



Verwendung der Apple Watch zur Schätzung der Kardio-Fitness mit VO_2 max

Mai 2021

Inhalt

Überblick	3
Einleitung	3
Definition	3
Messung und Schätzung	3
Dienstprogramme	3
Genetik	4
Interventionen	4
Kardio-Fitness auf der Apple Watch	4
Beschreibung der Metrik	4
Entwicklung	7
Studiendesign	7
Statistische Methoden	7
Ergebnisse	8
Diskussion	10
Schlussfolgerungen	12
Quellen	12

Überblick

Mit watchOS 7 verwendet Apple Watch Series 3 und höher einen aktualisierten Algorithmus, um den Cardio-Fitness-Level eines Benutzers anhand von VO_2 max, dem maximalen Sauerstoffvolumen, das eine Person aus der eingeatmeten Luft entnehmen kann, zu schätzen. Dieses Update dehnt die VO_2 max-Schätzungen auf niedrigere Bereiche aus und erweitert gleichzeitig die Verfügbarkeit dieser Metrik. Zudem können Benutzer mit watchOS 7.2 in der Health-App auf dem iPhone sehen, wie ihr Cardio-Fitness-Level basierend auf ihrer Altersgruppe und ihrem Geschlecht eingestuft wird, und eine Benachrichtigung erhalten, falls dieses in den niedrigen Bereich fällt. Dieses Dokument bietet ausführliche Informationen über die Funktionen dieser Features, einschließlich Informationen zu der Testung und der Validierung.

Einleitung

Definition

VO_2 max ist das maximale Sauerstoffvolumen, das eine Person aus der eingeatmeten Luft entnehmen und über den Zellstoffwechsel verbrauchen kann. VO_2 max stellt einen guten Indikator für die allgemeine kardiorespiratorische Fitness (CRF) dar, da er mehrere Organsysteme umfasst und von einer Reihe von Faktoren, die an unterschiedlichen Stellen des Vorganges, von der Atmung bis zum Sauerstoffverbrauch der Endorgane, zur Geltung kommen, beeinflusst wird.¹ VO_2 max-Werte werden in der Regel basierend auf der Körpermasse normiert und in Milliliter Sauerstoff pro Kilogramm Körpermasse pro Minute (ml/kg/min) angegeben. Sie nehmen mit zunehmendem Alter ab und variieren auf Bevölkerungsebene je nach biologischem Geschlecht.²

Messung und Schätzung

Die VO_2 max wird mittels der kardiopulmonalen Belastungsuntersuchung (CPET) bestimmt. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem eine Testperson mit zunehmender Intensität auf einem Ergometer fährt oder auf einem Laufband geht und der Sauerstoff in der ein- und ausgeatmeten Luft mittels einer Gesichtsmaske direkt bestimmt wird.³ In den meisten Fällen bleibt die während des Tests verbrauchte Sauerstoffmenge trotz zunehmender Belastung auf einem Plateau. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Plateau oder der Peak- VO_2 , VO_2 max ist, obwohl nicht sicher ist, dass ein echtes Maximum erreicht wurde.⁴

In der Praxis werden die VO_2 max oder die CRF häufiger anhand von Messungen bei submaximaler Belastung geschätzt, da diese Tests kostengünstiger und weniger zeitintensiv sind als das maximale CPET, der Testperson eine geringere Anstrengung abverlangen und für diese angenehmer sind. Zudem liegt für die Ableitung der VO_2 max aus submaximaler Belastung signifikante Evidenz vor.⁵

Dienstprogramme

Die CRF, die anhand der VO_2 max oder dem eng verwandten metabolischen Äquivalent (MET, 1 MET = ~3,5 ml/kg/min) bestimmt wird, hat sich in den letzten 30 Jahren oftmals als Prädiktor für die kardiovaskuläre und Gesamtmortalität sowie für kardiovaskuläre Ereignisse bei Männern und Frauen erwiesen.^{6,7} Sie war in einigen Studien unabhängig von bekannten Risikofaktoren für die kardiovaskuläre und Gesamtmortalität wie Bluthochdruck, Adipositas und Hypercholesterinämie und bot eine bessere Vorhersagekraft als diese.^{9,10,11}

Aufgrund dieses prognostischen Nutzens haben sich Mitglieder der medizinischen und wissenschaftlichen Gemeinschaft dafür ausgesprochen, CRF-Bestimmungen in die medizinische Routinepraxis als Ergänzung¹² zu oder sogar anstelle von traditionellen Risikomodellen wie Framingham aufzunehmen.¹³

Dieser prädiktive Nutzen gilt auch außerhalb der Allgemeinbevölkerung für krankheitsspezifische Kohorten, beispielsweise Personen mit Herzinsuffizienz,¹⁴ sowie für die klinische Entscheidungsfindung in Bezug auf bestimmte Ereignisse, beispielsweise perioperatives Management^{15,16} und die Überweisung zur kardialen Rehabilitation.¹⁷ Als Reaktion auf diese und andere Nachweise der Nützlichkeit sprach sich die American Heart Association (AHA) 2016 für eine regelmäßige CRF-Bestimmung aus und sprach sich dafür aus, die Fitness als Vitalzeichen einzustufen.⁵

Genetik

Die Genetik korreliert stark mit der VO_2 max eines Individuums sowie den Veränderungen der VO_2 max als Reaktion auf ein Training. Es wird angenommen, dass genetische Faktoren zu Beginn annähernd 50 bis 70 Prozent der zwischen Individuen beobachteten Unterschiede in der VO_2 max und annähernd 20 bis 60 Prozent der Variation hinsichtlich der Verbesserungen^{18,19} der VO_2 max als Reaktion auf das Training bestimmen.^{5,20}

Interventionen

Es besteht ein starker Zusammenhang zwischen Verbesserung oder Aufrechterhaltung der VO_2 max im Verlauf der Zeit und einer Senkung der Mortalität. In einer Studie mit über 500 männlichen Teilnehmern, die über 11 Jahre beobachtet wurden, fanden Laukkanen et al. heraus, dass jeder Anstieg der VO_2 max um 1 ml/kg/min das Sterberisiko um 9 Prozent senkte.²¹ Auf Studienebene führt hochintensives Intervalltraining zu den größten Verbesserungen der VO_2 max.^{22 23 24} Im Verlauf von Programmen, die von 6 bis 12 Wochen reichten, lagen die Verbesserungen der VO_2 max im Allgemeinen im Bereich von 5 bis 10 Prozent (in ml/kg/min). Zu beachten gilt, dass Abnahmen der VO_2 max bei verminderter Aktivität oder Inaktivität in ähnlichem oder größerem Ausmaß (Abnahme von bis zu 27 Prozent) über weitaus kürzere Zeiträume (2 bis 3 Wochen) berichtet wurden.^{25,26} Eine Ausweitung der körperlichen Aktivität bei fehlender Verbesserung der VO_2 max scheint nicht den gleichen Überlebensvorteil bei denjenigen zu bringen, deren VO_2 max steigt, im Vergleich zu denjenigen, deren VO_2 max sich nicht verändert.²⁷

Kardio-Fitness auf der Apple Watch

Dieses Dokument beschreibt die Entwicklung und Validierung der Kardio-Fitness-Metrik, bei der es sich um eine Schätzung der VO_2 max mit der Apple Watch handelt. Die Zielgruppe dieses Dokuments sind Forscher, Mediziner und Entwickler, die daran interessiert sein könnten, diese Schätzung in ihrer Arbeit zu verwenden, sowie Kunden, die mehr über VO_2 max und deren Bestimmung und Validierung mit der Apple Watch wissen möchten. Weitere Informationen zum Einrichten und Anzeigen von VO_2 max-Schätzungen für die Apple Watch finden Sie unter support.apple.com/de-de/HT211856.

Beschreibung der Metrik

Bei Kardio-Fitness auf der Apple Watch handelt es sich um eine Schätzung der VO_2 max eines Benutzers in ml/kg/min, die auf der Messung seiner Herzfrequenzreaktion eines auf körperliche Aktivität basiert. Aktualisierungen des Algorithmus, der zur Schätzung der VO_2 max in watchOS 7 verwendet wird, erweitern für Benutzer mit Apple Watch Series 3 oder höher die Schätzungen auf niedrigere Bereiche der kardialen Fitness (14 bis 60 ml/kg/min). Eine Ansicht von VO_2 max in der Health-App in iOS 14 finden Sie unter Kardio-Fitness in der Abbildung 1. Ein VO_2 max-Wert kann nach dem Gehen, Laufen oder Wandern im Freien auf relativ flachem Boden (das heißt mit einer Steigung oder einem Gefälle von weniger als 5 Prozent) mit angemessenen GPS, Qualität des Herzfrequenzsignals und Anstrengung (eine ungefähre Steigerung um 30 Prozent des Bereichs von der Ruheherzfrequenz bis zum Maximalwert) generiert werden. Das erste Training eines Benutzers generiert keine Schätzung. Zudem muss ein Benutzer die Apple Watch einen Tag lang getragen haben, bevor eine erste Schätzung generiert werden kann.

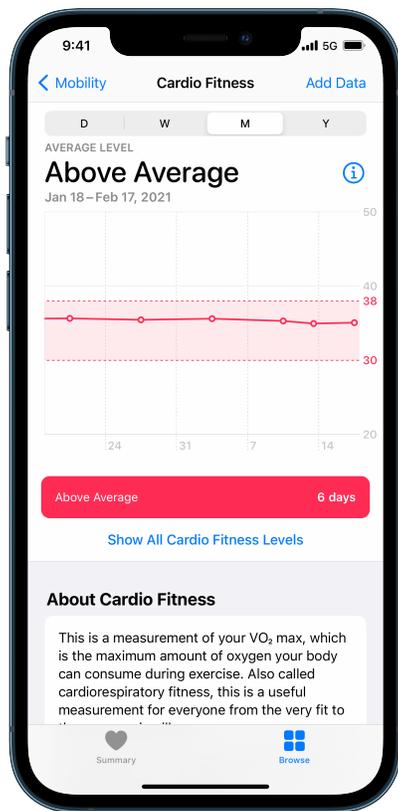


Abbildung 1: Kardio-Fitness in der Health-App in iOS 14

Diese Schätzungen der VO_2 max basierend auf submaximalen vorhergesagten Werten der VO_2 max und nicht auf der maximalen VO_2 . Der Benutzer muss somit nicht die maximale Herzfrequenz erreichen, um eine Schätzung zu erhalten. Es ist jedoch eine Schätzung der maximalen Herzfrequenz erforderlich. Aus diesem Grund können Benutzer, die Medikamente einnehmen, die ihre maximale Herzfrequenz verringern können, in den Gesundheitsinfos in der Health-App angeben, dass sie diese Medikamente einnehmen, und so genauere VO_2 max-Schätzungen zu ermöglichen (siehe Abbildung 2).

Seit ihrer Einführung in iOS 14.3 haben Benutzer ab 20 Jahren die Möglichkeit, sich benachrichtigen zu lassen, wenn ihr Kardio-Fitness-Level, das basierend auf der geschätzten VO_2 max bestimmt wird, dauerhaft und zuverlässig so gering ist, dass ein Risiko für langfristige Gesundheitsprobleme oder aktuelle Einschränkungen bei täglichen Aktivitäten vermutet werden können. Für Benutzer im Alter von 20 bis 59 Jahren ist dieser Schwellenwert für die Benachrichtigung das unterste Quintil basierend auf Geschlecht und Alter nach Dekade, wie es von der Fitness Registry and Importance of Exercise National Database² ermittelt wurde. Für Benutzer im Alter von 60 Jahren und darüber werden absolute VO_2 max-Schwellenwerte von 18 bzw. 15 ml/kg/min für Männer und Frauen verwendet, basierend auf Daten, die darauf hindeuten, dass dies die Schwellenwerte für ein unabhängiges Leben an den äußersten Altersgrenzen bei beiden Geschlechtern sind.²⁸ Benutzer, die Benachrichtigungen über eine geringe Kardio-Fitness erhalten möchten, müssen dies auswählen. Hierfür muss ein Onboarding-Prozess in der Health-App durchlaufen werden. Dabei wird die Funktion beschrieben, Informationen wie Alter, Geschlecht und relevante Medikamente, die für eine genaue Benachrichtigung erforderlich sind, werden erfasst und Faktoren, die Ihre Kardio-Fitness senken können, werden beschrieben. Zudem werden optionale Schulungsinhalte zur Verfügung gestellt, die die Bedeutung der VO_2 max und mögliche Ursachen für eine Benachrichtigung beschreiben (siehe Abbildung 3).

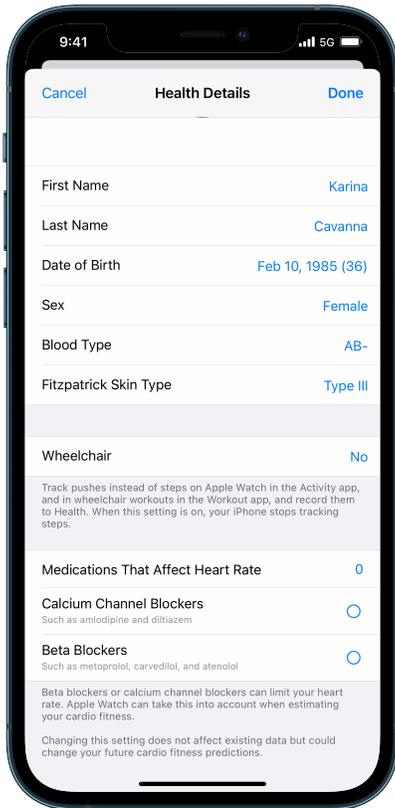


Abbildung 2: Medikamente, die eine Auswirkung auf die Herzfrequenz haben, können in der Health-App in iOS 14 in den Gesundheitsinfos vermerkt werden

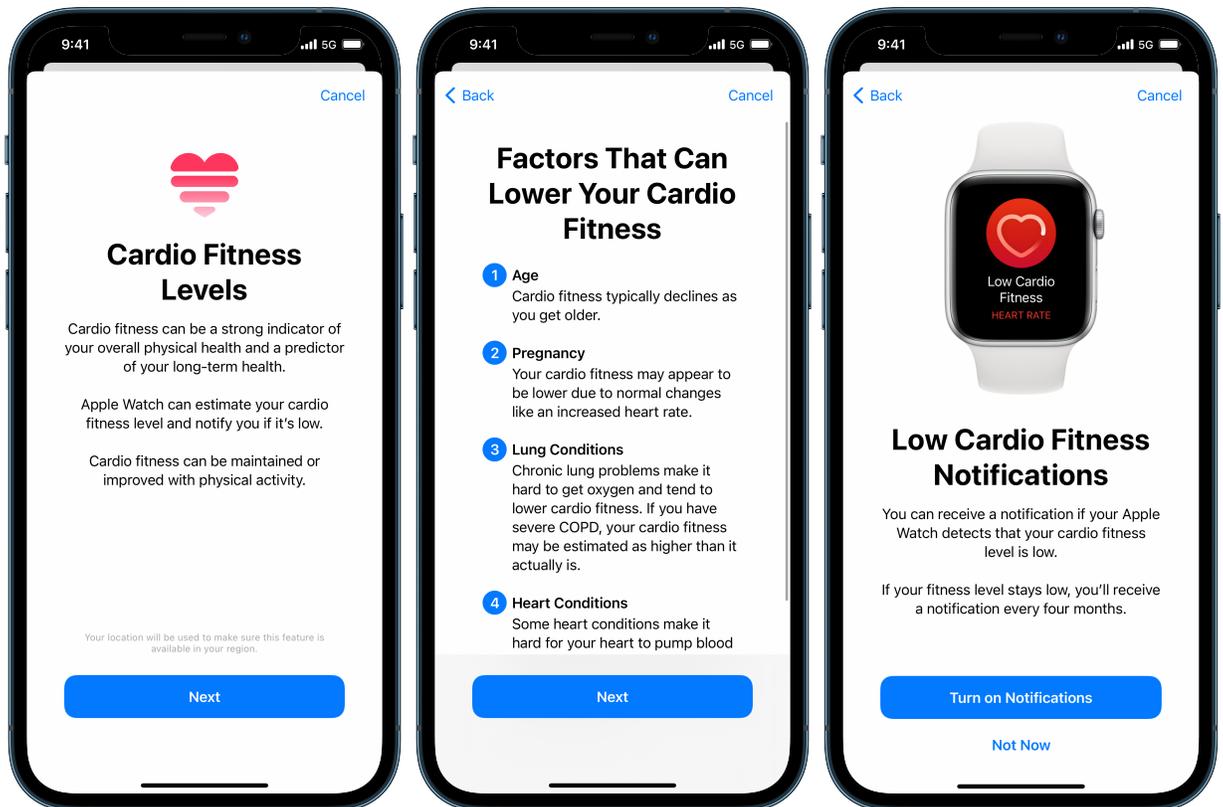


Abbildung 3: Onboarding für Benachrichtigungen wegen einer geringen Kardio-Fitness in der Health-App auf iOS 14

Entwicklung

Studiendesign

Für die Entwicklung und die Validierung der VO_2 max-Metrik hat Apple Daten aus mehreren Studien erfasst, die von einer Ethikkommission (EK) genehmigt wurden und an denen Teilnehmer teilnahmen, die der Sammlung und Verwendung ihrer Daten für diesen Zweck zugestimmt hatten.

Die Studienteilnehmer führten VO_2 max- und/oder VO_2 submax-Tests, die als kardiopulmonale Belastungsuntersuchung, oder CPET bezeichnet werden, durch und trugen dabei Apple Watch Series 4. Es wurden verschiedene CPET-Testprotokolle verwendet, bei denen Laufbänder als auch Ergometer zur Anwendung kamen. Jeder Teilnehmer absolvierte im Verlauf der Studien bis zu sechs CPETs, wobei mindestens 10 Tage zwischen den Tests lagen. So wurde sichergestellt, dass die Teilnehmer ausreichend Zeit hatten, sich zwischen den Tests zu erholen und angemessene Zeiträume für die Datenerfassung vor und nach den einzelnen CPETs zur Verfügung standen. Die CPET-Daten wurden verwendet, um zu überprüfen, ob das Protokoll korrekt durchgeführt wurde und ob die Teilnehmer mindestens 60 Prozent der maximalen vorhergesagten Herzfrequenz erreichten. Tests, bei denen eine Anomalie des Gasaustausches, ein Herzfrequenzsignal mit schlechter Qualität, eine festgestellte Arrhythmie, berichtete Schmerzen oder biomechanische Ineffizienz vorlagen, wurden aus allen weiteren Analysen ausgenommen. Tests, die die Verifizierungsetappen bestanden, flossen in die Algorithmusentwicklung hinein. Um die Referenz- VO_2 max für jeden Teilnehmer zu ermitteln, wurden lineare Hochrechnungen unter Verwendung der Herzfrequenz und der VO_2 im submaximalen Bereich durchgeführt. So konnte die VO_2 max basierend auf der altersabhängig vorhergesagten maximalen Herzfrequenz bestimmt werden. Die vorhergesagte maximale Herzfrequenz wurde für Benutzer, die Medikamente wie Betablocker einnehmen, die die Herzfrequenz herabsenken, entsprechend den veröffentlichten Vorhersagen gesenkt.²⁹

Zusätzlich zum Tragen der Apple Watch während der beaufsichtigten CPETs trugen die Teilnehmer im Verlauf der Studien die Apple Watch und das iPhone bei ihren alltäglichen Aktivitäten. Diese Aktivitäten umfassten die von den Teilnehmern protokollierten Trainingseinheiten. Daten verschiedener Apple Watch-Sensoren (Photoplethysmograph, Beschleunigungsmesser, Gyroskop, Barometer und GPS) wurden in diesem Zeitraum gesammelt und bei der Entwicklung des VO_2 max-Algorithmus angewendet.

Eine Untergruppe von Studienteilnehmern wurde nicht in die Daten für den die Entwicklung des Algorithmus einbezogen, um die Genauigkeit des Algorithmus zu überprüfen und eine Überanpassung zu verhindern. Die Leistungsfähigkeit des Algorithmus wurde berechnet, indem die letzte gültige VO_2 max-Schätzung auf der Apple Watch mit dem Durchschnitt der submaximalen Projektionen aus allen kuratierten CPETs für jeden Teilnehmer verglichen wurde, sofern nicht anders angegeben.

Statistische Methoden

Die Validität der VO_2 max auf der Apple Watch wurde als Mittelwert und Standardabweichung der Fehler zwischen der letzten gültigen mittleren VO_2 max-Schätzung auf der Apple Watch und der mittleren submaximalen VO_2 max-Projektion aus allen kuratierten CPETs für jeden Teilnehmer berechnet. Die Zuverlässigkeit, die als Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) angegeben wird, wurde durch die Berechnung der absoluten Übereinstimmung pro Teilnehmer zwischen der letzten gültigen VO_2 max-Schätzung auf der Apple Watch und einer vorherigen VO_2 max-Schätzung auf der Apple Watch, die mindestens 28 Tage zuvor erfolgte, beurteilt. Die Konsistenz der VO_2 max auf der Apple Watch wird als Median und 90. Perzentil-Standardabweichung pro Teilnehmer aller VO_2 max-Schätzungen auf der Apple Watch für Teilnehmer, für die mindestens fünf Schätzungen zur Verfügung standen, ausgedrückt. Schließlich wird die Verfügbarkeit der VO_2 max auf der Apple Watch auf zwei verschiedene Arten berechnet: als Prozentsatz aller Geh-Workouts im Freien mit einer Dauer von über 5,75 Minuten aller Teilnehmer, die eine VO_2 max-Schätzung auf der Apple Watch erhalten haben und als Prozentsatz der Teilnehmer, die

mindestens 10 Geh-Workouts im Freien mit einer Dauer von über 5,75 Minuten absolviert und die nach 10 Workouts mindestens eine VO₂ max-Schätzung auf der Apple Watch erhalten haben.

Ergebnisse

Baseline-Charakteristika der Teilnehmer, deren Daten für Design und Validierung verwendet wurden, sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1. Charakteristika der Teilnehmer

	Design (N = 534)	Validierung (N = 221)
Geschlecht – Anzahl (%)		
Weiblich	191 (36)	94 (43)
Männlich	343 (64)	127 (57)
Alter – Jahre* (Mittel ± SA)	53 ± 18	55 ± 17
Altersverteilung – Anzahl (%)		
<45 Jahre	207 (39)	74 (33)
45–54 Jahre	67 (13)	26 (12)
55–65 Jahre	57 (11)	36 (16)
>65 Jahre	203 (38)	85 (38)
Referenz- VO₂ max – ml/kg/min (Mittel ± SA)	31,7 ± 10,6	29,7 ± 10,5
Beobachtungsdauer – Tage (Mittel ± SA)	441 ± 137	390 ± 138
Begleiterkrankungen – Anzahl (%)		
Arthritis	51 (10)	17 (8)
Diabetes	38 (7)	23 (10)
Schlaganfall in der Anamnese	9 (2)	5 (2)
Koronare Herzkrankheit	41 (8)	24 (11)
Myokardinfarkt in der Anamnese	34 (6)	16 (7)
COPD	4 (1)	3 (1)
Herzinsuffizienz	10 (2)	5 (2)
Hypertonie	121 (22)	47 (21)
Raucherstatus (Zigaretten) – Anzahl (%)		
Aktueller Raucher	5 (1)	1 (1)
Früherer Raucher	63 (12)	37 (17)
Nie geraucht	300 (56)	129 (58)
Raucherstatus unbekannt	166 (31)	54 (24)
BMI-Kategorie – Anzahl (%)		
Untergewicht (BMI < 18,5)	1 (<1)	2 (<1)
Normalgewicht (18,5 ≤ BMI < 25,0)	215 (40)	99 (45)
Übergewicht (25,0 ≤ BMI < 30,0)	220 (41)	77 (35)
Adipositas (BMI ≥ 30,0)	98 (18)	43 (19)
* Basierend auf dem Geburtsjahr.		

Die Leistungsfähigkeit des Algorithmus hinsichtlich der Design- und Validierungsdatensets ist in Tabelle 2 aufgeführt. Ein Referenz-Plot (durchschnittliche CPET-abgeleitete VO_2 max pro Benutzer im Vergleich zur endgültigen geschätzten VO_2 max der Apple Watch) für die Entwicklungs- und Validierungsteilnehmer ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Leistungsfähigkeit des Algorithmus wurde basierend auf den während der Workouts erfassten Daten beurteilt. Für eine Untergruppe von Teilnehmern (132 Entwicklung und 62 Validierung) wurde die VO_2 max auch außerhalb von Workouts während Zeiten des Gehens im Freien geschätzt, um die Fähigkeit zu beurteilen, die VO_2 max zu schätzen, wenn kein Workout auf der Apple Watch initiiert wurde. Bei diesen Anwendern waren die Schätzungen außerhalb des Workouts im Durchschnitt um 0,32 ml/kg/min höher als diejenigen während des Workouts in der Designgruppe. In der Validierungsgruppe wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den Schätzungen während und außerhalb von Workouts festgestellt.

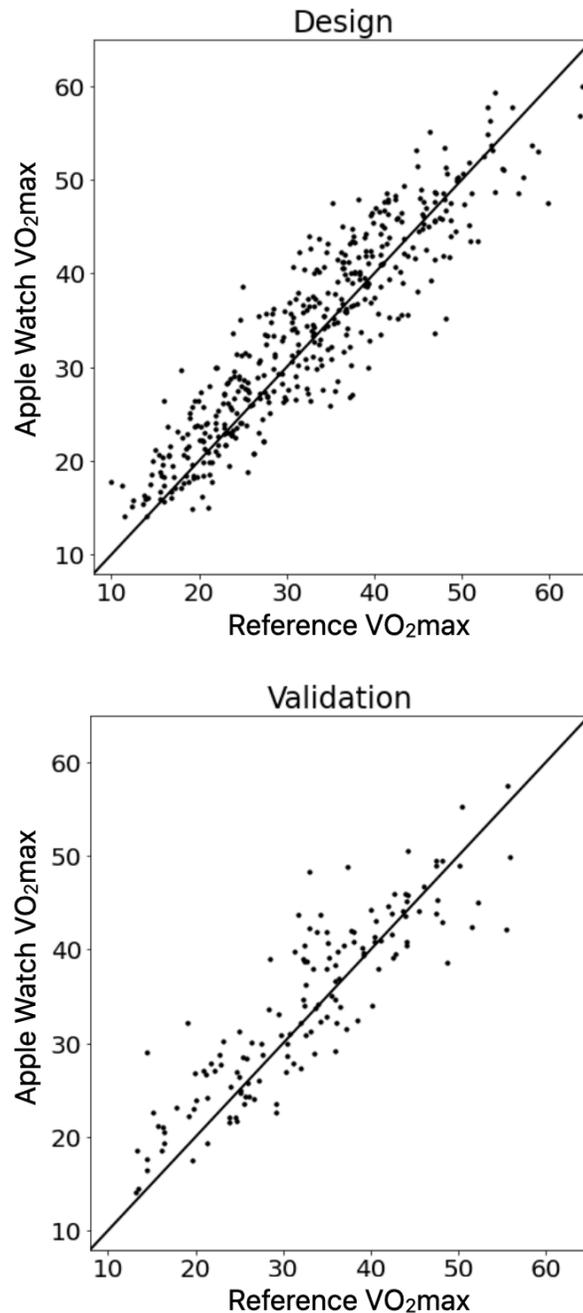


Abbildung 4: Referenz- im Vergleich zur geschätzten VO_2 max (ml/kg/min) für Teilnehmer in den Entwicklungs- und Validierungssets

Tabelle 2. VO₂ max-Leistung

Kennzahl	Beschreibung	Design (N = 534)	Validierung (N = 221)
Gültigkeit	Fehler (mittlere geschätzte VO ₂ max – mittlerer projizierter submaximalen Referenzwert) – ml/kg/min (Mittel ± SA)	1,2 ± 4,4	1,4 ± 4,7
Zuverlässigkeit	ICC A-1 Vergleich der letzten VO ₂ max-Schätzung unter Verwendung von Daten und Metadaten, die nur aus dieser Sitzung stammen, mit einer mehr als 28 Tage zurückliegenden VO ₂ max-Schätzung, unter Verwendung von Daten und Metadaten, die nur aus dieser Sitzung stammen – ICC [Konfidenzintervall]	0,89 [0,86, 0,91]	0,86 [0,80, 0,90]
Konsistenz	SA von pVO ₂ max pro Benutzer – ml/kg/min (% der pVO ₂ max)		
	Median	1,2 (3,7 %)	1,2 (3,4 %)
	90. Perzentile	2,6 (7,6 %)	2,6 (7,2 %)
Verfügbarkeit	Prozentsatz der Geh-Workouts im Freien mit einer Dauer über 5,75 Minuten, für die eine Schätzung erfolgt ist	79%	78%
	Prozentsatz der Teilnehmer, die mindestens 10 Geh-Workouts im Freien mit einer Dauer über 5,75 Minuten absolviert und mindestens eine Schätzung bei ihren ersten 10 Workouts erhalten haben	93%	93%

Diskussion

Die Beurteilung der CRF mittels VO₂ max hat als Mittel zur Risikostratifizierung zunehmende Aufmerksamkeit erhalten, wobei sich einige dafür aussprechen, sie als einen Vitalparameter zu betrachten.⁵ In der Praxis ist die objektive Bestimmung der CRF mittels CPET trotz der nachgewiesenen Vorteile in der Anwendung nach wie vor selten. Die Ursachen dafür bestehen in den Kosten, der Belastung der Teilnehmer und der begrenzten Akzeptanz der CPET als Standardverfahren in verschiedenen Fachbereichen.³⁰ Eine genaue Schätzung der VO₂ max mittels tragbarer Geräte könnte die CRF-Überwachung auf eine große Bevölkerungsgruppe zu geringeren Kosten ausweiten und die Fernüberwachung von Patienten zwischen den Klinikbesuchen im Rahmen von Programmen wie der kardialen Rehabilitation ermöglichen. Solch genaue und verfügbare Schätzungen der VO₂ max können auch für die Risikostratifizierung und die Beurteilung des Ansprechens auf Programme zur Risikoreduzierung verwendet werden, beispielsweise präoperative Beurteilung und Rehabilitation.³¹

Der hier beschriebene verbesserte Algorithmus für die VO₂ max-Schätzung auf der Apple Watch wurde für und basierend auf einer Population mit Referenz-VO₂ max entwickelt und validiert, die eine breite Palette an Kardio-Fitness-Levels abdeckt, wie in Abbildung 4 dargestellt. Fast die Hälfte der Studienteilnehmer war älter als 55 Jahre alt, und etwa 10 Prozent hatten eine bekannte koronare Herzerkrankung. Die ethnische Vielfalt in der Studienpopulation entsprach nicht annähernd derjenigen der US-Bevölkerung. Für die Herzfrequenz, eine wichtige Eingabe für die VO₂ max-Schätzungen auf der Apple Watch, wurde jedoch sowohl in internen als auch in externen Studien eine konsistente Genauigkeit bei Benutzern mit unterschiedlichen Hautfarben nachgewiesen.³²

Die Erweiterung der VO₂ max-Schätzungen auf niedrigere Bereiche in watchOS 7 kombiniert mit der Schätzung jenseits von Workouts erhöht die Verfügbarkeit dieser Metrik für Personen mit geringer Kardio-Fitness. Mehr als 90 Prozent der Teilnehmer mit mindestens einem Spaziergang im Freien, Lauf im Freien oder Wander-Workout mit einer Dauer von mehr als drei Minuten, das mit der Workout-App aufgezeichnet wurde, erhielten mindestens

eine Schätzung der VO₂ max auf der Apple Watch. Mit der Erhöhung der Anzahl der Geh-Workouts im Freien, steigt auch die Wahrscheinlichkeit und Genauigkeit einer VO₂ max-Schätzung auf der Apple Watch.

Die VO₂ max-Schätzung durch die Apple Watch ist im Vergleich zu gängigen Methoden zur Messung der VO₂ max genau und zuverlässig, wobei ein durchschnittlicher Fehler von weniger als 1 MET und ein ICC über 0,85 vorliegt. Die Genauigkeit der VO₂ max auf der Apple Watch kommt der Genauigkeit der Referenz nahe. Bei submaximalen Belastungstestprotokollen wurde zuvor ein mittlerer Fehler von ungefähr null und ein Standardfehler von 1 MET bestimmt.³³ Hinsichtlich der Test-Retest-Zuverlässigkeit wurde für die VO₂ max auf der Apple Watch in den Validierungsdaten ein ICC von 0,87 bestimmt, während dieser Wert bei submaximalen Laufbandtests bei 0,75 lag.³⁴

Mit dem neuen Algorithmus sollten VO₂ max-Schätzungen für Benutzer, die Medikamente einnehmen, die die Herzfrequenz senken, wie Betablocker und Kalziumkanalblocker, und diese Informationen in der Health-App auf dem iPhone angeben, das mit ihrer Apple Watch gekoppelt ist, im Vergleich zu Schätzungen in früheren Versionen von iOS und watchOS genauer sein. Bei der Handhabung dieser Medikamente werden keine Unterschiede hinsichtlich der Dosierung, der Kardioselektivität oder der intrinsischen sympathomimetischen Aktivität einiger Betablocker gemacht. Es handelt sich hierbei um allesamt potenziell aussagekräftige Eingaben, die jedoch zugunsten der Benutzerfreundlichkeit weggelassen wurden. Mit diesem Ansatz verringerte sich der geschätzte Fehler für Benutzer in der Validierungskohorte, die Betablocker und Kalziumkanalblocker einnehmen, von $11,8 \pm 4,0$ ml/kg/min auf $1,6 \pm 3,1$ ml/kg/min, sofern die Einstellungen der Gesundheitsinfos ihre Medikamentenverwendung angemessen reflektierten. Benutzer, die Medikamente einnehmen, die die Herzfrequenz herabsetzen, und diese Informationen nicht eingeben, erhalten Schätzungen, die über den tatsächlichen Werten liegen. Diejenigen, die niedrige oder bedarfsabhängige Dosen dieser Medikamente einnehmen, die die maximale Herzfrequenz nicht durchgängig reduzieren (beispielsweise Propranolol gegen Lampenfieber), erhalten vermutlich genauere Schätzungen, sofern sie auf die Eingabe dieser Informationen verzichten. Angesichts der weit verbreiteten Anwendung dieser Medikamente³⁵ ist deren angemessene Berücksichtigung, insbesondere bei älteren Benutzern, entscheidend für die genaue Schätzung der VO₂ max.

Unter bestimmten Bedingungen kann die VO₂ max-Schätzung eines Benutzers ungenau sein. Benutzer, die in der Health-App ein falsches Alter, Geschlecht oder Gewicht eingegeben, werden möglicherweise durchgehend ungenaue VO₂ max-Schätzungen haben. Auch normale physiologische Veränderungen, die im Zusammenhang mit der Schwangerschaft stehen, können zu ungenauen Schätzungen führen. Einzelne Schätzungen können niedrig ausfallen, falls die Sensordaten während Situationen aufgezeichnet werden, die die Leistung des Benutzers in einer Weise erhöhen, die von der Apple Watch nicht genau erfasst werden kann. Bei diesen Situationen handelt es sich oftmals um das Tragen von erheblichem Gewicht, das über das Körpergewicht hinaus geht, beispielsweise eines schweren Rucksacks oder eines Kindes, sowie das Gehen oder Laufen auf Böden, die die Leistung des Benutzers erhöhen, beispielsweise Sand. Ebenso kann die Verwendung eines Hilfsgeräts oder das Schieben eines Kinderwagens die Verfügbarkeit oder Genauigkeit der VO₂ max-Schätzungen auf der Apple Watch verringern. Faktoren, die die Herzfrequenz erhöhen, wie Dehydrierung, Koffeineinnahme, extreme Hitze oder der kürzlich erfolgte Übergang in große Höhenlagen, können ebenfalls zu Unterschätzungen führen. Die Genauigkeit der VO₂ max auf der Apple Watch kann durch häufige Geh-Workouts im Freien, durch eine größere Anstrengung bei den Workouts sowie durch das konsequente Tragen der Apple Watch im Verlauf des Tages, über typische Workouts hinaus, erhöht werden.

Bei Benutzern mit chronotroper Inkompetenz, einer Störung, bei dem die Herzfrequenz nicht angemessen ansteigt, um den Bedarf zu kompensieren,³⁶ kann es zu einer Überschätzung der VO₂ max kommen. Die chronotrope Inkompetenz ist in erster Linie mit Herzinsuffizienz assoziiert, die bei annähernd 30 bis 80 Prozent (in Abhängigkeit von diagnostischen Kriterien) der Patienten mit dieser Erkrankung auftritt.³⁷ Sie wurde auch mit einem signifikanten Anteil von Patienten mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD),³⁸ Lupus³⁹ und anderen Autoimmunerkrankungen in Verbindung gebracht.⁴⁰

Neben der chronotropen Inkompetenz können auch weitere Erkrankungen die Genauigkeit der VO₂ max-Schätzungen auf der Apple Watch verringern. Dazu gehören Erkrankungen oder Geräte, die die Herzfrequenz von der Bewegung oder dem Training entkoppeln (beispielsweise Schmerzen, Herzrhythmusstörungen, Herzschrittmacher oder Herzunterstützungsgeräte); Erkrankungen, die die Bewegungstoleranz stark einschränken und Patienten daran hindern, Herzfrequenzen zu erreichen, die nah an ihrer vorhergesagten maximalen Herzfrequenz liegen (beispielsweise periphere arterielle Verschlusskrankheit); sowie Erkrankungen, die das Gehen deutlich erschweren, wie skelettale oder neuromuskuläre Erkrankungen, die zu Gangstörungen führen (beispielsweise Multiple Sklerose, Zerebralparese).

Schlussfolgerungen

Mit watchOS 7 auf der Apple Watch Series 3 und höher wurden die VO₂ max-Schätzungen auf niedrigere Bereiche der Cardio-Fitness ausgeweitet. Zudem haben Benutzer nun die Möglichkeit, eine Benachrichtigung zu erhalten, wenn ihr Cardio-Fitness-Level für ihr Alter und Geschlecht niedrig ist. Durch diesen erweiterten Bereich sowie durch die erhöhte Verfügbarkeit von Schätzungen und die Option für Benutzer, die Medikamente, die die Herzfrequenz senken, einnehmen, genauere Schätzungen als bisher zu erhalten, könnten Forscher und Mediziner diese Metrik optimaler zur Beobachtung der Fitness bei älteren Erwachsenen und beim Vorliegen von Begleiterkrankungen einsetzen.

Quellen

¹Stringer WW. Cardiopulmonary exercise testing: current applications. *Expert Review of Respiratory Medicine*. 2010; 4(2): 179–188. doi: 10.1586/ers.10.8.

²Kaminsky LA, Arena R, Myers J. Reference Standards for Cardiorespiratory Fitness Measured With Cardiopulmonary Exercise Testing: Data From the Fitness Registry and the Importance of Exercise National Database. *Mayo Clinic Proceedings*. 2015; 90(11): 1515–1523. doi: 10.1016/j.mayocp.2015.07.026.

³American Thoracic Society, American College of Chest Physicians. ATS/ACCP Statement on cardiopulmonary exercise testing. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 2003; 167(2): 211–277. doi: 10.1164/rccm.167.2.211.

⁴Balady GJ, Arena R, Sietsema K, et al. Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2010; 122(2): 191–225. doi: 10.1161/CIR.0b013e3181e52e69.

⁵Ross R, Blair SN, Arena R, et al. Importance of Assessing Cardiorespiratory Fitness in Clinical Practice: A Case for Fitness as a Clinical Vital Sign: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*. 2016; 134(24): e653–e699. doi: 10.1161/CIR.0000000000000461.

⁶Blair SN, Kohl HW, Paffenbarger RS, et al. Physical Fitness and All-Cause Mortality: A Prospective Study of Healthy Men and Women. *JAMA*. 1989; 262(17): 2395–2401. doi: 10.1001/jama.1989.03430170057028.

⁷Mandsager K, Harb S, Cremer P, Phelan D, Nissen SE, Jaber W. Association of Cardiorespiratory Fitness With Long-term Mortality Among Adults Undergoing Exercise Treadmill Testing. *JAMA Network Open*. 2018; 1(6): e183605. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2018.3605.

⁸Clausen JSR, Marott JL, Holtermann A, Gyntelberg F, Jensen MT. Midlife Cardiorespiratory Fitness and the Long-Term Risk of Mortality: 46 Years of Follow-Up. *Journal of the American College of Cardiology*. 2018; 72(9): 987–995. doi: 10.1016/j.jacc.2018.06.045.

⁹Mora S, Redberg RF, Cui Y, et al. Ability of exercise testing to predict cardiovascular and all-cause death in asymptomatic women: a 20-year follow-up of the lipid research clinics prevalence study. *JAMA*. 2003; 290(12): 1600–1607. doi: 10.1001/jama.290.12.1600.

¹⁰Laukkanen JA, Kurl S, Salonen R, Rauramaa R, Salonen JT. The predictive value of cardiorespiratory fitness for cardiovascular events in men with various risk profiles: a prospective population-based cohort study. *European Heart Journal*. 2004; 25(16): 1428–1437. doi: 10.1016/j.ehj.2004.06.013.

¹¹Myers J, Nead KT, Chang P, Abella J, Kokkinos P, Leeper NJ. Improved reclassification of mortality risk by assessment of physical activity in patients referred for exercise testing. *The American Journal of Medicine*. 2015; 128(4): 396–402. doi: 10.1016/j.amjmed.2014.10.061.

¹²Kodama S, Saito K, Tanaka S, et al. Cardiorespiratory fitness as a quantitative predictor of all-cause mortality and cardiovascular events in healthy men and women: a meta-analysis. *JAMA*. 2009; 301(19): 2024–2035. doi: 10.1001/jama.2009.681.

- ¹³Nauman J, Nes BM, Lavie CJ, et al. Prediction of Cardiovascular Mortality by Estimated Cardiorespiratory Fitness Independent of Traditional Risk Factors: The HUNT Study. *Mayo Clinic Proceedings*. 2017; 92(2): 218–227. doi: 10.1016/j.mayocp.2016.10.007.
- ¹⁴Orimoloye OA, Kambhampati S, Hicks AJ, et al. Higher cardiorespiratory fitness predicts long-term survival in patients with heart failure and preserved ejection fraction: the Henry Ford Exercise Testing (FIT) Project. *Archives of Medical Science*. 2019; 15(2): 350–358. doi: 10.5114/aoms.2019.83290.
- ¹⁵Begum SSS, Papagiannopoulos K, Falcoz PE, Decaluwe H, Salati M, Brunelli A. Outcome after video-assisted thoracoscopic surgery and open pulmonary lobectomy in patients with low VO₂ max: a case-matched analysis from the ESTS database[†]. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2016; 49(4): 1054–1058. doi: 10.1093/ejcts/ezv378.
- ¹⁶Bhagwat M, Paramesh K. Cardio-pulmonary exercise testing: An objective approach to pre-operative assessment to define level of perioperative care. *Indian Journal of Anaesthesia*. 2010; 54(4): 286–291. doi: 10.4103/0019-5049.68369.
- ¹⁷Holmes AA, Phillips LM. Cardiopulmonary exercise testing and SPECT myocardial perfusion imaging: Pre-test probability is the key. *Journal of Nuclear Cardiology*. 2019; 26(1): 107–108. doi: 10.1007/s12350-017-0996-7.
- ¹⁸Schutte NM, Nederend I, Hudziak JJ, Bartels M, de Geus EJC. Twin-sibling study and meta-analysis on the heritability of maximal oxygen consumption. *Physiological Genomics*. 2016; 48(3): 210–219. doi: 10.1152/physiolgenomics.00117.2015.
- ¹⁹Bouchard C, An P, Rice T, et al. Familial aggregation of VO₂(max) response to exercise training: results from the HERITAGE Family Study. *Journal of Applied Physiology*. 1999; 87(3): 1003–1008. doi: 10.1152/jappl.1999.87.3.1003.
- ²⁰Zadro JR, Shirley D, Andrade TB, Scurrah KJ, Bauman A, Ferreira PH. The Beneficial Effects of Physical Activity: Is It Down to Your Genes? A Systematic Review and Meta-Analysis of Twin and Family Studies. *Sports Medicine - Open*. 2017; 3(1): 4. doi: 10.1186/s40798-016-0073-9.
- ²¹Laukkanen JA, Zaccardi F, Khan H, Kurl S, Jae SY, Rauramaa R. Long-term Change in Cardiorespiratory Fitness and All-Cause Mortality: A Population-Based Follow-up Study. *Mayo Clinic Proceedings*. 2016; 91(9): 1183–1188. doi: 10.1016/j.mayocp.2016.05.014.
- ²²Gist NH, Fedewa MV, Dishman RK, et al. Sprint Interval Training Effects on Aerobic Capacity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*. 2014; 44: 269–279. doi: 10.1007/s40279-013-0115-0.
- ²³Sultana RN, Sabag A, Keating SE, et al. The Effect of Low-Volume High-Intensity Interval Training on Body Composition and Cardiorespiratory Fitness: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*. 2019; 49: 1687–1721. doi: 10.1007/s40279-019-01167-w.
- ²⁴Helgerud J, Høydal K, Wang E, et al. Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2007; 39(4): 665–671. doi: 10.1249/mss.0b013e3180304570.
- ²⁵Krogh-Madsen R, Thyfault JP, Broholm C, et al. A 2-wk reduction of ambulatory activity attenuates peripheral insulin sensitivity. *Journal of Applied Physiology*. 2010; 108(5): 1034–1040. doi: 10.1152/jappphysiol.00977.2009.
- ²⁶Taylor HL. The effects of rest in bed and of exercise on cardiovascular function. *Circulation*. 1968; 38(6): 1016–1017. doi: 10.1161/01.cir.38.6.1016.
- ²⁷Williams PT. Physical fitness and activity as separate heart disease risk factors: a meta-analysis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2001; 33(5): 754–761. doi: 10.1097/00005768-200105000-00012.
- ²⁸Paterson DH, Cunningham DA, Koval JJ, St Croix CM. Aerobic fitness in a population of independently living men and women aged 55–86 years. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1999; 31(12): 1813–1820. doi: 10.1097/00005768-199912000-00018.
- ²⁹Brawner CA, Ehrman JK, Schairer JR, et al. Predicting maximum heart rate among patients with coronary heart disease receiving beta-adrenergic blockade therapy. *American Heart Journal*. 2004; 148(5): 910–914. doi: 10.1016/j.ahj.2004.04.035.
- ³⁰Forman DE, Myers J, Lavie CJ, et al. Cardiopulmonary Exercise Testing: Relevant but Underused. *Postgraduate Medicine*. 2010; 122(6): 68–86. doi: 10.3810/pgm.2010.11.2225.
- ³¹Older PO, Levett DZH. Cardiopulmonary Exercise Testing and Surgery. *Annals of the American Thoracic Society*. 2017; 14(Supplement_1): S74–S83. doi: 10.1513/AnnalsATS.201610-780FR.
- ³²Bent B, Goldstein BA, Kibbe WA, Dunn JP. Investigating sources of inaccuracy in wearable optical heart rate sensors. *npj Digital Medicine*. 2020; 3(1): 18. doi: 10.1038/s41746-020-0226-6.
- ³³Foster C, Jackson AS, Pollock ML, et al. Generalized equations for predicting functional capacity from treadmill performance. *American Heart Journal*. 1984; 107(6): 1229–1234. doi: 10.1016/0002-8703(84)90282-5.
- ³⁴Eng JJ, Dawson AS, Chu KS. Submaximal exercise in persons with stroke: test-retest reliability and concurrent validity with maximal oxygen consumption. *Archives of Physical Medicine Rehabilitation*. 2004; 85(1): 113–118. doi: 10.1016/s0003-9993(03)00436-2.
- ³⁵Argulian E, Bangalore S, Messerli FH. Misconceptions and Facts About Beta-Blockers. *The American Journal of Medicine*. 2019; 132(7): 816–819. doi: 10.1016/j.amjmed.2019.01.039.

³⁶Brubaker PH, Kitzman DW. Chronotropic incompetence: causes, consequences, and management. *Circulation*. 2011; 123(9): 1010–1020. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.110.940577.

³⁷Zweerink A, van der Lingen A-LCJ, Handoko ML, van Rossum AC, Allaart CP. Chronotropic Incompetence in Chronic Heart Failure. *Circulation: Heart Failure*. 2018; 11(8): e004969. doi: 10.1161/CIRCHEARTFAILURE.118.004969.

³⁸González-Costello J, Armstrong HF, Jorde UP, et al. Chronotropic incompetence predicts mortality in severe obstructive pulmonary disease. *Respiratory Physiology & Neurobiology*. 2013; 188(2): 113–118. doi: 10.1016/j.resp.2013.05.002.

³⁹Prado, DM Leite do, et al. Abnormal chronotropic reserve and heart rate recovery in patients with SLE: a case–control study. *Lupus*. 2011; 20(7): 717–720. doi: 10.1177/0961203310397081.

⁴⁰Pecanha T, Rodrigues R, Pinto AJ, et al. Chronotropic Incompetence and Reduced Heart Rate Recovery in Rheumatoid Arthritis. *Journal of Clinical Rheumatology*. 2018; 24(7): 375–380, doi: 10.1097/RHU.0000000000000745.