

publiziert bei	 AWMF online Das Portal der wissenschaftlichen Medizin
----------------	--

AWMF-Register Nr.	002/042	Klasse:	S2k
-------------------	---------	---------	-----

Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft

S2k-Leitlinie

der

Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM)

und

der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA),

der Deutschen Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention e.V. (DGSP) und

der Deutschen Physiologischen Gesellschaft e. V. (DPG)

DGAUM
DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR
ARBEITSMEDIZIN UND UMWELTMEDIZIN

GfA



DGSP
Deutsche Gesellschaft für
Sportmedizin und Prävention -
Deutscher Sportärzteebund



Leitlinienkoordination

Stefan Sammito, Irina Böckelmann

Leitliniengruppe

Stefan Sammito^{1,2}, Beatrice Thielmann¹, Andre Klusmann³, Andreas Deußen⁴, Klaus-Michael Braumann⁵, Irina Böckelmann¹

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

²Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe, Köln

³Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg, Professur Arbeitswissenschaft

⁴Institut für Physiologie, Medizinische Fakultät der Technischen Universität Dresden

⁵Abt. Sport- und Bewegungsmedizin, Fakultät für Psychologie und Bewegungswissenschaft, Universität Hamburg

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	6
2.	Definitionen	6
3.	Physiologische Mechanismen	10
3.1	Physiologische Mechanismen der Hf	10
3.2	Physiologische Mechanismen der HRV	10
4.	Erfassung der NN-Intervalle für die Berechnung der Hf und der HRV	12
4.1	Technische Möglichkeiten und Voraussetzungen	12
4.2	Elektroden	15
4.3	Vorbereitung der Haut	15
4.4	Auswahl der Ableitung und Positionierung der Elektroden	16
4.5	Qualitätssicherung bei der Erfassung der Hf	17
4.6	Qualitätssicherung bei der Ermittlung der HRV	17
4.7	Weitere Störquellen	19
5.	Analyseverfahren und Parameter der HRV	20
6.	Einflussfaktoren der individuellen Hf und HRV	29
7.	Auswertung und Interpretation von Hf und der HRV	36
7.1	Herzschlagfrequenz (Hf)	37
7.2	Ruheherzschlagfrequenz (Hf_{Ruhe})	37
7.3	Maximale Herzschlagfrequenz (Hf_{max})	38
7.4	Erholungsherzschlagfrequenz ($Hf_{Erholung}$)	39
7.5	(Herzschlagfrequenz-)Dauerleistungsgrenze	39
7.6	Herzfrequenzvariabilität (HRV)	42
8.	Möglichkeiten der Anwendung in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft ...	45
8.1	Einsatz bei physischen Belastungen	46
8.2	Einsatz bei psychischen Belastungen	47
8.3	Einsatz zur Prognose von Erkrankungen	47
8.4	Einsatz bei Präventionsmaßnahmen	49
8.5	Einsatz beim Biofeedback	50
9.	Schlussbemerkungen	50

10. References**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Vorbemerkung

Die vorliegende aktualisierte Leitlinie ersetzt die erstmalig im Jahre 2014 publizierte Leitlinie zur „Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft“ [1]. Die Autorengruppe hat basierend auf der 2014er Version der Leitlinie die in der Zwischenzeit publizierten Erkenntnisse zur Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität¹ gesichtet, bewertet und in eine Neufassung dieser Leitlinie einfließen lassen.

Diese Leitlinie wurde für den arbeitsmedizinischen bzw. -wissenschaftlichen Einsatz in Praxis und Forschung entwickelt, um die Einschätzung von Belastungen und die Beurteilung von Gefährdungen am Arbeitsplatz durch objektive physiologische Beanspruchungsparameter zu vervollständigen. Die Leitlinie gibt einen Überblick über die Einflussfaktoren auf die Regulation von Herzschlagfrequenz und Herzfrequenzvariabilität in Ruhe und unter den Bedingungen von Arbeitsbelastungen. Sie zeigt methodische Möglichkeiten der Messung im Labor und unter realen Arbeitsplatzbedingungen auf. Dabei werden ausgewählte Messmethoden und Anwendungsgebiete sowie Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Erfassung und Auswertung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität beschrieben.

Die aktualisierte Leitlinie besitzt neben einzelnen kleineren redaktionellen bzw. inhaltlichen Änderungen im Schwerpunkt in folgenden Themenfeldern größeren Veränderungen:

- Aussage zur Nutzbarkeit mobiler Wearables (Kap. 4.1),
- Trennschärfe zwischen HRV und Pulswellenvariabilität (Kap 4.1),
- Ergänzung um Neuerung im Bereich der Messtechnik seit 2014 (Tab. 1),
- Aktualisierung der Übersichtstabelle zu den HRV-Parametern (Tab. 2),
- Aktualisierung der Evidenz zu Einflussfaktoren auf die HRV und Neustrukturierung (Tab. 3),
- Ergänzungen zur Nutzbarkeit der Hf bei dynamischen Belastungen (Kap. 7.1),
- Komplette Überarbeitung des Kapitels zu Referenzwerten der HRV (Kap. 7.6),

¹ Die Herzschlagfrequenz wird hier stellvertretend für die Begriffe Herzfrequenz und Herzrate synonym genutzt, für den Begriff Herzfrequenzvariabilität gilt entsprechendes.² Sie lässt sich auch aus dem Quotienten aus 60.000 und dem mittleren NN-Intervall (NN-Intervall = Normal-to-Normal-Intervall, synonym werden die Begriffe RR-Intervall, IBI (interbeat-intervall), Herzperiodendauer bzw. Kardiointervall genutzt) in Millisekunden berechnen

- Aktualisierung zum Einsatz der HRV bei der Prognose von Erkrankungen (Kap. 8.3).

1. Einleitung

Die Herzschlagfrequenz gibt Informationen über die Beanspruchung des Herzkreislaufsystems als Reaktion auf Belastungen. Die Herzfrequenzvariabilität liefert zusätzliche Informationen über die Mechanismen der Herzkreislaufregulation [2]. Diese beiden physiologischen Parameter sind seit Jahren aufgrund der nicht-invasiven, komfortablen Mess- und Analysetechnik, der Auswertung und der Anwendung in der stationären und ambulanten Versorgung (u. a. Kardiologie, Intensivmedizin, Endokrinologie, Neurologie, Arbeits-, Sport- und Geburtsmedizin) sowie in den verschiedenen Forschungsbereichen der Medizin und Naturwissenschaften (u. a. Arbeitsphysiologie, Sportphysiologie, Arbeitswissenschaft, Psychologie und Pharmakologie) etabliert.

2. Definitionen

Kernaussage Nr. 1	neu [07/2021]
In der medizinischen Bewertung ist zwischen der Herzschlagfrequenz (zentral gemessen) und der Pulsfrequenz (peripher gemessen) zu unterscheiden. Eine Differenz kann z. B. bei bestimmten Formen von Herzrhythmusstörungen als Pulsdefizit auftreten.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Als *Herzschlagfrequenz* (Hf) wird die Anzahl der Herzaktionen während einer Minute bezeichnet.² Die Hf spiegelt die individuelle Herzkreislaufbelastung wider und wird durch unterschiedliche Faktoren (s. Kap. 6) beeinflusst. Sie ist zu unterscheiden von der *Pulsfrequenz*, die als Anzahl der Pulswellen pro Minute definiert ist und peripher erfasst wird (z. B. A. radialis bzw. A. ulnaris am Handgelenk und A. carotis communis am Hals). Ein Unterschied zwischen beiden ist möglich, weil es z. B. bei bestimmten Formen von Herzrhythmusstörungen zu ineffektiven Herzkontraktionen kommt, die zu einem nicht messbaren Pulsschlag führen. Eine Differenz zwischen Hf und Pulsfrequenz wird als *Pulsdefizit* bezeichnet.

² Sie lässt sich auch aus dem Quotienten aus 60.000 und dem mittleren NN-Intervall (NN-Intervall = Normal-to-Normal-Intervall, synonym werden die Begriffe RR-Intervall, IBI (interbeat-intervall), Herzperiodendauer bzw. Kardiointervall genutzt) in Millisekunden berechnen

Kernaussage Nr. 2	neu [07/2021]
Beim Erwachsenen liegt die Ruheherzschlagfrequenz in der Regel zwischen 60 und 80 Schlägen/min. Bei ausdauertrainierten Personen können in Ruhe Werte deutlich unterhalb von 50 Schlägen/min gemessen werden.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Die normale *Ruheherzschlagfrequenz* (Hf_{Ruhe}) des Erwachsenen liegt zwischen 60 und 80 Schlägen/min (S/min), bei Kindern ist sie i. d. R. höher (bis 120 S/min) [3]. Bei ausdauertrainierten Personen können in Ruhe Werte deutlich unterhalb von 50 S/min gemessen werden.

Empfehlung Nr. 1	neu [07/2021]
Die maximal erreichbare Herzschlagfrequenz ist interindividuell sehr unterschiedlich, sie ist u.a. alters- und geschlechtsabhängig. Es wird empfohlen, sie individuell im Rahmen einer ergometrischen Ausbelastung bei allgemeiner dynamischer Muskelarbeit zu ermitteln. Die Nutzung von Formeln zur Abschätzung der maximalen Herzschlagfrequenz sollte auf Grund der sehr breiten Streuung sehr zurückhaltend eingesetzt werden.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Durch Belastungen kann die Hf bis zu einem Maximum ansteigen. Dieses Maximum wird überwiegend vom Lebensalter bestimmt und nimmt mit zunehmendem Alter ab. Die häufig in der Arbeitsmedizin und in der Arbeitswissenschaft verwendete Faustformel zur Abschätzung der *maximal erreichbaren Hf* (Hf_{max}) lautet [4]:

$$Hf_{\text{max}} = 220 - \text{Lebensalter.}$$

Sie unterschätzt jedoch die Hf_{max} bei Personen oberhalb des 40. Lebensjahres [5]. Basierend auf einer Metaanalyse sowie eigenen Untersuchungen ermittelten Tanaka et al. [5] eine Regressionsformel zur Abschätzung der altersbezogenen maximalen Hf:

$$Hf_{\text{max}} = 207 - 0,7 \times \text{Lebensalter,}$$

wobei auch hier geschlechtsspezifische Unterschiede nicht berücksichtigt werden [5, 6]. Die hohe interindividuelle Heterogenität der maximalen Herzschlagfrequenz als Funktion des Alters belegen klinische Studien für Frauen [7] und Männer [8]. Zur Bestimmung der individuellen

Hf_{max} ist eine Ausbelastung bei allgemeiner dynamischer Muskularbeit notwendig, z. B. im Rahmen einer Laufband- oder Fahrradergometrie [9]. Ob Laufband oder Fahrrad richtet sich auch nach den spezifischen Belastungen des Probanden. Deshalb kommen evtl. auch andere Geräte wie das Handkurbelergometer in Betracht.

Kernaussage Nr. 3	neu [07/2021]
Zur weiteren Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Herzkreislaufsystems stehen die Erholungsherzschlagfrequenz, die Arbeitsherzschlagfrequenz und die Erholungsherzschlagsumme zur Verfügung.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Als Indikator für den Trainingszustand der Person wird in der Sportphysiologie häufig der Hf -Wert verwendet, der nach einer Minute³ Erholung nach Ende der maximalen Belastung im Rahmen einer (Arbeits-)Belastung festgestellt wird. Er zeigt im Vergleich mit dem Maximalwert der Herzschlagfrequenz am Ende der Belastung die schnelle regulative Phase der Erholungsfähigkeit an und wird als *Erholungsherzschlagfrequenz* ($Hf_{Erholung}$) bezeichnet.

Insbesondere im Bereich der Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft wird bei der Analyse der Beanspruchung, z. B. zur Beurteilung von körperlicher Arbeit, die *Arbeitsherzschlagfrequenz*⁴ (Hf_{Arbeit}) betrachtet. Die Hf_{Arbeit} ist definiert als Differenz zwischen der Hf_{Ruhe} und dem während einer Belastung gemessenem Wert [10–12]. Gelegentlich wird diese auch als *Nettoherzschlagfrequenz* bezeichnet [13]. Der so ermittelte Wert korreliert dann besser als die Hf mit der Arbeitsbelastung, wenn es möglich ist, vor Aufnahme der Arbeit eine Ruhephase von mindestens fünf, idealerweise 15 min, ohne körperliche und emotionale Belastung einzuhalten. Während das im Labor eine unbedingte Voraussetzung sein sollte, kann es möglich sein, dass bei Messungen am Arbeitsplatz vor Beginn einer Arbeitsschicht diese Bedingungen nicht einzuhalten sind. Dann bildet die Hf insbesondere bei körperlichen Belastungen sicherer die reale Beanspruchung ab als die auf einer erhöhten Ruhefrequenz basierende Hf_{Arbeit} . Alternativ kann

³ Bei manchen Belastungsprotokollen wird auch die Hf zusätzlich nach 3 oder 5 min. nach Belastungsende betrachtet

⁴ Ältere Publikationen verwenden häufig eher den Begriff Arbeitspuls und nicht die Arbeits- Hf .

auch die *Bezugsherzschlagfrequenz* bei leichter dynamischer Arbeit bestimmt werden (s. Kap. 7.2).

Als Maß für die Ermüdung und die Erholung wird in der Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft zudem häufig die *Erholungsherzschlagsumme* ermittelt, um die individuellen körperlichen Belastungen zu beschreiben [14]. Hierbei werden die Herzschläge zusammengezählt, die in der Erholungsphase (nach Beendigung der Belastung bis zum Erreichen des Ausgangswertes, z. B. der Hf_{Ruhe}) oberhalb des Ausgangswertes liegen (Bildung des Integrals der Herzschläge oberhalb der Hf_{Ruhe} über die Zeit vom Belastungsende bis zur Normalisierung der Hf).

Kernaussage Nr. 4	neu [07/2021]
Die Herzfrequenzvariabilität basiert auf einer mathematischen Analyse einer Zeitreihe von aufeinander folgenden Herzaktionen - den sog. NN-Intervallen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Der Begriff *Herzfrequenzvariabilität* (HRV) vereint eine Vielzahl von mathematisch berechneten Parametern, welche die Varianz, Rhythmik oder Komplexität einer Zeitreihe von aufeinander folgenden Herzaktionen - den sog. NN-Intervallen - kennzeichnet. Aufgrund der besseren Erfassung im Rahmen der automatischen Detektierung wird in der Regel die R-Zacke als Zeichen der Herzerregung genutzt (vgl. Abb. 1). Eine ausführliche Auflistung der häufig verwendeten Parameter findet sich im Kap. 5.



Abb. 1: Prinzip der Ermittlung der NN-Intervalle aus dem EKG als Abstandsmaß zwischen zwei R-Zacken.

3. Physiologische Mechanismen

3.1 Physiologische Mechanismen der Hf

Kernaussage Nr. 5	neu [07/2021]
Die vegetative Modulation der Hf durch sympathische Herznerven und den N. vagus (parasympathisch) wird primär über den Sinusknoten vermittelt.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

In Ruhe wird das Herz vom primären Taktgeber bzw. Erregungsbildungszentrum, dem Sinusknoten, angetrieben. Die Eigenfrequenz des nichtinnervierten Sinusknotens wird unterschiedlich in der Literatur angegeben. Kurzfristig nach Herztransplantation, bei der das Transplantat durch die Intervention denerviert ist, liegt die Hf höher als die normale physiologische Hf, die 60 bis 80 S/min beträgt [15]. Längere Zeit nach Transplantation verändert sie sich wieder in Richtung der normalen physiologischen Hf wahrscheinlich bedingt durch eine partielle Reinnervation. Nach Transplantation besteht jedoch weiterhin die beta-adrenerge Aktivierung der Sinusknotenzellen durch zirkulierendes Adrenalin aus dem Nebennierenmark, was zu der erhöhten Hf_{Ruhe} beitragen kann. Alle nachgeordneten, ebenfalls zur Spontandepolarisation fähigen Schrittmachergewebe (AV-Knoten, His-Bündel, Purkinje-Fasern) weisen geringere Eigenfrequenzen auf. Die vegetative Modulation der Hf durch den Sympathikus und den Parasympathikus (am Herzen singulär durch den N. vagus beeinflusst) wird primär über den Sinusknoten vermittelt. Diese zweizügige Führung des vegetativen Nervensystems wurde in Blockadeversuchen der adrenergen (beta-Blocker) und muskarinisch-cholinergen (Atropin) Rezeptoren gezeigt-[16–18].

3.2 Physiologische Mechanismen der HRV

Kernaussage Nr. 6	neu [07/2021]
Die Hf ist auch bei konstanter Belastung einer physiologischen Variabilität unterworfen, die unter anderem das Zusammenspiel von Sympathikus und N. vagus (als Teil des Parasympathikus) widerspiegelt, hieraus lassen sich HRV-Parameter berechnen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Die Hf ist auch bei konstanter Belastung einer physiologischen Variabilität unterworfen, die unter anderem das Zusammenspiel von Sympathikus und N. vagus (als Teil des Parasympathikus widerspiegelt. Das vegetative Nervensystem führt mit seinem sympathischen Anteil über eine Adrenalin- und Noradrenalinfreisetzung zu einer reduzierten HRV und mit seinem parasympathischen (vagalen) Anteil über die Acetylcholinfreisetzung zu einer Erhöhung der HRV [19].

Unter Ruhebedingungen und bei geringer Belastung überwiegt die parasympathische (vagale) gegenüber der sympathischen Steuerung. Das führt zu einer höheren Variabilität des Herzrhythmus: Die Unterschiede in den Abständen zwischen zwei aufeinander folgenden Herzaktionen nehmen zu.

Die HRV-Analyse dient insbesondere dazu, dieses Zusammenspiel von Sympathikus und Parasympathikus bei unterschiedlichen Anforderungen differenzierter abschätzen zu können. Dabei lässt sich die vegetative Aktivität vor allem durch die Analyse rhythmischer Schwankungen der Herzschlagfolge quantifizieren. Schnelle Änderungen der Hf mit einer Zyklusdauer von ca. 2 - 7 Sekunden sind eng mit der Atmung assoziiert (Respiratorische Sinusarrhythmie [RSA]). Diese hochfrequenten Schwankungen werden fast ausschließlich über den parasympathischen Zweig des vegetativen Nervensystems (N. vagus) moduliert; langsame Schwankungen (Zyklusdauer ca. 10 Sekunden) dagegen sowohl durch sympathische als auch parasympathische Efferenzen [20]. Letztlich muss bei der Interpretation von Hf und HRV immer berücksichtigt werden, dass beide Parameter zwar primär das Endergebnis der Wirkung vegetativer kardialer Efferenzen darstellen, aber darüber hinaus auch andere modulierende Faktoren wie körperliche Belastung, Hitze und weitere Umweltbedingungen Einfluss besitzen. Im Fall von Temperaturveränderungen werden die Wirkungen einerseits über die Modulation des vegetativen Nervensystems und andererseits direkt über Temperatureffekte an den Sinusknochenzellen des Herzens vermittelt.

Der vagale Ruhetonus ist umso höher, je besser das Herz an die Bewältigung hoher physischer Belastungen angepasst ist, weshalb Trainierte (z. B. Ausdauersportler) neben einer geringeren Hf_{Ruhe} i. d. R. eine höhere HRV haben. Zusätzlich zu Veränderungen der Aktivitäten vegetativer Efferenzen kommt es als Folge von Ausdauertraining zu veränderten Expressionen von Ionenkanalproteinen und Membrantransportproteinen [21], was einen zusätzlichen senkenden Effekt auf die Hf_{Ruhe} ausübt.

4. Erfassung der NN-Intervalle für die Berechnung der Hf und der HRV

4.1 Technische Möglichkeiten und Voraussetzungen

Empfehlung Nr. 2	neu [07/2021]
Für die Erfassung der Herzaktionen stehen unterschiedliche Messsysteme zur Verfügung. Deren Messgenauigkeit für eine anschließende HRV-Analyse ist unterschiedlich. Es wird empfohlen, eine EKG-basierte Messung hierzu zu nutzen. Die Geräte sollten mit einer hohen Abtastrate (idealerweise 1000 Hz) nichtinvasiv messen, mechanisch robust und rückwirkungsfrei sein.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Zur Erfassung der Abstände zwischen zwei normalen Herzaktionen stehen verschiedene Messsysteme zur Verfügung: Stationäre EKG-Geräte - besser geeignet für Laboruntersuchungen bzw. im intensivmedizinischen Bereich - und mobile Messsysteme, die in Felduntersuchungen einsetzbar sind. Zu den mobilen Messsystemen gehören 24h-EKG-Geräte, Brustgurtsysteme mit direkter Speicherung bzw. Speicherung auf einem externen Datenmodul (z. B. in einer separaten Pulsuhr) sowie eine Reihe in den letzten Jahren auf dem Markt verfügbare mobil einsetzbare Messsysteme (z. B. Uhren ohne Brustgurt, Systeme mit Messung im Gehörgang, etc.). Allen Messsystemen gemeinsam ist, dass sie mit einer unterschiedlich genauen Messgenauigkeit die NN-Intervalle erfassen und es somit bei der anschließenden HRV-Analyse zu Abweichungen kommen kann [22, 23].

Pulsoximeter können über die Erfassung der Pulswelle ebenfalls einen Abstand zwischen zwei Pulswellen ermitteln. Diese unterscheiden sich jedoch von den mittels Elektroden gemessenen NN-Intervallen am Herzen. Ein systematisches Review [24] ergab, dass lediglich bei jungen, gesunden Probanden unter Ruhebedingungen akzeptable Übereinstimmungen zwischen NN-Intervallen und Puls-NN-Intervallen bestehen, jedoch HRV-Parameter basierend auf den Puls-NN-Intervallen teilweise signifikant erhöht sind (u. a. HF). Es gilt daher strikt zwischen der HRV und der sog. Pulsratenvariabilität (PRV) zu unterscheiden. Für die HRV-Analyse ist eine sog. „beat-to-beat-Aufzeichnung“ mit Erfassung aller Herzaktionen und hoher Abtastrate (idealerweise 1.000 Hz) sinnvoll, um die Abstände zwischen den einzelnen Herzaktionen mit hoher zeitlicher Genauigkeit zu erfassen.

Darüber hinaus sollten eingesetzte Geräte folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Nichtinvasivität,
- Mechanische Robustheit (insbesondere bei Felduntersuchungen an Arbeitsplätzen mit körperlicher Schwerarbeit bzw. Umgebungsbedingungen wie Hitze, Nässe, Kälte usw.) und
- Rückwirkungsfreiheit (das Verfahren darf das Messergebnis selbst nicht beeinflussen).

Die Vor- und Nachteile einzelner Messsysteme sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Tab. 1: Vor- und Nachteile verschiedener Messsysteme

	Vorteile	Nachteile
Stationäres (24h-)EKG	<ul style="list-style-type: none"> • EKG-Aufzeichnung • nicht invasiv • visuelle Überprüfbarkeit der R-Zacken-Detektierung • Medizinprodukt nach MPG^{5,6} 	<ul style="list-style-type: none"> • nicht tragbar, nur für Laboruntersuchungen und Intensivstationen geeignet • störende Kabel
Mobiles (24h-)EKG	<ul style="list-style-type: none"> • tragbare, kleine Geräte • geeignet für Labor- und Felduntersuchung • EKG-Aufzeichnung • nicht invasiv • visuelle Überprüfbarkeit der R-Zacken-Detektierung • Medizinprodukt nach MPG 	<ul style="list-style-type: none"> • störende Kabel
Brustgurtsysteme mit Speicherung in separater Pulsuhr	<ul style="list-style-type: none"> • tragbare, kleine Geräte • hohe Rückwirkungsfreiheit • nicht invasiv 	<ul style="list-style-type: none"> • keine EKG-Aufzeichnung • Störungen der Datenübertragung (Stromleitungen, Fahrzeuge usw.) • kein Medizinprodukt nach MPG
Brustgurtsysteme mit direkter Speicherung im Brustgurt	<ul style="list-style-type: none"> • tragbare, kleine Geräte • hohe Rückwirkungsfreiheit • nicht invasiv 	<ul style="list-style-type: none"> • zumeist keine EKG-Aufzeichnung • kein Medizinprodukt nach MPG
Uhrsysteme ohne Brustgurt und mit Sensoren zur Erfassung der Pulswelle	<ul style="list-style-type: none"> • tragbare, kleine Geräte • hohe Rückwirkungsfreiheit • nicht invasiv 	<ul style="list-style-type: none"> • keine EKG-Aufzeichnung • formal keine NN-Intervallfassung • zur Messung der HRV nicht geeignet • kein Medizinprodukt nach MPG
Messung im Gehörgang	<ul style="list-style-type: none"> • tragbare, kleine Geräte • hohe Rückwirkungsfreiheit • nicht invasiv 	<ul style="list-style-type: none"> • keine EKG-Aufzeichnung • formal keine NN-Intervallfassung • zur Messung der HRV nicht geeignet • kein Medizinprodukt nach MPG
Messung mittels Ohrclips auf Pulsoximeterbasis	<ul style="list-style-type: none"> • tragbare, kleine Geräte • hohe Rückwirkungsfreiheit • nicht invasiv 	<ul style="list-style-type: none"> • keine EKG-Aufzeichnung • formal keine NN-Intervallfassung • zur Messung der HRV nicht geeignet • kein Medizinprodukt nach MPG

⁵ Medizinproduktegesetz

4.2 Elektroden

Empfehlung Nr. 3	neu [07/2021]
Es wird empfohlen, für ein optimales Messergebnis eine adäquate Vorbereitung der Elektroden durchzuführen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Um Fehler bei der Messung zu vermeiden, sollten

- Klebeelektroden verwendet werden, die auch über einen langen Erfassungszeitraum von 24 Stunden und bei entsprechender Schweißproduktion der untersuchten Person ohne Hautkontaktverlust einsetzbar sind,
- die Elektroden am Brustgurt (Abnahmestellen) befeuchtet sein,
- ein guter Sitz des Brustgurtes garantiert sein und
- ein textiles Gurtband bevorzugt werden, da es sich optimal an die individuelle Oberkörperform anpasst.

4.3 Vorbereitung der Haut

Empfehlung Nr. 4	neu [07/2021]
Es wird empfohlen, für ein optimales Messergebnis eine adäquate Vorbereitung der Haut durchzuführen. Dies umfasst u.a. die Reduzierung des Fettfilmes der Haut und ggf. eine Entfernung bestehender (Brust-)Behaarung.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Um ein optimales Messergebnis auch über einen längeren Zeitraum (24 h) zu erzielen, muss die Haut sorgfältig vorbereitet werden. Bei einem hochohmigen Haut-Elektroden-Kontakt ist die Qualität der Aufzeichnung geringer und die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Artefakten erhöht.

⁶ Geräte nach dem MPG sind speziell für diagnostische oder therapeutische Zwecke und vom Hersteller zur Anwendung am Menschen bestimmt.

Die Hautvorbereitung hat das Ziel, den Fettfilm der Haut zu entfernen, um den Elektroden-Haut-Übergangswiderstand zu vermindern und eine bessere Haftung der Elektroden zu ermöglichen. Die Haut wird am vorgesehenen Elektrodensitz mit hautverträglicher, fettlösender Flüssigkeit (z. B. Alkohollösung) abgerieben. Oberstes Prinzip ist es jedoch, die Haut nicht zu beschädigen oder zu verletzen. Bei Brusthaarwuchs ist ggf. eine sorgfältige Entfernung der Behaarung an den entsprechenden Klebestellen vor Anbringen der Klebeelektroden notwendig. Eine zusätzliche Fixierung der Elektroden und der Elektrodenkabel (Pflaster) erhöht die Haftdauer und verhindert das schnelle Abreißen der Elektroden bzw. der Kabelendstücke.

4.4 Auswahl der Ableitung und Positionierung der Elektroden

Empfehlung Nr. 5	neu [07/2021]
Es wird empfohlen, die EKG-Ableitung mit der größten Amplitude der R-Zacke des QRS-Komplexes auszuwählen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Es sollte die EKG-Ableitung mit der größten Amplitude der R-Zacke des QRS-Komplexes ausgewählt werden (vgl. Abb. 1). Prinzipiell ist die Aufzeichnung einer Ableitung ausreichend, jedoch sollten zur besseren Artefaktkorrektur mehrere Ableitungen gewählt werden.

Bei einer automatischen NN-Intervall-Bestimmung ist darauf zu achten, dass bei der R-Zacken-Detektion nicht zwischen unterschiedlichen Ableitungen „gesprungen“ wird. Dies kann zu einer fälschlich gemessenen Erhöhung der HRV führen, da der Zeitpunkt der ermittelten R-Zacke zwischen unterschiedlichen Kanälen relevant variieren kann. So ist der Zeitpunkt des Beginns des QRS-Komplexes in den meisten Ableitungen von Mehrkanalsystemen nahezu identisch, nicht jedoch der Zeitpunkt des Auftretens der R-Zacke, der als Grundlage für die NN-Intervallbestimmung dient [25, 26].

Die Positionierung der Elektroden beeinflusst die Qualität der Aufnahme. Bei ungeeigneter Positionierung der Elektroden kann es zur Häufung von Artefakten kommen, was sich negativ auf die Qualität der Aufnahme auswirkt. Geeignete Stellen für die Positionierung der Elektroden sind die Interkostalräume. Hierbei sollten möglichst glatte Hautstellen ausgewählt werden (z. B. keine erhabenen Muttermale).

4.5 Qualitätssicherung bei der Erfassung der Hf

Kernaussage Nr. 7	neu [07/2021]
Bei der Erfassung der Hf sind zur Qualitätssicherung die Bestimmung der Hf _{Ruhe} , eine Artefaktkontrolle, eine möglichst hohe Abtastrate sowie die Berücksichtigung möglicher Einflussfaktoren notwendig.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Zur Qualitätssicherung sollten folgende Aspekte unter dem Gesichtspunkt der Praktikabilität berücksichtigt werden:

- die Bestimmung der Hf_{Ruhe}⁷ vor Beginn einer Belastung als Basis der Auswertungen (s. Kap. 7.2),
- eine Artefaktkontrolle und ggf. -bereinigung (z. B. durch visuelle Kontrolle der Daten im Rahmen der Analysen, automatische Artefaktkorrekturverfahren),
- eine möglichst hohe Abtastrate (s.o.),
- die möglichen Einflussfaktoren je nach Fragestellung (s. Tab. 3) und
- die Beachtung der zirkadianen Rhythmik bei vergleichenden Untersuchungen.

4.6 Qualitätssicherung bei der Ermittlung der HRV

Empfehlung Nr. 6	neu [07/2021]
Zur Qualitätssicherung bei der Ermittlung der HRV wird empfohlen, die Ableitung eines Ruhe-EKGs durchzuführen, eine Artefaktkontrolle und ggf. -bereinigung vorzunehmen, Aufzeichnungen mit wenigen Extrasystolen zu verwenden sowie eine geeignete Analysemethode und Messdauer zu wählen, eine möglichst hohe Abtastrate zu nutzen und mögliche Einflussfaktoren zu berücksichtigen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

⁷ Dafür wird folgendes Vorgehen empfohlen: Die Messung sollte vorzugsweise in sitzender Position, nach mindestens fünf idealerweise fünfzehn minütiger Ruhephase erfolgen und durch zwei aufeinander folgende Messungen bestimmt werden. Die Messdauer sollte mindestens 30 Sekunden betragen. Eine halbe Stunde vor der Messung sollte auf Rauchen, Nahrungsaufnahme, Koffein oder physische Anstrengung verzichtet werden [107, 195].

Zur Qualitätssicherung sollten folgende Aspekte unter dem Gesichtspunkt der Praktikabilität berücksichtigt werden:

- die Ableitung eines Ruhe-EKGs vor der Analyse der HRV, um Herzrhythmusstörungen (z. B. Vorhofflimmern) auszuschließen,
- Aufzeichnungen mit mehr als 1% von ventrikulären bzw. supraventrikulären Extrasystolen sollten aufgrund der scheinbaren Erhöhung der HRV kritisch begutachtet werden [27],
- eine Artefaktkontrolle und ggf. -bereinigung (z. B. durch visuelle Kontrolle der Daten im Rahmen der Analysen, automatische Artefaktkorrekturverfahren),
- die Wahl der Analysemethode (z. B. Fast Fourier Transformation, Autoregressives Modell, trigonometrisch regressive Spektralanalyse), um vergleichende Interpretationen zu ermöglichen (s. Kap. 5),
- die gewählte Messdauer (später Länge der Analysesequenz) bzw. die zu Grunde gelegte Datenmenge je nach gewählter Analysemethode bzw. Fragestellung (s. Tab. 2),
- eine möglichst hohe Abtastrate (s.o.),
- die möglichen Einflussfaktoren je nach gewählter Analysemethode bzw. Fragestellung (s. Tab. 3) und
- die Beachtung der zirkadianen Rhythmik bei vergleichenden Untersuchungen.

Im Rahmen von Kurzzeitmessungen (Aufzeichnungen kleiner als eine Stunde) ist die Auswahl eines geeigneten, repräsentativen Bereichs der NN-Intervalle zur HRV-Analyse ein wichtiges Kriterium zur Qualitätssicherung. Hierbei sollten nichtstationäre Einschwingphasen zu Beginn der Untersuchung und Aufzeichnungen mit Artefakten möglichst nicht zur Analyse genutzt werden (s. Abb. 2).

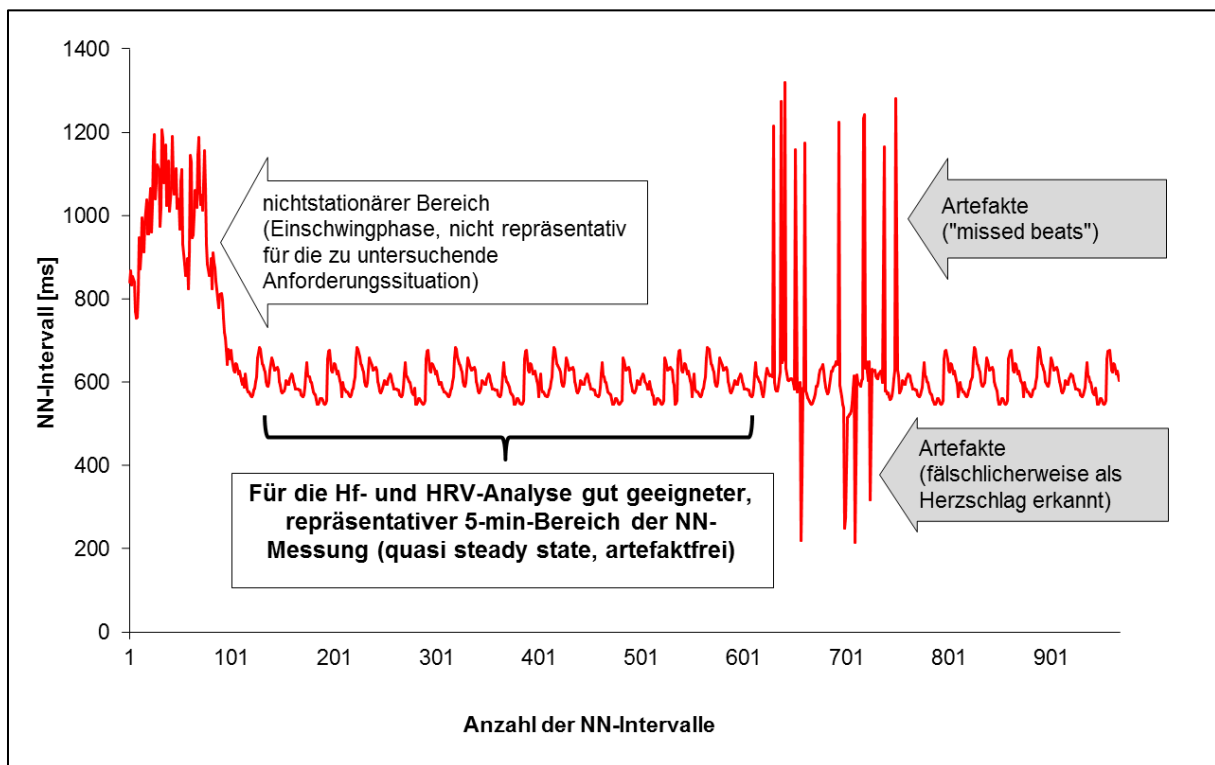


Abb. 2: Prinzip der Auswahl eines geeigneten 5-min-Bereichs der NN-Messung aus einer artefaktüberlagerten Aufzeichnung mit vorangegangenem nichtstationärem Bereich.

4.7 Weitere Störquellen

Kernaussage Nr. 8	neu [07/2021]
Es existieren auch weitere Störquellen (wie z. B. elektromagnetische Felder), welche die Aufzeichnung von Hf und HRV beeinflussen können.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Insbesondere bei Verwendung von Brustgurtsystemen mit Funkübertragung zu einer separaten speichernden Uhr in der Nähe elektromagnetischer Felder von Strommasten und -leitungen [2] sowie beim Einsatz in Fahrzeugen und deren Umgebung [28, 29] sind diese hoch störanfällig. Bei körperlicher Aktivität der untersuchten Person kann es zu Artefakten durch Bewegung und durch elektrische Aktivität anderer Muskeln kommen. Bei einer EKG-Aufzeichnung kann dies im Anschluss an die Aufzeichnung entdeckt und manuell entfernt werden, während bei einer Datenerfassung ohne EKG-Aufzeichnung (wie bei den meisten Brustgurtsystemen) keine Zuordnung der Bewegungsartefakte möglich ist.

5. Analyseverfahren und Parameter der HRV

Kernaussage Nr. 9	neu [07/2021]
Die Quantifizierung der HRV kann mittels Methoden des Zeit- und Frequenzbereichs sowie der nichtlinearen Analyse erfolgen. Es ist hierbei auf die richtige Auswahl mit Bezug zu Zielsetzung und Auswertezeit zu achten. Siehe auch Empfehlung Nr. 11 und Empfehlung Nr. 12.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Die Quantifizierung der HRV kann mittels Methoden des Zeit- und Frequenzbereichs sowie der nichtlinearen Analyse erfolgen (s. Abb. 3).

Analysen des Zeitbereiches sind in statistische und geometrische Methoden unterteilt. Während bei den statistischen Methoden die NN-Intervalle mathematisch hinsichtlich ihrer Varianz ausgewertet werden und die Rhythmusmaße mit einer Zeitdimension oder Prozentangabe versehen sind, wird die HRV bei den geometrischen Methoden anhand von geometrischen Formen bewertet. Hierzu werden z. B. Balkendiagramme, HRV-Dreiecksindizes und seine Modifikationen, dreieckige/dreischenklige Interpolationen des NN-Intervall-Balkendiagramms verwendet [30].

Zu den Analysen des Frequenzbereiches zählen u.a. die Verfahren der Fast Fourier-Transformation und die Autoregression [31] [32]. Hierbei werden die rhythmischen und nicht-rhythmischen Schwankungen der NN-Intervallreihen im Rahmen einer Spektralanalyse in frequenzabhängige Oszillationen umgewandelt. Dadurch ist es möglich, die NN-Intervallreihen und die periodischen Oszillationen des Herzschlages in verschiedene Frequenzen und Amplituden aufzuspalten, die wiederum verschiedene physiologische Prozesse bzw. verschiedene Regelsysteme abbilden [33].

In einigen Fällen wird zur Analyse bei unterschiedlichen Aufzeichnungslängen auch der Lomb-Algorithmus benutzt. Dieser stellt ein Spektralanalyseverfahren von nicht-äquidistant abgetasteten Messwerten dar [34]. Der Lomb-Algorithmus ist eine sehr langsame Technik, jedoch sind Näherungsverfahren etabliert, die die Durchführung des Lomb-Algorithmus deutlich beschleunigen [35].

Die Methoden der nichtlinearen Dynamik (z. B. Approximierte Entropie [ApEn], Sample Entropy [SampEn], Detrended Fluctuation Analysis [DFA]) [36–39] unterscheiden sich von den

traditionellen Zeit- und Frequenzparametern darin, dass sie nicht die Stärke der HRV widerspiegeln, sondern eher qualitative Aspekte der NN-Zeitreihe erfassen [36]. Oftmals sind diese Methoden sowohl für Langzeit- als auch für Kurzaufzeichnungen geeignet und robust gegen Artefakte.

Eine Form der Visualisierung von NN-Intervall Zeitreihen bietet der so genannte Poincaré-Plot⁸ [39] (vgl. Abb. 3). Aus der so dargestellten Punktwolke lassen sich verschiedene Indizes (z. B. Länge und Breite der Punktwolke) ermitteln und interpretieren, aber auch möglicherweise Aufschluss über bestimmte Herzrhythmusstörungen gewinnen [40].

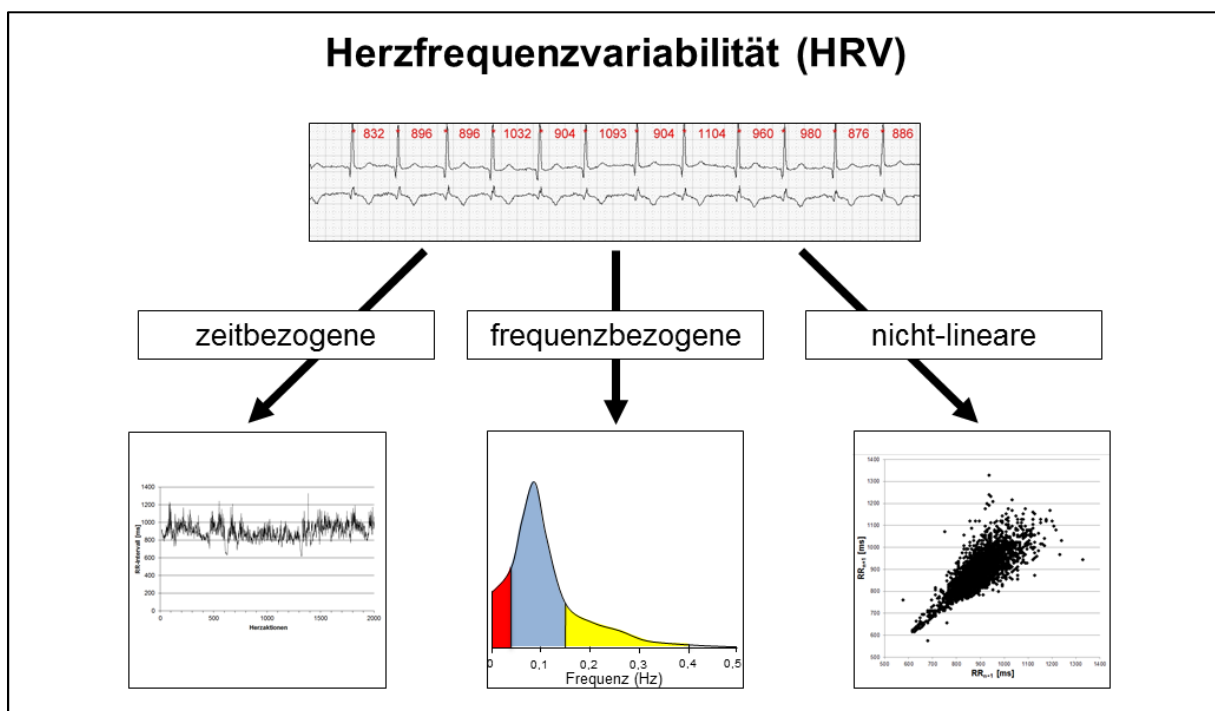


Abb. 3: Übersicht über die Möglichkeiten der HRV-Analyse mit Beispielen möglicher grafischer Darstellungen

Eine detaillierte Auflistung der HRV-Parameter ist in der Tab. 2 zusammengefasst.

⁸ Synonym werden auch die Begriffe Lorenz-Plot oder Scatter-Plot verwendet

Tab. 2: Parameter der HRV

Methode	Variabilitätsmaß	andere Bezeichnung	Messeinheit	Definition und Erklärung	Indikator der...	Aktivität als Teil des vegetativen Nervensystems	Empfehlungen zur Auswertzeit
zeitbezogene Parameter							
Statistisch	SDNN	RRSD, SD, SDRR	ms	Standard deviation of NN intervals: Standardabweichung der NN-Intervalle im Messzeitbereich	Kurz- und Langzeitvariabilität [41]	Sympathikus und Parasympathikus [42]	
	CVRR	CV	k. E.	Koeffizient der Variation der NN Intervalle, entspricht der Standardabweichung der NN-Intervalle geteilt durch den Mittelwert der NN-Intervalle	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	
	SDANN		ms	Standard deviation of the average NN intervals: Standardabweichung der Mittelwerte der NN-Intervalle in 5-min-Segmenten	Langzeitvariabilität [42]	keine klare Zuordnung	Langzeiterfassung, am besten 24h
	RMSSD	R-MSSD, rMSSD	ms	Root Mean Square of successive differences: Quadratwurzel aus dem arithmetischen Mittel der quadrierten Differenzen zwischen benachbarten NN-Intervallen	Kurzzeitvariabilität [41]	Parasympathikus	
	SDNN-Index	SDANN-Index, SDNN _i	ms	Mittelwert der Standardabweichungen der NN-Intervalle in 5-min-Segmenten	Langzeitvariabilität, Kurzzeitvariabilität [41]	keine klare Zuordnung	Langzeiterfassung, am besten 24h
	NN 50		k.E.	Anzahl der Paare benachbarter NN-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen	Spontanvariabilität, Langzeitvariabilität	Parasympathikus [41]	

zeitbezogene Parameter (Fortsetzung)							
Methode	Variabilitätsmaß	andere Bezeichnung	Messeinheit	Definition und Erklärung	Indikator der...	Aktivität als Teil des vegetativen Nervensystems	Empfehlungen zur Auswertzeit
Statistisch (Forts.)	pNN 50		%	Prozentsatz aufeinander folgender NN-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen, bezogen auf die Gesamtzahl der NN-Intervalle	Spontanvariabilität, Langzeitvariabilität	Parasympathikus [42]	
	SAa		ms	Absolute Sinusarrhythmie: Summe der Differenzen der aufeinanderfolgenden NN-Intervalle, dividiert durch ihre Anzahl	Keine klare Zuordnung	Keine klare Zuordnung	
geometrisch	HRV triangular Index	RR 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	Gesamtvariabilität	keine klare Zuordnung	mind. 20 min
	TINN		ms	Triangular interpolation of NN intervall histogram: Länge der Basis des minimalen quadratischen Unterschiedes der triangulären Interpolation für den höchsten Wert des Histogramms aller NN-Intervalle	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	mind. 20 min

frequenzbezogene Parameter							
Methode	Variabli- tätsmaß	andere Bezeichnung	Mess- ein- heit	Definition und Erklärung	Indikator der...	Aktivität als Teil des vegetativen Nerven- systems	Empfehlun- gen zur Auswerte- zeit
FFT (Fast Fourier Transfor- mation) und Autoregres- sives Mo- dell (AR)	TP		ms ²	Total power: Gesamtleistung oder Ge- samtspektrum; entspricht Energiedichte im Spektrum von 0,00001 bis 0,4 Hz	Gesamtva- riabilität	keine klare Zuordnung	
	ULF		ms ²	Ultra very low frequency: Leistungsdichtes- pektrum unter 0,003 Hz	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	
	ULF%		%	prozentualer ULF-Anteil am Gesamtspekt- rum	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	
	VLF		ms ²	Very low frequency power: Leistungs- dichtespektrum im Frequenzbereich von 0,003 bis 0,04 Hz	keine klare Zuordnung	Parasympathikus [43]	
	VLF%		%	prozentualer VLF-Anteil am Gesamtspekt- rum	keine klare Zuordnung	Parasympathikus [43]	
	LF	B-Band	ms ²	Low frequency power: Leistungsdichte spektrum im Frequenzbereich von 0,04 bis 0,15 Hz	keine klare Zuordnung	Sympathikus und Pa- rasympathikus	mind. 5 min [44]

frequenzbezogene Parameter (Fortsetzung)							
Methode	Variabilitätsmaß	andere Bezeichnung	Messeinheit	Definition und Erklärung	Indikator der...	Aktivität als Teil des vegetativen Nervensystems	Empfehlungen zur Auswertzeit
FFT (Fast Fourier Transformation) und Autoregressives Modell (AR) (Forts.)	LF%	relatives B-Band	%	prozentualer LF-Anteil am Gesamtspektrum	keine klare Zuordnung	Sympathikus und Parasympathikus	mind. 5 min [44]
	HF	C-Band, respiratorische Sinusarrhythmie, Atmungsband	ms ²	High frequency power: Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,15 bis 0,40 Hz	keine klare Zuordnung	Parasympathikus [45]	mind. 5 min [44]
	HF%	relatives C-Band, respiratorische Sinusarrhythmie, Atmungsband	%	prozentualer HF-Anteil am Gesamtspektrum	keine klare Zuordnung	Parasympathikus	mind. 5 min [44]
	LF nu	LF n.U., LF norm	nu	Low frequency normalized unit: normierte Leistung oder Leistung der LF in normierten Einheiten; entspricht $LF/(TP-VLF) \times 100^1$	keine klare Zuordnung	Sympathikus und Parasympathikus	mind. 5 min (44)
	HF nu	HF n.U., HF norm	nu	High frequency normalized unit: normierte Leistung oder Leistung der HF in normierten Einheiten. Entspricht $HF/(TP - VLF) \times 100^1$	keine klare Zuordnung	Parasympathikus [45]	mind. 5 min [44]

Methode	Variabilitätsmaß	andere Bezeichnung	Messeinheit	Definition und Erklärung	Indikator der...	Aktivität als Teil des vegetativen Nervensystems	Empfehlungen zur Auswertzeit
frequenzbezogene Parameter (Fortsetzung)							
	LF/HF	Quotient aus LF und HF; LF/HF-Ratio	k.E.	Quotient aus dem Spektrum in LF und dem Spektrum im HF	keine klare Zuordnung	Verhältnis oder Koeffizient oder Ratio zwischen LF- und HF-Bandleistung [45]	mind. 5 min [44]
	VLF-Peak		Hz	Very low frequency peak: Frequenzgipfel im VLF-Band; Thermoregulation-Peak	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	
	LF-Peak		Hz	Low frequency peak: Frequenzgipfel im LF-Band; Baroreflex-Peak	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	mind. 5 min [44]
	HF-Peak		Hz	High frequency peak: Frequenzgipfel im HF-Band; Respiratorischer Peak	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	mind. 5 min [44]
nicht-lineare Parameter							
Poincaré-Plot	DL	D _L , Lorenz-Länge	ms	Länge des Längsdurchmessers der 95%-Vertrauensellipse	Langzeitvariabilität	keine klare Zuordnung	
	DQ	D _q , DW, Lorenz-Breite	ms	Länge des Querdurchmessers der 95%-Vertrauensellipse	Kurzzeitvariabilität	keine klare Zuordnung	

Methode	Variabilitätsmaß	andere Bezeichnung	Messeinheit	Definition und Erklärung	Indikator der...	Aktivität als Teil des vegetativen Nervensystems	Empfehlungen zur Auswertzeit
nicht-lineare Parameter (Fortsetzung)							
Poincaré-Plot (Forts.)	SD1	SDQ, SDw, stdb, SO _Q , SD-quer, SO _w	ms	Standardabweichung der Punktabstände zum Querdurchmesser ²	Kurzzeitvariabilität [38, 46]	Parasympathikus [47]	
	SD2	SDL, SD-längs, stda, SO _L	ms	Standardabweichung der Punktabstände zum Längsdurchmesser ²	Langzeitvariabilität [38, 46]	Sympathikus und Parasympathikus [47]	
Detrended fluctuation Analyse (DFA) oder trend-bereinigende Fluktuationsanalyse	DFA1	alpha 1	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	Kurzzeitvariabilität [38, 48, 49]	keine klare Zuordnung	
	DFA2	alpha 2	k.E.	wird häufig als nichtlinearer Parameter für RR-Intervalle längerer Aufzeichnungsdauer genutzt, reduzierte Werte sind assoziiert mit einer schlechten Prognose	Langzeitvariabilität [38, 48, 49]	keine klare Zuordnung	
	D2		k. E.	Correlation dimension: Korrelationsmaß	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	
Recurrence plot	Lmean		Schläge	Mean line length	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	
	Lmax		Schläge	Max line length	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	

Methode	Variabilitätsmaß	andere Bezeichnung	Messeinheit	Definition und Erklärung	Indikator der...	Aktivität als Teil des vegetativen Nervensystems	Empfehlungen zur Auswertzeit
nicht-lineare Parameter (Fortsetzung)							
	REC		%	Recurrence rate	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	
	DET		%	Determinism	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	
	ShanEn		Schläge	Shannon Entropy	keine klare Zuordnung	keine klare Zuordnung	
Andere	ApEn		k. E.	Approximate entropy, hohe Werte entsprechen einer hohen Variabilität, Werte unabhängig von der Aufzeichnungslänge [50]	Kurzzeitvariabilität [38]	keine klare Zuordnung	
	SampEn		k. E.	Sample entropy: hohe Werte entsprechen einer hohen Variabilität, Werte abhängig von der Aufzeichnungslänge [50]	Kurzzeitvariabilität [38]	keine klare Zuordnung	

2 *Bemerkung: k.E. = keine Einheit*

3 ¹ *LF nu und HF nu verhalten sich reziprok zueinander, die Summe beider Parameter ergibt 100 %*

4 ² *SD1 und SD2 korrelieren direkt mit den HRV-Parameter SDNN und dem SDNN-Index und werden daher von einigen Autoren nicht als nicht-lineare Parameter,*
5 *sondern vielmehr als zeitbezogene HRV-Parameter eingestuft [51]*

6

7 6. Einflussfaktoren der individuellen Hf und HRV

Kernaussage Nr. 10	neu [07/2021]
Hf und HRV werden unabhängig von der akuten Belastung durch zahlreiche veränderbare und nicht veränderbare Faktoren (unbeeinflussbare physiologische Faktoren, Krankheiten, beeinflussbare Lebensstilfaktoren und äußere Faktoren) beeinflusst.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

8

9 Hf und HRV werden unabhängig von der akuten Belastung durch zahlreiche veränderbare und
10 nicht veränderbare Faktoren beeinflusst. Neben unbeeinflussbaren physiologischen Parame-
11 tern (z. B. Alter) existiert eine Reihe von veränderbaren Einflussfaktoren - z. B. Lebensge-
12 wohnheiten der Probanden bzw. daraus entstehende Folgen oder äußere Rahmenbedingun-
13 gen. Des Weiteren geht eine Vielzahl von Krankheiten mit einer reduzierten HRV einher, wobei
14 der Einfluss auf das vegetative Nervensystem vielmehr als Folge der Krankheit und nur selten
15 als potentielle Ursache betrachtet werden kann.

16 Hierbei lassen sich die einzelnen Einflussfaktoren in vier Hauptbereiche (unbeeinflussbare
17 physiologische Faktoren, Krankheiten, beeinflussbare Lebensstilfaktoren und äußere Fakto-
18 ren) unterteilen (siehe Abb. 4). Wesentliche Einflussfaktoren für arbeitsmedizinische und ar-
19 beitswissenschaftliche Fragestellungen werden in der Tab. 3 beschrieben. Der Kenntnis dieser
20 Faktoren kommt eine besondere Bedeutung bei der Bewertung und Beurteilung der Hf und
21 HRV zu. Darüber hinaus sind in der Literatur weitere Faktoren und Erkrankungen bekannt, die
22 jedoch für die Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft weniger bedeutsam sind (z. B. HRV
23 beim Vorliegen einer intensivmedizinisch zu behandelnden Sepsis), so dass auf die weitere
24 Erwähnung dieser Faktoren verzichtet wird.

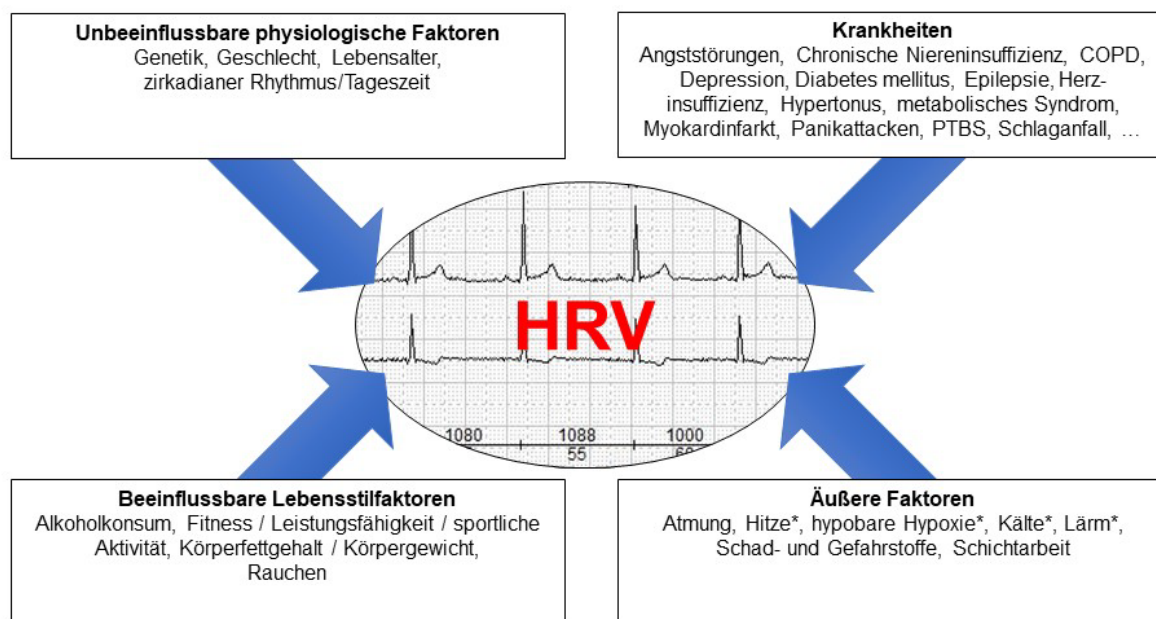


Abb. 4: Gruppierung der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die HRV in vier Hauptbereiche (übersetzt und modifiziert entnommen aus [52])

* = HRV-Reduzierung als Folge der physiologischen Reaktion auf den physikalischen Reiz

Auch Medikamente mit Einfluss auf das vegetative Nervensystem bzw. auf das Erregungsleitungssystem des Herzens sind als externe beeinflussende Faktoren bei der Bewertung und Beurteilung der Hf und der HRV zu beachten. Aufgrund der Vielzahl möglicher pharmakologischer Interaktionen seien hier nur beispielhaft die Gruppen der Betablocker, ACE-Hemmer, Antiarrhythmika und Psychopharmaka genannt [45].

Tab. 3: Einflussfaktoren auf Hf und HRV, sortiert nach den vier Hauptbereichen, innerhalb des Hauptbereichs alphabetisch sortiert

Einflussfaktor	Wirkung auf die Hf _{Ruhe}	Wirkung auf die HRV
Unbeeinflussbare physiologische Faktoren		
Genetik		Die HRV scheint zwischen Mitgliedern unterschiedlicher Ethnienzugehörigkeit unterschiedlich auszufallen [53].
Geschlecht	Die Hf ist bei Frauen üblicherweise höher als bei Männern [54].	Die meisten Studien ergaben bei Frauen gegenüber Männern eine erhöhte parasympathische Aktivität [55–62], die sich jedoch ab dem 50. Lebensjahr annähert [63–65].

Einflussfaktor	Wirkung auf die Hf_{Ruhe}	Wirkung auf die HRV
		Einige Studien haben jedoch eine erhöhte sympathische Grundaktivität bei Frauen gesehen [66–69].
Lebensalter	Mit dem Alter fallen Hf_{Ruhe} [70] und Hf_{max} [9] i. d. R. ab.	Die HRV steigt im ersten Lebensjahr stark, später bis zum 15. Lebensjahr an [71], ist im jungen Erwachsenenalter am höchsten und fällt mit dem Alter nicht-linear ab [38, 55, 57, 63–66, 69–80].
Schwangerschaft	Während der Schwangerschaft kommt es i. d. R. zu einem Anstieg der Hf [81].	Während einer Schwangerschaft kommt es i. d. R. zu einer Reduzierung der HRV während des Fortschreitens der Schwangerschaft [81] und ist im 2. Trimenon am geringsten [82, 83].
Zirkadianer Rhythmus / Tageszeit	Die Hf unterliegt einem zirkadianen Rhythmus, wobei es zu einer nächtlichen Absenkung der Hf kommt [84].	Die HRV unterliegt einem zirkadianen Rhythmus, wobei die HRV in den Nachtstunden aufgrund des Überwiegens der Parasympathikusaktivität erhöht und in den Tagstunden aufgrund des Überwiegens der Sympathikusaktivität reduziert ist [85].
Krankheiten		
Chronische Niereninsuffizienz		Bei einer chronischen Niereninsuffizienz ist i. d. R. die HRV reduziert [86].
Chronisch obstruktive Lungenerkrankungen (COPD)		Bei einer COPD ist i. d. R. die HRV reduziert [87, 88].
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	Herzinsuffizienz führt zu erhöhter Hf [89] und eingeschränkter maximaler Hf .	Bei einer Herzinsuffizienz ist i. d. R. die HRV reduziert [6, 90–93].
		Bei einem Hypertonus ist i. d. R. die HRV reduziert [94, 95].
	Durch die Sympathikusaktivierung kommt es bei Patienten nach Myokardinfarkt häufig zu einer Hf -Erhöhung und dies ist prognoseentscheidend [96–101].	Bei einer Koronaren Herzerkrankung (KHK) mit und ohne Angina pectoris sowie nach Myokardinfarkt ist i. d. R. die HRV reduziert [102, 103].
Kopfschmerzen, regelmäßig		Regelmäßige Kopfschmerzen sind i. d. R. mit einer erniedrigten HRV assoziiert [104, 105].

Einflussfaktor	Wirkung auf die Hf_{Ruhe}	Wirkung auf die HRV
Muskeldystrophie Duchenne		Die HRV ist in der Regel beim Vorliegen einer Muskeldystrophie Duchenne bereits in Frühstadien und bei manifester Erkrankung deutlich erniedrigt [106].
Psychiatrische Erkrankungen	Bei Angststörungen oder bei Patienten mit Panikattacken liegen i. d. R. erhöhte Hf vor [107].	Bei Angststörungen [72, 108–111] und Patienten mit Panikattacken [107, 109] kommt es i. d. R. zu einer Reduzierung der HRV.
	Patienten mit Anorexie haben i. d. R. eine reduzierte Hf [112].	Bei Patienten mit Anorexie ist die HRV i. d. R. erniedrigt [113].
		Bei Patienten mit Bulimia nervosa ist die HRV i. d. R. erniedrigt [114].
		Bei Vorliegen einer Posttraumatische Belastungsstörung ist die HRV erniedrigt [115].
	Eine schwere Depression führt häufig zu einer Erhöhung der Hf [116–118].	Bei einer (schweren) Depression ist häufig die HRV erniedrigt [72, 117, 119–123].
		Bei einer Epilepsie ist i. d. R. die HRV erniedrigt [124].
		Bei einer Borderline-Persönlichkeitsstörung ist i. d. R. die HRV erniedrigt [125].
		Bei einer bipolaren Störung [72, 122, 126, 127]/ Schizophrenie [128] ist i. d. R. die HRV erniedrigt.
		Bei einer Substanzabhängigkeit [72] ist i. d. R. die HRV erniedrigt.
Rheumatische Arthritis		Auf Basis einer systematischen Literaturrecherche scheint derzeit die HRV bei Vorliegen einer rheumatischen Arthritis nicht verändert zu sein [129].
Schlafstörungen		Eine Reduzierung der HRV bei bestehenden Schlafstörungen wird derzeit durch die wissenschaftliche Literatur nicht gestützt [130]. Ähnliches findet sich bei unbehandelten Obstruktiven Schlafapnoesyndrom .

Einflussfaktor	Wirkung auf die Hf_{Ruhe}	Wirkung auf die HRV
Schlaganfall		Ein Schlaganfall ist i. d. R. mit einer reduzierten HRV assoziiert [131].
Schmerz		Bei chronischen Schmerzen ist i. d. R. HRV erniedrigt [132].
Stoffwechselerkrankungen	Eine Diabeteserkrankung geht häufig mit einer Sympathikussteigerung und damit mit einer Hf -Erhöhung einher [133].	Die HRV ist bei Patienten mit Diabetes mellitus häufig reduziert [61, 134–137], wobei eine Korrelation zwischen Ausprägung der HRV und Dauer der Diabeteserkrankungen, vor allem bei schlechter Diabeteseinstellung, besteht [138]. Die Reduzierung ist bedingt durch eine periphere Neuropathie auf dem Boden von Mikrozirkulationsstörungen [139].
		Bei einem metabolischen Syndrom ist die HRV i. d. R. erniedrigt [138, 140–146], wobei insbesondere bei Frauen sich dies eindeutig zeigt [147].
Tumorerkrankungen		Der Einfluss einer Brustkrebserkrankung auf die HRV ist unklar [148].
Beeinflussbare Lebensstilfaktoren		
Alkoholkonsum		Bei akutem Alkoholkonsum ist die HRV i. d. R. erniedrigt [149]. Geringer ständiger Alkoholkonsum mit einem Alkoholanteil von einem Standardgetränk bei Frauen bzw. zwei Standardgetränken bei Männern führt i. d. R. zu einer kurzfristigen, jedoch zu keiner langfristigen Veränderung der HRV bzw. einer erhöhten HRV, während chronischer Alkoholabusus mit einer Reduzierung der HRV assoziiert ist [149, 150].
Fitness, Leistungsfähigkeit, sportliche Aktivität		Hoch intensives Intervalltraining (HIIT) erhöht i. d. R. die HRV, was insbesondere für gesunde Probanden und Patienten mit metabolischem Syndrom gezeigt werden konnte [151]. Hochintensive Trainings- und Wettkampfsereien können hingegen zu einer reduzierten HRV führen [152, 153].

Einflussfaktor	Wirkung auf die Hf_{Ruhe}	Wirkung auf die HRV
		Bei Krafttraining finden sich i. d. R. bei Gesunden keine Veränderung der HRV, während bei Probanden mit chronischen Erkrankungen Krafttraining i. d. R. mit einer Erhöhung der HRV assoziiert ist [154].
	Initial kommt es aufgrund der körperlichen Aktivität zu einer Hf_{Ruhe} -Erhöhung, die jedoch bei regelmäßiger körperlicher Aktivität ohne Übertrainingssymptome zu einer Abnahme der Hf aufgrund einer Erhöhung der Parasympathikusaktivität, einer Optimierung der Herzauswurfleistung führt [155]. Die Expression von Ionenkanälen für das Schrittmacherpotential ist reduziert [21]. Daher führt Ausdauertraining häufig zu einer trainingsinduzierten Bradykardie [156–159].	Im Rahmen regelmäßiger körperlicher Aktivität kommt es initial zur Steigerung des Sympathikus und zur Reduzierung der HRV [160], welche bei fortdauernder, regelmäßiger körperlicher Aktivität zu einer Steigerung des Parasympathikus und einer Erhöhung der HRV führt [66, 153, 160–162]. Ausdauertraining erhöht i. d. R. die HRV [152, 153, 163–165]. Diese Effekte sind auch bei Patienten mit Myokardinfarkt, mit Herzinsuffizienz [163] oder Diabetes mellitus II [166] zu finden.
Körperfettgehalt/Körpergewicht	Erhöhtes Körpergewicht (BMI) führt i. d. R. zu einer Steigerung der Hf_{Ruhe} [167], was teilweise über die stimulierende Wirkung von Leptin auf zentrale sympathische Neurone erklärt werden kann [168, 169].	Bei einem erhöhten Körpergewicht (BMI) bzw. einer erhöhten freien Fettmasse ist häufig die HRV erniedrigt [170].
Rauchen	Aktives [171] und passives Rauchen [172] kann zu einer Hf -Erhöhung führen.	Rauchen kann zu einer Reduzierung der HRV führen [173], dieser Effekt ist dosisabhängig [172]. Auch bei Nichtrauchern führt Passivrauchen im privaten wie beruflichen Umfeld zu einer Reduzierung der HRV [172–174].
Stress/Mentale Anspannung	Stress (z. B. mentaler, arbeitsplatzbezogener) führt i. d. R. zur Erhöhung der Hf [175–178]	Stress (z. B. mentaler, arbeitsplatzbezogener) führt i. d. R. zu einer Reduzierung der Parasympathikusaktivität und damit zu einer Reduzierung der HRV [176, 178–183].
Äußere Faktoren		
Atmung	Während der Inspiration kommt es zu einer kurzfristigen Hf -Zunahme, während der Expiration zu einer kurzfristigen Hf -Abnahme [184, 185]. Dies ist	Der Einfluss der Atmung auf die HRV spiegelt sich in der respiratorischen Sinusarrhythmie (RSA) wider und kommt im HF-Band zum Ausdruck.

Einflussfaktor	Wirkung auf die Hf_{Ruhe}	Wirkung auf die HRV
	wesentlich durch pulmonale Afferenzen von Dehnungsrezeptoren sowie Interaktionen von zentralen respiratorischen Neuronen zum Kreislaufzentrum in der Medulla oblongata bedingt	Insgesamt scheint der HRV-Parameter RMSSD von der Atmung nicht beeinflusst zu werden [186]. Für die übrigen Parameter ist die Studienlage nicht eindeutig [187–189].
Hitze, hohe Temperaturen	Hohe Umgebungstemperaturen führen zu einem Anstieg der Hf [13, 190, 191] bedingt einerseits durch direkte Temperatureffekte am Sinusknoten und andererseits über die Erhöhung der sympathischen Aktivität als Folge der Aktivierung von Warmrezeptoren.	Hohe Umgebungstemperaturen führen zu einer erhöhten sympathischen Aktivität und einer reduzierten HRV [192, 193].
Hypoxie		Eine hypobare Hypoxie führt i. d. R. zu einer kurzfristigen Sympathikusaktivierung [194] und langfristig zu einer Reduzierung der HRV [195].
Kälte, niedrige Temperaturen	Niedrige Umgebungstemperaturen führen bei Männern i. d. R. zu einer Abnahme der Hf sowohl unter Ruhe als auch Belastung während es bei Frauen zu keiner Abnahme der Herzfrequenz, sondern vielmehr zu einer leichten Erhöhung der Hf kommt [196].	Es liegen nur wenige Studien zum Einfluss kalter Umgebungstemperaturen auf die HRV vor: bei kurzzeitiger Kälteexposition wird von einer reduzierten Sympathikusaktivität und damit erhöhter HRV berichtet [197], während bei langfristiger Kälteexposition, u.a. in Wintermonaten oder bei beruflicher Kälteexposition kein Einfluss auf die HRV gezeigt werden konnte. [192, 198, 199].
Lärm	Bei Lärm steigt die Hf häufig an [200], bedingt durch eine Aktivierung sympathischer Nerven [201].	Es liegen nur wenige Studien zum Einfluss von Lärm auf die HRV vor; die HRV erscheint bei Auftreten von Lärm reduziert [202–205].
Schadstoffe		Neurotoxische Stoffe können zu einer Reduzierung der HRV führen: dies wurde u. a. für Carbondisulfid [206, 207], jedoch nicht für Langzeitkontakt im Niedrigdosisbereich [208]; für akute Diesel- und Biodieselinhalation [209]; für chronische Blei- [210, 211], und Cadmium- [212] oder Quecksilberexposition [213] sowie bei neurotoxischer Styrolexposition [214, 215] gezeigt. Die Datenlage zum Einfluss von chronischer Lösemittelexposition ist nicht eindeutig, es werden Reduzierungen der HRV und

Einflussfaktor	Wirkung auf die Hf_{Ruhe}	Wirkung auf die HRV
		keine Unterschiede beschrieben [216–218]. Dagegen fanden sich keine Hinweise für eine Reduzierung der HRV durch eine Quecksilberexposition [219]. Lediglich für fetale Quecksilberexposition scheint zu einer Erniedrigung der HRV zu führen [213]. Eine Exposition gegenüber Feinstaubpartikel (PM2.5) scheint die HRV zu reduzieren [220].
Schichtarbeit mit Nachtschicht		Durch Schichtarbeit mit Nachtschicht kommt es i. d. R. zu einer Aktivierung des Sympathikus und einer Reduzierung des Parasympathikus und somit zu einer Reduzierung der HRV, wobei eine Korrelation zwischen Dauer der Schichtarbeit in Jahren und Reduzierung der HRV existiert [221–227].

36

37 7. Auswertung und Interpretation von Hf und der HRV

Empfehlung Nr. 7	neu [07/2021]
Um die Ergebnisse von Hf - und HRV-Analysen korrekt bewerten und interpretieren zu können, wird empfohlen im Vorfeld der Untersuchungen die konkrete Fragestellung, die eingesetzte Methode der Datenerfassung und die Auswertungsstrategie aufeinander abzustimmen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

38

39 Um die Ergebnisse von Hf - und HRV-Analysen bewerten und interpretieren zu können, ist es
40 unerlässlich, im Vorfeld der Untersuchungen die konkrete Fragestellung, die eingesetzte Me-
41 thode der Datenerfassung und die Auswertungsstrategie aufeinander abzustimmen. Des Wei-
42 teren sind die Hf - und HRV-Parameter als Beanspruchungsdaten konkreter belasteter Perso-
43 nen im individuellen, psychophysiologischen und arbeitsplatzbezogenen Gesamtkontext zu
44 betrachten (vgl. Tab. 3) und ggf. mit ergänzenden Methoden (u. a. Fragebögen zur subjektiven
45 Beanspruchung, zum Stresserleben und dem Gesundheitszustand) zu kombinieren. Zeitgleich

sollte möglichst die Erfassung von physikalischen Arbeitsplatzbedingungen wie Lärm, Temperatureinflüssen etc. erfolgen.

7.1 Herzschlagfrequenz (Hf)

Kernaussage Nr. 11	neu [07/2021]
Wesentliche Einflussgrößen für die Hf sind vor allem dynamische Belastungen großer Muskelgruppen, aber auch statische Muskelbelastungen, die thermische sowie die psychische Belastung.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Wesentliche Einflussgrößen für die Hf sind vor allem dynamische Belastungen großer Muskelgruppen, aber auch statische Muskelbelastungen, die thermische sowie die psychische Belastung [228, 229]. Diese Einflussgrößen wirken gemeinsam auf das Herzkreislaufsystem und führen bei erhöhten Belastungen zu entsprechend erhöhten Werten für die Hf. So untersuchten z. B. Hettinger et al. [200] die Einflüsse bei unterschiedlicher Muskel-, Temperatur- und Wärmestrahlungsbelastung. Eine Separierung der Einzelanteile ist so nur unter kontrollierten Bedingungen möglich. So kann die Hf bei einer dynamischen Arbeit, bei der größere Muskelgruppen eingesetzt werden, zuverlässig für die Abschätzung des Energieumsatzes herangezogen werden, wenn die Anteile an statischen Muskelbelastungen ebenso wie die psychischen Belastungen vernachlässigbar sind und neutrale thermische Bedingungen bestehen [229]. Begleitende statische Muskelbelastungen sowie psychische und thermische Belastungen führen zur Abnahme der Güte der Korrelation von Energieumsatz und Hf (kleinerer Korrelationskoeffizient).

7.2 Ruheherzschlagfrequenz (Hf_{Ruhe})

Empfehlung Nr. 8	neu [07/2021]
Es wird empfohlen, die Hf_{Ruhe} als Ausgangswert der Interpretation der Hf-Veränderung unter Arbeitsbelastungen zugrunde zu legen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Für die Interpretation von gemessener Hf unter Arbeitsbelastungen stellt die Hf_{Ruhe} einen bevorzugten Ausgangswert dar (s. Kap. 4.5). Hierbei gilt es, Aufnahmebedingungen (u. a. Posi-

tion der Person, Dauer der Aufnahme) bei Vergleichen mit Referenzwerten zu beachten. Erhöhte und reduzierte Hf_{Ruhe} können mit kardiologischen Erkrankungen assoziiert sein [230, 231]. Personen mit einer tachykarden oder einer bradykarden Hf_{Ruhe} unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren (s. Kap. 6) sollten ggf. ärztlich, vorzugsweise internistisch-kardiologisch untersucht werden.

Da die Ermittlung der Hf_{Ruhe} in Feldstudien häufig Schwierigkeiten bereitet (Einfluss psychischer Faktoren, Umgebungsbedingungen wie Lärm etc., die nur schwierig zu kontrollieren sind), empfehlen Hettinger und Wobbe [200] die Ermittlung einer Bezugsherzschlagfrequenz (Hf_{Bezug}) bei leichter dynamischer Arbeit (z. B. 20 Watt auf einem Fahrradergometer für 10 min). Infolge der auch von den Probanden als sehr leicht empfundenen Arbeit wird die psychisch bedingte Verstellung der Hf_{Ruhe} weitgehend ausgeschaltet und der Einfluss der individuellen Leistungsfähigkeit ist wegen der geringen Belastung wenig ausgeprägt. Bei Männern erwartet man durch diese Belastung von 20 W eine Steigerung der Hf um ca. 18,5 S/min, bei Frauen um etwa 24,5 S/min gegenüber dem Ruhewert im Liegen bei relativ geringer individueller Schwankungsbreite [200].

7.3 Maximale Herzschlagfrequenz (Hf_{max})

Empfehlung Nr. 9	neu [07/2021]
Es wird empfohlen, die Hf_{max} als Ausbelastungskriterium zu nutzen und mittels eines standardisierten Belastungsprotokolls zu erheben.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Die Hf_{max} dient als Ausbelastungskriterium und sollte mittels eines standardisierten Belastungsprotokolls erhoben werden [232]. Die am weitesten verbreiteten Methoden stellen hierbei die Laufband- und die Fahrradergometrie dar. Die optimale Motivation zum Erbringen der maximalen Leistung und die Beachtung von Abbruchkriterien sind wesentliche Voraussetzungen zur Bestimmung der Hf_{max} . Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass neben Einflussfaktoren wie Alter, Geschlecht und aktuellem Trainingszustand [233] sowie einiger bradykardisierender Medikamente [9] die ermittelte Hf_{max} wesentlich von der eingesetzten Muskelmasse abhängt.

Eine Interpretation der Hf zur Abschätzung der kardialen Beanspruchung der zu untersuchenden (Arbeits-)Belastung erfolgt sinnvollerweise in Bezug zur gemessenen Hf_{Ruhe} und der individuell mittels standardisiertem Belastungsprotokoll gemessenen Hf_{max} bzw. errechneten Hf_{max} .

(s. Kap. 3). Hier deutet eine während der (Arbeits-)Belastung gemessene Hf in der Nähe der Hf_{\max} auf eine hohe kardiale Beanspruchung hin. Je nach eingesetzter Muskelmasse kann die (Herzschlagfrequenz-)Dauerleistungsgrenze zur Interpretation hinzugezogen werden (s. Kap. 7.5).

7.4 Erholungsherzschlagfrequenz (Hf_{Erholung})

Kernaussage Nr. 12	neu [07/2021]
Zur Abschätzung der Erholungsfähigkeit des kardiovaskulären und metabolischen Systems kann die Hf_{Erholung} genutzt werden.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Zur Abschätzung der Erholungsfähigkeit des kardiovaskulären und metabolischen Systems kann die Hf_{Erholung} genutzt werden. Sie korreliert hoch mit der Funktion des parasympathischen vegetativen Nervensystems [234] und nimmt nach Belastungsende exponentiell ab. Als wesentliche Einflussfaktoren bestimmen Belastungsintensität, -dauer, -methode, initialer Leistungszustand und Art der Erholung den zeitlichen Verlauf der Wiederherstellung der Vagusaktivität [235–237].

7.5 (Herzschlagfrequenz-)Dauerleistungsgrenze

Kernaussage Nr. 13	neu [07/2021]
Die Dauerleistungsgrenze (DLG) bei körperlicher Arbeit ist die maximale körperliche Arbeit, die über eine Arbeitsschicht (ca. 8 Stunden) ohne fortschreitende Ermüdungserscheinung geleistet werden kann.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Die Dauerleistungsgrenze (DLG) bei körperlicher Arbeit ist die maximale körperliche Arbeit, die über eine Arbeitsschicht (ca. 8 Stunden) ohne fortschreitende Ermüdungserscheinung geleistet werden kann und bei der die messbaren physiologischen Parameter nach Beendigung der Belastung etwa nach 15 Minuten den Ausgangswert wieder erreicht oder unterschritten haben [13]. Insbesondere in der Arbeitswelt kann die DLG zur Identifikation von muskulär ermüdungsfreier physischer Belastung (unterhalb der DLG) und muskulär ermüdender physischer Belastung (oberhalb der DLG), jeweils bezogen auf eine 8-stündige Arbeitsschicht, genutzt werden [10, 238, 239]. Zur Bestimmung der DLG können sowohl kardiale (z. B. Hf) als

auch metabolische Kennwerte (z. B. Energieumsatz, Laktat) genutzt werden. Alternativ kommt die spiroergometrische Bestimmung (z. B. 40 % der maximalen Sauerstoffaufnahme) in Betracht. Vor allem die Hf eignet sich als leicht zu erhebender kardialer Parameter zur Erfassung der kardio-pulmonalen Beanspruchung. Bei allgemeiner dynamischer Belastung liegt die Dauerleistungsgrenze etwa im Bereich von 105-110 S/min, bzw. alternativ bestimmt bei $Hf_{\text{Ruhe}} + 30 - 35$ S/min [13]. Zu beachten ist, dass, wie bei der individuellen Hf_{Ruhe} und Hf_{max} , auch die zur Abschätzung der DLG genutzte Hf individuellen Unterschieden unterliegt, die sich unter anderem durch das Alter und den Grad der körperlichen Fitness erklären lassen.

Unterhalb der DLG zeigt die Hf mit zunehmender Arbeitsschwere eine lineare Zunahme. Bei einer leichten Arbeit mit zeitlich konstanter Leistung erreicht die Hf innerhalb kurzer Zeit (wenige Minuten) eine annähernd gleichbleibende Auslenkung („steady state“). Dieses „steady state“ kann prinzipiell über die gesamte 8-stündige Arbeitsschicht beibehalten werden (vgl. Abb. 4).

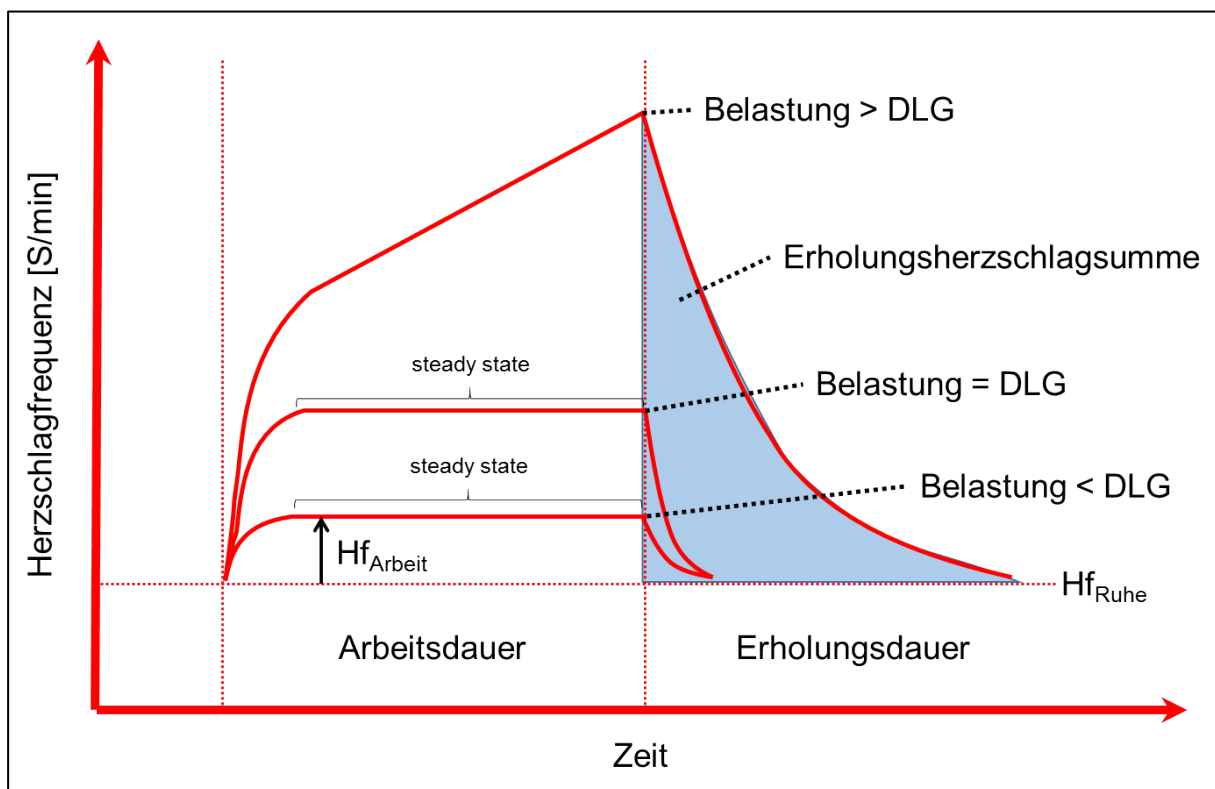


Abb. 5: Herzschlagfrequenzverläufe bei unterschiedlichen Belastungen (unterhalb bzw. oberhalb der DLG sowie im Bereich der DLG) mit jeweiliger Erholungsphase, schematische Darstellung, modifiziert nach Müller [14], DLG = Dauerleistungsgrenze

Kurzfristige geringe Überschreitungen der DLG (z. B. Hf um 130-140 S/min) sind im Arbeitsleben nicht außergewöhnlich und in der Regel ohne Gesundheitsrisiko. Bei dauernder physischer Belastung mit einer Hf > 130 S/min wird die muskuläre Ermüdung nach Belastungsende durch vorgesehene Pausen wieder abgebaut. Ermüdende Tätigkeiten sind zeitlich umso mehr zu begrenzen, je intensiver die körperliche Belastung ist und je mehr der Zustand der Erschöpfung erreicht wird, d. h. je weiter die DLG überschritten ist.

Wird die DLG ständig deutlich überschritten, wird von schwerer körperlicher Arbeit oder Schwerstarbeit im energetischen Sinne gesprochen [240]. Dies führt zu zunehmender Muskelermüdung, was i. A. ohne gesundheitliche Konsequenzen reversibel ist. Die Hf steigt hierbei fortlaufend weiter an und es kommt zum sog. Ermüdungsanstieg (s. Abb. 4). Gesundheitlich bedeutsam ist darüber hinaus Schwer- und Schwerstarbeit aus motorisch-biomechanischer Sicht, da am Bewegungsapparat (Gelenke, Bandscheiben) unter bestimmten Voraussetzungen relevante Schäden entstehen können [239]. Solche Aspekte werden in dieser Leitlinie jedoch nicht weiter vertieft.

Neben der DLG wird auch die Erholungsherzschlagsumme (s. Abb. 4) als Kenngröße der individuellen körperlichen Belastungen betrachtet [14].

Es ist zu beachten, dass die Betrachtung der oben beschriebenen DLG nur sinnvoll ist, wenn die eingesetzte Muskelmasse > 1/6 der Gesamtmuskelmasse ist. Werden dagegen kleinere Muskelmassen im Rahmen dynamischen Tätigkeiten eingesetzt, ist die DLG umso niedriger, je geringer die arbeitende Muskelmasse ist, d. h. Hf, Hf_{Arbeit} und Sauerstoffaufnahme weisen in diesem DLG-Bereich niedrigere Werte als bei Ganzkörperarbeit auf, so dass sie bei reiner Arm- oder Handarbeit wegen der geringen Erhöhung nicht mehr verwertbar ist [241]. Hierbei ist die lokale Belastung begrenzend für die Dauer der Arbeitsverrichtung. Bei statischer Arbeit bzw. bei zunehmendem Anteil statischer Muskelbeanspruchung ist eine Beurteilung der Belastungsintensität mit Hilfe der DLG ebenfalls nicht möglich.

Unter dem Gesichtspunkt der Arbeitsgestaltung sollten die Tätigkeiten einer speziellen Betrachtung unterzogen werden, die für ein Überschreiten des DLG-Bereichs als verantwortlich erkannt werden.

7.6 Herzfrequenzvariabilität (HRV)

Empfehlung Nr. 10	neu [07/2021]
Es wird empfohlen, zur Interpretation von HRV-Parameter unter äußeren Belastungen eine sinnvolle Planung und Durchführung der Messung der Herzaktionen, insbesondere in Hinblick auf die Länge der Aufzeichnung zu beachten. Hierzu sind die Empfehlung Nr. 11 und Empfehlung Nr. 12 zu beachten.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Für die Berechnung der unterschiedlichen HRV-Parameter stehen mehrere Möglichkeiten zur Auswahl. Die HRV-Zeitbereichsparameter können prinzipiell über mathematische Funktionen in gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen berechnet werden. Weiterhin bieten viele Hersteller ambulanter EKG-Messgeräte Softwareprogramme an, die eine Berechnung von HRV-Parametern im Zeit- und Frequenzbereich, aber auch eine nichtlineare Analyse von NN-Intervallreihen ermöglichen. Auch stehen frei verfügbare Softwarepakete mit guter Dokumentation zur Verfügung.

Für Aussagen zum vegetativen Nervensystem (s. Kap. 8.1 und 8.2) sollten geeignete HRV-Parameter herangezogen und mit einem für die Tätigkeit bzw. Ruhemessung geeigneten Zeitbereich erfasst bzw. analysiert werden (s. Tab. 2). Hierbei ist zu berücksichtigen, ob primär ein Einfluss des sympathischen oder des parasympathischen vegetativen Nervensystems gemessen werden soll bzw. wie lange die Erfassungszeit sinnvoll erfolgen kann.

Während für einige HRV-Parameter Langzeitmessungen obligat sind (s. Tab. 2), bzw. die 24h-Messung der HRV zur Gewinnung eines Gesamteindrucks des vegetativen Nervensystems von Vorteil sein kann, sollten zur Beurteilung von Belastungen am Arbeitsplatz mit kurzfristigen Änderungen der Anforderungen primär HRV-Parameter mit einer Eignung für die Kurzzeitmessungen genutzt werden. Nach Belastungswechsel sollte die erste Minute nicht in die Datenanalyse einbezogen werden, da in dieser Phase Einschwingvorgänge der vegetativen Regelkreise dominieren.

Aufgrund der hohen interindividuellen Variabilität und den zahlreichen exogenen und endogenen Einflussfaktoren, die im Rahmen einer Messung der NN-Intervalle zumeist nicht verändert werden können, sollte die HRV-Analyse nur in Kombination mit einer Ruhe-HRV-Analyse bzw.

185 im Rahmen von länger andauernden Veränderungen durch Wiederholungsmessungen unter
186 gleichen Bedingungen genutzt werden.

Kernaussage Nr. 14	neu [07/2021]
Für die Vergleichbarkeit von Ruhemessungen stehen einige Arbeiten mit Referenzwerten zur Verfügung. Hierbei ist auf die Alters- und Geschlechtsabhängigkeit der HRV sowie auf eine mit dem Probanden identische Vergleichspopulation zu achten.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

187
188 In den vergangenen Jahren wurden einige Arbeiten publiziert, welche mittels Referenzwerten
189 erlauben sollen, HRV-Einzelmessungen in erhöhte bzw. reduzierte HRV zu unterscheiden.
190 Aufgrund der oben beschriebenen Alters- und Geschlechtsabhängigkeit der HRV sollten ent-
191 sprechende HRV-Referenzwerte dies ebenfalls berücksichtigen, was jedoch nur bei einigen
192 der publizierten Arbeiten durchgeführt wurde. Eine Übersicht von Arbeiten mit Referenzwerten
193 ist in der Tabelle 4 zu finden. Es sollte ferner aufgrund des möglichen genetischen Einflusses
194 der Ethnie auf eine Studie zurückgegriffen werden, welche sich aus Probanden zusammen-
195 setzte, welche mit der arbeitenden Bevölkerung ähnlich sind. Es bieten sich daher für den
196 deutschsprachigen Raum die Arbeiten von Voss und Kollegen [79, 242] und Sammito & Bö-
197 ckelmann [243, 244] an.

Tab. 4: 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 [245]/ ESC/NASPE 1996 [45]	Erwachsene	274	24 h	nein	nein	Mw ± SD
ESC/NASPE 1996 [45]	Erwachsene	k. A.	5 min	nein	nein	Mw ± SD
Nunan et al. 2010 [246]	systematisches Review	1 – 40 Studien	5 min	nein	ja	Mw ± SD
Kim & Woo 2011 [247]	erwachsene Teilnehmer an Check-up-Untersuchungen in Korea	3.396	5 min	ja	ja	Mw ± SD
Voss et al. 2012 [79]	repräsentative erwachsene Bevölkerung aus Deutschland	1.906	5 min	ja	nein	Perzentile
Zeng et al. 2014 [248]	Probanden aus China	371	15 min	ja	ja, aber kein Unterschied festgestellt	Perzentile
Voss et al. 2015 [242]	repräsentative erwachsene Bevölkerung aus Deutschland	1.906	5 min	ja	ja	Mw ± SD
Sammito & Böckelmann 2017 [243]	erwachsene Bevölkerung aus Deutschland (20-60 Jahre)	695	24 h	ja	ja	Perzentile
Sammito & Böckelmann 2017 [244]	erwachsene Bevölkerung aus Deutschland (20-60 Jahre)	673	5 min	ja	ja	Perzentile

Bemerkung: Mw - Mittelwert, SD – Standardabweichung, k. A. – keine Angaben

Auch wenn hierdurch Grenzwerte für HRV-Parameter vorliegen gilt es zu bedenken, dass diese rein empirisch berechnet wurden. Daher sind hiermit auch keine generellen gesundheits-

bezogenen Aussagen möglich. Standardisierte Verlaufsmessungen (individuelle Längsschnittuntersuchungen) der HRV in Kombination mit Anamnese, klinischer Untersuchung und weiteren Instrumenten (z. B. Fragebögen) können jedoch bei der Aufklärung des individuellen Gesundheitsrisikos bzw. bei der Wirkung von präventivmedizinischen Maßnahmen sinn- und wertvoll sein.

8. Möglichkeiten der Anwendung in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft

Kernaussage Nr. 15	neu [07/2021]
Im Bereich der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft sind Hf und HRV zu verschiedenen Fragestellungen sinnvoll einsetzbar.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Messmethoden zur Erfassung und Analyse der Hf und HRV können zur Objektivierung der Einflüsse der Aktivität des vegetativen Nervensystems eingesetzt werden. Im Bereich der Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft ergeben sich u. a. folgende Anwendungsbereiche:

- ergänzende Untersuchung zur Gefährdungsanalyse und -beurteilung zur Identifizierung von betrieblichen Belastungsschwerpunkten,
- individuelle physische und psychische Beanspruchungsanalyse sowie prozessbegleitende Messungen zur Objektivierung der Beanspruchungen im Verlauf eines Arbeitstages,
- Erfassung eines Indikators zum Gesundheitsstatus,
- Ableitung von individuellen Handlungsempfehlungen z. B. zur Arbeitsplatzgestaltung,
- Erfassung des Ermüdungs- und Erholungsverhaltens und
- Evaluation arbeitsmedizinischer bzw. gesundheitsbezogener Interventionen.

8.1 Einsatz bei physischen Belastungen

Kernaussage Nr. 16	neu [07/2021]
Der Einsatz der Hf bei physischen Belastungen, insbesondere bei dynamischer Muskelarbeit, ist lange etabliert. Die Analyse der HRV bietet darüber hinaus aufgrund des oftmals zwei- oder mehrphasigen Verhaltens unter ansteigenden Belastungen einen Mehrwert im Vergleich zum linearen Verhalten der Hf.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Empfehlung Nr. 11	neu [07/2021]
Hierzu sollten die HRV-Parameter SDNN, RMSSD, Total Power, LF-Power und/oder HF-Power genutzt werden. Eine Mindestaufnahmedauer von 5 min wird empfohlen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Die Beurteilung der physischen Belastung mittels Hf, insbesondere bei dynamischer Muskelarbeit, ist lange etabliert. Der Informationsgewinn der HRV bei solchen Fragestellungen liegt in dem zumindest unter 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 [249, 250]. Dies kann eine genauere Einschätzung der physischen Beanspruchungen bei gleichzeitigem Verzicht auf eine zeitaufwändige, kostenintensive, teilweise nicht ambulant verfügbare und reaktive Messtechnik ermöglichen. Von den HRV-Parametern eignen sich für die Erfassung der akuten physischen Belastung neben den Parametern der Gesamtvariabilität wie SDNN oder Total Power insbesondere die Parameter RMSSD, LF-Power und HF-Power sowie nichtlineare Indizes. Diese zeigen unter ansteigender Belastung oftmals ein zwei- oder mehrphasiges Verhalten und besitzen somit einen Mehrwert im Vergleich zum linearen Verhalten der Hf, insbesondere unter moderaten und hohen körperlichen Belastungen [251, 252].

8.2 Einsatz bei psychischen Belastungen

Kernaussage Nr. 17	neu [07/2021]
Für den Einsatz bei psychischen Belastungen können Hf und HRV genutzt werden. Die Auswahl geeigneter HRV-Parameter ist jedoch eingeschränkt.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Empfehlung Nr. 12	neu [07/2021]
Hierzu sollten die HRV-Parameter RMSSD, LF, HF, LF/HF, DQ und SD1 genutzt werden. Eine Mindestaufnahmedauer von 5 min wird empfohlen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Bei psychischen Belastungen finden sich ebenso Auslenkungen der Hf und der HRV, die somit als psychische Beanspruchungsindikatoren genutzt werden können. Vor allem bei den schwer messbaren psychischen Belastungen gelten Hf und HRV als Parameter der allgemeinen Aktivierung und bieten eine Möglichkeit, die vegetative Balance des Organismus zu beschreiben. Somit können über diesen Beanspruchungsparameter Rückschlüsse auf die psychische Belastung gezogen werden [109, 253–264]. Darüber hinaus lässt sich die HRV als Indikator für psychophysische Zustände des Organismus und als Indikator für Einschränkungen einer Adaptations- und Anpassungsfähigkeit für biopsychosoziale Fragestellungen einsetzen. Als HRV-Parameter für die psychischen Belastungen eignen sich RMSSD, LF, HF bzw. LFnu und HFnu, LF/HF sowie DQ und SD1. Nicht geeignet sind ULF und VLF. Für den Einsatz als Prädiktor für kognitive Leistungen ist nach den z. Z. vorliegenden Kenntnissen aus der Literatur die Ruhe-HRV-Messung jedoch in Querschnittsanalysen nicht geeignet.

8.3 Einsatz zur Prognose von Erkrankungen

Kernaussage Nr. 18	neu [07/2021]
Eine reduzierte HRV korreliert bei einigen Erkrankungen (z. B. nach Myokardinfarkt, nach koronarer Bypass-Operation, bei Herzinsuffizienz, nach Schlaganfall, bei COPD und Bluthochdruck) mit einer erhöhten Morbidität- bzw. Mortalität.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Ein prognostischer Wert der HRV konnte derzeit lediglich für wenige Krankheiten nachgewiesen werden. Hierbei zeigte sich u. a. in großen Kohortenstudien, dass bei Patienten nach Myokardinfarkt und einer erniedrigten HRV die Mortalität signifikant erhöht gegenüber Patienten mit höheren HRV-Parametern in der Postinfarktphase war [103, 265, 266]. So lag nach einer Metaanalyse von 5 Untersuchungen mit insgesamt 3.489 Patienten das Mortalitätsrisiko bei Patienten nach Myokardinfarkt und einer SDNN < 70 ms bei 21,7 %, während bei einer SDNN > 70 ms diese bei 8,1 % lag [265]. Das Risiko, in den nächsten 3 Jahren nach dem Myokardinfarkt zu versterben, war damit in der Gruppe mit geringer HRV 2-3fach erhöht.

Auch bei Patienten nach koronarer Bypass-Operation konnte ein Zusammenhang zwischen erniedrigter HRV (hier SDNN < 93 ms) und erneutem Auftreten eines koronaren Ereignisses gefunden werden. Bei einer im Mittel dreijährigen Nachbeobachtungszeit erlitten 13 von 74 Patienten mit erniedrigter HRV ein solches Ereignis, während dies in der Vergleichsgruppe (SDNN ≥ 93 ms) lediglich 3 von 132 Patienten betraf [267]. Auch für Patienten mit Herzinsuffizienz konnte ein Zusammenhang zwischen niedriger HRV und der Gesamtmortalität bzw. kardialen Endpunkten gefunden werden [268] bzw. bei Patienten mit Schlaganfällen korrelierte die individuelle HRV nach dem Schlaganfall mit dem langfristigen Outcome [131].

Schmidt et al. [269] konnten bei intensivmedizinischen Patienten mit Multiorganversagen zeigen, dass der logarithmische Wert des frequenzbezogenen HRV-Parameter VLF (lnVLF) in der Kurzzeitprognose (bis 60 Tagen) eine gute Mortalitätsabschätzung erlaubt.

Ein systematisches Review über den Zusammenhang zwischen einer chronisch obstruktiven Lungenerkrankung und der HRV ergab, dass die Reduzierung der HRV mit dem Schweregrad der COPD korreliert [87].

Ferner scheint eine Korrelation zwischen einer höheren HRV und einem längeren Überleben im Rahmen einer Tumorerkrankung vorzuliegen [270, 271].

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die HRV bei diagnostiziertem Diabetes mellitus Typ I bereits vor dem Auftreten klinischer Zeichen einer vegetativen Dysfunktion erniedrigt ist [272]^R.

Auch für das Auftreten eines manifesten Bluthochdrucks scheint ein Zusammenhang zwischen einer erniedrigten HRV und der späteren Manifestation vorzuliegen. So wiesen die Probanden des untersten Quartils der HRV einer nach Alter, Geschlecht, Ethnienzugehörigkeit, aktuellem

Rauchstatus, Diabetes mellitus und dem Bildungsstatus kontrollierten Gruppe von 2.061 Probanden ein 2,44fach erhöhtes Risiko für die Neumanifestation eines Bluthochdrucks nach drei Jahren auf [273]. Basierend auf Daten aus der Framingham Heart Study (2.024 Probanden) konnten Singh et al. [274] ein erhöhtes Risiko für das Entstehen eines Bluthochdruckes bei reduzierter HRV bei Männern, jedoch nicht bei Frauen zeigen. In einer Studie von Schroeder et al. [275] mit 11.061 Probanden war die Zugehörigkeit zum niedrigsten Quartil – bezogen auf den RMSSD-Wert – mit einem 1,36fach höheren Risiko für das Entstehen eines Bluthochdrucks im Vergleich zum höchsten Quartil verbunden.

Kernaussage Nr. 19	neu [07/2021]
Die reduzierte HRV korreliert mit Prognose-Scores für das Auftreten von kardiovaskulären Ereignissen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

In einer Untersuchung von Schuster et al. konnte an einem Kollektiv von 11.994 Probanden aus der Mannheimer Industriekohorte eine signifikante Korrelation zwischen der Reduzierung des HRV-Parameters RMSSD und verschiedenen Prognose-Scores für das Auftreten einer koronaren Herzerkrankung bzw. einem Schlaganfall aufgezeigt werden [276]. Hierbei wurden der PROCAM-Score nach Assmann et al. [277], der Coronary Heart Disease Framingham Score [278], sowie die kardiovaskulären Prognoseindikatoren SCORE, bezogen auf das Risiko einer koronaren Herzerkrankung (SCORE-CHD) bzw. für eine kardiovaskuläre Erkrankung (SCORE-CVD) nach Conroy et al. [279], betrachtet.

8.4 Einsatz bei Präventionsmaßnahmen

Kernaussage Nr. 20	neu [07/2021]
Die HRV kann im Rahmen der Evaluierung von Präventionsmaßnahmen unter Einhaltung der Qualitätskriterien (siehe Kernaussage Nr. 7) eingesetzt werden. Hierzu sind wiederholte Messungen der HRV einzusetzen.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Vor allem hat sich die HRV als nützlicher Parameter zur Evaluierung von Präventionsmaßnahmen etabliert, wie z. B. bei Stressbewältigungskursen, Ernährungs-, Genussmittel-, Konsumumstellungen, sportlichen Betätigungen einschließlich der präventiven Überwachung vor

Übertrainingssyndromen [280][281]^R und Maßnahmen zur Gewichtsreduktion, um im Längsschnittvergleich den Präventions- bzw. Interventionserfolg bei entsprechenden Maßnahmen einzuschätzen [282]. Eine Veränderung der sympathisch-parasympathischen Balance des vegetativen Nervensystems hin zu einer höheren parasympathischen Grundaktivität (z. B. erhöhte SDNN oder RMSSD, erniedrigte LF/HF-Ratio) weist hierbei auf die Wirksamkeit von Präventionsmaßnahmen hin.

8.5 Einsatz beim Biofeedback

Kernaussage Nr. 21	neu [07/2021]
Hf und HRV-Parameter können für die Objektivierung von Entspannungseffekten im Rahmen des Biofeedbacks eingesetzt werden. Langfristige Effekte konnten mit HRV-basierten Biofeedbackverfahren nicht nachgewiesen werden.	
Konsensusstärke: starker Konsens (100%)	

Bei der Stressbewältigung und in jüngster Zeit auch zur Behandlung von posttraumatischen Belastungsstörungen werden die Hf- und HRV-Parameter im Rahmen von Biofeedbackmethoden eingesetzt, z. B. für die Objektivierung von Entspannungseffekten [182, 283–286]. Jedoch konnten bislang lediglich kurzfristige Effekte nachgewiesen werden. Eine Langzeitwirkung ist bisher nicht belegt worden [286]. Darüber hinaus müssen für die Nutzung der kurzfristigen Wirkungen der HRV-Biofeedbackmethoden geeignete und validierte Methoden zum Einsatz kommen. Mit Verweis auf die Erfassung und Auswertung der HRV ergibt sich zwangsläufig (s. Kap. 4.1), dass Biofeedbackmethoden, die die HRV mittels Pulsoximeter oder anhand der Atemtätigkeit ermitteln, nicht als valide Messinstrumente angesehen werden können und daher nicht als HRV-Biofeedbackmethode eingesetzt werden sollten.

9. Schlussbemerkungen

Die Praxistauglichkeit der Hf- und HRV-Analysen im Rahmen von Felduntersuchungen an Arbeitsplätzen ist erwiesen. Die Analysen können für verschiedene Fragestellungen zielführend eingesetzt werden, wenn die methodischen Anforderungen erfüllt sind. Unter diesen Voraussetzungen können sie nicht nur Forschungseinrichtungen, sondern auch praktizierenden Arbeitsmedizinern und Betriebsärzten empfohlen werden, zumal kardioassoziierte Aspekte in

334 der modernen Arbeitsmedizin im Rahmen des Wandels der Arbeitswelt und der demografi-
335 schen Situation der Erwerbstätigen in Deutschland eine zunehmend größere Bedeutung er-
336 langen.