

Version 4. September 2026

Herzfrequenzvariabilität - HFV

(heart rate variability, HRV)

Konzepte, Messmethodik, Metriken, Anwendungsfelder und Perspektiven

Die Herzfrequenzvariabilität (HFV) beschreibt die zeitliche Schwankung der Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Herzschlägen (RR-Intervalle) und ist ein nichtinvasiver Marker für die Dynamik des autonomen Nervensystems. Hohe HFV spiegelt im Regelfall eine flexible, anpassungsfähige Regulation durch ein ausgewogenes Zusammenspiel von parasympathischer (vagaler) und sympathischer Aktivität wider, während niedrige HFV auf eingeschränkte Adaptationsfähigkeit, erhöhte Stressbelastung oder pathophysiologische Zustände hindeuten kann.

Innerhalb der Prävention, Sport- und Arbeitsmedizin sowie der Kardiologie wird HFV genutzt zur Einschätzung von vagalem Tonus, Stress-/Erholungsstatus, Trainingssteuerung, Schlafqualität und als Risikomarker u. a. bei Herzinsuffizienz, postinfarktbedingter Arrhythmiegefährdung und autonomen Neuropathien. HFV ist sensitiv, aber nicht spezifisch. Interpretationen sollten Messumgebung, Kovariaten und Längsschnittverläufe berücksichtigen.

[1,2,3]

Inhalt

INHALT	1
1 EINLEITUNG	4
2 MESSGRUNDLAGEN	5
2.1 SDNN (Standard Deviation of NN Intervals)	5
2.2 RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences)	6
2.3 PNN50 (%)	6
2.4 VLF (Very Low Frequency, 0.0033-0.04 Hz)	6
2.5 LF (Low Frequency, 0.04-0.15 Hz)	6
2.6 HF (High Frequency, 0.15-0.40 Hz)	7
2.7 LF/HF	7
2.8 Acc. (Acceleration)	7
2.9 Dec. (Deceleration)	7
3 AUSWIRKUNGEN DER ATMUNG AUF VLF, LF, HF UND DAS LF/HF-VERHÄLTNIS	8
4 PHYSIOLOGISCHE GRUNDLAGEN DER HFV	9
4.1 Autonome Regulation des Herzens	9
4.2 Baroreflex und Respiratorische Sinusarrhythmie	9
5 MESSMETHODIK UND DATENQUALITÄT	10
5.1 Signalaquisition: EKG vs. PPG	10
5.2 Sampling, Vorverarbeitung und Artefaktkorrektur	10
5.3 Messprotokolle	10
5.3.1 Kurzzeit-HFV	10
5.3.2 Langzeit-HFV	10
5.3.3 Kontext	10
5.4 Qualitätsmetriken und Reproduzierbarkeit	10
6 METRIKEN UND ANALYSEN	11
6.1 Zeitdomäne	11
RMSSD	11
SDNN	11
pNN50/pNN20	11
6.2 Frequenzdomäne	11
6.3 Nichtlineare Analysen	11
Poincaré-Plot (SD1/SD2)	11
Entropie-Masse	11
6.4 Praxisempfehlungen zur Metrikauswahl	11
7 EINFLUSSFAKTOREN UND CONFOUNDER	12
7.1.1 Physiologie	12
7.1.2 Medizinisch	12
7.1.3 Messung	12
8 ANWENDUNGSFELDER	13

8.1	Prävention und Stress/Erholung	13
8.2	Sport und Trainingssteuerung	13
8.3	Schlaf- und Tagesrhythmusdiagnostik	13
8.4	Klinische Anwendungen	13
8.5	Trend- versus Querschnittsbewertung	13
8.6	LF/HF-Kontroversen	14
8.7	Daten aus Wearables	14
9	HFV - INTERPRETATION DER WERTE	15
9.1	Zu hohe HFV	15
9.2	Zu tiefe HFV	15
9.3	Was verbessert die HFV?	16
9.4	Normwerte	16
9.5	Einflussfaktoren	17
9.5.1	HFV sinkt durch:	17
9.5.2	HFV steigt durch:	17
10	ÜBERSICHT ÜBER DIE WICHTIGSTEN MESSGRÖSSEN	18
10.1	Bedeutung der einzelnen Parameter	18
10.1.1	SDNN	18
10.1.2	RMSSD	19
10.2	Frequenzanalyse	19
10.2.1	HF (High Frequency)	19
10.2.2	LF (Low Frequency)	20
10.2.3	LF/HF-Verhältnis	20
11	PRAKTISCHER INTERPRETATIONSALGORITHMUS	21
11.1	Schritt 1: Messqualität prüfen	21
11.2	Schritt 2: Herzfrequenz berücksichtigen	21
11.3	Schritt 3: Abweichung vom individuellen Verlauf beurteilen	21
11.4	Schritt 4: Klinischen Kontext erfassen	21
11.5	Schritt 5: Bei auffälligem Befund objektivieren	21
11.6	Warnzeichen für weitere Abklärung	22
12	ÜBERSICHT FÜR DIE HAUSÄRZTLICHE PRAXIS	23
12.1	Sehr gute autonome Regulation	23
12.2	Akuter Stress	23
12.3	Chronische Dysregulation	23
12.4	Nach Herzinfarkt oder bei Herzinsuffizienz	23
12.5	Kompakte Übersicht	24
12.5.1	Grundprinzip	24
12.5.2	Standardisierte Kurzzeitmessung	26
12.5.3	Grobe Orientierung für fünfminütige Ruheaufzeichnungen	27
12.5.4	Was bedeutet eine niedrige HFV	28
12.5.5	Was bedeutet eine sehr hohe HFV	28
13	WEARABLES	29
13.1	Garmin	29
13.2	Apple Watch	29

13.3	Oura	29
13.4	Polar.....	29
13.5	Klinische Regel	29
14	INTERPRETATION DER GARMIN-HFV (RMSSD-BASIERT)	30
14.1	Typische Muster	31
14.1.1	Gute Regeneration	31
14.1.2	Schlafmangel	31
14.1.3	Beginn eines Infekts	31
14.1.4	Übertraining	31
14.1.5	Chronischer Stress.....	31
14.1.6	Wann sollte man genauer untersuchen?	32
15	KLINISCHE KONSTELLATIONEN	33
15.1	Diabetes mellitus	33
15.2	Herzinsuffizienz und Zustand nach Myokardinfarkt.....	33
15.3	Long COVID.....	33
15.4	ME/CFS	33
15.5	Übertraining und Regeneration.....	34
16	GARMIN-SMARTWATCH.....	35
16.1	HFV-Status	35
16.2	Ruhepuls	35
16.3	Was täglich beobachtet ein sollte	35
16.4	Verlaufsbeobachtung	36
16.5	Die Fenix 6 kann als eine Art „vegetatives Labor“ dienen.....	36
17	BEISPIEL -MANN 77-JÄHRIG	37
17.1	Einordnung	38
17.2	Beurteilung der autonomen Regulation.....	38
17.3	Nutzung der Fenix 6.....	39
18	TRAININGSKONZEPT FÜR EINEN GESUNDEN, SPORTLICHEN 77- JÄHRIGEN	40
18.1	Ausdauertraining (Grundlage) 4-6×/Woche	40
18.2	Krafttraining 2-3×/Woche.....	40
18.3	Hochintensives Intervalltraining (HIIT) - 1×/Woche	41
18.4	Beweglichkeit - täglich	41
18.5	5. Gleichgewichtstraining - täglich 5 Minuten	42
18.6	Atemtraining - 10 Minuten täglich	42
18.7	Zusätzliche Empfehlung bei guter Fitness	42
18.8	Ernährung zur Unterstützung der HFV	43
18.9	Persönliche Einschätzung	43
19	ZUSAMMENFASSUNG/SCHLUSSFOLGERUNG	44
20	TABELLEN-/ABBILDUNGSVORSCHLÄGE.....	45
21	LITERATUR	46

1 Einleitung

Die Herzfrequenzvariabilität (HFV) beschreibt die zeitlichen Schwankungen aufeinanderfolgender Herzschlagintervalle (RR-Intervalle) und gilt als nichtinvasiver Marker der autonomen Regulation. Als Ausdruck des Zusammenspiels zwischen parasympathischer und sympathischer Aktivität korreliert eine erhöhte HFV im Ruhekontext typischerweise mit grösserer Adaptationsfähigkeit, während reduzierte HFV auf Belastung, Erkrankung oder eingeschränkte Regulationsreserve hindeuten kann [6]. Methodisch basiert HFV überwiegend auf EKG-basierten RR-Intervallen. PPG-basierte Pulse-Intervalle bieten Alltagstauglichkeit, erfordern jedoch konsequentes Artefaktmanagement. Gängige Metriken umfassen Zeitdomänenmasse (RMSSD, SDNN), Frequenzdomänenmasse (LF, HF, LF/HF) und nichtlineare Indizes (Poincaré-SD1/SD2, Entropie-Masse, Detrended Fluctuation Analysis).

Anwendungen reichen von Prävention, Stress-/Erholungsmonitoring und Sporttrainingssteuerung bis zur kardiologischen Risikostratifizierung, etwa bei Herzinsuffizienz oder postmyokardialen Arrhythmierisiken. Interpretation und Vergleichbarkeit hängen wesentlich von standardisierten Messprotokollen, Signalqualität und Kontextualisierung ab.

Trendbasierte Längsschnittanalysen sind punktuellen Vergleichen überlegen. Dieses Manuskript bündelt Konzepte, Messmethodik, Metriken und Anwendungsfelder, diskutiert Limitationen und Confounder (Atmung, Tageszeit, Medikamente, Erkrankungen) und skizziert Perspektiven wie ambulantes Langzeitmonitoring, personalisierte Referenzwerte und multimodale Modelle. Ziel ist eine praxisnahe, methodisch fundierte Orientierung für Forschung und Anwendung der HFV als Bestandteil eines integrativen, evidenzbasierten Assessments.

Schlüsselwörter: Herzfrequenzvariabilität, autonomes Nervensystem, RMSSD, SDNN, Spektralanalyse, Poincaré-Plot, Stress, Sport, Kardiologie

2 Messgrundlagen

[9]

Messgrundlage:

Elektrokardiogramm (EKG) mit präziser R-Zackenerkennung. Alternativ photoplethysmographische Pulse-to-Pulse-Intervalle (PPG) mit Vorsicht bzgl. Artefakten.

Domänen und Metriken:

Zeitdomäne: SDNN (Gesamtvariabilität). Standard Deviation of NN Intervals
RMSSD (kurzfristig-vagaler Einfluss)
pNN50¹

Frequenzdomäne: LF (ca. 0,04–0,15 Hz)
HF (ca. 0,15–0,40 Hz)
LF/HF-Verhältnis.
Interpretationen abhängig von Atmung und Bedingungen

Nichtlinear:

Poincaré-Analyse (SD1/SD2), Entropie-Masse (SampEn/ApEn), Detrended Fluctuation Analysis ($\alpha1/\alpha2$).

Einflussfaktoren:

Atmung, Körperlage, Tageszeit, Alter, Geschlecht, Fitness, Koffein/Alkohol/Medikation, Fieber/Infekte, psychischer und physischer Stress, Messdauer und -kontext (Ruhe vs. Belastung, Schlaf vs. Wachzustand).

Qualitätsaspekte:

Artefaktkorrektur, stabile Messfenster (z. B. 5-min-Kurzzeit-HFV in Ruhe), standardisierte Protokolle (Atemkontrolle, Fasten/kein Koffein), transparente Berichtsformate.

2.1 SDNN (Standard Deviation of NN Intervals)

[9]

Definition

Standardabweichung der RR-Intervalle (ms), misst sowohl sympathische als auch parasympathische Aktivität.

Interpretation

Kleinere Werte deuten auf eine schlechte autonome Regulation hin, höhere Werte sind typisch für gesunde Personen.

Anmerkung

Wird während der Atemübungen in Echtzeit angezeigt, wenn in den Pro-Einstellungen aktiviert. Standardmäßig deaktiviert.

[Zitat,9]

¹ PNN50 bezeichnet den Prozentsatz aller RR-Intervalle, die sich um mindestens 50 Millisekunden vom vorhergehenden Intervall unterscheiden. Hohe PNN50-Werte weisen auf eine stärkere Langzeitvariabilität und erhöhte parasympathische Aktivität hin.

2.2 RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences)

Definition

Wurzel des Mittelwerts der quadrierten Unterschiede zwischen aufeinanderfolgenden RR-Intervallen (ms), misst hauptsächlich die parasympathische Aktivität.

Interpretation

Ein höherer Wert (≥ 30 ms) weist auf eine starke parasympathische Aktivität hin, während Werte unter 20 ms oft mit Stress oder schlechter Gesundheit assoziiert sind.

Anmerkung

Wird während der Atemübungen in Echtzeit angezeigt, wenn in den Pro-Einstellungen aktiviert. Standardmässig aktiviert.

[Zitat,9]

2.3 PNN50 (%)

Definition: Prozentsatz der RR-Intervalle, die sich um mehr als 50 ms unterscheiden.

Interpretation: Höhere Werte (≥ 10 -20%) zeigen eine gute vagale Regulation an, während niedrige Werte auf eine eingeschränkte autonome Kontrolle hindeuten.

Anmerkung: Wird während der Atemübungen in Echtzeit angezeigt, wenn in den Pro-Einstellungen aktiviert. Standardmässig deaktiviert.

[Zitat,9]

2.4 VLF (Very Low Frequency, 0.0033-0.04 Hz)

Definition

Energiegehalt in sehr niedrigen Frequenzen der HFV.

Interpretation

Wird mit Stoffwechselprozessen und dem autonomen Nervensystem in Verbindung gebracht. Dauerhaft niedrige Werte können auf Entzündungen und Herzproblemen hinweisen.

Anmerkung

Die Frequenzen werden entweder in % (Standardeinstellung) oder in ms^2 angezeigt. Dies hängt von der Einstellung „HFV-Frequenzeinheiten“ im Pro-Bildschirm ab.

[Zitat,9]

2.5 LF (Low Frequency, 0.04-0.15 Hz)

Definition

Energiegehalt im niedrigen Frequenzbereich der HFV.

Interpretation

Wird durch das sympathische Nervensystem und den Baroreflex beeinflusst. Ein hoher LF-Wert kann auf Stress oder eine aktive Anpassungsfähigkeit hinweisen.

Anmerkung

Die Frequenzen werden entweder in % (Standardeinstellung) oder in ms^2 angezeigt. Dies hängt von der Einstellung „HFV-Frequenzeinheiten“ im Pro-Bildschirm ab.

[Zitat,9]

2.6 HF (High Frequency, 0.15-0.40 Hz)

Definition

Energiegehalt im hohen Frequenzbereich der HFV.

Interpretation

Repräsentiert die parasympathische Aktivität. Hohe HF-Werte deuten auf eine gute Entspannungsfähigkeit hin, niedrige Werte auf Stress oder schlechte vagale Kontrolle.

Anmerkung

Die Frequenzen werden entweder in % (Standardeinstellung) oder in ms^2 angezeigt. Dies hängt von der Einstellung „HFV-Frequenzeinheiten“ im Pro-Bildschirm ab.

[Zitat,9]

2.7 LF/HF

Definition

Verhältnis zwischen LF- und HF-Werten.

Interpretation

Ein hoher Wert (> 3) zeigt eine Dominanz des sympathischen Nervensystems (Stress), während ein niedriger Wert (< 1.5) auf eine parasympathische Dominanz hindeutet. Wobei diese Interpretation in der Wissenschaft umstritten ist. Für weitere Details siehe Die Auswirkungen der Atmung auf VLF, LF, HF und das LF/HF-Verhältnis unten.

Anmerkung

Wird während der Atemübungen in Echtzeit angezeigt, wenn in den Pro-Einstellungen aktiviert. Standardmäßig deaktiviert.

[Zitat 9,2]

2.8 Acc. (Acceleration)

Definition

Beschleunigung der Herzfrequenz (ms).

Interpretation

Zeigt die Veränderung der Herzfrequenz gegenüber dem vorherigen Herzschlag an.

Anmerkung

Für die Darstellung im Diagramm sind Acc. (Acceleration) und Dec. (Deceleration) miteinander verknüpft.

[Zitat,9]

2.9 Dec. (Deceleration)

Definition

Verlangsamung der Herzfrequenz (ms).

Interpretation

Zeigt die Veränderung der Herzfrequenz gegenüber dem vorherigen Herzschlag an.

Anmerkung

Für die Darstellung im Diagramm sind Dec. (Deceleration) und Acc. (Acceleration) miteinander verknüpft.

[Zitat,9]

3 Auswirkungen der Atmung auf VLF, LF, HF und das LF/HF-Verhältnis

Die Herzfrequenz steigt beim Einatmen und sinkt beim Ausatmen, ein Effekt, der als respiratorische Sinusarrhythmie (RSA) bekannt ist und erhebliche Auswirkungen auf die HFV hat.

Bei einer gleichmässigen Atmung von etwa sechs Atemzügen pro Minute (0.1 Hz) synchronisiert sich die Herzfrequenz mit dem Atemrhythmus, was ein Gefühl tiefer Entspannung erzeugt. Dieser Zustand wird allgemein als Herzkohärenz bezeichnet [Zitat,9].

4 Physiologische Grundlagen der HFV

4.1 Autonome Regulation des Herzens

Das autonome Nervensystem (ANS) steuert die Herzfrequenz über vagale und sympathische Efferenzen. Vagusaktivierung wirkt über muskarinerge M2-Rezeptoren am Sinusknoten, reduziert die I_f -Ströme und verkürzt die spontane Depolarisation. Effekte treten innerhalb von Herzschlägen ein. Sympathische Aktivierung, vermittelt durch β_1 -adrenerge Rezeptoren, erhöht cAMP, verstärkt Ca^{2+} -Ströme und beschleunigt die Depolarisation. Der Effekt entfaltet sich über Sekunden [29]. Diese Asymmetrie begründet, warum kurzfristige HFV-Metriken wie RMSSD in Ruhe besonders sensitiv für vagale Einflüsse sind.

4.2 Baroreflex und Respiratorische Sinusarrhythmie

Die respiratorische Sinusarrhythmie (RSA), die atemphasenabhängige Oszillation der Herzfrequenz, ist eine Hauptquelle hochfrequenter HFV. Baroreflexe koppeln Blutdruckschwankungen an vagale/sympathische Gegenregulation. Atmung moduliert intrathorakale Drücke und venösen Rückstrom, wodurch die RR-Intervalle in der HF-Bandbreite ($\sim 0,15\text{--}0,40$ Hz) oszillieren. RSA-Amplitude hängt von Atemfrequenz und -tiefe ab. Kontrollierte Atmung ist daher zentral für standardisierte Messungen [4].

Multiskalen-Dynamik

Herzzeitserien zeigen Fraktalität² und $1/f$ -ähnliche Eigenschaften über Zeitmassstäbe. Nichtlineare Metriken wie Detrended Fluctuation Analysis (DFA α_1/α_2) erfassen diese Langzeitkorrelationen. Pathophysiologische Zustände können die Skalierung verzerren [5].

² Fraktalität beschreibt die Eigenschaft von Objekten, auf verschiedenen Massstabsebenen ähnliche oder selbstähnliche Strukturen zu zeigen.

5 Messmethodik und Datenqualität

5.1 Signalaquisition: EKG vs. PPG

Das EKG mit verlässlicher R-Detektion gilt als Goldstandard für HFV. Artefakte resultieren aus Muskelaktivität, schlechter Elektrodenhaftung und Bewegung. PPG³ misst volumetrische Pulswellen per optischer Reflektion/Transmission. Es ist alltagstauglich, aber anfälliger für Bewegungsartefakte, Vasokonstriktion und Lichtsättigung. PPG-Pulse-Intervalle korrelieren im Ruhezustand gut mit RR-Intervallen, weichen jedoch insbesondere bei Belastung und niedriger Perfusion ab. Eine sorgfältige Filterung und Qualitätskennzeichnung ist zwingend [10].

5.2 Sampling, Vorverarbeitung und Artefaktkorrektur

Erforderlich sind ausreichende Abtastraten (EKG $\geq$ 250–500 Hz für präzise R-Erkennung), robuste QRS-Detektoren und nachgelagerte Intervall-Qualitätsprüfungen. Artefakte und Extrasystolen verzerren HFV erheblich.

Übliche Strategien sind adaptive Schwellen, Morphologie-Checks, Intervall-Outlier-Erkennung (z. B. Kubios-Regeln), interpolative Korrektur und dokumentierte Ausschlussquoten. Die Berichterstattung sollte Rohdatenquelle, Detektor, Korrekturrate, verbleibende Artefakte und Fensterung offenlegen.

5.3 Messprotokolle

5.3.1 Kurzzeit-HFV

5-minütige Ruheaufnahmen im Sitzen/Liegen, idealerweise mit kontrollierter Atmung (z. B. 0,25 Hz) oder dokumentierter Spontanatmung.

5.3.2 Langzeit-HFV

24-h-Holter zur Erfassung zirkadianer Muster. SDNN über 24 h spiegelt Gesamtvariabilität. Nächtliche Abschnitte sind vergleichsweise stabil.

5.3.3 Kontext

Tageszeit, Fasten/Koffeinabstinenz, Nikotin, Medikamente, Körperlage, Temperatur und psychischer Zustand sollten standardisiert oder erfasst werden.

5.4 Qualitätsmetriken und Reproduzierbarkeit

Berichte sollten Intraklassenkorrelationen (ICC), Limits of Agreement (Bland-Altman)⁴, Test-Retest-Variabilität und Artefaktquoten ausweisen. Für Wearables ist eine Validierung gegen EKG in der Zielpopulation und -situation entscheidend.

³ Ein Photoplethysmogramm (PPG) ist ein optisch gewonnenes Plethysmogramm, mit dem sich Veränderungen des Blutvolumens im mikrovaskulären Gewebebett erfassen lassen. Ein PPG wird häufig mithilfe eines Pulsoximeters gewonnen, das die Haut beleuchtet und Veränderungen der Lichtabsorption misst.

⁴ In der Statistik genutzte Darstellungsmethode zum Vergleich zweier Messmethoden, die auf graphischen Abbildungen und einfachen Rechnungen basiert.

6 Metriken und Analysen

6.1 Zeitdomäne

RMSSD

Quadratwurzel des Mittelwerts quadrierter aufeinanderfolgender Differenzen, robust für kurzfristig-vagale Aktivität in Ruhe. Geeignet für tägliches Monitoring.

SDNN

Standardabweichung aller NN-Intervalle, Mass der Gesamtvariabilität. Benötigt längere Fenster oder 24-h-Daten für Stabilität.

pNN50/pNN20

Prozentanteil aufeinanderfolgender Intervalldifferenzen > 50 ms bzw. 20 ms. Sensitiv für vagalen Tonus.

6.2 Frequenzdomäne

Spektrale Zerlegung, üblicherweise via FFT oder Autoregressionsmodellen, in:

HF (0,15–0,40 Hz): Überwiegend vagal und atemgetrieben

LF (0,04–0,15 Hz): gemischter Ursprung (baroreflexvermittelt, sympathisch-parasympathisch)
Interpretation kontextabhängig

VLF ($< 0,04$ Hz): Reflektiert langsame Mechanismen (Thermoregulation, Renin-Angiotensin, zirkadiane Einflüsse). Belastbare Messung erfordert lange Zeitreihen. Das LF/HF-Verhältnis wurde klassisch als Sympatho-Vagotonie-Index genutzt, ist jedoch kontrovers und darf nicht unkritisch als „Sympathikus/Parasympathikus-Quotient“ interpretiert werden [11].

6.3 Nichtlineare Analysen

Poincaré-Plot (SD1/SD2)

SD1 approximiert kurzfristige Variabilität (vagal), SD2 längerfristige Dynamik

Entropie-Masse

Approximate/Sample Entropy (Komplexität/Unvorhersehbarkeit).

DFA (α_1/α_2): Langzeitkorrelationen und Fraktalität. Pathologische Zustände verschieben α -Werte.

Recurrence Quantification, Symbolische Dynamik: ergänzende Komplexitätsmasse.

6.4 Praxisempfehlungen zur Metrikauswahl

Für tägliches Selbstmonitoring und Trainingssteuerung ist RMSSD (oder der natürliche Logarithmus $\ln$ RMSSD) in standardisierten Ruhefenstern besonders geeignet. Für klinische Fragestellungen mit prognostischer Bedeutung sind breitbandige Masse (24-h-SDNN) und spektrale Analysen ergänzend sinnvoll. Nichtlineare Metriken liefern Zusatzinformationen bei komplexen Dynamiken, sollten aber mit etablierten Massen korreliert und vorsichtig interpretiert werden.

7 Einflussfaktoren und Confounder

HFV ist sensibel für zahlreiche Kovariaten

7.1.1 Physiologie

Alter (abnehmende HFV mit Alter), Geschlecht, Fitness, genetische Einflüsse.

Verhalten/Umwelt: Schlafdauer/-qualität, körperliche Aktivität, Ernährung, Alkohol/Koffein/Nikotin, psychischer Stress.

7.1.2 Medizinisch

Fieber/Infektionen, endokrine/metabolische Störungen (Diabetes), kardiovaskuläre Erkrankungen, Medikamente (Betablocker, Anticholinergika).

7.1.3 Messung

Atmungsfrequenz und -tiefe, Körperlage, Temperatur, Geräuschkulisse, Geräte/Algorithmen.

Konsequenz: HFV-Interpretationen müssen Kontexte und Trends einbeziehen. Querschnittsvergleiche zu Referenzen sind nur bedingt aussagekräftig.

8 Anwendungsfelder

8.1 Prävention und Stress/Erholung

HFV dient als Marker für Stressreaktionen und Erholung. Interventionen wie Schlafoptimierung, Atem-/Biofeedback, Ausdauertraining und Achtsamkeit erhöhen häufig vagale Tonusindikatoren [12]. Biofeedback mit langsamer kontrollierter Atmung (Resonanzfrequenz ~ 0.1 Hz) kann RSA und Baroreflexsensitivität steigern.

8.2 Sport und Trainingssteuerung

In der Sportpraxis wird morgendliche lnRMSSD im Sitzen/Liegen zur Steuerung der Trainingslast genutzt: Stabile oder erhöhte Werte deuten auf Erholtheit hin. Anhaltend erniedrigte Werte sprechen für Belastungsakkumulation/Stress. Trend- statt Tageswert-Fokus reduziert Fehlalarme. Kontextdaten (Schlaf, RPE, Trainingsinhalt) verbessern Entscheidungen.

8.3 Schlaf- und Tagesrhythmusdiagnostik

Nächtliche HFV spiegelt Erholungsprozesse. Phasen hoher vagaler Aktivität (HF-Power) korrespondieren mit NREM-Schlaf. Veränderungen können auf Schlafmangel, Schlafapnoe oder Stress hinweisen. Wearable-basierte HFV im Schlaf ist methodisch attraktiv, verlangt aber strenges Qualitäts- und Artefaktmanagement.

8.4 Klinische Anwendungen

Kardiologie

Reduzierte HFV korreliert in bestimmten Kollektiven mit erhöhter Mortalität (post-MI, Herzinsuffizienz) und kann zur Risikostratifizierung beitragen [13]. HFV ergänzt, ersetzt aber keine etablierten klinischen Scores.

Neuropathien

Bei diabetischer autonomer Neuropathie sind vagale Indizes reduziert.

Perioperative Medizin/Intensivmedizin

HFV-Veränderungen können Stress, Schmerz, Delir- oder Infektionsrisiken anzeigen. Standardisierung ist hier besonders anspruchsvoll.

8.5 Trend- versus Querschnittsbewertung

Individuelle Baselines und Längsschnitte (z. B. 7-Tage-Mittel, Wochenvarianz) sind verlässlicher als der Vergleich mit alters-/geschlechtsadjustierten Normbereichen. Praktikabel ist ein Ampelsystem basierend auf Abweichungen vom individuellen gleitenden Mittel.

8.6 LF/HF-Kontroversen

Das LF/HF-Verhältnis ist kein verlässlicher „Sympathikus/Parasympathikus-Quotient“. LF spiegelt baroreflexvermittelte Oszillationen und Mischaktivität. HF repräsentiert vagalen/atembedingten Anteil. Beeinflussung durch Atmung, Haltung und Messkontext limitiert die Deutung [11].

Empfehlung: LF/HF nur im streng standardisierten Kontext und ergänzend berichten.

8.7 Daten aus Wearables

Tragbare Geräte ermöglichen grossskalige, ökologische Messungen. Unterschiede in Sensorik, Algorithmen, Sampling und Artefaktbehandlung zwischen Herstellern erschweren Vergleiche. Validierungsstudien gegen EKG im Zielkontext sind Voraussetzung. Rohdatenzugang und transparente Qualitätskennzahlen erhöhen wissenschaftlichen Nutzen.

9 HFV - Interpretation der Werte

Die HFV beschreibt die Schwankung der Zeitabstände zwischen zwei Herzschlägen. Entgegen einer häufigen Annahme schlägt ein gesundes Herz **nicht** völlig regelmässig. Eine höhere Variabilität ist in den meisten Situationen ein Zeichen dafür, dass das vegetative Nervensystem flexibel auf Belastungen reagieren kann.

9.1 Zu hohe HFV

Eine hohe HFV ist **meist ein gutes Zeichen** und spricht für:

- gute Erholung und Regenerationsfähigkeit
- gute körperliche Fitness
- hohe Anpassungsfähigkeit des vegetativen Nervensystems
- ausreichenden Schlaf und geringe Stressbelastung

Eine sehr hohe HFV kann gelegentlich auch bei bestimmten Herzrhythmusstörungen auftreten. Deshalb muss sie immer im klinischen Zusammenhang beurteilt werden.

9.2 Zu tiefe HFV

Eine niedrige HFV weist häufig auf eine Dominanz des Sympathikus ("Stressnerv") oder eine verminderte Anpassungsfähigkeit hin. Mögliche Ursachen sind:

- chronischer oder akuter Stress
- Schlafmangel
- Infektionen oder Entzündungen
- Übertraining
- Depression oder Angststörungen
- Diabetes mellitus (autonome Neuropathie)
- Herzinsuffizienz oder nach Herzinfarkt
- höheres Lebensalter
- Alkohol, Nikotin und manche Medikamente

Eine dauerhaft niedrige HFV ist in Studien mit einem erhöhten Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen und einer ungünstigeren Prognose bei verschiedenen Erkrankungen assoziiert.

9.3 Was verbessert die HFV?

- Regelmässiges Ausdauertraining
- Ausreichender Schlaf (7–9 Stunden)
- Stressmanagement (Meditation, Atemübungen, Yoga)
- Gesunde Ernährung
- Gewichtsnormalisierung
- Verzicht auf Rauchen und übermässigen Alkoholkonsum
- Gute Behandlung von Bluthochdruck, Diabetes und Schlafapnoe

9.4 Normwerte

Es gibt keinen einheitlichen Normwert, da die HFV stark vom Alter, Geschlecht, der Messmethode und der Tageszeit abhängt. Wichtiger als der Vergleich mit anderen ist die eigene Entwicklung im Verlauf.

Bei Wearables (z. B. Garmin, Apple Watch, Oura, Polar) wird häufig der Parameter **RMSSD** verwendet:

- **< 20 ms:** häufig niedrig
- **20–50 ms:** häufig durchschnittlich
- **50–100 ms:** gut
- **> 100 ms:** sehr gut (vor allem bei jüngeren oder gut trainierten Personen)

Diese Bereiche sind jedoch nur grobe Orientierungswerte.

9.5 Einflussfaktoren

[16]

9.5.1 HFV sinkt durch:

- Alter
- Diabetes
- Entzündung
- chronischen Stress
- Schlafmangel
- Alkohol
- Rauchen
- Herzinsuffizienz
- Übertraining

9.5.2 HFV steigt durch:

- regelmässiges Ausdauertraining
- Krafttraining
- HIIT (langfristig, trotz kurzfristigem Abfall nach intensiven Einheiten)
- Gewichtsabnahme
- Meditation
- Atemtraining (ca. 6 Atemzüge/min)
- guter Schlaf
- ausreichende Flüssigkeitszufuhr

10 Übersicht über die wichtigsten Messgrößen

(SDNN, RMSSD, pNN50, LF, HF, LF/HF-Verhältnis) mit ihrer klinischen Bedeutung sowie aktuelle Evidenz.

[14]

Tabelle 1 Klinisch wichtigste HFV-Parameter

Parameter	Misst hauptsächlich	Klinische Bedeutung
SDNN	Gesamtvariabilität	Globaler Marker der autonomen Regulation
RMSSD	Parasympathische Aktivität (Vagus)	Wichtigster Kurzzeitparameter, Standard bei Wearables
pNN50	Parasympathikus	Ergänzend zu RMSSD
HF (0.15–0.40 Hz)	Vagusaktivität	Erholung, Schlaf, Entspannung
LF (0.04–0.15 Hz)	Gemischte sympathische + parasympathische Aktivität	Nicht als reiner Sympathikusmarker interpretieren
LF/HF	Verhältnis beider Frequenzbereiche	Heute deutlich vorsichtiger zu interpretieren als früher
SDANN	Langfristige Schwankungen	Besonders bei 24-h-Holter sinnvoll

Die heutigen Empfehlungen betonen, dass RMSSD und SDNN für die klinische Praxis die robustesten Parameter sind. Das LF/HF-Verhältnis gilt inzwischen nicht mehr als verlässlicher Marker eines einfachen "Sympathikus/Parasympathikus-Gleichgewichts".

10.1 Bedeutung der einzelnen Parameter

[14]

10.1.1 SDNN

Der wichtigste Gesamtparameter

- misst die gesamte autonome Regulation
- besonders geeignet beim 24-h-Holter
- niedrige Werte sind prognostisch ungünstig

Erniedrigt bei

- Herzinsuffizienz
- Zustand nach Myokardinfarkt
- Diabetes mit autonomer Neuropathie
- chronischem Stress
- höherem Alter

10.1.2 RMSSD

Der heute klinisch interessanteste Kurzzeitparameter

Er spiegelt nahezu ausschliesslich den vagalen Tonus wider.

Hohe Werte sprechen für

- gute Regeneration
- guten Schlaf
- Trainingsanpassung
- geringe Stressbelastung

Niedrige Werte finden sich bei

- akuten Infekten
- Schlafmangel
- Übertraining
- chronischem Stress
- Alkohol
- Schmerzen

RMSSD korreliert eng mit der HF-Komponente und wird deshalb von den meisten Wearables (Garmin, Polar, Oura, WHOOP) verwendet.

10.2 Frequenzanalyse

[15]

10.2.1 HF (High Frequency)

- parasympathische Aktivität
- respiratorische Sinusarrhythmie
- steigt bei tiefer Atmung

Hohe HF

→ gute vagale Aktivität

Niedrige HF

- Stress
- Schlafmangel
- Entzündung

10.2.2 LF (Low Frequency)

Früher: > "Sympathikus"

Heute weiss man:

LF enthält:

- Baroreflex
- Parasympathikus
- Sympathikus

und ist deshalb kein reiner Sympathikusparameter

10.2.3 LF/HF-Verhältnis

Früher sehr populär. Heute wird dieser Parameter deutlich zurückhaltender bewertet.

Ein erhöhtes Verhältnis kann auftreten bei

- Stress
- Übertraining
- Schlafmangel
- Schmerz
- Angst

Allein ist dieser Quotient jedoch diagnostisch wenig aussagekräftig.

Tabelle 2 Praktische Interpretation

Befund	Bedeutung
SDNN ↓, RMSSD ↓	Verminderte autonome Anpassungsfähigkeit
SDNN normal, RMSSD ↓	Akuter Stress, schlechter Schlaf
RMSSD ↑	Gute vagale Aktivität
HF ↓	Reduzierte Parasympathikusaktivität
HF ↑	Erholung, Meditation, tiefe Atmung
LF/HF ↑	Mögliche Stressreaktion (nur im Kontext interpretieren)

11 Praktischer Interpretationsalgorithmus

11.1 Schritt 1: Messqualität prüfen

- Sinusrhythmus?
- Extrasystolen oder Vorhofflimmern?
- Artefakte?
- gleiche Messdauer, Körperlage und Tageszeit?
- gleiches Gerät und derselbe Algorithmus?

11.2 Schritt 2: Herzfrequenz berücksichtigen

Eine niedrigere Herzfrequenz geht mechanisch häufig mit höherer HFV einher. Veränderungen sollten deshalb immer zusammen mit dem Ruhepuls beurteilt werden.

11.3 Schritt 3: Abweichung vom individuellen Verlauf beurteilen

Bei Wearables sind sieben- bis dreissigtägige Trends meist aussagekräftiger als ein Einzelwert.

11.4 Schritt 4: Klinischen Kontext erfassen

- Infekt?
- Alkohol?
- Schlafdefizit?
- Schmerzen?
- Medikamentenänderung?
- Überlastung?
- orthostatische Beschwerden?
- Palpitationen?

11.5 Schritt 5: Bei auffälligem Befund objektivieren

Je nach Fragestellung:

- Ruhe-EKG
- Langzeit-EKG
- orthostatische Messung
- Labor
- Schlafdiagnostik
- Echokardiografie
- autonome Funktionstests

11.6 Warnzeichen für weitere Abklärung

Eine medizinische Abklärung ist angezeigt bei:

- neuem stark unregelmäßigem Puls
- Synkope oder Präsynkope

12 Übersicht für die hausärztliche Praxis

[6,7,14,18,19]

Folgende Konstellationen sind zu unterscheiden:

12.1 Sehr gute autonome Regulation

- SDNN hoch
- RMSSD hoch
- HF hoch
- Ruhepuls niedrig

→ gute Prognose

12.2 Akuter Stress

- RMSSD erniedrigt
- HF erniedrigt
- Ruhepuls erhöht

→ häufig reversibel

12.3 Chronische Dysregulation

- SDNN dauerhaft niedrig
- RMSSD niedrig
- klinisch oft Erschöpfung, metabolisches Syndrom oder Diabetes

→ erhöhtes kardiovaskuläres Risiko

12.4 Nach Herzinfarkt oder bei Herzinsuffizienz

- deutlich reduzierte SDNN
- prognostisch ungünstig und mit einer erhöhten Mortalität assoziiert [17]

12.5 Kompakte Übersicht

Die Werte sind als **Orientierung**, nicht als starre Normgrenzen formuliert.

12.5.1 Grundprinzip

Die Herzfrequenzvariabilität, HFV beziehungsweise HFV, beschreibt die zeitliche Schwankung aufeinanderfolgender **normaler NN-Intervalle**. Sie ist kein direkter Messwert für „Stress“, sondern ein Summenparameter der kardialen autonomen Regulation, beeinflusst unter anderem durch:

- Atmung und Baroreflex
- Parasympathikus und Sympathikus
- Herzfrequenz
- Alter und Trainingszustand
- Körperlage und Tageszeit
- Schlaf, Schmerz, Infektion und psychische Belastung
- Medikamente und Genussmittel

Für HFV existieren weiterhin keine universell gültigen altersbezogenen Normalwerte, weil Messdauer, Körperlage, Atmung, Gerät, Artefaktkorrektur und Auswertungsalgorithmus die Ergebnisse erheblich beeinflussen. Entscheidend sind daher standardisierte Bedingungen und der individuelle Verlauf [20].

Tabelle 3 Wichtigste Parameter

Parameter	Definition	Hauptaussage
SDNN	Standardabweichung aller normalen NN-Intervalle	Gesamtvariabilität während der jeweiligen Messdauer
RMSSD	Quadratischer Mittelwert aufeinanderfolgender NN-Differenzen	Vorwiegend kurzfristige vagale Modulation
lnRMSSD	Natürlicher Logarithmus des RMSSD	Statistisch stabilere Verlaufsdarstellung
pNN50	Anteil aufeinanderfolgender NN-Differenzen über 50 ms	Vagale Kurzzeitvariabilität, stark altersabhängig
HF-Power	Leistung im Bereich 0,15–0,40 Hz	Respiratorisch gekoppelte vagale Modulation
LF-Power	Leistung im Bereich 0,04–0,15 Hz	Baroreflexabhängige gemischte autonome Aktivität
LF/HF	Verhältnis von LF zu HF	Kein verlässlicher Quotient des „Sympathikus-Parasympathikus-Gleichgewichts“
SDANN	SD der mittleren NN-Intervalle einzelner Zeitabschnitte	Langfristige Schwankungen im 24-Stunden-EKG
Total Power	Gesamtleistung eines definierten Frequenzspektrums	Globale Variabilität, abhängig von Messdauer und Analyse

RMSSD und HF eignen sich unter kontrollierten Bedingungen als Marker der kardialen vagalen Modulation. LF ist dagegen kein reiner Sympathikusmarker. Auch LF/HF sollte nicht als direkte sympathovagale Waage interpretiert werden [21].

12.5.2 Standardisierte Kurzzeitmessung

Für diagnostisch oder wissenschaftlich verwertbare Kurzzeitmessungen empfiehlt sich:

1. Möglichst EKG-basierte Erfassung oder validierter Brustgurt
2. Gleiche Tageszeit, idealerweise morgens
3. Kein Alkohol am Vorabend
4. Vorher kein Nikotin, Koffein, Essen oder intensiver Sport
5. Mindestens fünf Minuten ruhige Anpassung
6. Anschliessend fünf Minuten Aufzeichnung
7. Immer gleiche Körperlage, vorzugsweise liegend oder sitzend
8. Spontanatmung dokumentieren. Forcierte langsame Atmung verändert besonders HF und LF
9. Extrasystolen, Vorhofflimmern, Fehlmessungen und Bewegungsartefakte korrigieren beziehungsweise ausschliessen
10. Herzfrequenz parallel berücksichtigen

Bereits ein Wechsel zwischen Liegen, Sitzen und Stehen oder zwischen häuslicher und klinischer Umgebung kann die HFV messbar verändern [22].

12.5.3 Grobe Orientierung für fünfminütige Ruheaufzeichnungen

Die folgenden Bereiche gelten nur als klinische Orientierung bei Erwachsenen unter standardisierten Ruhebedingungen:

Tabelle 4 SDNN, 5 Minuten - Einordnung

SDNN, 5 Minuten	Grobe Einordnung
unter 20 ms	niedrig
20–40 ms	eher niedrig bis mittel
40–60 ms	mittlerer bis guter Bereich
über 60 ms	hoch

Tabelle 5 RMSSD - Einordnung

RMSSD	Grobe Einordnung
unter 15–20 ms	deutlich niedrig
20–30 ms	eher niedrig
30–50 ms	mittlerer Bereich
50–80 ms	eher hoch
über 80–100 ms	hoch, häufig bei Jüngeren oder Ausdauertrainierten

Diese Zahlen sind **keine diagnostischen Grenzwerte**. Ein RMSSD von 20 ms kann bei einem älteren klinisch gesunden Menschen individuell normal sein, während derselbe Wert bei einem jungen Ausdauersportler einen deutlichen Abfall darstellen kann. Publierte Referenzbereiche unterscheiden sich erheblich nach Alter, Population und Messprotokoll [23].

12.5.4 Was bedeutet eine niedrige HFV

Eine erniedrigte HFV spricht unspezifisch für eine verminderte autonome Anpassungsfähigkeit. Häufige Ursachen sind:

- akuter oder chronischer Stress
- Schlafmangel oder Schlafapnoe
- akuter Infekt und systemische Entzündung
- Schmerzen
- Alkohol, Nikotin und Dehydratation
- intensive körperliche Belastung oder ungenügende Regeneration
- Diabetes mit autonomer Neuropathie
- Adipositas und metabolisches Syndrom
- Herzinsuffizienz
- Zustand nach Myokardinfarkt
- chronische Nieren- oder Lungenerkrankung
- Dysautonomie

Eine einzelne niedrige Nachtmessung besitzt keine eigenständige diagnostische Bedeutung. Klinisch wichtiger sind ein anhaltender Abfall gegenüber dem individuellen Ausgangswert, begleitende Symptome und Veränderungen von Ruhepuls, Schlaf, Leistungsfähigkeit und Blutdruck.

12.5.5 Was bedeutet eine sehr hohe HFV

Eine hohe HFV ist bei gesunden, insbesondere trainierten Personen meist günstig. Eine ungewöhnlich hohe oder plötzlich stark ansteigende HFV ist jedoch nicht automatisch „besser“.

Mögliche Ursachen scheinbar hoher Werte:

- ausgeprägte respiratorische Sinusarrhythmie
- sehr langsame Atmung
- Messartefakte
- Extrasystolen
- Vorhofflimmern oder andere Arrhythmien
- fehlerhafte Erkennung der Pulswellen
- nächtliche Bradykardie
- selten autonome Instabilität oder Überlastung

Bei unerwartet hoher HFV sollte deshalb zunächst die Rohkurve beziehungsweise ein EKG geprüft werden.

13 Wearables

Garmin, Apple Watch, Oura und Polar

Grundsätzlich

Wearables messen meistens keine echten RR-Intervalle aus einem kontinuierlichen EKG, sondern Pulsintervallvariationen mittels Photoplethysmographie. In Ruhe und während des Schlafs können diese Werte brauchbar sein. Bei Bewegung, Arrhythmien, schlechter Hautdurchblutung oder losem Sitz nimmt die Genauigkeit ab. Consumer-Geräte dürfen daher nicht mit einer standardisierten medizinischen HFV-Analyse gleichgesetzt werden [24].

13.1 Garmin

- verwendet überwiegend nächtliche HFV-Daten
- zeigt typischerweise einen persönlichen Basisbereich
- geeignet für Verlauf und Trainingssteuerung
- Einzelwerte unterschiedlicher Modelle sind nicht direkt vergleichbar
- „unausgeglichen“ bedeutet primär Abweichung vom persönlichen Bereich, nicht automatisch Krankheit

13.2 Apple Watch

- erfasst intermittierend überwiegend **SDNN**
- Messzeitpunkte und Messdauer sind nicht immer konstant
- Werte können durch Atmungs- beziehungsweise Achtsamkeitssitzungen deutlich beeinflusst werden
- für Trends brauchbar, aber nicht direkt mit nächtlichem RMSSD anderer Geräte vergleichbar

13.3 Oura

- misst nachts puls-basierte Intervalle und berichtet überwiegend RMSSD
- längere nächtliche Aggregation kann robuste Trends ergeben
- eine Studie zeigte gute Resultate bei strenger Qualitätskontrolle und ausreichend langen gültigen Messabschnitten [25]

13.4 Polar

- ein geeigneter Brustgurt kann unter Ruhebedingungen RR-Intervalle annähernd EKG-nah erfassen
- für standardisierte Kurzzeitmessungen meist geeigneter als eine optische Uhr
- Datenqualität hängt dennoch von Elektrodensitz, Artefaktkorrektur und Software ab

13.5 Klinische Regel

Nicht zwischen Geräten vergleichen.

Apple-SDNN, Garmin-Nachtwert, Oura-RMSSD und Polar-Kurzzeitmessung sind methodisch unterschiedliche Messgrößen.

14 Interpretation der Garmin-HFV (RMSSD-basiert)

Wichtig:

Garmin bewertet primär den Trend gegenüber dem persönlichen Basiswert. Ein RMSSD von 30 ms kann für einen 75-Jährigen völlig normal, für einen 25-jährigen Ausdauersportler dagegen niedrig sein.

Tabelle 6 Einordnung nach Alter

Alter	Typischer RMSSD-Bereich (ms)	Interpretation
20–30 Jahre	45–90	sehr gut
30–40 Jahre	35–75	gut
40–50 Jahre	30–65	normal
50–60 Jahre	25–55	normal
60–70 Jahre	20–45	altersentsprechend
>70 Jahre	15–40	häufig altersentsprechend

Entscheidend ist die individuelle Entwicklung über Wochen und Monate.

Tabelle 7 Kombination aus HFV und Ruhepuls

HFV	Ruhepuls	Interpretation
hoch	niedrig	optimale Regeneration
hoch	hoch	gelegentlich nach intensiver Belastung oder bei Infektbeginn. Verlauf beobachten
niedrig	niedrig	mögliche chronische autonome Anpassung, klinisch einordnen
niedrig	hoch	Stress, Infekt, Schlafmangel oder Überlastung wahrscheinlich

14.1 Typische Muster

14.1.1 Gute Regeneration

- HFV im persönlichen Bereich oder leicht darüber
- Ruhepuls normal oder etwas tiefer
- guter Schlaf
- normale Leistungsfähigkeit

→ keine Massnahmen nötig

14.1.2 Schlafmangel

- HFV 10–30 % unter Basis
- Ruhepuls erhöht
- Müdigkeit

→ häufig Normalisierung nach ein bis zwei Nächten mit gutem Schlaf.

14.1.3 Beginn eines Infekts

Oft schon **24–48 Stunden vor Symptombeginn**:

- HFV fällt deutlich
- Ruhepuls steigt
- Schlafqualität nimmt ab

Dies kann ein frühes Warnsignal sein, ist aber **nicht spezifisch**.

14.1.4 Übertraining

- HFV mehrere Tage erniedrigt
- Ruhepuls erhöht
- Leistungsabfall
- Müdigkeit

→ Trainingsumfang reduzieren und Erholung priorisieren.

14.1.5 Chronischer Stress

Typisch:

- dauerhaft erniedrigte HFV
- leicht erhöhter Ruhepuls
- schlechter Schlaf
- erhöhte Reizbarkeit

14.1.6 Wann sollte man genauer untersuchen?

Eine weiterführende Abklärung ist sinnvoll bei:

- anhaltendem HFV-Abfall über 2–4 Wochen ohne erkennbare Ursache
- Palpitationen oder unregelmässigem Puls
- Synkopen oder Schwindel
- Belastungsdyspnoe
- deutlicher Leistungsminderung
- Verdacht auf Vorhofflimmern
- Diabetes mit möglicher autonomer Neuropathie
- Long COVID oder ME/CFS mit orthostatischen Beschwerden

Dann sind z. B. Ruhe-EKG, Langzeit-EKG, orthostatische Tests, Labor und gegebenenfalls weitere kardiologische Untersuchungen angezeigt.

15 Klinische Konstellationen

15.1 Diabetes mellitus

Typisch sind erniedrigtes RMSSD, reduzierte HF-Power und später eine verminderte Gesamtvariabilität. HFV kann eine autonome Dysfunktion anzeigen, ersetzt aber nicht die etablierte Diagnostik der kardiovaskulären autonomen Neuropathie, etwa:

- Herzfrequenzreaktion auf tiefe Atmung
- Valsalva-Manöver
- 30:15-Quotient beim Aufstehen
- orthostatische Blutdruckmessung

15.2 Herzinsuffizienz und Zustand nach Myokardinfarkt

Eine stark erniedrigte 24-Stunden-SDNN ist mit ungünstiger Prognose assoziiert. Die HFV ist jedoch kein alleiniger Entscheidungsparameter für Therapie, ICD-Indikation oder Risikostratifikation. Für diese Fragestellung ist eine validierte Langzeit-EKG-Analyse erforderlich, nicht ein Wearable [26].

15.3 Long COVID

Studien zeigen bei Teilen der Betroffenen Veränderungen der autonomen Regulation und der HFV. Die Resultate sind jedoch heterogen. Sowohl reduzierte vagale Aktivität als auch andere autonome Muster wurden beschrieben. HFV kann eine Dysautonomie unterstützen, ist aber weder diagnostisch spezifisch für Long COVID noch ein Mass für den Schweregrad [27].

15.4 ME/CFS

Autonome Symptome und orthostatische Intoleranz sind häufig. Eine reduzierte oder veränderte HFV kann vorkommen, ist jedoch nicht spezifisch und nicht Bestandteil eines allein beweisenden diagnostischen Tests. Wichtiger sind Anamnese, Post-Exertional Malaise, aktive Stehprüfung beziehungsweise Kipptischdiagnostik und der Ausschluss anderer Ursachen [28].

15.5 Übertraining und Regeneration

Ein kurzfristiger RMSSD-Abfall nach einer intensiven Belastung ist physiologisch. Verdächtig auf unzureichende Regeneration ist eher:

- mehrtägiger Abfall des RMSSD
- gleichzeitig erhöhter Ruhepuls
- Schlafstörung
- Leistungseinbruch
- ungewöhnliche Müdigkeit oder Reizbarkeit

Ein einzelner hoher oder niedriger Trainingsbereitschafts-Score ist nicht ausreichend.

16 Garmin-Smartwatch

Anzeige „ausgeglichen“, „unausgeglichen“, „niedrig“

Interpretation bei der Anwendung einer Garmin-Smartwatch (z. B. Fenix, Epix, Venu oder Forerunner)

Die **Garmin Fenix 6** ist sehr gute Uhr für die HFV-Beurteilung. Mit den neueren Firmware-Versionen erhielt sie die Funktion **HFV Status**, die ursprünglich nur für neuere Modelle vorgesehen war. Die Uhr misst die HFV nachts am Handgelenk und erstellt nach etwa **3 Wochen** regelmässigen Tragens einen individuellen Basisbereich.

16.1 HFV-Status

- **Balanced (grün):** Der 7-Tage-Durchschnitt liegt innerhalb des persönlichen Bereichs
- **Unbalanced (orange):** Der Durchschnitt liegt ober- oder unterhalb Ihres Basisbereichs

Garmin bewertet also nicht den absoluten Wert, sondern die Abweichung von Ihrer eigenen Norm.

16.2 Ruhepuls

Tabelle 8 Der nächtliche Ruhepuls ist oft ebenso wichtig wie die HFV

HFV	Ruhepuls	Wahrscheinliche Interpretation
normal	normal	gute Erholung
niedrig	erhöht	Infekt, Stress oder Schlafdefizit
niedrig	unverändert	chronische Belastung oder höheres Alter
hoch	niedrig	sehr gute Regeneration

16.3 Was täglich beobachtet ein sollte

Für die Praxis genügt oft ein kurzer Blick auf:

- HFV-Status
- nächtlicher Ruhepuls
- Body Battery
- Schlafscore

Wenn alle vier Parameter gleichzeitig schlechter werden, ist das meist aussagekräftiger als ein einzelner HFV-Wert.

16.4 Verlaufsbeobachtung

Im höheren Ihrem Alter interessiert weniger, ob die HFV **30 oder 40 ms** beträgt, sondern:

- Bleibt sie über Monate stabil?
- Sinkt sie plötzlich über mehrere Tage?
- Erholt sie sich nach einem Infekt?
- Passt sie zum klinischen Befinden?

Gerade bei älteren Menschen ist die Verlaufsbeobachtung wesentlich wertvoller als der Vergleich mit Referenzwerten.

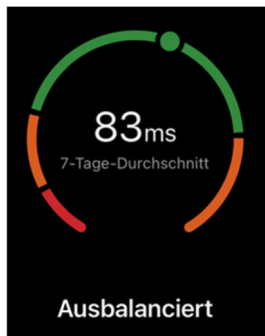
16.5 Die Fenix 6 kann als eine Art „vegetatives Labor“ dienen

- **Infekte** erkennt sie häufig 1–2 Tage vor den ersten Symptomen durch einen HFV-Abfall und einen Anstieg des Ruhepulses
- **Überlastung** zeigt sich oft durch mehrere Tage erniedrigter HFV
- **Regeneration** nach Sport, Reisen oder Stress lässt sich gut verfolgen

Auch bei Long COVID oder ME/CFS kann der Verlauf der HFV zusätzliche Informationen liefern, allerdings ersetzt sie keine Diagnostik.

17 Beispiel -Mann 77-jährig

- HFV im Durchschnitt 83 ms
- Mittlere Herzfrequenz nachts 42
- Sport: Kraft- und Ausdauertraining



83 ms ist für einen 77-jährigen Mann ein bemerkenswert guter HFV-Wert, sofern er korrekt gemessen wurde (nächtliche Messung, Sinusrhythmus, regelmässiges Tragen der Fenix 6).

Abbildung 1 HFV Messung mit Fenix 6

Erwartungen für jüngere Erwachsene:

- **RMSSD⁵ etwa 20–40 ms:** Häufig altersentsprechend
- **Ruhepuls 55–70/min:** Meist günstig, sofern keine Symptome bestehen und keine relevante Bradykardie vorliegt.
- Ein **plötzlicher Abfall der HFV um mehr als etwa 20–30%** über mehrere Tage ist oft aussagekräftiger als der absolute Wert

⁵ RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences)/ms: Berechnet wird die Wurzel aus den quadrierten Differenzen aufeinanderfolgender Herzschläge. Spiegelt die Erholungsfähigkeit des Körpers wider.

17.1 Einordnung

- 83 ms liegt deutlich über dem Durchschnitt für diese Altersgruppe
- Das spricht in der Regel für eine gute vagale Aktivität, eine gute Regenerationsfähigkeit und eine insgesamt günstige autonome Regulation
- Viel wichtiger als der absolute Wert ist jedoch, dass dieser über Wochen stabil bleibt und sich mit dem Wohlbefinden deckt

Ein solcher Wert passt häufig zu Menschen, die:

- körperlich regelmässig aktiv sind
- normal schlafen
- keine akute Entzündung oder Infektion haben
- kein relevantes Herz-Kreislauf-Leiden mit autonomer Dysfunktion aufweisen

Ein hoher HFV-Wert sollte überprüft werden, wenn gleichzeitig:

- Herzstolpern oder ein unregelmässiger Puls auftreten
- Schwindel oder Synkopen bestehen
- bekannte Herzrhythmusstörungen vorliegen

In solchen Fällen kann eine Arrhythmie die HFV künstlich erhöhen. Bei beschwerdefreier Person mit stabilem Sinusrhythmus ist 83 ms dagegen ein positives Zeichen.

17.2 Beurteilung der autonomen Regulation

Mit der Kombination aus

- HFV 83 ms
- Ruhepuls
- und ggf. Body Battery

lässt sich die autonome Regulation wesentlich genauer beurteilen.

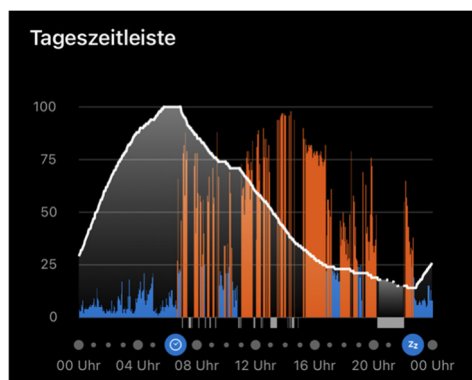


Abbildung 2 Body Batterie, morgens 100 = optimal

Täglicher Ausdauersport über viele Jahre führt häufig zu einer sogenannten Trainingsbradykardie und zu einer erhöhten HFV. Die Kombination aus:

- HFV: 83 ms
- nächtlicher Ruhepuls: 42/min
- täglichem Ausdauersport
- Alter: 77 Jahre

ist durchaus vereinbar mit einem sehr gut trainierten autonomen Nervensystem.

Durch regelmässiges Ausdauertraining kommt es zu:

- erhöhtem Vagustonus (Parasympathikus)
- effizienterer Herzarbeit (grösseres Schlagvolumen)
- niedrigerem Ruhepuls
- höherer Herzfrequenzvariabilität
- besserer Baroreflex-Funktion⁶
- günstigeren Stoffwechsel- und Gefässanpassungen

17.3 Nutzung der Fenix 6

Fokus auf Veränderungen gegenüber dem persönlichen Normalzustand:

- **HFV fällt über mehrere Tage um >20–30%** (z. B. von 83 auf unter etwa 60-65 ms)
→ mögliche Ursachen wie Infekt, Überlastung oder Schlafmangel sind zu prüfen
- **Ruhepuls steigt gleichzeitig um >5–10 Schläge/min**
→ zusätzliche Belastung wahrscheinlich
- **Beide Werte normalisieren sich innerhalb weniger Tage**
→ spricht für eine gute Regeneration

Mit 77 Jahren erreichen viele gesunde Menschen eine nächtliche HFV eher im Bereich von 20–40 ms. Ein stabiler Wert von 83 ms ist ungewöhnlich hoch und spricht, sofern keine Rhythmusstörung vorliegt, für einen ausgezeichneten Trainingszustand und eine gute autonome Regulation.

⁶ Der Baroreflex (auch Barorezeptorreflex genannt) ist ein neurophysiologischer Regelkreis, der kurzfristige Änderungen des arteriellen Blutdrucks durch Anpassungen von Herzfrequenz, Schlagvolumen und Gefäßtonus kompensiert.

18 Trainingskonzept für einen gesunden, sportlichen 77-Jährigen

Nicht möglichst viel Training, sondern die richtige Kombination bringt die grössten gesundheitlichen Vorteile, einschliesslich einer günstigeren HFV.

18.1 Ausdauertraining (Grundlage) 4-6×/Woche

Dies bleibt die wichtigste Säule

Empfehlung

- 30–60 Minuten
- Puls etwa **60–75 % der maximalen Herzfrequenz**
- zügiges Gehen, Radfahren, Schwimmen, Langlaufen oder Wandern

Wirkungen

- ↑ HFV
- ↓ Ruhepuls
- ↑ Mitochondrienfunktion
- ↑ Endothelfunktion
- ↓ Entzündung
- ↓ kardiovaskuläres Risiko

18.2 Krafttraining 2-3×/Woche

Ab dem 70. Lebensjahr fast ebenso wichtig wie Ausdauertraining.

Wichtig zu trainieren:

- Beine
- Gesäss
- Rücken
- Brust
- Schultern

Je Übung:

- 2-3 Sätze
- 8-12 Wiederholungen
- relativ hohe Intensität, technisch sauber

Vorteile:

- Erhalt der Muskelmasse
- bessere Insulinsensitivität
- Sturzprophylaxe
- höhere Knochendichte
- bessere Lebensqualität

Persönliche Empfehlung: eGym

18.3 Hochintensives Intervalltraining (HIIT) - 1×/Woche

Bei guter Gesundheit und ohne relevante Herzerkrankung

Beispiel auf dem Fahrrad:

- 10 Minuten Einfahren
- 4 × 4 Minuten zügig (ca. 85-90% der maximalen Belastbarkeit)
- jeweils 3 Minuten locker
- 10 Minuten Ausfahren

HIIT verbessert:

- VO₂max
- Gefäßfunktion
- Mitochondrien
- langfristig oft auch die HFV

Wichtig: Nicht täglich, ausreichende Regeneration einplanen.

18.4 Beweglichkeit - täglich

10-15 Minuten:

- Hüfte
- Brustwirbelsäule
- Schultern
- Waden

Ergänzend:

- Yoga oder Tai-Chi

18.5 5. Gleichgewichtstraining - täglich 5 Minuten

Ab 75 Jahren besonders wichtig.

Zum Beispiel:

- Einbeinstand
- Tandemgang
- Zehen- und Fersenstand

Dies senkt das Sturzrisiko deutlich.

18.6 Atemtraining - 10 Minuten täglich

Etwa **6 Atemzüge pro Minute** (langsam und gleichmässig) können kurzfristig die vagale Aktivität erhöhen und die HFV verbessern. Viele Menschen empfinden dies auch als hilfreich zur Entspannung.

18.7 Zusätzliche Empfehlung bei guter Fitness

1× pro Woche längere Einheit

90–120 Minuten Radfahren oder Wandern

Das fördert die aerobe Leistungsfähigkeit und Ausdauer.

2× pro Woche Krafttraining

Viele Ausdauersportler trainieren im höheren Alter zu wenig Kraft. Gerade diese Komponente schützt vor Sarkopenie und erhält die Selbstständigkeit.

Mindestens 1 Ruhetag oder sehr lockerer Tag pro Woche

Auch wenn die HFV hervorragend ist, profitieren Muskulatur, Sehnen und Immunsystem von regelmässiger Erholung.

18.8 Ernährung zur Unterstützung der HFV

Nach der aktuellen Evidenz günstig sind:

- Mediterrane Ernährung
- Ausreichende Proteinzufuhr. Bei älteren Aktiven etwa 1.2-1.5 g/kg Körpergewicht/Tag, sofern keine relevante Nierenerkrankung entgegensteht
- Omega-3-Fettsäuren (insbesondere bei geringer Fischzufuhr)
- Ausreichend Magnesium bei nachgewiesenem Mangel oder erhöhter Belastung
- Gute Flüssigkeitszufuhr
- Moderater Alkoholkonsum

18.9 Persönliche Einschätzung

- Täglich Ausdauersport treiben
- Sich intensiv mit Ernährung, Prävention und Stoffwechsel beschäftigen
- Die Garmin-Daten regelmässig verfolgen

19 Zusammenfassung/Schlussfolgerung

HFV bietet ein Fenster in die autonome Regulation und damit in Stress-, Erholungs- und Krankheitsprozesse. Kurzzeitmetriken wie RMSSD sind robust für vagale Aktivität im Ruhekontext und eignen sich für tägliches Monitoring. Breitbandige Masse (SDNN) und spektrale Analysen ergänzen das Bild über längere Zeiträume.

HFV ist ein leistungsfähiger, nichtinvasiver Marker autonomer Adaptivität. Ihre Stärken liegen im sensiblen Erfassen von Veränderungen im Stress-/Erholungsgleichgewicht und in der ergänzenden Risikostratifizierung in ausgewählten klinischen Populationen. Die Aussagekraft entsteht aus qualitativ hochwertigen Daten, standardisierten Protokollen und einer kontextsensitiven, trendbasierten Interpretation. Für Praxis und Forschung empfehlen sich: (1) klare Mess- und Reporting-Standards, (2) robuste, validierte Metrikauswahl passend zum Einsatzkontext, (3) Integration von HFV in multimodale Assessments, (4) konsequente Validierung von Wearables und Algorithmen, und (5) prospektive Studien, die HFV-geleitete Entscheidungen mit patientenrelevanten Endpunkten verknüpfen.

Für Forschung und Praxis gelten drei Kernpunkte:

1. Kontext schlägt Einzelwert

Standardisierte Messbedingungen und trendbasierte Auswertung über Tage/Wochen sind aussagekräftiger als punktuelle Vergleiche mit Referenzen.

2. Qualität vor Quantität

Saubere Signalakquise (EKG bevorzugt), Artefaktmanagement und konsistente Protokolle sind Voraussetzung für valide Schlüsse. PPG ist praktikabel, benötigt aber striktes Qualitätscontrolling.

3. Interpretation mit Augenmass

HFV reflektiert multiple Einflüsse
Klinische Entscheidungen sollten HFV stets mit Symptomen,

HFV ist ein leistungsfähiger, nichtinvasiver Marker für autonome Adaptivität. Korrekt erhoben und kontextualisiert unterstützt sie Prävention, Trainingssteuerung und klinische Risikostratifizierung als Teil eines multimodalen Assessments, nicht als Einzelindikator.

20 Tabellen-/Abbildungsvorschläge

Tabelle 1 Klinisch wichtigste HFV-Parameter.....	18
Tabelle 2 Praktische Interpretation.....	20
Tabelle 3 Wichtigste Parameter.....	25
Tabelle 4 SDNN, 5 Minuten - Einordnung	27
Tabelle 5 RMSSD - Einordnung.....	27
Tabelle 6 Einordnung nach Alter	30
Tabelle 7 Kombination aus HFV und Ruhepuls	30
Tabelle 8 Der nächtliche Ruhepuls ist oft ebenso wichtig wie die HFV.	35
Abbildung 1 HFV Messung mit Fenix 6	37
Abbildung 2 Body Batterie, morgens 100 = optimal	38

21 Literatur

1. Berntson, Gary G., John T. Cacioppo, und David R. Quigley. 1997. The Metrics of Cardiac Chronotropism. *Psychophysiology*. 1995 Mar;32(2):162-71. [Internet]. [zitiert am 17. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7630981/>
2. Billman, George E. The LF/HF Ratio Does Not Accurately Measure Cardiac Sympatho Vagal Balance. *Front Physiol*. 2013 Feb 20;4:26. [Internet]. [zitiert am 17. Juli 2026]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3576706/>
3. J M Dekker RS Crow, AR Folsom, PJ Hannan, D Liao, CA Swenne, EG Schouten. Low heart rate variability in a 2-minute rhythm strip predicts risk of coronary heart disease and mortality from several causes: the ARIC Study. *Atherosclerosis Risk In Communities*. [Internet]. [zitiert am 17. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10982537/>
4. Grossman, Paul, Edwin W. Taylor. 2007. Toward understanding respiratory sinus arrhythmia: Relations to cardiac vagal tone, evolution and biobehavioral functions. *Biological Psychology*. Volume 74, Issue 2, February 2007, Pages 263-285. [Internet]. [zitiert am 17. Juli 2026]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301051106001876>
5. CK Peng, S Havlin, HE Stanley, AL Goldberger. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos*. 1995;5(1):82-7. [Internet]. [zitiert am 17. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11538314/>
6. Shaffer Fred, J. P. Ginsberg. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms*. *Front Public Health*. 2017 Sep 28;5:258 [Internet]. [zitiert am 17. Juli 2026]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5624990/>
7. Marek Malik. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*. 1996 Mar 1;93(5):1043-65. [Internet]. [zitiert am 17. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8598068/>
8. Thayer Julian F, Stefano S. Maixent, Richard D. Lane. A model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation. [Internet]. [zitiert am 17. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11163422/>
9. Breath Ball. Herzfrequenzmessung und HFV. [Internet]. [zitiert am 15. Juli 2026]. <https://breathball.com/de/herzfrequenzmessung-und-HFV/>
10. Axel Schäfer, Jan Vagedes. How accurate is pulse rate variability as an estimate of heart rate variability?: A review on studies comparing photoplethysmographic technology with an electrocardiogram. *International Journal of Cardiology*. Volume 166, Issue 1, 5 June 2013, Pages 15-29. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167527312003269>
11. George E. Billman. The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Front. Physiol.*, 20 February 2013. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2013.00026/full>
12. Paul M. Lehrer, Richard Gevirtz. Heart rate variability biofeedback: how and why does it work? *Front. Psychol.*, 21 July 2014. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2014.00756/full>
13. Jacqueline M. Dekker, Richard S. Crow, Aaron R. Folsom, Peter J. Hannan, Duanping Liao, Cees A. Swenne, and Evert G. Schouten. Low Heart Rate Variability in a 2-Minute Rhythm Strip Predicts Risk of Coronary Heart Disease and Mortality From Several Causes : The ARIC Study. *Circulation*. Volume 102, Number 11. 2000. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <file:///C:/Users/Eichhorn%20J%C3%BCrg/Desktop/Downloads/dekker-et-al-2000-low-heart-rate-variability-in-a-2-minute-rhythm-strip-predicts-risk-of-coronary-heart-disease-and.pdf>
14. Sylvain Laborde, Emma Mosley, Julian F. Thayer. Heart Rate Variability and Cardiac Vagal Tone in Psychophysiological Research – Recommendations for Experiment Planning, Data Analysis, and Data Reporting. *Front. Psychol.*, 20 February 2017. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2017.00213/full?utm_source=chatgpt.com
15. Michael H Crawford, Steven J Bernstein, Prakash C Deedwania, John P DiMarco Kevin J Ferrick, Arthur Garson, Lee A Green, H. Leon Greene, Michael J Silka, Peter H Stone, Cynthia M Tracy, Raymond J Gibbons, Joseph S Alpert, Kim A, Timothy J Gardner MD, Arthur Garson Jr, Gabriel Gregoratos, Richard O Russell, Thomas J Ryan, Sidney C Smith. ACC/AHA guidelines for ambulatory electrocardiography: A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (Committee to Revise the Guidelines for Ambulatory Electrocardiography) developed in collaboration with the North American Society for Pacing and Electrophysiology. *Journal of the American College of Cardiology*. Volume 34, Issue 3, September 1999, Pages 912-948. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073510979900354X?utm_source=chatgpt.com

16. Faming Yang, Ying Ma, Shuangyan Liang, Yali Shi, Chen Wang. Effect of Exercise Modality on Heart Rate Variability in Adults: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *Rev Cardiovasc Med*. 2024 Jan 9;25(1):9. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39077654/>
17. Phyllis K. Stein. Assessing heart rate variability from real-world Holter reports. *Card Electrophysiol Rev*. 2002 Sep;6(3):239-44. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12114845/>
18. Stein PK, Kleiger RE. Insights from the study of heart rate variability. *Annu Rev Med*. 1999;50:249-61. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10073276/>
19. Fred Shaffer, Zachary M Meehan, Christopher L Zerr. Critical Review of Ultra-Short-Term Heart Rate Variability Norms Research. *Front Neurosci*. 2020 Nov 19;14:594880. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33328866/>
20. Stefan Sammito, Beatrice Thielmann, Andre Klussmann, Andreas Deussen, Klaus-Michael Braumann, Irina Böckelmann. Guideline for the application of heart rate and heart rate variability in occupational medicine and occupational health science. *J Occup Med Toxicol*. 2024 May 13;19:15. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11089808/?utm_source=chatgpt.com
21. Bianca Lee Thomas, Nicolaas Claassen, Piet Becker, Margaretha Viljoen. Validity of Commonly Used Heart Rate Variability Markers of Autonomic Nervous System Function. *Neuropsychobiology*. 2019;78(1):14-26. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30721903/>
22. C Besson, A L Baggish, P Monteventi, L Schmitt, F Stucky V Gremeaux. Assessing the clinical reliability of short-term heart rate variability: insights from controlled dual-environment and dual-position measurements. *Sci Rep*. 2025 Feb 15;15:5611. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11829968/?utm_source=chatgpt.com
23. Maximilian Brozat, Irina Böckelmann, Stefan Sammito. Systematic Review on HFV Reference Values. *J. Cardiovasc. Dev. Dis*. 2025, 12(6). [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. https://www.mdpi.com/2308-3425/12/6/214?utm_source=chatgpt.com
24. Alexandra Jamieson, Timothy J A Chico, Siana Jones, Nishi Chaturvedi, Alun D Hughes, Michele Orini. A guide to consumer-grade wearables in cardiovascular clinical care and population health for non-experts. *NPJ Cardiovasc Health*. 2025 Sep 2;2:44. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12404996/?utm_source=chatgpt.com
25. Tian Liang, Gizem Yilmaz, Chun-Siong Soon. Deriving Accurate Nocturnal Heart Rate, rMSSD and Frequency HFV from the Oura Ring. *Sensors (Basel)*. 2024 Nov 23;24(23):7475. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11644394/?utm_source=chatgpt.com
26. Monika Míková, David Pospíšil, Jan Řehoř, Marek Malik. Heart Rate Variability Analysis in Congestive Heart Failure: The Need for Standardized Assessment Protocols. *Rev Cardiovasc Med*. 2025 May 26;26(5):36321. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12135661/?utm_source=chatgpt.com
27. Minyu Qin, Kwan Lee, Seok-Ju Yoo. The impact of long COVID on heart rate variability: a cross-sectional study. *BMC Infect Dis*. 2025 Feb 24;25(1):261. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39994668/>
28. Anindita Issa, Jin-Mann S Lin, Yang Chen 1, Jacob Attell, Dana Brimmer, Jeanne Bertolli, Benjamin H Natelson, Charles W Lapp, Richard N Podell, Andreas M Kogelnik, Nancy G Klimas, Daniel L Peterson, Lucinda Bateman, Elizabeth R Unger. Autonomic Dysfunction in Myalgic Encephalomyelitis/Chronic Fatigue Syndrome (ME/CFS): Findings from the Multi-Site Clinical Assessment of ME/CFS (MCAM) Study in the USA. *J Clin Med*. 2025 Sep 5;14(17):6269. [Internet]. [zitiert am 19. Juli 2026]. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12428951/?utm_source=chatgpt.com
29. G G Berntson, J T Bigger Jr, D L Eckberg, P Grossman, P G Kaufmann, M Malik, H N Nagaraja, S W Porges, J P Saul, P H Stone, M W van der Molen. Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*. 1997 Nov;34(6):623-48. [Internet]. [zitiert am 21. Juli 2026]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9401419/>
- 30.