–969
- Löllgen H (1999) Herzfrequenzvariabilität. *Dt Ärztebl* 31–32: A-2029–2032
- Malfatto G, Branzi G, Riva B, Sala L, Leonetti G, Facchini M (2002) Recovery of cardiac autonomic responsiveness with low-intensity physical training in patients with chronic heart failure. *Eur J Heart Fail* 4: 159–166
- Malik M (1996) Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation* 17: 354–381
- Malik M, Camm AJ (1995) Heart Rate Variability: Futura Publ Comp, Inc. Armonk New York
- Mandigout S, Melin A, Fauchier L, N'Guyen LD, Courteix D, Obert P (2002) Physical training increases heart rate variability in healthy prepuberal children. *Eur J Clin Invest* 32: 479–487
- Manthei U, Cammann H, Eckoldt K (1996) Zum Wert der Spektralanalyse von Herzperiodendauern bei Patienten mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen. *Herz Kreisl* 28: 20–23
- Massin MM, Maeyns K, Withofs N, Ravet F, Gerard P (2000) Circadian rhythm of heart rate and heart rate variability. *Arch Dis Child* 83: 179–182
- Melanson EL (2000) Resting heart rate variability in men varying in habitual physical activity. *Med Sci Sports Exerc* 32 (11): 1894–1901
- Metzler P, Nickel B (1986) Zeitreihen und Verlaufsanalysen, Hirzel, Leipzig

- 34 Moser M (2005) Innovative Parameter zur Messung von Beanspruchung und Erholung Herzfrequenzvariabilität. Österreichisches Forum Arbeitsmedizin. Heft 01/05 „Stress“: 12–17
- 35 Mück H und Mück-Weymann M (2003) Alles über Herzratenvariabilität www.hrv24.de
- 36 Nickel P, Eilers K, Seehase L, Nachreiner F (2002) Zur Reliabilität, Validität, Sensitivität und Diagnostizität von Herzfrequenz- und Herzfrequenzvariabilitätsmaßen als Indikatoren psychischer Beanspruchung. Z Arb Wiss 56:22–36
- 37 Parati G, Omboni S, Villani A, Galvina F, Castiglioni P, Di Rienzo M, Mancina G (2001) Reproducibility of beat-by-beat blood pressure and heart rate variability. Blood Press Monit 6:217–220
- 38 Patzak A, Mrowka R, Springer S, Eckardt T, Ipsiroglu OS, Erler T, Hofmann S (2000) Herzfrequenzvariabilität – Methoden, Physiologie und Applikation im pädiatrischen Schlaflabor. Wiener Klin Wschr 11, 2/5:234–250
- 39 Penaz J (1973) Photoelectric measurement of blood pressure, volume, and flow in the finger.
- 40 Perkiomaki JS, Zareba W, Badilini F, Moss AJ (2002) Influence of atropine on fractal and complexity measures of heart rate variability. Ann Noninvasive Electrocardiol 7:326–331
- 41 Pfister EA, Böckelmann I, Ferl T (1996) Vegetative function diagnosis for early detection of lead intoxication. Int Arch Occup Environ Health 69,1:14–20
- 42 Pfister EA, Böckelmann I, Peter B (2004) Stressbewältigung und vegetativer Tonus. ErgoMed 28:55–63
- 43 Pfister EA, Böckelmann I, Peter B, Wollenberg H (2006) Arbeitsmedizinische Möglichkeiten bei der Zurückdrängung von arbeitsassoziierten Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Zbl Arbeitsmed (eingereicht)
- 44 Recordati G (2003) A thermodynamic model of the sympathetic and parasympathetic nervous system. Auton Neurosci 103:1–12
- 45 Rennie KL, Hemingway H, Kumari M, Brunner E, Malik M, Marmot M (2003) Effects of moderate and vigorous physical activity on heart rate variability in a British study of civil servants. Am J Epidemiol 158:135–143
- 46 Rüdiger H, Henke S, Paditz E, Ziemssen T, Süß M, Süß F (2006) Untersuchung zur Genauigkeit der Abtastung von EKG-Signalen für eine nachfolgende Spektralanalyse kontinuierlich gemessener RR-Intervalle im Schlaflabor. Somnologie 10, 1–8
- 47 Rüdiger H, Klinghammer L, Scheuch K (1999) The trigonometric regressive spectral analysis – a method for mapping of beat-to-beat recorded cardiovascular parameters on to frequency domain in comparison with fourier transformation. Computer Methods and programs in Biomedicine 58:1–15
- 48 Schubert E (1984) Bedeutung von Untersuchungen des Herzrhythmus. Dt Gesundh Wesen 39,22:845–856
- 49 Sharpley CF, Kamen P, Galatsis M, Heppel R, Veivers C, Claus K (2000) An examination of the relationship between resting heart rate variability and heart rate reactivity to a mental arithmetic stressor. Appl Psychophysiol Biofeedback 25:143–153
- 50 Terziotti P, Schena F, Gulli G, Cevese A (2001) Post-exercise recovery of autonomic cardiovascular control: a study by spectrum and cross-spectrum analysis in humans. Eur J Appl Physiol 84:187–194
- 51 Tsuji H, Larson MG, Venditti FJH, Manders ES, Evans JC, Feldman CL, Levy D (1996) Impact of reduced heart rate variability on risk for cardiac events. The Framingham Heart Study. Circulation 94:2850–2855
- 52 Ueno LM, Moritani T (2003) Effects of long-term exercise training on cardiac autonomic nervous activities and baroreflex sensitivity. Eur J Appl Physiol 89:109–114
- 53 Umetani K, Singer DH, McCraty R, Atkinson M (1998) Twenty-four hour time domain heart rate variability and heart rate: Relations to age and gender over nine decades. JACC 31,3:93–601
- 54 Uusitalo AL, Laitinen T, Vaisanen SB, Lansimies E, Rauramaa R (2002) Effects of endurance training on heart rate and blood pressure variability. Clin Physiol Funct Imaging 22: 173–179
- 55 Van Amelsvoort LGPM, Schouten EG, Maan AC, Swenne CA, Kok FJ (2000) Occupational determinants of heart rate variability. Int Arch Occup Environ Health 73:255–262
- 56 Verlinde D, Beckers F, Ramaekers D, Aubert AE (2001) Wavelet decomposition analysis of heart rate variability in aerobic athletes. Auton Neurosci 90:138–141
- 57 Wagner T, Rudolf M, Noack F (1998) Die Herzfrequenzvariabilität in der arbeitsphysiologischen Feldforschung – Methodenprobleme und Anwendungsbeispiele. Z Arbeits Organisationspsychol 42,4:197–204
- 58 Zaza A, Lombardi F (2001) Autonomic indexes based on the analysis of heart rate variability: a view from the sinus node. Cardiovasc Res 50:434–442
- 59 Zhang R, Iwasaki K, Zuckerman JH, Behbehani K, Crandall CG, Levine BD (2002) Mechanism of blood pressure and R-R variability: insights from ganglion blockade in humans. J Physiol 543:337–348

Erarbeitet von:

E.A. Pfister, Magdeburg, H. Rüdiger, K. Scheuch, Dresden (2001)

Diskutiert im Forum Arbeitsphysiologie

Letztmalig aktualisiert von: E.A. Pfister, I. Böckelmann, Magdeburg, H. Rüdiger, R. Seibt, Dresden, R. Stoll, R. Vilbrandt, Rostock, Juli 2006

Verabschiedet vom Vorstand der DGAUM: November 2006

Hinweise bitte an:

Geschäftsstelle der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin
Institut für Arbeitsmedizin Universitätsklinikum Schleswig-Holstein,
Campus Lübeck, Ratzeburger Allee 160
23538 Lübeck
Fax: +49 (451) 500-3632