

Zbl Arbeitsmed 2020 · 70:269–277

<https://doi.org/10.1007/s40664-020-00401-x>

Online publiziert: 14. Juli 2020

© Der/die Autor(en) 2020



I. Böckelmann¹ · S. Sammito^{1,2}

¹ Bereich Arbeitsmedizin, Medizinische Fakultät, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, Deutschland

² Forschung & Erprobung, Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe, Köln, Deutschland

Herzfrequenzvariabilitätsanalyse in der betriebsärztlichen Praxis

Die Herzfrequenz- bzw. Herzratenvariabilität („heart rate variability“, HRV) hat in den letzten Jahren nicht nur in der klinischen Medizin (beispielhaft in der autonomen Funktionsdiagnostik in der Neurologie, in der Neuropathiediagnostik bei Diabetes und bei der Risikostratifizierung nach einem Myokardinfarkt), sondern auch zunehmend in experimentellen, forschungsorientierten arbeitsmedizinischen Studien Interesse gefunden. Daher wird sie in der Arbeitsphysiologie als Beanspruchungsindikator in Belastungs-Beanspruchungs-Analysen verwendet.

Auch in der betriebsärztlichen, präventiv ausgerichteten Praxis hat sich die HRV als ein möglicher Gesundheitsindikator etabliert. Dies gilt insbesondere auf dem Gebiet der betrieblichen Gesundheitsförderung (BGF) bei Fragestellungen im Kontext der Risikoprävention von Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

Die HRV ist ein Parameter der allgemeinen Aktivierung in einem komplexen vegetativen Regulationssystem des Organismus. Beim Einsatz in der betriebsärztlichen Praxis kann sie auf die abweichenden Regulationsmechanismen des Herz-Kreislauf-Systems (HKS) oder auf eine sympathisch-parasympathische Imbalance des autonomen Nervensystems (ANS) hinweisen.

Auf Basis einer selektiven Literaturrecherche unter Einbeziehung von Empfehlungen aus Leitlinien und Lehrbü-

chern zur Analyse der HRV ist es das Ziel dieses Beitrags, dass der Leser im Anschluss die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der HRV als Beanspruchungsparameter im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge und Prävention kennt.

Physiologische Grundlagen

Bedeutung der Regulationssysteme des autonomen Nervensystems

Bei einem gesunden Erwachsenen schlägt das Herz nicht mit einer konstanten Frequenz. Die Anzahl der Herzaktionen (bestehend aus einer Kontraktionsphase [Systole] und einer anschließenden Erschlaffungsphase [Diastole]) während einer Minute wird als Herzschlagfrequenz (Hf) bezeichnet. Diese neigt zu einer physiologischen Variation und wird durch verschiedene physische und psychische Faktoren beeinflusst. Der Grundrhythmus der Herzaktion sowie die Kontrolle, Regulation und Steuerung des HKS werden durch efferente Fasern des ANS über parasympathische und sympathische Nerven bestimmt. Das ANS beeinflusst mit seinen beiden Anteilen bei den Regulationsprozessen neben der Hf (Chronotropie), die Geschwindigkeit der Überleitungszeit der Herzerregung über den AV-Knoten (Dromotropie), die Erregbarkeit des Herzens (Bathmotropie), die Herzmuskelkontraktivität (Inotropie) sowie -relaxation (Lusitropie) und somit die Variabilität der Hf [1, 2]. Das ANS moduliert mit seinem sympathischen Anteil über die Noradrenalinfreisetzung fördernd und mit seinem parasymp-

pathischen (vagalen) Anteil über die Acetylcholinfreisetzung hemmend die Herzrhythmik. Im Ruhezustand oder in der Regenerationsphase überwiegt in der Regel die parasympathische gegenüber der sympathischen Steuerung [3].

Bezogen auf die HRV führt eine Aktivierung des Sympathikus, z. B. während einer Stresssituation oder unter hoher Belastung, zu einer Reduzierung und eine Aktivierung des Parasympathikus, wie sie in Ruhe und im Schlaf vorkommt, zu einer Erhöhung der HRV.

Definition und Parameter

Die mittels statistischer Methoden analysierte Zeitreihe von aufeinanderfolgenden Herzaktionen (den sog. NN-Intervallen; **Abb. 1**) führt zu verschiedenen Parametern, die die Variabilität der NN-Intervalle beschreiben und unter dem Begriff HRV zusammengefasst werden [4]. Die verschiedenen Parameter der HRV dienen dazu, das Zusammenspiel von Sympathikus und Parasympathikus bei der Regulation und Steuerung des HKS, u. a. bei unterschiedlichen Belastungssituationen im Arbeitsprozess, differenzierter zu beschreiben. Über die Ausprägung des Niveaus der Regulationsmechanismen können die funktionalen Reserven des HKS und die Anpassungsmöglichkeiten des Gesamtorganismus beurteilt werden.

Es hat sich international eine Unterteilung der HRV-Parameter in 3 Bereiche etabliert [4]:

- Zeitbereich,
- Frequenzbereich,
- nichtlineare Methoden.

Herrn Prof. Dr. med. Bernd Hartmann zum 75. Geburtstag gewidmet.



Abb. 1 ▲ Ausschnitt aus einem Elektrokardiogramm (EKG). Die Erfassung der NN-Intervalle dient als Grundlage der Herzfrequenzvariabilitätsanalyse

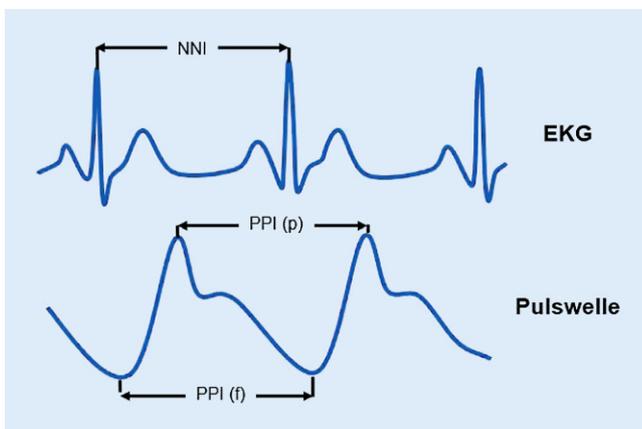


Abb. 2 ◀ Unterschiede zwischen einer EKG-Ableitung und der daraus resultierenden Abstände zwischen den R-Zacken (NN/NN-Intervall) und der Ableitung der Abstände zwischen 2 Pulswellen (PPI Pulswellenintervalle)

In **Tab. 1, 2 und 3** sind für die 3 Bereiche die jeweils zuzuordnenden HRV-Parameter mit der jeweils gültigen Messeinheit, der Definition und der Zuordnung des HRV-Parameter zum autonomen Nervensystem nach den Erkenntnissen aus der Literatur aufgelistet.

Von der HRV ist grundsätzlich die Variabilität des Pulsschlages (die sog. Pulswellenvariabilität, PRV) zu unterscheiden (**Abb. 2**). Wenngleich das Vorgehen analog erscheint (statistische Varianz zwischen den unterschiedlichen Abständen zweier Pulsschläge in Analogie zu den Herzaktionen), erreicht die PRV als Surrogat für den Abstand zwischen 2 Herzaktionen nicht die Genauigkeit der Erfassung der NN-Intervalle mittels EKG [5]. Im Gegensatz zu einer EKG-basierenden Messung der NN-Intervalle wird die Messung der Pulswelle durch z. B. die Gefäßsteifigkeit beeinflusst. Insbesondere das HF-Band wird bei der PRV gegenüber der HRV überschätzt [6]. Es gilt daher, sehr strikt zwischen der HRV und

der PRV zu unterscheiden, um nicht zwei ähnliche, aber von der Messmethodik unterschiedliche Parameter irrtümlich zu verwechseln. Die Analyse der HRV auf Basis einer Messung der Abstände zweier Pulsschläge (z. B. mittels Pulsoxymeter) wird in nationalen Leitlinien daher nicht empfohlen [4].

Rahmenbedingungen der HRV-Analyse

Einflussfaktoren

Es gibt eine Reihe von endogenen und exogenen Faktoren beruflicher und nichtberuflicher Herkunft, welche die HRV beeinflussen können (**Abb. 3**).

Diese Einflussfaktoren sollten vor der Untersuchung erfasst und bei den Messungen bzw. Auswertungen berücksichtigt werden [9]. So nimmt die HRV mit dem Alter zunächst von der Geburt an zu und nimmt ab dem 2. Lebensjahrzehnt kontinuierlich ab. Männer

und Frauen zeigen eine unterschiedlich hohe HRV, welche sich erst beginnend mit dem 5. Lebensjahrzehnt annähert, und es existieren Erkenntnisse, dass die HRV mit einer Ethnienzugehörigkeit unterschiedlich ausfällt. Zahlreiche Krankheiten beeinflussen die HRV und reduzieren sie, während positiv assoziierte Lebensstilfaktoren (z. B. regelmäßiger Ausdauersport, Fitness) die HRV erhöhen und negativ assoziierte (z. B. Nikotinabusus, regelmäßiger Alkoholkonsum) die HRV reduzieren. Gerade bei Kurzeitaufzeichnungen ist die zirkadiane Rhythmik der HRV zu beachten (**Abb. 4**; [10]). Daher sollten Wiederholungs- oder Vergleichsmessungen zur gleichen Tageszeit gewählt werden. Neben diesen Faktoren beeinflussen auch arbeitsplatzbezogene und sonstige Einflussfaktoren die HRV, deren Kenntnis für eine aussagekräftige HRV-Analyse zwingend notwendig ist.

Technische Anforderungen

Um eine hohe Qualität der HRV-Analyse zu erreichen, sind folgende Anforderungen an die Technik zu berücksichtigen: Neben der Art der NN-Intervalldetektion (am besten EKG-genau) ist hierbei ein besonderes Augenmerk auf die Abtastrate (Genauigkeit der Messung der NN-Intervalle, möglichst hoch) und auf den Tragekomfort zu setzen. Ferner sollte ein Messgerät die Möglichkeit der späteren automatischen wie auch manuell visuellen Detektion von Artefakten besitzen. Aus diesen Gründen hat sich das 24-h-Langzeit-EKG-Monitoring zur späteren Analyse der HRV als Goldstandard etabliert. Neben stationären Geräten, die sich für Laboruntersuchungen und Intensivstationen eignen, sind mobile Messsysteme als tragbare 24-h-EKG-Geräte klein und sowohl für Labor- als auch für Felduntersuchungen ausreichend und werden vom Probanden zumeist als noch ausreichend komfortabel tragbar empfunden. Diese Geräte bieten neben der visuellen und manuellen Artefaktkorrektur ferner die Möglichkeit, die Häufigkeit von (ventrikulären und supraventrikulären) Extrasystolen einzuschätzen, da eine HRV-Analyse bei einem Anteil von Extrasy-

stolen von >1 % an allen Herzaktionen nicht empfohlen wird [4].

Demgegenüber stehen sog. Brustgurt-systeme zur Verfügung, welche unter Berücksichtigung von Limitationen nutzbar sind. Auch diese sind klein, mobil einsetzbar und besitzen eine hohe Rückwirkungsfreiheit für den Probanden und eine entsprechende (Trage-)Akzeptanz, sodass diese insbesondere bei Feldversuchen eingesetzt werden können. Die Datenaufzeichnung kann jedoch insbesondere bei Verwendung von Brustgurtssystemen mit Funkübertragung zu einer separaten speichernden Uhr in der Nähe elektromagnetischer Felder (z. B. von Strommasten/-leitungen) sowie beim Einsatz in Fahrzeugen aufgrund von Funkstörungen beeinträchtigt sein [11, 12]. Zumeist haben diese Messsysteme auch keine EKG-Aufzeichnung, was die Beurteilung der Artefakte erschwert. Außerdem gilt es zu bedenken, dass es sich bei diesen Systemen zumeist nicht um ein Medizinprodukt nach dem Medizinproduktegesetz (MPG) handelt. Neben diesen beiden etablierten Verfahren existiert gerade auf dem Markt der „wearables“ eine ganze Reihe weiterer Geräte, die mittels unterschiedlicher Verfahren und Methoden die Herzaktionen und Pulsaktionen erfassen können. Diese sind jedoch in ihrer Datenaufzeichnung und -genauigkeit zumeist deutlich eingeschränkter und daher eher dem Bereich der „Lifestyle-Produkte“ zuzuordnen als für eine klinische und/oder wissenschaftliche Fragestellung mit HRV-Analyse geeignet.

Zusammenfassend gilt es, bei der Auswahl der Geräte zur Erfassung der Kardiointervalle die Vorteile vs. Nachteile von Messungen unter Laborbedingungen (kontrollierte Bedingungen, besser geeignet für Kurzzeitmessungen) und *im Alltag*, z. B. mittels 24-h-Holter EKG (für Langzeitmessungen, Aktivität des Probanden nicht sicher kontrollierbar, formal nicht stationär) gegeneinander abzuwägen [4].

Aufzeichnungsdauer

Die Auswahl der Aufzeichnungsdauer ist abhängig von der Fragestellung, von den Analysemethoden und der Wahl der HRV-Parameter. Vergleichende Un-

tersuchungen aus 2 Messungen sollten, wenn immer möglich, zur gleichen Tageszeit erfolgen und eine identische Aufzeichnungs- und Analysedauer haben. Nur so sind die ermittelten HRV-Parameter aus diesen 2 Messungen vergleichbar.

Die Wahl der Aufzeichnungsdauer hängt von vielen Kriterien ab. Grundsätzlich lassen sich sowohl stationäre als auch mobile Messungen, sowohl Kurzzeit- als auch Langzeitmessungen durchführen. Jedoch werden Messungen unter *Laborbedingungen* nur in seltenen Fällen 24 h und länger betragen, während mobile Kurzzeitmessungen *im Alltag* sich aufgrund der häufig nicht kontrollierbaren Aktivitäten des Probanden nicht anbieten. Da zusätzlich der zirkadiane Rhythmus beachtet werden muss, eignen sich für solche Messungen eher 24-h-Messungen mit mobilen Geräten. Für Kurzzeitmessungen am Arbeitsplatz oder im Rahmen von BGF-Maßnahmen sollte auf jeden Fall die Einschwingphase beachtet werden (z. B. wenn der Proband kurz zuvor körperlich aktiv war) und die Messung sollte unter kontrollierten Bedingungen stattfinden.

Die Wahl der Aufzeichnungsdauer hängt neben der reinen Betrachtung und Analyse des gewünschten Zeitintervalls auch von den später genutzten HRV-Parametern ab. So sollten für eine Analyse der HRV-Parameter SDANN und SDNN-Index eine Langzeitmessung, am besten über 24 h, erfolgen [4]. Für die HRV-Parameter HRV triangular Index und TINN („triangular interpolation NN intervall histogramm“) sollte die Auswertungszeit mindestens 20 min betragen. Bei Spektralanalysen ist je nach zu analysierendem Frequenzbereich eine Mindestaufzeichnungsdauer von einigen Minuten (HF-Band) bis hin zu einigen Stunden einzuhalten (■ **Tab. 4**), da die Aufzeichnungsdauer das 10-fache der Periodendauer umfassen sollte [13]. Gerade bei vergleichenden Analysen mit mehreren Parametern aus dem Frequenzbereich gilt es, für alle Parameter die Mindestaufzeichnungsdauer einzuhalten, weswegen sich z. B. bei den Analysen von LF/HF sowie LF nu, HF nu eine 5-minütige Aufzeichnungsdauer etabliert hat. ■ **Abb. 5** zeigt eine Über-

Zbl Arbeitsmed
<https://doi.org/10.1007/s40664-020-00401-x>
 © Der/die Autor(en) 2020

I. Böckelmann · S. Sammito

Herzfrequenzvariabilitätsanalyse in der betriebsärztlichen Praxis

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag werden basierend auf einer selektiven Literaturrecherche und unter Berücksichtigung aktueller Leitlinien die Rahmenbedingungen der Herzfrequenzvariabilitätsanalyse (HRV-Analyse), die Auswahl der HRV-Parameter bei den verschiedenen Fragestellungen und die Möglichkeiten der Nutzbarkeit der HRV für die betriebsärztliche Praxis zusammengefasst. Inzwischen in der praktischen Anwendung gut etabliert, werden die HRV-Parameter als Beanspruchungsindikatoren für die Einschätzung der Regulationsmechanismen und funktionalen Reserven des Herz-Kreislauf-Systems eingesetzt.

Schlüsselwörter

Autonomes Nervensystem · Sympathikus · Parasympathikus · Vegetatives Nervensystem · Herz-Kreislauf-System

Analysis of heart rate variability in the occupational medical practice

Abstract

This review article explains the general conditions of the heart rate variability (HRV) analysis, the selection of the HRV parameters for different questions and the possibilities for utilization of HRV for the occupational physician, based on a selective literature search and considering current guidelines. The practical application of HRV is now well established, the HRV parameters are used as stress indicator and for the estimation of the regulatory mechanisms and functional reserves of the cardiovascular system.

Keywords

Autonomic nervous system · Sympathetic nervous system · Parasympathetic nervous system · Vegetative nervous system · Cardiovascular system

Tab. 1 Gebräuchliche Parameter für die Herzfrequenzvariabilität (HRV) des Zeitbereichs. (Mod. nach [7])

Variabilitätsmaß	Messeinheit	Definition und Erklärung	Aktivität als Teil des autonomen Nervensystems
Mittlerer RR	ms	Mittelwert aller NN-Intervalle	–
SDNN	ms	„Standard deviation of NN intervals“ (Standardabweichung der NN-Intervalle im Messzeitbereich)	Sympathikus und Parasympathikus
SDANN	ms	„Standard deviation of the average NN intervals“ (Mittelwert der Standardabweichungen aller konsekutiven 5-Minuten-NN-Intervalle zur Abschätzung der HRV bei Langzeitmessungen)	Keine klare Zuordnung
RMSSD	ms	„Root Mean Square of successive differences“ (Quadratwurzel des Mittelwertes der Summe aller quadrierten Differenzen zwischen benachbarten NN-Intervallen)	Parasympathikus
SDNN-Index	ms	Mittelwert der Standardabweichung von allen normalen NN-Intervallen von 5-min-Seg-menten aus dem 24-h-EKG	Keine klare Zuordnung
NN50	k. E.	Anzahl der Paare benachbarter NN-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen	Parasympathikus
pNN50	%	Prozentsatz aufeinander folgender NN-Intervalle, die mehr als 50 ms differieren	Parasympathikus
HRV triangular Index	k. E.	Integral der Dichteverteilung (Anzahl aller NN-Intervalle dividiert durch das Maximum (Höhe) der Dichteverteilung) bzw. Quotient aus der absoluten Anzahl der NN-Intervalle zur Anzahl der modalen NN-Intervalle	Keine klare Zuordnung
TINN	ms	„Triangular interpolation of NN interval histogram“ (Länge der Basis des minimalen quadratischen Unterschiedes der triangulären Interpolation für den höchsten Wert des Histogramms aller NN-Intervalle)	Keine klare Zuordnung

k. E. keine Einheit, RR Abstand zwischen den R-Zacken (NN-Intervall)

Tab. 2 Gebräuchliche Herzfrequenzvariabilität(HRV)-Parameter des Frequenzbereichs. (Mod. nach [7])

Variabilitätsmaß	Messeinheit	Definition und Erklärung	Aktivität als Teil des autonomen Nervensystems
TP	ms ²	<i>Total Power</i> : Gesamtleistung oder Gesamtspektrum; entspricht Energiedichte im Spektrum von 0,00001 bis 0,4 Hz	Keine klare Zuordnung
VLF	ms ²	„Very low frequency power“ (Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,003–0,04 Hz)	Parasympathikus
VLF%	%	Prozentualer VLF-Anteil am Gesamtspektrum	Parasympathikus
LF	ms ²	„Low frequency power“ (Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,04–0,15 Hz)	Sympathikus und Parasympathikus, wobei der Anteil des Parasympathikus überwiegt
LF%	%	Prozentualer LF-Anteil am Gesamtspektrum	Sympathikus und Parasympathikus, wobei der Anteil des Parasympathikus überwiegt
HF	ms ²	„High frequency power“ (Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,15–0,40 Hz)	Parasympathikus
HF%	%	Prozentualer HF-Anteil am Gesamtspektrum	Parasympathikus
LF nu	Nu	„Low frequency normalized unit“, entspricht $LF / (TP - VLF) \times 100^a$	Sympathikus und Parasympathikus (der Anteil des Parasympathikus überwiegt)
HF nu	Nu	<i>High frequency normalized unit</i> : entspricht $HF / (TP - VLF) \times 100^a$	Parasympathikus
LF/HF	k. E.	Quotient der LF und HF	–

k. E. keine Einheit

^aLF nu und HF nu verhalten sich reziprok zueinander, die Summe beider Parameter ergibt 100 %

sicht über die zu beachtenden Aspekte zur Aufzeichnungsdauer und -methode.

Auswahl der HRV-Parameter

Bei der Beurteilung der Beanspruchung bei *physischen Belastungen*, insbesondere bei dynamischer Muskelarbeit, empfiehlt sich die Hf. Zusätzlich können auch die

HRV-Parameter SDNN, RMSSD, Total Power, LF- und HF-Power sowie die nichtlinearen Indizes SD1 und SD2 einbezogen werden. Der Informationsgewinn der HRV bei solchen Fragestellungen liegt in dem zumindest unter

Tab. 3 Gebräuchliche Parameter der Herzfrequenzvariabilität (HRV) aus nichtlinearen Analysen. (Mod. nach [7])

Methoden	Variabilitätsmaß	Messeinheit	Definition und Erklärung	Aktivität als Teil des autonomen Nervensystems
Poincaré-Plot	DL	ms	Länge des Längsdurchmessers der 95 %-Vertrauensellipse	Keine klare Zuordnung
	DQ	ms	Länge des Querdurchmessers der 95 %-Vertrauensellipse	Keine klare Zuordnung
	SD1	ms	Standardabweichung der Punktabstände zum Querdurchmesser ^a	Parasympathikus
	SD2	ms	Standardabweichung der Punktabstände zum Längsdurchmesser ^a	Sympathikus und Parasympathikus
Detrended-fluctuation-Analyse (DFA) oder trendbereinigende Fluktuationsanalyse	DFA1	k. E.	Grad der Zufälligkeit/Korrelation; reicht von 0,5 (zufällig) bis 1,5 (korreliert) mit Normalwerten um 1,0; wird häufig als nichtlinearer Parameter für kurze NN-Intervall-Daten genutzt	Keine klare Zuordnung
	DFA2	k. E.	Wird häufig als nichtlinearer Parameter für NN-Intervalle längerer Aufzeichnungsdauer genutzt, reduzierte Werte sind assoziiert mit einer schlechten Prognose	Keine klare Zuordnung
Recurrence-Plot	L _{mean}	Schläge	„Mean line length“	Keine klare Zuordnung
	L _{max}	Schläge	„Max line length“	Keine klare Zuordnung

k. E. keine Einheit

^aSD1 und SD2 korrelieren direkt mit den HRV-Parametern SDNN und dem SDNN-Index und werden daher von einigen Autoren nicht als nichtlineare Parameter, sondern vielmehr als zeitbezogene HRV-Parameter eingestuft [8]

Tab. 4 Überblick über die Periodendauer der Leistungsbänder und Empfehlungen zur Aufzeichnungs- bzw. Auswertungsphasenlänge

Leistungsband	Frequenzbereich des Leistungsdichtespektrums	Periodendauer	Notwendige Mindestaufzeichnungsdauer
ULF	<0,003 Hz	>als 5:30 min	>55 min
VLF (Thermoregulationsband)	0,003 bis 0,04 Hz	5:30 min bis 25 s	55 min
LF (Baroreflexorenband)	0,04 bis 0,15 Hz	25 bis 7 s	250 s
HF (Atmungsband)	0,15 bis 0,40 Hz	7 bis 2,5 s	70 s

UVLF „ultra low frequency“, VLF „very low frequency“, LF „low frequency“, HF „high frequency“

standardisierten Bedingungen nachweisbaren Zusammenhang zwischen HRV-Parametern und metabolischen und respiratorischen Beanspruchungsindikatoren, dem mehrphasigen Verlauf bei progressiver Belastungssteigerung unter standardisierten Bedingungen und dem Erholungsverhalten nach unterschiedlichen Belastungsintensitäten [14, 15]. Diese besitzen somit einen Mehrwert im Vergleich zum linearen Verhalten der Hf. Der Vorteil liegt in einer genaueren Einschätzung der physischen Beanspruchungen bei gleichzeitigem Verzicht auf eine zeitaufwändige, kostenintensive, teilweise nicht ambulant verfügbare und reaktive Messtechnik.

Zur Beurteilung der Beanspruchung bei *psychischen Belastungen* eignen sich Auslenkungen der Hf, welche die Dynamik der Herzschlagfrequenzregulation widerspiegeln. Gerade bei psychischen Belastungen sind spontane und manchmal nur kurzzeitige Hf-Anstiege häufig verbunden mit einem ebenso sponta-

nen und schnellen Abfall. Darum gehen bei der Betrachtung der mittleren Hf über einen längeren Zeitabschnitt viele Informationen über das Herzschlagfrequenzverhalten verloren. Es ist daher günstiger, zusätzlich die Dynamik der Hf zu betrachten. Darüber hinaus eignen sich die folgenden HRV-Parameter: RMSSD, Power im LF- und HF-Band bzw. LF nu und HF nu, der Koeffizient LF/HF sowie DQ und SD1. Dagegen eignen sich ULF und VLF bei dieser Fragestellung nicht. Vor allem bei den schwer messbaren psychischen Belastungen spiegeln die Hf-Auslenkungen und die aufgeführten HRV-Parameter die allgemeine Aktivierung wider und bieten eine Möglichkeit, die vegetative Balance des Organismus zu beschreiben. Somit können über diese psychischen Beanspruchungsindikatoren Rückschlüsse auf die stattgefunden psychische Belastung gezogen werden [16–22].

Messvergleiche

Intraindividuelle Beanspruchungssituationen ein und desselben Probanden im zeitlichen Verlauf oder unter zwei unterschiedlichen Belastungssituationen lassen sich grundsätzlich ohne Weiteres miteinander vergleichen, sofern Aufzeichnungsdauer, -messmethode und -auswertung identisch gewählt wurden. Demgegenüber werden für Einzelmessungen von Probanden, z. B. im Rahmen der BGE, mit dem Ziel, diese gegenüber einem Kollektiv zu vergleichen (interindividueller Vergleich), entsprechende Referenzwerte benötigt. Hierzu ist es notwendig, dass sich die Referenzstichprobe aufgrund nichtbeeinflussbarer Einflussfaktoren aus einer möglichst homogenen, gesunden und mit dem Probanden vergleichbaren Bevölkerungsstichprobe zusammensetzt, eine Berücksichtigung von Alter und Geschlecht bei der Berechnung der Referenzwerte vorgenommen wurde und die Aufzeichnungsdauer und

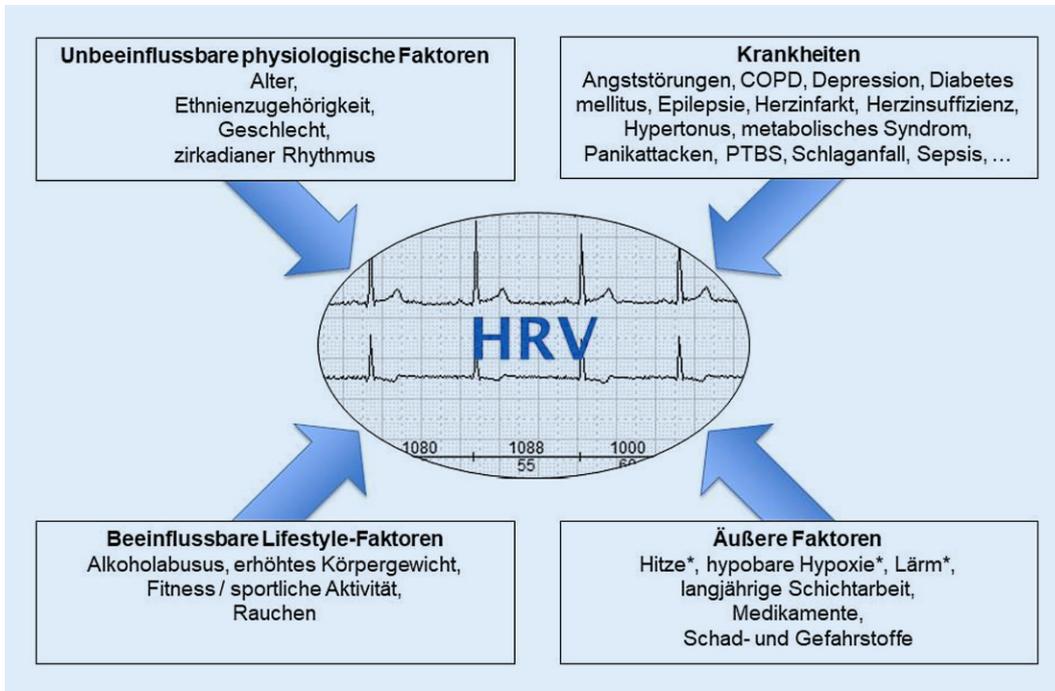


Abb. 3 ◀ Einflussfaktoren auf die HRV. HRV Herzfrequenzvariabilität, COPD chronisch-obstruktive Lungenerkrankung, PTBS posttraumatische Belastungsstörung, Asterrisk HRV-Reduzierung als Folge der physiologischen Reaktion auf den physikalischen Reiz. (Mod. nach [9])

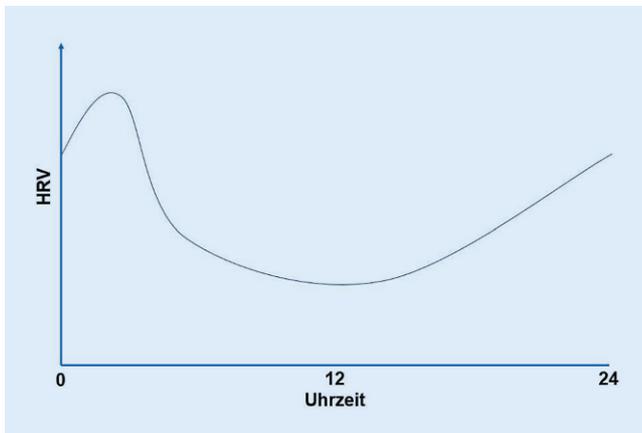


Abb. 4 ◀ Zirkadianer Rhythmus der Herzfrequenzvariabilität. (Nach [10])

Analysemethode mit der für den Probanden gewählten übereinstimmt. In der wissenschaftlichen Literatur liegt eine Reihe von entsprechenden Arbeiten vor (Tab. 5); für den praktisch oder wissenschaftlich tätigen Arbeitsmediziner sind jedoch lediglich publizierte Referenzwerte der erwachsenen Bevölkerung im arbeitsfähigen Alter von Nutzen.

Erstmalig wurden bereits in den Empfehlungen der Europäischen Gesellschaft für Kardiologie und der North American Society of Pacing and Electrophysiology zum Einsatz und den Analysemöglichkeiten der HRV 1996 Referenzwerte publiziert [23]. Aufgrund fortgeschrittener Messtechnik (Festplattenrekorder anstel-

le von Bandaufzeichnungen) ist davon auszugehen, dass die damals publizierten Referenzwerte nur begrenzt einsetzbar sind. So zeigten Untersuchungen, dass signifikante Unterschiede in den analysierten HRV-Parametern beim direkten Vergleich alter Bandrekordersysteme vs. den neueren Festplattenrekordern vorliegen [24]. In Tab. 5 ist eine Übersicht über publizierte Arbeiten zu HRV-Referenzwerten und wesentliche statistische Kenngrößen der genutzten Analyse- und Auswertemethodik dargestellt. Der Vollständigkeit halber werden auch außereuropäische Bevölkerungen aufgeführt, da im Rahmen der Globalisierung ggf. auch ein Einsatz oder eine Beratungsleistung

durch den hiesigen Arbeitsmediziner für ein Werk in Asien etc. stattfinden könnte.

Anwendungsgebiete der HRV-Analyse

Durch den fortlaufenden Wandel der Arbeitswelt mit zunehmenden kognitiven Herausforderungen des Arbeitnehmers gegenüber früher vorherrschenden körperlichen Beanspruchungen werden neue Beanspruchungsmaße, die über die unmittelbare Stoffwechselvermittlung bzw. Energetik hinausgehen und die neue Belastungen gut erfassen können, benötigt. Hier bietet sich die HRV an, da sie die vegetative Balance des Organismus beschreibt und als Parameter der allgemeinen Aktivierung gilt. In der betriebsärztlichen Praxis lässt sich die HRV-Analyse u.a. als Beanspruchungsindikator an Arbeitsplätzen für die Beurteilung der Beanspruchung bei Einführung neuer Arbeitsmittel und neuer Technologien nutzen [33]. Hierbei ist der Einsatz der HRV sowohl unter Laborbedingungen, an Modellarbeitsplätzen und bei Felduntersuchungen an Arbeitsplätzen unter realen Arbeitsplatzbedingungen nutzbar. So zeigen beispielhaft Untersuchungen mit HRV-Analyse, dass bei einer kurzzeitigen An-

Tab. 5 Übersicht über die verschiedenen Studien mit der Angabe der Normwerte

Studie	Probanden/Altersgruppe	Anzahl	Dauer der Analyse	Altersbezogen	Geschlechterbezogen	Angabe der Normwerte als ...
Bigger et al. (1995) [25]/ESC/NASPE (1996) [23]	Erwachsene	274	24 h	Nein	Nein	MW ± SD
ESC/NASPE (1996) [23]	Erwachsene	k. A.	5 min	Nein	Nein	MW ± SD
Nunan et al. (2010) [26]	Systematisches Review	1–40 Studien	5 min	Nein	Ja	MW ± SD
Kim und Woo (2011) [27]	Erwachsene koreanische Teilnehmer an Check-up-Untersuchungen	3396	5 min	Ja	Ja	MW ± SD
Voss et al. (2012) [28]	Repräsentative erwachsene deutsche Bevölkerung	1906	5 min	Ja	Nein	Perzentile
Zeng et al. (2014) [29]	Chinesische Probanden	371	15 min	Ja	Ja, aber kein Unterschied festgestellt	Perzentile
Voss et al. (2015) [30]	Repräsentative erwachsene deutsche Bevölkerung	1906	5 min	Ja	Ja	MW ± SD
Sammito und Böckelmann (2017a) [31]	Deutsche erwachsene Bevölkerung (20–60 Jahre)	695	24 h	Ja	Ja	Perzentile
Sammito und Böckelmann (2017b) [32]	Deutsche erwachsene Bevölkerung (20–60 Jahre)	673	5 min	Ja	Ja	Perzentile

MW Mittelwert, SD Standardabweichung, k. A. keine Angaben

	≤ 60 s	5 min	15 min	1-6 h	24 h	24*X h
Stationär / Labor	✓	✓	✓	✓	(✓)	(✓)
im Alltag	✓	(✓)	(✓)	✓	✓	✓
Frequenzanalyse HF und LF	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Frequenzanalyse VLF	✗	✗	✗	✓	✓	✓
Frequenzanalyse ULF	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Zirkadianik	!	!	!	!	✓	✓
Vergleichbar	← ————— ✗ ————— →					
Analysemethoden	!	!	!	!	!	!

Abb. 5 ▲ Übersicht über Einschränkungen der Herzfrequenzvariabilitätsanalyse in Abhängigkeit von der Länge der Aufzeichnung. *Grüne Haken* = geeignet, *rote X* = nicht geeignet, *Ausrufezeichen* = ist zu beachten, *24*X* = mehrfaches von 24 h, *HF* „high frequency“, *LF* „low frequency“, *VLF* „very low frequency“, *ULF* „ultra low frequency“

wendung von Assistenzsystemen keine zusätzliche Beanspruchung durch ihre Nutzung entsteht [34]. Die HRV ist bei vielen physikalischen und chemischen Belastungsfaktoren reduziert [22]. Auch wenn die Auswirkungen beruflich bedingter Exposition neurotoxischer Substanzen mittels der

HRV-Analyse in Form von reduzierter HRV aufgezeigt werden können [35–39], ersetzt die HRV keineswegs die etablierten Methoden des Biomonitorings und der arbeitsplatzbezogenen Schutzmaßnahmen, um den Arbeitnehmer zielgerichtet und ausreichend vor den

pathologischen Wirkungen ebendieser Stoffe zu schützen. Ferner ist die HRV bei Arbeitnehmer in Schichtarbeit zusätzlich reduziert [22] und lässt sich darüber hinaus zur Einschätzung des Burnout-Risikos und Arbeitsstresses [40] nutzen. Auch in diesen Fällen liegt eine reduzierte HRV vor. Neben dem Einsatz der HRV als zusätzlichem Parameter im Rahmen einer Beurteilung physischer und psychischer Belastungen und Beanspruchungen lässt sich die HRV-Analyse auch im Rahmen von Präventionsmaßnahmen für die Evaluierung von stattgefundenen Maßnahmen und zur Einschätzung des Interventionserfolgs einsetzen [4, 41]. So eignet sie sich beispielhaft zur Einschätzung des Interventionserfolgs im Rahmen von Stressbewältigungskursen [25], BGF-Maßnahmen zu Ernährungs-, Genussmittel- und/oder Konsumumstellungen sowie bei sportlichen Betätigungen, der vegetativen Auswirkungen der Gewichtsreduktion einschließlich der präventiven Überwachung vor Übertrainingssyndromen [42]. So kann eine Veränderung der sympathisch-parasympathischen Balance hin zu einer höheren parasympathischen Grundaktivität auf positive Auswirkungen der

Präventionsmaßnahmen hinweisen. Zu beachten ist jedoch, dass es initial bei Neuaufnahme von sportlicher Betätigung zu einer Reduzierung der HRV kommt; diese sollte jedoch bei adäquater Beanspruchung der Teilnehmer im Zeitverlauf, insbesondere bei regelmäßigem moderatem aerobem Training, zu einer Erhöhung der Gesamtvariabilität des Herzschlags und zu einer Zunahme der vagal-modulierten HRV-Parameter in Ruhe führen [43, 44]. Im Gegensatz dazu deutet eine zunehmend reduzierte HRV auf ein Übertrainingssyndrom hin und sollte durch regenerative Maßnahmen ersetzt werden. Die regelmäßige Kontrolle der Hf und der HRV erlauben es daher, im Rahmen von sportlichen BGF-Maßnahmen die Beanspruchung von Teilnehmern im Training individuell so zu gestalten, dass es nicht zu einer Überforderung und somit zu einem negativen Effekt der BGF-Maßnahme kommt.

Die Literaturrecherche zeigt, dass die HRV sich insbesondere gut für die Risikostratifizierung hinsichtlich Herz-Kreislauf-Erkrankungen eignet. Der Zusammenhang zwischen reduzierter HRV und Prognose-Scores für HKE ist zwar bekannt [45], aber bisher ist keine Handlungsempfehlung zum praktischen Einsatz vorhanden. So zeigten unterschiedliche Untersuchungen den Zusammenhang zwischen reduzierter HRV mit erhöhten kardiovaskulären Risikoparametern [45] bzw. mit dem Auftreten einer koronaren Herzerkrankung bzw. einem Schlaganfall [46–49].

Fazit für die Praxis

- Unter Berücksichtigung der o. g. Qualitätskriterien für die Erfassung der Intervalle zwischen 2 Herzaktionen und der nachfolgenden Analyse der HRV sowie unter Wahl eines geeigneten Vergleichskollektivs (intra-/interindividuell) besitzt die HRV großes Potenzial, erweitert die diagnostische Bandbreite und erweist sich im Rahmen von Felduntersuchungen an Arbeitsplätzen als praxistauglich.
- So ergänzt die HRV-Analyse mittels Objektivierung der Aktivität des autonomen Nervensystems die

klassischen physiologischen und psychologischen Messsysteme und liefert weitergehende Informationen über die Mechanismen der Herz-Kreislauf-Regulation bei unterschiedlichen Anforderungen sowie eine Beurteilbarkeit der funktionalen Reserven des HKS.

- **Dennoch bleiben eine weiterführende (ärztliche) Anamnese und ggf. (arbeitsmedizinische) Untersuchung unerlässlich.**

Korrespondenzadresse



Prof. Dr. med. I. Böckelmann
Bereich Arbeitsmedizin,
Medizinische Fakultät, Otto-
von-Guericke-Universität
Magdeburg
Leipziger Str. 44,
39120 Magdeburg,
Deutschland
Irina.Boeckelmann@
med.ovgu.de

Funding. Open Access funding provided by Projekt DEAL.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. I. Böckelmann erhielt von der Firma Grünenthal GmbH (Deutschland) ein Honorar für eine HRV-Präsentation (Ärztliche Weiterbildung und Fortbildung 09/2019 in Dresden) und hat keine anderen potenziellen Interessenkonflikte zu melden. S. Sammito gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Addicks K (1990) Morphologische Grundlagen der autonomen Regulation der Herzrhythmickeit. In: Griebenow R, Gülker H (Hrsg) Autonomes Nervensystem und Herzrhythmusstörungen. Thieme, Stuttgart, New York, S 1–16
2. Isenberg G (1990) Zellphysiologische Grundlagen der kardialen Sympathikus- und Parasympathikuswirkung. In: Griebenow R, Gülker H (Hrsg) Autonomes Nervensystem und Herzrhythmusstörungen. Thieme, Stuttgart, New York, S 17–55
3. Gramann KSR (2009) Psychophysiologie. Körperliche Indikatoren psychischen Geschehens, 4. Aufl. Beltz, Weinheim, Basel
4. Sammito S, Thielmann B, Seibt R, Klusmann A, Weippert M, Böckelmann I (2015) Guideline for the application of heart rate and heart rate variability in occupational medicine and occupational science. ASU International Edition, Gentner Verlag, Stuttgart. <https://doi.org/10.17147/ASUI.2015-06-09-03>
5. Schäfer A, Vagedes J (2013) How accurate is pulse rate variability as an estimate of heart rate variability? A review on studies comparing photoplethysmographic technology with an electrocardiogram. Int J Cardiol 166(1):15–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2012.03.119>
6. Dehkordi P, Garde A, Karlen W, Wensley D, Ansermino JM, Dumont GA (2013) Pulse rate variability compared with Heart Rate Variability in children with and without sleep disordered breathing. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2013:6563–6566. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6611059>
7. Böckelmann I, Sammito S (2016) Herzfrequenzvariabilität. In: Letzel S, Nowak D (Hrsg) Handbuch der Arbeitsmedizin. 41. Ergänzungslieferung, 06/2016. ecomed Medizin, Landsberg, S 1–32
8. Brennan M, Palaniswami M, Kamen P (2001) Do existing measures of Poincaré plot geometry reflect nonlinear features of heart rate variability? IEEE Trans Biomed Eng 48(11):1342–1347. <https://doi.org/10.1109/10.959330>
9. Sammito S, Böckelmann I (2016) Factors influencing heart rate variability. Int J Cardi Forum 6:8–22. <https://doi.org/10.17987/icf.v6i0.242>
10. Sammito S, Sammito W, Böckelmann I (2016) The circadian rhythm of heart rate variability—A systematic review of the literature. Biol Rhythm Res 47(5):717–730. <https://doi.org/10.1080/09291016.2016.1183887>
11. Sammito S, Darius S, Böckelmann I (2011) Validierungsstudie zum Einsatz eines funktionslosen Brustgurtsystems zur Messung der Herzratenvariabilität unter Ruhebedingungen und in Fahrzeugen. Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed 46:60–65
12. Sammito S, Böckelmann I (2012) Validierung von drei verschiedenen Systemen zur Erfassung der Herzschlagfrequenz in Sanitätsfahrzeugen. ErgoMed Z Prakt Arbeitsmed 36(2):38–45
13. Berntson GG, Bigger JT, Eckberg DL, Grossman P, Kaufmann PG, Malik M, Nagaraja HN, Porges SW, Saul JP, Stone PH, van der Molen MW (1997) Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. Psychophysiology 34(6):623–648. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb02140.x>

14. Cottin F, Médigue C, Lopes P, Leprêtre P-M, Heubert R, Billat V (2007) Ventilatory thresholds assessment from heart rate variability during an incremental exhaustive running test. *Int J Sports Med* 28(4):287–294. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924355>
15. Kaikkonen P, Hynynen E, Mann T, Rusko H, Nummela A (2010) Can HRV be used to evaluate training load in constant load exercises? *Eur J Appl Physiol* 108(3):435–442. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1240-1>
16. Aasman J, Mulder G, Mulder LJ (1987) Operator effort and the measurement of heart-rate variability. *Hum Factors* 29(2):161–170. <https://doi.org/10.1177/001872088702900204>
17. Backs RW, Ryan MR (1994) Psychological measures of workload during continuous performance. *Hum Factors* 36:514–531
18. Egelund N (1982) Spectral analysis of heart rate variability as an indicator of driver fatigue. *Ergonomics* 25(7):663–672. <https://doi.org/10.1080/00140138208925026>
19. Jorna PG (1992) Spectral analysis of heart rate and psychological state: a review of its validity as a workload index. *Biol Psychol* 34(2–3):237–257. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(92\)90017-o](https://doi.org/10.1016/0301-0511(92)90017-o)
20. Kalsbeek J, Ettema J (1963) Continuous recording of heart rate and the measurement of perceptual load. *Ergonomics* 6:306–307
21. Paas FG, van Merriënboer JJ, Adam JJ (1994) Measurement of cognitive load in instructional research. *Percept Mot Skills* 79(1 Pt 2):419–430. <https://doi.org/10.2466/pms.1994.79.1.419>
22. van Amelsvoort LG, Schouten EG, Maan AC, Swenne CA, Kok FJ (2000) Occupational determinants of heart rate variability. *Int Arch Occup Environ Health* 73(4):255–262. <https://doi.org/10.1007/s004200050425>
23. 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
24. Körber T, Ismer B, von Knorre GH (2000) Die klinische Bedeutung der Verwendung unterschiedlicher Rekordertechnologien für die Ergebnisse der Analyse der Herzfrequenzvariabilität aus dem Langzeit-EKG. *Herzschr Elektrophys* 11:110–116
25. Bigger JT Jr, Fleiss JL, Steinman RC, Rolnitzky LM, Schneider WJ, Stein PK (1995) RR variability in healthy, middle-aged persons compared with patients with chronic coronary heart disease or recent acute myocardial infarction. *Circulation* 91(7):1936–1943. <https://doi.org/10.1161/01.cir.91.7.1936>
26. Nunan D, Sandercock GRH, Brodie DA (2010) A quantitative systematic review of normal values for short-term heart rate variability in healthy adults. *Pacing Clin Electrophysiol* 33(11):1407–1417. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.2010.02841.x>
27. Kim G-M, Woo J-M (2011) Determinants for heart rate variability in a normal Korean population. *J Korean Med Sci* 26(10):1293–1298. <https://doi.org/10.3346/jkms.2011.26.10.1293>
28. Voss A, Heitmann A, Schroeder R, Peters A, Perz S (2012) Short-term heart rate variability—age dependence in healthy subjects. *Physiol Meas* 33(8):1289–1311. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/33/8/1289>
29. Zeng F, Tang Z-H, Li Z, Yu X, Zhou L (2014) Normative reference of short-term heart rate variability and estimation of cardiovascular autonomic neuropathy prevalence in Chinese people. *J Endocrinol Invest* 37(4):385–391. <https://doi.org/10.1007/s40618-013-0047-4>
30. Voss A, Schroeder R, Heitmann A, Peters A, Perz S (2015) Short-term heart rate variability—influence of gender and age in healthy subjects. *PLoS ONE* 10(3):e118308. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118308>
31. Sammito S, Böckelmann I (2017) New reference values of heart rate variability during ordinary daily activity. *Heart Rhythm* 14(2):304–307. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2016.12.016>
32. Sammito S, Böckelmann I (2017) Alters- und geschlechterbezogene Referenzwerte für den Einsatz der Herzfrequenzvariabilität in der Bewegungstherapie. *Bewegungsther Gesundheitsport* 33:268–275
33. Schega L, Hamacher D, Böckelmann I, Mecke R, Huckauf A, Urbina M, Tümler J (2011) Wirkung unterschiedlicher mobiler Augmented Reality Systeme auf die Beanspruchung im industriellen Arbeitsprozess. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 46:402–410
34. Minow A, Böckelmann I (2018) Beanspruchungsindikatoren mit neuen digitalen Assistenztechnologien – Wie smarte Arbeit 4.0 gelingt Kognitive Ergonomie: Der Mensch – eingebunden in die Logistik 4.0. Huss, München, S 106–113
35. Murata K, Araki S, Yokoyama K, Maeda K (1991) Autonomic and peripheral nervous system dysfunction in workers exposed to mixed organic solvents. *Int Arch Occup Environ Health* 63(5):335–340. <https://doi.org/10.1007/BF00381584>
36. Murata K, Araki S, Yokoyama K (1991) Assessment of the peripheral, central, and autonomic nervous system function in styrene workers. *Am J Ind Med* 20(6):775–784. <https://doi.org/10.1002/ajim.4700200609>
37. Murata K, Araki S, Yokoyama K, Nomiyama K, Nomiyama H, Tao YX, Liu SJ (1995) Autonomic and central nervous system effects of lead in female glass workers in China. *Am J Ind Med* 28(2):233–244. <https://doi.org/10.1002/ajim.4700280208>
38. Araki S, Murata K, Yokoyama K (1994) Application of neurophysiological methods in occupational medicine in relation to psychological performance. *Ann Acad Med Singapore* 23(5):710–718
39. Böckelmann I, Pfister EA, McGauran N, Robra B-P (2002) Assessing the suitability of cross-sectional and longitudinal cardiac rhythm tests with regard to identifying effects of occupational chronic lead exposure. *J Occup Environ Med* 44(1):59–65. <https://doi.org/10.1097/00043764-200201000-00010>
40. Järvelin-Pasanen S, Sinikallio S, Tarvainen MP (2018) Heart rate variability and occupational stress—systematic review. *Ind Health* 56(6):500–511. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2017-0190>
41. Tapanainen JM, Thomsen PEB, Køber L, Torp-Pedersen C, Mäkikallio TH, Still A-M, Lindgren KS, Huikuri HV (2002) Fractal analysis of heart rate variability and mortality after an acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 90(4):347–352. [https://doi.org/10.1016/s0002-9149\(02\)02488-8](https://doi.org/10.1016/s0002-9149(02)02488-8)
42. Hoos O (2009) Herzfrequenzvariabilität und Physiotherapie. *Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. *Z Physiother* 61:277–282
43. Carter JB, Banister EW, Blaber AP (2003) Effect of endurance exercise on autonomic control of heart rate. *Sports Med* 33(1):33–46. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333010-00003>
44. Sandercock GRH, Bromley PD, Brodie DA (2005) Effects of exercise on heart rate variability: inferences from meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 37(3):433–439. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000155388.39002.9d>
45. Kleiger RE, Miller JP, Bigger JT, Moss AJ (1987) Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 59(4):256–262. [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(87\)90795-8](https://doi.org/10.1016/0002-9149(87)90795-8)
46. Carnethon MR, Liao D, Evans GW, Cascio WE, Chambless LE, Rosamond WD, Heiss G (2002) Does the cardiac autonomic response to postural change predict incident coronary heart disease and mortality? The Atherosclerosis Risk in Communities Study. *Am J Epidemiol* 155(1):48–56. <https://doi.org/10.1093/aje/155.1.48>
47. Carnethon MR, Liao D, Evans GW, Cascio WE, Chambless LE, Heiss G (2002) Correlates of the shift in heart rate variability with an active postural change in a healthy population sample: The Atherosclerosis Risk In Communities study. *Am Heart J* 143(5):808–813. <https://doi.org/10.1067/mhj.2002.121928>
48. Banzer W, Lucki K, Bürklein M, Rosenhagen A, Vogt L (2006) Sportmedizinische Aspekte kardialer Risikostratifizierung. Herzfrequenzvariabilität und physische Leistungsfähigkeit. *Herzschr Elektrophys* 17:197–204
49. Tsuji H, Venditti FJ, Manders ES, Evans JC, Larson MG, Feldman CL, Levy D (1996) Determinants of heart rate variability. *J Am Coll Cardiol* 28(6):1539–1546. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(96\)00342-7](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(96)00342-7)