Physiologische Veränderung über einen 100-km-Marsch

Abschlussarbeit zur Erlangung des Master of Science in Sportwissenschaften Option Unterricht

eingereicht von

Adrian Camenzind

an der Freiburg, Schwe

Universität Freiburg, Schweiz

Mathematisch-Naturwissenschaftliche und Medizinische Fakultät

Abteilung Medizin

Department für Neuro- und Bewegungswissenschaften

in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Hochschule für Sport Magglingen

Referent
Dr. Thomas Wyss

Betreuerinnen
Theresa Schweizer
Dr. Rahel Gilgen-Ammann

Zürich, August 2022

Zusammenfassung

Einleitung

Ultramarathons (über 42.195 km) rufen verschiedene physiologische Veränderungen im Körper hervor (Baur et al., 2016; Knechtle et al., 2008). Diese Belastungen werden joggend bewältigt und finden bei mittlerer Intensität statt. Weniger weiss man über sehr lange Ausdauerbelastungen bei niedriger Intensität, bei denen gewandert oder marschiert wird.

Ziel

Mit dieser Arbeit wird untersucht, wie sich die Herzfrequenz, Körperkerntemperatur und Herzfrequenzvariabilität mit steigender Erschöpfung bei einer submaximalen langen Ausdauerbelastung verändert und welche dieser Parameter sinnvoll sind, um die körperliche Ermüdung und Überbelastung bei einem 100-km-Marsch zu messen?

Methode

Bei einem 100-km-Marsch wurde bei 18 Militärangehörigen die Herzfrequenz, Körperkerntemperatur und Herzfrequenzvariabilität mit portablen Sensoren aufgezeichnet. Zur Ermittlung der Belastung wurde der *Physiological Strain Index* (PSI) berechnet. Vier und neun Marschsektoren wurden für die Parameter mittels Varianzanalyse mit Messwiederholung verglichen.

Resultate

In der ersten Marschhälfte waren die Herzfrequenzen, Körperkerntemperaturen und PSI signifikant höher und die Herzfrequenzen stiegen und sanken signifikant. In der zweiten Marschhälfte waren die Parameter tiefer und blieben unverändert bis vor Schluss. Die Herzfrequenzvariabilität war vor dem Marsch am höchsten. Während und danach war sie signifikant tiefer.

Diskussion und Schlussfolgerung

Weder die Herzfrequenz noch die Körperkerntemperatur nahmen mit zunehmender Dauer des Marsches zu. Sie waren mehr von der Marschgeschwindigkeit und dem wechselnden Terrain beeinflusst, als von der Müdigkeit. Die Herzfrequenz passte sich dabei schneller an als die Körperkerntemperatur. Die PSI-Werte indizierten eine Marschbelastung von moderat hin zu niedrig. Die Herzfrequenzvariabilität deutete auf einen Rückgang des Parasympathikus hin. Da es keinen Kollaps gab, ist unklar, ob die Parameter für die Erkennung eines solchen geeignet sind.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1 Einleitung	4
1.1 Lange Ausdauerbelastungen	4
1.2 Physiologische Veränderungen bei langen Ausdauerbelastungen	6
1.3 Physiologische Parameter für die Messung von Ermüdung und Überbelastung	9
1.4 Ziel der Arbeit	18
2 Methode	19
2.1 Untersuchungsgruppe	19
2.2 Design der Studie	20
2.3 Untersuchungsinstrumente	21
2.4 Analysen und Auswertungen der Daten	24
3 Resultate	31
3.1 Resultate Deskriptive «Overall-Analyse»	31
3.2 Resultate der Vergleiche zwischen Marschsektoren	39
3.3 Resultate der Analyse des PSI	53
3.4 Resultate der Analyse der Herzfrequenzvariabilität	62
4 Diskussion	66
4.1 Erkenntnisse der «Overall-Analyse»	66
4.2 Erkenntnisse der Analyse der Marschsektoren	69
4.3 Erkenntnisse der Analyse des PSI	71
4.4 Erkenntnisse der Analyse der Herzfrequenzvariabilität	73
4.5 Stärken und Schwächen der Studie	74
5 Schlussfolgerung	76
Literaturverzeichnis	78
Anhang	87
A Tests auf Normalverteilung.	87
Dank	99

1 Einleitung

1.1 Lange Ausdauerbelastungen

1.1.1 Zu Fuss unterwegs in der Freizeit

Während sich das Bewegungsverhalten der Schweizer Bevölkerung in den letzten zehn Jahren geändert und stetig abgenommen hat (Hepa, 2013), wird in der Schweiz weiterhin aktiv gewandert. Das Wandern ist ein fester Bestandteil in der Schweizer Gesellschaft. Es wird als Schweizer Volkssport bezeichnet (Compagno, 2017; sda, 2017; Volkssportverband Schweiz-Liechtenstein VSL, 2021) und ist über die allermeisten Altersgenerationen sehr populär. Es ist sogar so, dass der Anteil von Wandernden in den letzten zehn Jahren in allen Sprachregionen der Schweiz deutlich zugenommen hat. Gemäss einer vom Bundesamt für Strassen ASTRA in Auftrag gegebenen Sekundäranalyse von Fischer et al. (2021) bewegen sich ab dem 15 Lebensjahr über 57 % der schweizerischen Wohnbevölkerung regelmässig in der Natur und üben das Wandern als eine Bewegungs- und Sportaktivität aus. Das entspricht hochgerechnet etwa 4 Millionen Schweizer Wandernden. Unter einer Wanderung versteht man das Gehen zu Fuss über eine längere Distanz oder Dauer. Die Schweizer Bevölkerung wandert am liebsten zwischen einer und fünf Stunden am Stück und es werden oft auch Mehrtageswanderungen gemacht. Längere Distanzen und Wanderungen über 6 Stunden werden von sehr ambitionierten Wandernden absolviert. Zu den Sportmotiven der Wandernden zählen vor allem die Gesundheit und die Fitness, sowie die Aktivität draussen in der Natur. Ausserdem wird auch gewandert, um Stress abzubauen und um sich zu erholen (Fischer et al., 2021).

Neben dem Wandern kann man in der Schweiz auch das Jogging (Laufen) als Volkssport betiteln. In der Schweiz joggen 27 % der Bevölkerung regelmässig. Somit ist das Jogging in der Schweiz unter den fünf beliebtesten Sportaktivitäten. Von 2014 bis 2020 ist der Anteil der aktiven Läuferinnen und Läufer sogar um 3.2 % gestiegen. Besonders bemerkenswert ist, dass Jogging mindestens einmal wöchentlich, und somit bedeutend häufiger als zum Beispiel Skifahren oder Schwimmen betrieben wird (Lamprecht et al., 2020). Es zeugen unzählige Veranstaltungen vom Lauffieber und vom Boom der Langstreckenläufe. Darunter zählen Stadtläufe, Halbmarathons, Staffel- und Sponsorenläufe, Trail-Running und die Königsdisziplin Marathon. Jährlich nehmen laut Swiss Running (2021) 300'000 Personen an Lauf-Events von Swiss Running teil und die Teilnehmerzahlen solcher Veranstaltungen nimmt jährlich zu.

Unter einem Ultramarathon, Ultra-Trail-Running, einer Extremwanderung oder einem Ultramarsch versteht man Ausdauersportarten, die die üblichen 42.195 km eines Marathons in Distanz überragen. Als solche werden auch Aktivitäten bezeichnet, die länger als 6 Stunden am Stück andauern. Typischerweise sind das Distanzen ab 50 km und mehr (Knechtle & Nikolaidis, 2015, 2018). Oft werden bei diesen Aktivitäten nebst der grossen Distanz von bis zu 121 km, auch Höhenmeter von über 5000 Metern überwunden (Datasport, 2022). Im Vergleich zu klassischen Marathons, wo Tausende daran teilnehmen, nehmen bei Ultramarathons oder Ultra-Ausdauer-Triathlons nur ein paar Hundert teil. Trotz dieses Nischendaseins gewinnen Veranstaltungen und Läufe, bei denen Distanzen über die des Marathons um einiges überragen an Beliebtheit. Die Zahl solcher Anlässe und auch die Zahl der Athleten, die daran teilnehmen, hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen (Ultrarunners, 2022; Whyte, 2014).

1.1.2 Das Marschieren im Militär

Das Marschieren ist eine Tätigkeit, die man in der Armee sehr oft und regelmässig ausüben muss. Es gehört schon seit jeher zu den Haupttätigkeiten eines Militärs. Besonders vor der Erfindung der Eisenbahn, als der Transport einer Truppe nicht anders zu bewältigen war. Dies belegen Rekrutentransporte in Schweizerregimenter aus dem 18. Jahrhundert, die in Italien in Neapel stationiert und dort zwischen 1734 bis 1789 ihren Dienst für den bourbonischen König absolviert haben. Die Rekrutierung dieser Soldaten für fünf Schweizerregimenter geschah damals kompanieweise in Regionen der Innerschweiz und an der nördlichen Grenze zur Alten Eidgenossenschaft. Zwei Drittel der vertraglich fixierten 9150 Sollstellen für das neapolitanische Regiment hatten gemäss einer Auflage aus den Regionen der heutigen Schweiz zu stammen und der katholischen Konfession anzugehören. Dies war aufgrund starker Konkurrenz zu anderen Armeen und Nationen und den demographischen Gegebenheiten eine schwierige Aufgabe (Eyer, 2015).

Die Angeworbenen und Ausgehobenen marschierten anschliessend in Gruppen von bis zu zwanzig Rekruten aus den Regionen der Alten Eidgenossenschaft bis zu den Hafenstädten Livorno oder Genua, welche als Generaldepots der neapolitanischen Dienste dienten. Dabei mussten sie die Schweizer Alpenpässe Furka, Gotthard oder Splügen, die mehr als 2000 Meter über Meer liegen, überqueren. Während des Marsches wurden die Rekruten in der Regel vom Anwerber selbst oder sonstigen bewaffneten Führern begleitet und überwacht. Die Anstrengungen dieses langen Fussmarsches zollten ihren Tribut. Immer wieder mussten Einzelne zurück-

gelassen werden oder erlagen den Strapazen. Für die Strecke von zirka 500 km von der Innerschweiz bis nach Genua brauchten die Rekruten etwa zwei Wochen. Die alternative Strecke bis nach Neapel ist zirka 1000 km lang und wurde etwa in vier Wochen absolviert. Dies entspricht einer täglichen Marschdistanz zwischen 30 und 40 km. Bei dieser enormen Ausdauerbelastung trugen die Rekruten auch noch ihr schweres Gepäck mit sich und waren den wechselnden Witterungsbedingungen ausgesetzt (Eyer, 2015).

Auch heute ist das Marschieren im Militär ein grosser und wichtiger Bestandteil des aktiven Dienstes. Märsche gehören zur Grundausbildung und werden für wichtige taktische Manöver und Verschiebung von Einheiten eingesetzt. Dabei werden von den Armeeangehörenden oft grössere Distanzen zurückgelegt und zusätzlich muss auch noch das Gepäck mitgetragen werden. Übliche Märsche in der Rekrutenschule der Schweizer Armee sind der 35- oder 50-km-Marsch. In der Offiziersschule müssen die Offiziersanwärter einen 100-km-Marsch absolvieren. Diese gelten bei den meisten Teilnehmenden als einschneidende und unvergessliche Erfahrung. Auch sonst gibt es täglich kürzere Verschiebungen zu Fuss und mit Gepäck. Gemäss einer Studie von Wyss et al. (2012) legen Rekruten von Infanterieeinheiten der Schweizer Armee über 15 km pro Tag zurück. Auch andere Einheiten erreichen Distanzen von über 10 km pro Tag. Im Vergleich zum Zivilleben sind Armeeangehörende während des Militärdienstes körperlich stark gefordert. Das Marschieren gilt als grosse körperliche Belastung bei den Armeeangehörenden und ist verantwortlich für einen grossen Teil der Verletzungen während des Militärdienstes. Das führt zu vielen Ausfällen und verkürzten Dienstzeiten (Reynolds et al., 1999; Wyss et al., 2014). Bereits mässig intensive Märsche mit kleineren Distanzen von 10 km und unter angenehmen Umweltbedingungen können kognitive und körperlichen Fähigkeiten wie zum Beispiel die Reaktionsgeschwindigkeit nach dem Marsch bis zu 20 % verringern (Yanovich et al., 2015). Dies steigert das Risiko von Verletzungen während und nach dem Marsch. Rekruten, die eine schlechte körperliche Fitness haben, neigen besonders zu Überlastungsschäden. Körperliche Fitness schützt dementsprechend vor Verletzungen während des Militärdienstes (Rosendal et al., 2003).

1.2 Physiologische Veränderungen bei langen Ausdauerbelastungen

Mit dem Boom von Events von sehr langen Ausdaueraktivitäten wie Ultramarathons im letzten Jahrzehnt und den immer besser werdenden technischen Mitteln, hat die Wissenschaft vermehrt ein Auge auf solche Aktivitäten gelegt. Dies wiederspiegelt zum Beispiel den rasanten Anstieg an wissenschaftlichen Publikation über Ultramarathonläufen ab 2010 bis 2018. Während davor

nur wenig veröffentlicht worden war, stieg in dieser Zeit die Anzahl auf zirka 49 Publikationen über Ultramarathons pro Jahr (Hoffmann, 2016). In den letzten Jahren bis heute wurde weiterhin auf einem stabilen Niveau über Ultramarathonläufe publiziert. Die Studien befassen sich vor allem mit den Themenbereichen Wettkampfleistung (21.8 %), Herz-Kreislauf-System (17.4 %) und Biomarker (14.8 %) und beziehen sich auf physiologische Fragen (Hoffman, 2016; Murray, 2021).

Die sehr langen Ausdauerbelastungen bei Ultramarathons oder Ultra-Ausdauer-Triathlons rufen verschiedene physiologische und metabolische Veränderungen im menschlichen Körper hervor. So nimmt die fettfreie Masse des Körpers, die Masse des Körperfetts, sowie der Anteil der Blutfette und Serumlipide ab (Baur et al., 2016; Ginsburg et al., 1996; Knechtle et al., 2008). Dies kann als positiver Effekt dieser Ausdauerbelastungen bezeichnet werden, bedenkt man den hohen Anteil der Übergewichtigen in unserer Gesellschaft (Bundesamt für Statistik, 2020). Negative Auswirkungen sind aber unter anderem Anstiege bei Hormonen und Biomarkern, die auf Entzündungen und Muskelschäden hinweisen. Zum Beispiel sind die Konzentrationen von Herzenzymen erhöht. Diese können als Anzeichen für Schädigungen und Entzündungen von Herzmuskelzellen gelten und werden zum Beispiel auch bei Herzinfarkten freigesetzt. In der Regel sind aber die Veränderungen und erhöhten Konzentrationen der Biomarker nach Ultramarathonläufen nur vorübergehend und die Werte normalisieren sich wieder nach der Ausdaueraktivität (Baur et al., 2016; Knechtle & Nikolaidis, 2018). Einen grossen Teil (50 bis 60 %) der Teilnehmenden, die einen längeren Ultramarathon absolvieren, leiden während oder direkt nach einer solchen Aktivität unter muskuloskelettalen Problemen. Am meisten Verletzungen treten bei Ultramarathons in den unteren Gliedmassen bei den Knien und Knöcheln auf oder betreffen die Haut, zum Beispiel in Form von Blasen (Knechtle & Nikolaidis, 2018; Krabak et al., 2014).

Bei einer Untersuchung über die Auswirkungen eines 100-km-Ultramarathons auf die Herzfrequenz und die Herzfrequenzvariabilität wurde herausgefunden, dass die Aktivität des Sympathikus des autonomen Nervensystems gesteigert wird. Folglich führt die Belastung eines Ultramarathons zu einem Anstieg der Ruheherzfrequenz und einer Reduktion der Herzfrequenzvariabilität unmittelbar nach der Belastung und bis sieben Tage nach der Belastung. Somit bleibt eine erhöhte Aktivität des Sympathikus über die ganze Woche nach der Belastung bestehen (Paech et al., 2021). Ähnliche Befunde wurden auch nach einem 90-km-Ultramarathon beobachtet, bei dem es fast einen Monat dauerte, bis sich die Ruheherzfrequenz wieder auf die

Werte vor dem Ultramarathon sanken (Chambers et al., 1998). Oder bei einem Ultra-Ausdauerberglauf über 14 Stunden wurde herausgefunden, dass die Herzfrequenzvariabilität ebenfalls sank und somit die Sympathikusaktivität zunahm. Die mittlere Herzfrequenz betrug über die 14 Stunden 112 Schläge pro Minute (bpm) (Clemente-Suarez, 2015).

Weitere Forschungen betreffen eine mögliche Überhitzung (Hyperthermie) des Körpers während einer Ausdaueraktivität. Bei einem Ultramarathon über 161 km war die Körperkerntemperatur bei den Teilnehmenden gut reguliert und erreichte keine klinischen hyperthermischen Werte von über 40 Grad Celsius (°C) (Al Mahri & Bouchama, 2018; Hoffman & Stuempfle, 2014; Valentino et al., 2016). Die mittlere Laufgeschwindigkeit beim Ultramarathon war mit 6.0 km/h eher im tieferen Bereich, trotzdem waren die Teilnehmenden schneller unterwegs, als bei einem Marsch (Valentino et al., 2016).

Andererseits gibt es immer wieder schwere Fälle von Hitzeschlägen durch Überhitzung des Körpers während Ausdauerläufen, die sogar tödlich oder lebensbedrohlich sind. Diese übersteigen sogar die schwerwiegenden kardialen Fälle um ein Vielfaches, wie eine Metaanalyse von Ausdauerläufen zwischen 2007 und 2013 in Israel belegen (Yankelson et al., 2014). Die Hyperthermie kann zum belastungsbedingtem Kollaps führen und betrifft sowohl Teilnehmende von Marathons wie auch Ultramarathons (Krabak et al., 2014; McLaughlin et al., 2006).

Die Belastung von Ultramarathons werden vor allem abwechslungsweise laufend und joggend, aber vor allem joggend bewältigt. Die Durchschnittgeschwindigkeiten bei solchen Aktivitäten belaufen sich um die 10 bis zu 15 km/h und finden dementsprechend bei mittleren Intensitäten statt (Lambert et al., 2004; Zingg et al., 2015).

In der Literatur findet man weit weniger über die physiologischen Veränderungen im Körper bei sehr langen Ausdauerbelastungen über sehr grosse Distanzen (ab 50 km), die mit niedriger Intensität absolviert werden. Diese Ausdauerbelastungen werden mittels wandern und gehen absolviert und haben eine Durchschnittsgeschwindigkeit um die 5 km/h. Dies betrifft zum Beispiel sehr lange Bergwanderungen, Mammut- oder Ultramarsch-Events, bei denen Distanzen von 100 km zurückgelegt wird, aber auch die langen Märsche von 50 bis 100 km im Militär, bei denen meistens noch Gepäck mitgetragen werden muss.

Eine Studie von Jorres et al. (2021) analysierte die physiologischen Veränderungen, mit dem Fokus auf Veränderungen des Stoffwechsels und die Körperzusammensetzung, während des *Mammutmarsches*, einem 100-km Marsch-Event. Demnach nehmen die Konzentrationen von Muskel- und Herzstressmarkern ähnlich wie bei Ultramarathonläufen oder hochintensiven Trainings zu, obwohl die Intensität beim Marsch niedriger war.

Niedermeier et al. (2017) untersuchten stressbedingte physiologische Veränderungen beim Speichelcortisol, Blutdruck und der Herzfrequenzvariabilität während einer Bergwanderung. Jedoch war die Wanderung mit drei Stunden nur sehr kurz. Sie fanden einzig heraus, dass das Bergwandern die Konzentration von Speichelcortisol reduziert, was eine positive Auswirkung auf den Stress hat. Beim Blutdruck und der Herzfrequenzvariabilität konnten sie keine signifikanten positiven Veränderungen finden.

In einer kürzlich veröffentlichten Studie (Oeschger et al., 2022) wurde der Einfluss der kardiorespiratorischen Fitness der Soldaten (Wyss et al., 2007) auf die physiologischen Reaktionen während eines lang andauernden und anspruchsvollen Militärmarsches von 34 km untersucht. Sie fanden heraus, dass bei Soldaten mit erhöhter aerober Kapazität, und somit besserer Fitness, die mittleren Herzfrequenzen über den gesamten Marsch tiefer waren, als bei den Soldaten mit einer tieferen aeroben Kapazität. Ausserdem war die maximale Körperkerntemperatur bei den körperlich weniger fitten Soldaten mit 38.6 ± 0.3 °C höher als bei den fitteren Soldaten, die bei 38.4 ± 0.2 °C lag. Trotzdem belief sich die Kernkörpertemperatur während des ganzen Marsches in einem gut regulierten Bereich und führte zu keinen Überhitzungen.

Auch bei einer Untersuchung von Soldaten während eines 72-km-Marsches belief sich die mittlere Körperkerntemperatur während des gesamten Marsches zwischen 37.1 und 38.1 °C. Die Maximalwerte erreichten auch hier nur 38.7 °C und gelangen somit nie in den Bereich einer Hyperthermie, welche ab 39 °C besteht (Armstrong et al., 1996). Für die gesamte Distanz benötigten die Soldaten 16 Stunden (h) 27 Minuten (min) und hatten eine Marschgeschwindigkeit von 3.6 bis 5.3 km/h (B. H. Poon et al., 2021).

1.3 Physiologische Parameter für die Messung von Ermüdung und Überbelastung

Die Ermüdung ist Folge grosser Belastungen und die ersten Definitionen von Ermüdung gehen schon sehr lange Zeit zurück. So publizierte Mosso (1915) bereits 1915 seine Definition, worunter man unter dem Phänomen Ermüdung einerseits die Verringerung der Muskelkraft und der physischen Leistungsfähigkeit, und andererseits die Ermüdung als Gefühl versteht. Somit lasse sich die Ermüdung als physische Tatsache messen und vergleichen, während dem sie sich als psychische Tatsache der Messung entziehe.

Bis heute ist diese Definition nicht verworfen und gilt weiterhin als Grundlage. Es gibt jedoch sehr viele unterschiedliche Definitionen von Ermüdung und die Wissenschaft tut sich schwer, sich auf eine definitiv gültige Definition zu konzentrieren. Dies macht konsistente Interpretationen und Vergleiche von Studien über Ermüdung schwierig (Phillips, 2015).

Die Begriffe Ermüdung und Erschöpfung führen auch deshalb zur Verwirrung, weil sie in der Forschung oft synonym verwendet werden. Teilnehmende, die eine Aktivität mit einer bestimmten Belastung abbrechen müssen, gelten als erschöpft. Trotzdem sind sie noch in der Lage eine Aktivität mit geringerer Intensität auszuüben. Die Definition der Erschöpfung als völliger Verlust der Kraft, oder das Aufbrauchen oder Verbrauchen der gesamten Kraft, impliziert das Erreichen eines Zustands, welcher zu einer totalen Unfähigkeit führt, weiter zu funktionieren, und nicht nur zu einer Unfähigkeit eine Aktivität mit einer bestimmten Belastung weiterzuführen (Phillips, 2015). Im Fall einer langen Ausdauerleistung wie die eines Marsches, könnte die Erschöpfung unter anderem durch physiologische Überbelastung erreicht werden und gezwungenermassen zum Abbruch des Marsches führen.

Das Erkennen und Messen einer physiologischen Überbelastung eines menschlichen Körpers während einer ausgedehnten Ausdauertätigkeit und bei kleiner Intensität stellt eine besondere Herausforderung dar. Es gilt hierfür geeignete Parameter festzulegen, welche man über einen langen Zeitraum von bis zu 24 Stunden erfassen und später analysieren kann. Hierfür müssen die Parameter möglichst lückenlos erfasst werden können und gleichzeitig dürfen die technischen Geräte, welche die Daten erfassen, die Untersuchungspersonen bei der Ausübung ihrer Tätigkeit nicht behindern oder stören.

Es ist bekannt, dass die Messung der Herzfrequenz (HF) bei Aktivitäten als Indikator für die Belastung und Intensität gilt (Achten & Jeukendrup, 2003). Trotz vielen Faktoren, die die Herzfrequenz beeinflussen, lässt sie sich technisch gut mit portablen Geräten über einen langen Zeitraum messen. Man hat ausserdem erkannt, dass die Überhitzung des menschlichen Körpers während einer Ausdaueraktivität zu einer Überbelastung führen kann (Armstrong et al., 1996; Krabak et al., 2014; McLaughlin et al., 2006; Yankelson et al., 2014). Somit ist die Messung der Körperkerntemperatur zunehmend von Interesse bei Forschungsgruppen. Zusammen mit der Herzfrequenz lässt sich mit der Körperkerntemperatur ein physiologischer Belastungsindex, der *Physiological Strain Index* (PSI) berechnen, welcher eine Belastung im kritischen Bereich beziffern und Anzeichen einer Überbelastung benennen kann (Buller et al., 2008; Cuddy et al., 2013; Moran et al., 1998).

Dank immer besseren technischen Möglichkeiten rückt zunehmend die Messung und Analyse der Herzfrequenzvariabilität in den Fokus von Fitness- und Ausdauersportlern. Sie ist beeinflusst vom autonomen Nervensystem und kann aussagen, ob sich der Körper leistungsbereit und regeneriert oder gestresst und erschöpft fühlt (Hottenrott, 2021).

1.3.1 Die Herzfrequenz

Über Jahrhunderte hat man hat man die Herzfrequenz mit dem Ohr an der Brust abgehört. Um zirka 1820 erfand Rene Laennec dann das Stethoskop, mit dem man die Herztöne deutlich besser und somit genauer abhören konnte. Willem Einthoven entwickelte zu Beginn des 20. Jahrhunderts den ersten Elektrokardiographen, mit dem die Herzströme grafisch dargestellt werden konnten. Ende der 1950er-Jahre wurde der Holter-Monitor entwickelt, einen portablen Elektrokardiographen, mit dem man die Herzströme einer Person durchgehend über 24 Stunden auf Band aufzeichnen konnte (Achten & Jeukendrup, 2003; Holter, 1961). Erst ab 1977 entwickelte *Polar Electro Oy* den ersten batteriebetriebenen Fingerspitzen-Herzfrequenzmesser als Trainingshilfe für die finnische Langlaufnationalmannschaft. Seit 1983 wurden dann die ersten drahtlosen Herzfrequenzmesser mit elektrischer Felddatenübertragung von *Polar Electro Oy* auf den Markt gebracht. Somit war der Weg für die Herzfrequenzmessung bei sportlichen Ausdaueraktivitäten geebnet (Laukkanen & Virtanen, 1998).

Herzfrequenzmessgeräte haben sich in den letzten Jahrzenten im Ausdauersport bestens bewährt und sind die am häufigsten benutzte direkte physiologische Messmethode unter Feldbedingungen. Die objektive Messung der Herzfrequenz wird hauptsächlich benutzt, um die Intensität einer Aktivität während eines Trainings oder eines Wettkampfes zu ermitteln. Ausserdem lässt sich mit der Herzfrequenz und der Sauerstoffaufnahme, die zueinander in einer linearen Beziehung stehen, den Energieverbrauch schätzen. Bei der Erhöhung der Herzfrequenz erhöht sich auch die Sauerstoffaufnahme. Dank portablen Geräten wie Fitness- und Sportuhren und Brustgurte kann man die Herzfrequenz in den meisten Situationen sehr leicht über einen langen Zeitraum messen, überwachen und aufzeichnen. Sie haben eine sehr kleine Fehlerrate und gelten deshalb als sehr valide. Darüber hinaus sind sie heutzutage auch sehr kostengünstig (Achten & Jeukendrup, 2003).

Zu beachten ist, dass die Herzfrequenz durch äussere Einflüsse verfälscht werden kann. So kann zum Beispiel warmes Wetter die Herzfrequenz beeinflussen. Belastungen unter sehr heissen Aussenbedingungen kann dazu führen, dass der Körper die Hitze nicht austragen kann und somit die Körperkerntemperatur ansteigt. Folglich kann die Herzfrequenz um etwa 10 bpm bei gleicher Intensität ansteigen. Ausserdem kann eine Dehydration zu einem Anstieg der Herzfrequenz von bis zu 7.5 % führen (Achten & Jeukendrup, 2003; Gonzalez-Alonso et al., 2000; Gonzalez-Alonso et al., 1999). Zudem ist bei submaximalen Belastungen in grosser Höhe die Herzfrequenz im Vergleich zu Belastungen auf Meereshöhe 10 bis 20 % erhöht. Die maximale

Herzfrequenz wiederum erreicht in der Höhe gleiche oder sogar leicht niedrigere Werte im Vergleich zu Belastungen in tieferen Regionen (Achten & Jeukendrup, 2003).

Seit langem wird die Überwachung und Messung der Herzfrequenz zur Beurteilung von Reaktionen auf verschiedene Belastungsfaktoren gemacht. In der Literatur findet man viele Untersuchungen, bei denen die Reaktion der Herzfrequenz beschrieben wird und bis heute viel zitiert werden. Obwohl die meisten Studien keine signifikanten Unterschiede zwischen der Ruheherzfrequenz bei Personen im überbelasteten und normalen Zustand zeigen, gibt es bei einigen frühen Studien vor 1990 erhöhte Ruheherzfrequenzen bei Übertrainierten (Achten & Jeukendrup, 2003; Dressendorfer et al., 1985). Interessanterweise zeigen spätere Studien aber, dass übertrainierte Personen bei submaximalen Ausdauerbelastungen im müden Zustand tiefere mittlere Herzfrequenzen aufweisen als im normalen Zustand (Achten & Jeukendrup, 2003; Billat et al., 1999; Hedelin et al., 2000). In der Erkennung und Prävention von Überbelastung kann die Messung der Herzfrequenz zusammen mit anderen Parametern wie die Körperkerntemperatur oder die Herzfrequenzvariabilität eine übergeordnete Rolle spielen (Buller et al., 2008; Cuddy et al., 2013; Moran et al., 1998).

1.3.2 Die Körperkerntemperatur

Die normale Körperkerntemperatur bei gesunden Personen im Ruhezustand ist bei 37 ± 0.5 °C (Hymczak et al., 2021). Sie ist der auschlaggebende Parameter, wenn es um die Wärmeentwicklung und -veränderung im körperlichen Organismus während einer körperlichen Aktivität geht. Die Messung und das Monitoring der Körperkerntemperatur kann deshalb bei einer sehr langen Ausdauerbelastung entscheidend sein, um allfällige Verletzungen und Überbelastungen aufgrund starker Kälte- oder Wärmeentwicklung im Körper zu erkennen.

Bei langen Ausdauerläufen gehören zu den häufigsten Hitze- und Kälteerkrankungen die Hitzeerschöpfung und der Hitzeschlag, aber auch die Unterkühlung (Armstrong et al., 1996).

Bei der Hitzeerschöpfung verliert der Körper aufgrund heissen äusserlichen Bedingungen (hohe Umgebungstemperatur) und oft in Kombination mit körperlicher Belastung einen grossen Anteil an Flüssigkeit und Elektrolyten (6 bis 10 % vom Körpergewicht). Dies führt zu einem geringeren Blutvolumen, tieferen Blutdruck und zu einer reduzierten Schweissproduktion. Sie wird als die häufigste Hitzeerkrankung bei Ausdauersportlern angesehen und kann zu Schwindel, Kopfschmerzen, allgemeiner Schwäche oder Übelkeit führen, und damit oft zum Abbruch der sportlichen Aktivität oder sogar zu einem Kollaps (Armstrong et al., 1996).

Hyperthermie ist ein Zustand, bei dem die Körperkerntemperatur über den Normalbereich erhöht ist. Im Unterschied zu Fieber, beim welchem es sich um eine geregelte und natürliche Reaktion des Körpers handelt, kann der Körper bei der Hyperthermie die eigene Thermoregulation nicht mehr gewährleisten. Dies geschieht, wenn die durch körperliche Aktivität entstehende Wärme im Körper stärker zunimmt, als sie wieder an die Umwelt abgegeben werden kann (Dräger, 2013). Beim Hitzeschlag kommt es zu einer Hyperthermie des Körpers, bei dem die Kerntemperatur des Körpers über 40 °C ansteigt (Al Mahri & Bouchama, 2018). Er kann deshalb für den Menschen lebensbedrohlich sein. Verursacht wird er entweder durch sehr hohe Umgebungstemperaturen (klassischer Hitzeschlag) oder durch die erzeugte Hitze von Muskeln bei sehr anstrengender körperlicher Betätigung (anstrengungsbedingter Hitzeschlag). Vom anstrengungsbedingten Hitzeschlag sind vor allem junge und gesunde Personen betroffen, die bei einer Anstrengung über die Grenzen der eigenen Leistungsfähigkeit gehen. Darunter gehören Armeeangehörende und Sportler, aber auch Feuerwehrleute und Bauarbeiter. Personen mit einer schlechten Fitness haben dabei ein deutlich höheres Risiko einen anstrengungsbedingten Hitzeschlag zu erleiden. Beim Hitzeschlag kann es zu Dysfunktionen und Schädigungen von mehreren Organen kommen, darunter zu Schädigungen der Gehirnfunktionen (Enzephalopathie), zu niedrigem Blutdruck (Hypotonie), Atemstillstand und Durchfall (Al Mahri & Bouchama, 2018; Leon & Bouchama, 2015).

Bei kühlen oder kalten, nassen oder windigen Aussenbedingungen kann es bei Ausdauerläufen zu einer Unterkühlung (Hypothermie) kommen. Man spricht davon, wenn die Körperkerntemperatur unter 36 °C sinkt. Sowohl schwacher (Körperkerntemperatur von 34 bis 36 °C), wie auch mittlerer (30 bis 34 °C) Hypothermie sollte man entgegenwirken, bevor sie weiter zu einer starken (unter 30 °C) Hypothermie führt, welche wiederum zu einem Herzstillstand führen kann (Armstrong et al., 1996).

Die Messung der Körperkerntemperatur war für lange Zeit nur mit einer invasiven Messmethode mit einem Thermometer möglich. Alle Instrumente, die zur Messung von Temperatur benutzt werden, werden als Thermometer bezeichnet. Seit dem 18. Jahrhundert wird das Quecksilberthermometer in der Medizin eingesetzt, um Körpertemperatur zu messen. Es war lange Zeit das beliebteste Instrument dafür. Aufgrund der Giftigkeit von Quecksilber und des Umweltbewusstseins wurden erst um die Jahrtausendwende vermehrt Thermometer auf Alkoholbasis und digitale Thermometer, aber auch Infrarot Thermometer, für die Messung im Ohr, benutzt (Moran & Mendal, 2002). Das Quecksilberthermometer ist zwar bis heute noch zum

Teil in Arztpraxen oder zu Hause im Einsatz, doch die Technologie der Ausdehnungsthermometer wird allmählich von neuen Technologien, wie die elektronische Thermometrie ersetzt. Bei den Methoden der Körperkerntemperaturmessung unterscheidet man heute zwischen nicht invasiven, wenig invasiven und invasiven Methoden (Dräger, 2013). Unter den nicht invasiven Methoden zur Messung der Körperkerntemperatur gehören die Hauttemperaturmessung axillar, bei der das Thermometer unter der Achselhöhe platziert wird, und die Messung auf der Stirn, bei der mit der Hand oder mit einem Flüssigkristallthermometer gemessen wird. Die Hauttemperaturmessung ist für die Ermittlung der Körperkerntemperatur sehr ungenau, wird aber oft angewendet, um schnell zu kontrollieren, ob man Fieber hat (Dräger, 2013; Hymczak et al., 2021; Moran & Mendal, 2002).

Zu den wenig invasiven Methoden gehören die orale Messung unterhalb der Zunge, die tympanische Messung im Ohr mittels Infrarotsensor und die rektale Messung. Während die Messung im Mund und im Ohr sehr fehleranfällig und ungenau ist, erreicht man bei der rektalen Messung sehr akkurate Körperkerntemperaturwerte, auch wenn die Körperkerntemperatur bei gefülltem Mastdarm im Rektum stark verzögert angezeigt wird. Bei allen drei Methoden ist eine kontinuierliche Messung aber nicht möglich oder sehr unangenehm für die Testpersonen (Dräger, 2013; Hymczak et al., 2021; Moran & Mendal, 2002).

Die invasiven Methoden liefern bezüglich Körperkerntemperatur die besten Resultate. Der grosse Nachteil ist, dass die Methoden nur bei narkotisierten Patienten eingesetzt werden können oder für die Testpersonen sehr unangenehm und schmerzhaft sind. Darunter gehören die Messung über den Nasopharynx in der Nasenhöhle und die ösophageale Messung in der Speiseröhre, bei denen eine Sonde über die Nase oder den Mund platziert wird. Auch die Messung über die Harnblase mittels Blasenkatheter oder die Messung über eines Pulmonalarterienkatheters, welcher auf der Intensivstation in der Herzchirurgie eingesetzt wird, gehört zu den invasiven Methoden (Dräger, 2013; Hymczak et al., 2021; Moran & Mendal, 2002).

Alle beschriebenen Methoden sind jedoch für den Einsatz während einer sportlichen Aktivität über einen längeren Zeitraum nicht geeignet. Erst in den letzten Jahren wurden neue Technologien entwickelt, die das bequeme und nicht invasive Messen der Körperkerntemperatur im sportlichen Kontext ermöglichen. Hier handelt es sich um neue Doppelsensortechnologien, auch Heat-Flux-Technologie genannt, bei denen mittels Sensoren der Wärmefluss auf einer isolierten Hautstelle gemessen wird. Die Körperkerntemperatur wird mittels firmeninternen Algorithmen ermittelt. Diese Geräte garantieren einen sehr hohen Tragekomfort und messen und ermitteln die Körperkerntemperatur sehr genau (Dräger, 2013; greenTEG, 2022a, 2022c).

1.3.3 Der Physiological Strain Index (PSI)

Der *Physiological Strain Index* (PSI) ist ein physiologischer Belastungsindex, der entwickelt wurde, um die hitzebedingte Beanspruchung des Körpers – besonders während einer Wärmeoder Hitzebelastung – zu erkennen und zu bewerten (Moran et al., 1998). Er kann deshalb universell bei körperlichen Belastung als Präventivinstrument eingesetzt werden und somit Hitzeschäden vorbeugen (Buller et al., 2008). Der PSI basiert auf der Herzfrequenz und der Körperkerntemperatur und wird mit ihren Werten mittels einer mathematischen Formel berechnet. Dafür sind die Herzfrequenz in Ruhe HF(0) und die Körperkerntemperatur in Ruhe T_{core}(0) und
die zum Zeitpunkt gemessenen Herzfrequenz- HF(t) und Körperkerntemperaturwerte T_{core}(t)
erforderlich. Die originale Formel nach Moran et al. (1998) lautet:

$$PSI = 5 \times \frac{T_{core}(t) - T_{core}(0)}{39.5 - T_{core}(0)} + 5 \times \frac{HF(t) - HF(0)}{180 - HF(0)}$$

Das Resultat gibt die Wärmebelastung der Person und ihren Körper zwischen 0 (keine Belastung) und 10 (sehr hohe Belastung) an (Tabelle 1). Einen PSI-Wert > 7.5 kann als gefährdete Belastung «unter Risiko» eingestuft werden (Buller et al., 2008; Cuddy et al., 2013).

Für die kontinuierliche Überwachung in Echtzeit ist der PSI massgeblich von zuverlässigen Messmethoden und Werten der Körperkerntemperatur und Herzfrequenz abhängig. Aufgrund invasiven Messmethoden der Körperkerntemperatur, war das bis vor kurzem eine schwierige und unpraktische Sache. Neuere technische Mittel für die Ermittlung der Körperkerntemperatur mittels Wärmeflussmesssensoren (Dräger, 2013; greenTEG, 2022b), die an der Haut messen, vereinfachen die Überwachung und bringen viel Potenzial für den Einsatz des PSI bei sportlichen Aktivitäten mit (Buller et al., 2008).

Tabelle 1

Physiological Strain Index nach Moran et al. (1998)

PSI	Belastung	Gefährdung
0		
1	keine/wenig	
2		
3	Niedrig	tief
4		uei
5	Moderat	
6		
7	Hoch	
8	-	
9	sehr hoch	hoch
10		

Anmerkung. Bewertung der Hitzebelastung mittels PSI = Physiological Strain Index. Gefährdung für Person bei < 7.5 tief und bei > 7.5 hoch (Buller et al., 2008; Moran et al., 1998).

1.3.4 Die Herzfrequenzvariabilität

Herzschläge werden mit einem Elektrokardiogramm erfasst und in einer Kurve dargestellt. Der QRS-Komplex, bestehend aus der negativen Q-, der positiven R- und der negativen S-Zacke, ist ein Kurvenbestandteil des Elektrokardiogramms, bei dem der Herzschlag mit einem hohen Ausschlag dargestellt wird. Dieser höchste Zacken stellt die grösste elektrische Aktivität dar und wird als R-Zacken bezeichnet. Das RR-Intervall (auch NN-Intervall genannt) beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen zwei R-Zacken im Elektrokardiogramm (Risk et al., 2005). Dies entspricht der Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Herzschlägen, welche zur weiteren Analyse und Berechnung weiterer Werte benutzt werden kann. Die zeitliche Varianz zwischen aufeinanderfolgenden Schlägen des Herzens ist somit der physiologische Parameter Herzfrequenzvariabilität (Böckelmann, 2012).

Die Herzfrequenz und ihre Variabilität werden vom autonomen Nervensystem gesteuert. Sie wiederspiegeln das Zusammenspiel zwischen verschiedenen Bereichen des Gehirns, dem akti-

vierenden Sympathikus und dem beruhigenden Parasympathikus. Je nach übergeordneter Aktivität eines dieser Bereiches, schlägt das Herz variabler oder regelmässiger. Mit der Herzfrequenzvariabilität können somit Schlüsse über die Aktivität der beiden Bereiche gezogen werden. Eine tiefe Herzfrequenzvariabilität, und somit ähnliche oder gleiche zeitliche Abstände zwischen den Herzschlägen, gibt Hinweise darauf, dass vor allem der anspannende und aktivierende Sympathikus arbeitet. Die autonomen Mechanismen für die Regulation des Herzschlages sind beeinträchtigt und das Herz-Kreislauf-System kann sich nur schlecht an psychische und physische Veränderungen anpassen. Dies kann ein Indikator sein, dass der Körper angespannt ist und unter Stress leidet. Eine hohe Herzfrequenzvariabilität, und somit unterschiedlich wechselnde zeitliche Abstände zwischen den Herzschlägen, deutet auf eine verstärkte Aktivität des entspannenden Parasympathikus hin. Das Herz-Kreislauf-System ist durch Kontrollmechanismen des autonomen Nervensystems gut reguliert und kann sich gut und schnell auf physische und psychische Änderungen anpassen. Das weist auf einen entspannten und erholten Körper hin (Annunzio, 2017; Böckelmann, 2012; Sammito & Böckelmann, 2015; Shaffer & Ginsberg, 2017). Dies macht die Herzfrequenzvariabilität zu einem spannenden physiologischen Parameter, um eine allfällige Überbelastung des Körpers zu erkennen.

Die Analyse der Herzfrequenzvariabilität stellt mathematisch die Aktivität und Beeinflussung des autonomen Nervensystems auf das Herz-Kreislauf-System dar und gilt als nicht-invasives Verfahren. Man unterscheidet dabei zwischen zeitbezogener, frequenzbezogener und nichtlinearer Methode. Die Fragestellung bestimmt erstens die mathematische Methode zur Bestimmung des geeigneten Parameters (Variabilitätsmass) der Herzfrequenzvariabilität und zweitens die sinnvolle Aufzeichnungsdauer der RR-Intervalle. Es können sehr kurze Abschnitte von Herzschlagfolgen über wenige Minuten, mittellange Abschnitte von bis zu zwei Stunden oder sehr lange Abschnitte über 24 Stunden erfasst und analysiert werden (Sammito & Böckelmann, 2015).

Bei der zeitbezogenen Herzfrequenzvariabilitätsanalyse werden die RR-Intervalle statistisch bezüglich ihrer Varianz ausgewertet. Die zu berechnenden Parameter der Herzfrequenzvariabilität werden beiden Aktivitäten, sowohl der sympathischen wie auch der parasympathischen zugeordnet. Für die Beurteilung der parasympathischen Aktivität werden die Werte der Herzfrequenzparameter RMSSD (Root mean square of successive differences; auf deutsch: Quadratwurzel des Mittelwerts der Summe aller quadrierten Differenzen zwischen benachbarten RR-Intervallen), NN50 (Anzahl Paare benachbarter RR, die mehr als 50 ms voneinander abwei-

chen) und pNN50 (Prozentsatz aufeinanderfolgender RR-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen) benutzt. Als Standardmass für die parasympathische Aktivität ist der RMSSD-Wert für die Kurzzeitvariabilität besonders interessant, um den parasympathischen Einfluss auf die Regeneration und Körperentspannung zu betrachten (Franke-Gricksch, 2017; Sammito & Böckelmann, 2015).

1.4 Ziel der Arbeit

Mit dieser Arbeit soll herausgefunden werden, wie sich die physiologischen Parameter Herzfrequenz, Körperkerntemperatur und Herzfrequenzvariabilität mit steigender Erschöpfung verändern und welche dieser Parameter sinnvoll sind, um die körperliche Ermüdung und Überbelastung bei einem 100-km-Marsch zu messen? Diese Erkenntnisse sollen später dazu dienen,
Verletzungen oder einen Kollaps frühzeitig zu erkennen. Hierfür habe ich folgende konkrete
Forschungsfragen formuliert:

- a) Verändert sich die Herzfrequenz mit steigender Ermüdung beim 100-km-Marsch signifikant?
- b) Erhöht sich die Körperkerntemperatur mit steigender Ermüdung beim 100-km-Marsch signifikant?
- c) Verändert sich die Herzfrequenzvariabilität vor dem Marsch mit steigender Ermüdung beim 100-km-Marsch signifikant?

Ich stelle die Hypothese auf, dass die Teilnehmenden eines 100-km-Marsches mit steigender Müdigkeit keine signifikant erhöhten Herzfrequenzen aufweisen, jedoch steigt die Körperkerntemperatur signifikant an. Weiter erwarte ich, dass die Herzfrequenzvariabilität im Vergleich zu vor dem Marsch eine signifikant stärkere sympathische Aktivität während und am Ende des Marsches aufweist.

2 Methode

2.1 Untersuchungsgruppe

Es nahmen achtzehn Wachtmeister (Geschlecht: 1 weiblich/17 männlich; Alter: 22.7 ± 3.9 Jahre; Grösse: 1.75 ± 0.06 m; Gewicht: 77.98 ± 10.92 kg) der Schweizer Armee an der Untersuchung teil. Die Wachtmeister waren alle Offiziersaspiranten und Teil der Offiziersschule Genie/Rettung/ABC in Bremgarten (G/Rttg/ABC OS 74-2/2021). Keiner der Aspiranten hatte im Vorfeld Herzprobleme oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen und keiner nahm weder akute noch chronische Medikamente zu sich. Vier Teilnehmende hatten wiederkehrende Verletzungen oder körperliche Beschwerden. Dazu gehörte eine Überlastung des rechten Knies, eine Zehrung/Prellung und Entzündung des Schlüsselbeins, Schmerzen in der Wade und am Schienbein und Schmerzen im linken Bein. Nur bei einem Teilnehmenden war die Beschwerde für den 100-km-Lauf störend (Zehrung/Prellung und Entzündung des Schlüsselbeins). Sechzehn der Teilnehmenden haben sich vor dem Einrücken in die Armee regelmässig körperlich betätigt oder Sport gemacht (mindestens 1 bis 3 Stunden pro Woche), wobei vier davon viel bis sehr viel Sport getrieben haben (5 bis 12 Stunden pro Woche). Zwei Teilnehmende haben gar keinen Sport gemacht oder sich nur sehr wenig körperlich betätigt. Eine Übersicht über die demografischen und anthropometrischen Daten sind in der Tabelle 2 aufgelistet.

 Tabelle 2

 Demografische und Anthropometrische Daten der Teilnehmenden

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Alle Gruppen
n	6	6	6	18
Alter (Jahre)	22.3 ± 1.0	24.3 ± 6.7	21.5 ± 0.8	22.7 ± 3.9
Grösse (m)	1.75 ± 0.06	1.73 ± 0.06	1.77 ± 0.06	1.75 ± 0.06
Gewicht (kg)	81.78 ± 17.05	72.62 ± 5.19	79.53 ± 5.75	77.98 ± 10.92
BMI (kg/m ²)	26.6 ± 4.3	24.1 ± 1.5	25.5 ± 2.6	25.4 ± 3.0
Sport (h/Woche)	2.1 ± 1.1	4.8 ± 3.1	4.5 ± 3.4	3.8 ± 2.8

Anmerkung. Werte in Mittelwert \pm Standardabweichung. BMI = Body-Mass-Index. Sport = Sport und Bewegungsverhalten vor dem Einrücken in die Armee. m = Meter. kg = Kilogramm. kg/m² = Kilogramm pro Quadratmeter. h = Stunde. n = Anzahl Teilnehmende.

2.2 Design der Studie

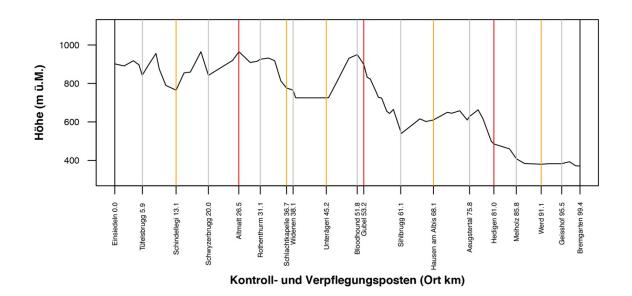
Die Datenerhebung startete am 8.11.2021, zwei Wochen vor dem Marsch, mit der Aufnahme allgemeiner Informationen (Alter, Sprache), der anthropometrischen Daten (Grösse, Gewicht, Brustumfang) sowie der Befragung der Teilnehmenden über ihre Gesundheit, das Bewegungsverhalten und Verletzungen im Vorfeld und während des Militärdienstes. Dafür wurde ein Codebook mit Fragen und Antwortmöglichkeiten verwendet.

Am Mittwochvormittag, 24.11.2021 wurden die Teilnehmenden etwa vier Stunden vor dem geplanten Start des Marsches mit den, für die Messungen nötigen Sensoren und Materialien, ausgerüstet und für die Montierung und Installation, sowie Nutzung an deren Körper instruiert. Es wurden dabei fünf verschiedene Sensoren für die Messungen der verschiedenen Parameter abgegeben. Die Sensoren wurden im Vornherein mit den nötigen Einstellungen, welche im nächsten Abschnitt genauer erläutert werden, für die Nutzung am Marsch vorbereit und auf ihre Funktionalität überprüft. Nachdem die Sensoren an den Teilnehmenden angebracht waren, wurden sie ein weiteres Mal auf ihre Funktionalität überprüft. Danach wurde die Truppe in den Mittag entlassen. Kurz vor dem Start des Marsches (ab 30 Minuten vor dem Start) wurde die Installation und Funktion der Geräte ein drittes Mal überprüft, um eine möglichst lückenlose Datenerhebung über die ganze Marschdauer gewährleisten zu können.

Um 14:00 Uhr startete die *G/Rttg/ABC OS 74-2/2021* der Schweizer Armee zu ihrem 100-km-Marsch von Einsiedeln SZ nach Bremgarten AG. Die Aspiranten absolvierten den Marsch in drei Gruppen (Gruppe 1: 6 Teilnehmende; Gruppe 2: 6 Teilnehmende, Gruppe 3: 6 Teilnehmende) mit einem Startintervall von 2 Minuten (Gruppe 1: 14:00 Uhr; Gruppe 2: 14:02 Uhr; Gruppe 3: 14:04 Uhr).

Der Marsch hatte eine Horizontaldistanz von 90 km. Nach Einberechnung der Höhendifferenzen wurden die Leistungskilometer ermittelt, welche 99.4 km betrugen. Diese Leistungskilometer waren für die weiteren Berechnungen und Messungen ausschlaggebend. Die Route beinhaltete insgesamt siebzehn Posten, davon acht Verpflegungsposten und neun weitere Kontrollposten (Abbildung 1). Diese hatten ähnliche Distanzen zueinander (Mittelwert der Abstände: 5.5 ± 1.90 km). Während die Kontrollposten nur für die Sicherheit und Aufnahme der Zeit geplant und installiert wurden, waren die Verpflegungsposten als kurze Pausen von zirka 5 Minuten gedacht, wobei drei Posten als 20-Minuten-Pausen für die Hauptmahlzeiten eingeplant waren. Bei allen Posten wurde die genaue Ankunfts- und Startzeit aufgenommen.

Abbildung 1Höhenprofil des 100-km-Marsches von Einsiedeln SZ nach Bremgarten AG



Anmerkung. Höhenprofil der 100-km-Marschstrecke mit Kontroll- und Verpflegungsposten. M ü. M. = Meter über Meer. km = Kilometer.

2.3 Untersuchungsinstrumente

Für die Untersuchung wurde der Fokus auf die Parameter Herzfrequenz, Körperkerntemperatur und Herzfrequenzvariabilität gelegt. Für die Aufzeichnung dieser Parameter während des 100-km-Marsches wurden aktuelle Geräte und Instrumente auf dem höchsten Stand der Technik verwendet. Bei der Auswahl der Instrumente musste auf die grosse Distanz und somit die lange Dauer des Erfassungszeitraumes geachtet werden. Einerseits sollten möglichst viele Daten lückenlos und korrekt aufgezeichnet werden. Andererseits sollten die Teilnehmenden nicht unnötiges Gewicht und unbequeme Instrumente an sich tragen, die sie bei der Ausübung des Marsches stören und negativ beeinflussen.

2.3.1 Polar H10 mit Polar Vantage V2

Für die Messung der Herzfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität trugen die Teilnehmenden den Polar Brustgurt mit dem Sensor *Polar H10* in Kombination mit der Uhr *Polar Vantage V2* als Datenlogger.

Der Brustgurt mit dem Sensor *Polar H10* kann für die Messung der RR-Intervalle und somit für die Ermittlung der Herzfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität als Goldstandart bezeichnet werden (Gilgen-Ammann et al., 2019; Polar, 2021). Mit seiner störungsfreien elektrischen Messung über Elektroden und der Erfassung der Herzfrequenzdaten für jede Sekunde, garantiert er eine Messung mit hoher Präzision bei Ruhezustand, sowie bei gemässigten wie auch sehr intensiven Trainings. Diese Messungen erreichen die Genauigkeit eines Elektrokardiogramms (EKG). Alle RR-Intervalle werden in Millisekunden (ms) erfasst. Der *Polar H10* lässt sich auch gut mit Gruppen benutzen, ohne dass sich die Sensoren gegenseitig stören. Dies ermöglichte die Benutzung in der Truppe und in der Marschgruppe (Hinde et al., 2021). Ausserdem war er mit seiner Batterielaufzeit und seiner internen Speicherkapazität von bis zu 30+ Stunden gut für den Einsatz beim 100-km-Marsch geeignet (Polar, 2021).

Im Vorfeld des Marsches wurden alle *Polar H10* Sensoren mit neuen Batterien (CR 2025) ausgestattet und von allen Rest-Speicherdaten von früheren Trainingseinheiten gereinigt. Dann wurden die Sensoren mit einer Klebeetikette nummeriert und mit der passenden, ebenfalls nummerierten Uhr *Polar Vantage V2* über die App *Polar Flow* gekoppelt.

Die gekoppelte und als Armbandempfänger fungierende Uhr *Polar Vantage V2* diente als Datenlogger. Ausserdem konnte man mit ihr die Einheit starten und stoppen und die Daten abrufen.

Auch hier wurden im Vorfeld des Marsches alle Akkus der Uhren aufgeladen und alle Restdaten auf den Uhren gelöscht und zurückgesetzt. Ein wichtiger Schritt für die spätere Nachverfolgbarkeit der gemessenen Daten des Brustgurtes war die sekundengenaue Einstellung der Uhrzeit und des Datums bei den Uhren. Ohne diese sekundengenaue Einstellung, hätte man bei der Erkennung und Zuordnung des Marsch-Starts Probleme gehabt. Ausserdem wurde an allen Uhren die Energiespareinstellung eingeschaltet, welches zum Beispiel die Pulsmessung am Handgelenk ausschaltet und den Bildschirmschoner verwendet. Somit wurde der Akkuverbrauch reduziert und optimiert, damit die Laufzeit der Uhr über die volle Distanz des 100-km-Marsches gewährleistet war.

Die Instruktion an die Teilnehmenden für das Anlegen des Brustgurtes und des Sensors *Polar H10* geschah nach Anleitung des Herstellers. Der Elektrodenbereich des Gurtes musste befeuchtet werden und anschliessend um die Brust, leicht unterhalb der Brustwarzen gelegt und befestigt werden. Danach befestigte man die Sensoren an die Gurte.

Die Armbanduhr *Polar Vantage V2* wurde von den Teilnehmenden am linken oder rechten Handgelenk getragen.

2.3.2 Polar Verity Sense

Die Teilnehmenden trugen mit dem Pulssensor *Polar Verity Sense* einen weiteren Herzfrequenzsensor. Beim Polar Verity Sense handelt es sich um einen hochwertigen optischen Pulsmesser, der gut als Alternative zum Brustgurt oder Pulsuhren eingesetzt werden kann. Optische Herzfrequenzmesser funktionieren mit einem LED-Licht, welches über die Hautoberfläche die Blutgefässe durchleuchten. Das Licht wird je nach Blutvolumen absorbiert oder reflektiert. Somit erkennt der Sensor die Veränderung des Blutvolumens und kann daraus die Herzfrequenz ableiten (Nystrom, 2021). Der Vorteil dieses Sensors liegt an der flexiblen und einfachen Montierung mittels eines Armbands oder einer Klammer an einer freien Hautstelle und der sehr grossen Bewegungsfreiheit. Er kann deshalb bei verschiedensten Sportarten benutzt werden. Neben der Herzfrequenz kann auch die Distanz und das Tempo gemessen werden (Polar, 2022). Dank seinem Speicher von bis zu 600 Stunden Trainingsdaten und der Akkulaufzeit von bis zu 30 Stunden am Stück, eignete sich der Polar Verity Sense gut für den 100-km-Marsch für die Ermittlung der Herzfrequenz über die gesamte Dauer. Der Sensor erfasste während dem Marsch die Herzfrequenz für jede Sekunde, analog des Brustgurtsensors.

Vor dem Marsch wurden auch hier alle Akkus der Sensoren aufgeladen, von eventuell vorhandenen Daten gereinigt, mit einer Etikette nummeriert und mittels dem App *Polar Flow* in das passende Profil mit dem vorhandenen Brustgurtsensor *Polar H10* und der Uhr *Polar Vantage V2* integriert. Der Sensor wurde bei den Teilnehmenden am linken Oberarm mit dem Armband befestigt.

2.3.3 greenTEG Calera Research

Für die Messung der Körperkerntemperatur wurde der Sensor *greenTEG Calera Research* verwendet. Dieser kleine und wasserfeste Sensor ermöglicht eine hochpräzise und nicht-invasive Messung der Körperkerntemperatur mit einer Genauigkeit von ± 0.56 °C. Die Körperkerntemperatur wird indirekt anhand eines firmeninternen Algorithmus und über Hauttemperatur und Wärmetransfermessungen indirekt berechnet (greenTEG, 2022a). Dazu misst der Sensor auch noch die Herzfrequenz und die Beschleunigung in den Achsen x, z und y. Der Sensor ist durch äusserliche thermische Einflüsse von der Umgebung nicht beeinflussbar. Dank seiner Batterielauf- und Sendezeit von bis zu sechs Tagen am Stück (greenTEG, 2022b), eignete sich der Sensor gut für den 100-km-Marsch. Die Körperkerntemperatur wurde während dem Marsch für jede Sekunde erfasst.

Der Sensor von *greenTEG Calera Research* wurde vor dem Marsch geladen und mit der hauseigenen Software neu formatiert. Alle Sensoren wurden mit einer Nummer beschriftet und an den passenden Polar Brustgurt angebracht. Bei den Teilnehmenden wurde der Sensor am Brustgurt, nach den Vorgaben des Herstellers, seitlich links der Brust platziert.

2.4 Analysen und Auswertungen der Daten

Zu Beginn der Untersuchung war die Art und Weise der Auswertung und der genauen Methode für die Analyse der Daten noch nicht abschliessend definiert. Damit jede Auswertungsmöglichkeit offen bleibt, wurde eine enorme Datenmemenge erfasst. So wurden Daten für jede Sekunde über einen Zeitraum von über 24 Stunden, und bis zu 27 Stunden für jeden Parameter aufgezeichnet. Da in der aktuellen Literatur nur sehr wenige vergleichbare Methoden für die Analyse dieser Parameter während der Ausdauerleistung über einen so langen Zeitraum im Bezug zu einem vergleichbaren Thema vorhanden waren, musste im Prozess der Auswertung immer wieder nach dem Prinzip des Versuchs und Irrtums (Lauth & Sareiter, 2005) gearbeitet werden. Durch diesen iterativen Ansatz konnte man im Prozess immer genauer erkennen, welche Methoden für eine sinnvolle Aussage und für diesen langen Untersuchungszeitraum in Frage kommen. Dies betraf vor allem die sinnvolle Strukturierung der Daten, die Reduzierung und Zusammenfassung der Daten auf geeignete Mittelwerte (Mittelwerte der Werte für wie viele Minuten) und die Aufteilung der Daten in sinnvolle Zeit- oder Distanzabschnitte des 100-km-Marsches, die man miteinander vergleichen konnte.

2.4.1 Vorbereitung, Sortierung und Reinigung der Daten

Die erhobenen Daten wurden mittels den jeweiligen firmeninternen Softwareprogrammen *Polar Flow* (Polar Electro Europe AG, Kempele, Finnland) und *CALERAresearch* (greenTEG AG, Rümlang ZH, Schweiz) von den Messgeräten auf einen Computer heruntergeladen und als Excel-Dokumente (Microsoft Corporation, Redmond WA, Vereiniget Staaten von Amerika) ausgegeben. Für jeden der Teilnehmenden existierte somit für jedes getragene Messgerät ein Excel-Dokument mit den vom Gerät erhobenen Daten. Diese Excel-Dokumente wurden in einem Ordner nach Messgeräten und den erhobenen Parameter geordnet und sortiert. Somit hatte man jeweils einen Ordner mit allen Excel-Dokumenten der Teilnehmenden für die Herzfrequenzen vom *Polar H10 mit Vantage V2*, die Herzfrequenzen vom *Polar Verity Sense*, die RR-Intervalle vom *Polar H10 mit Vantage V2* und die Körperkerntemperaturen vom *greenTEG Calera Research* als Rohdaten.

Weil die Daten für den Zeitraum vor, während und nach dem Marsch erfasst wurden, hatte man Daten über einen Zeitraum von bis zu 27 Stunden. Dank den detailliert erfassten Marschzeiten für jeden Kontrollabschnitt und den genau eingestellten Uhrzeiten bei den Messgeräten (Zeitstempel), konnten die relevanten erhobenen Datenabschnitte wie die Start-, Pausen- und Endzeiten ermittelt werden.

Da in drei Gruppen marschiert wurde, wurden die Rohdaten-Dokumente der Teilnehmenden in verschiedene Ordner nach Gruppen sortiert. Nun wurden neue Excel-Dokumente pro Gruppe und Parameter erstellt, welche nur die relevanten Daten drin haben, und die als Ausgangsdaten für die statistische Analyse im Statistikprogramm verendet werden können. Nebst den, für die Untersuchung relevanten Daten, waren in den Rohdaten-Dokumenten viele weitere Daten vorhanden, die nicht benötigt wurden. Die für die Untersuchung relevanten Daten, waren nebst den Zeitstempeln, die Werte der Herzfrequenzen in Schläge pro Minute (beats per minute = bpm), der RR-Intervalle in Millisekunden (ms) und der Körperkerntemperaturen in Grad Celsius (°C). Diese wurden auf den Zeitraum des Marsches beschränkt, aus den Rohdaten-Dokumenten entnommen und in die neuen Excel-Dokumente eingefügt. Somit hatte man saubere Excel-Dokumente pro Gruppe und Parameter, die für die Weiterverarbeitung im Statistikprogramm geeignet waren.

Die weiteren Manipulationen der Daten und ihre Auswertung wurde mit dem Programm für Statistik *RStudio* (RStudio Public Benefit Corporation PBC, Boston MA, Vereinigte Staaten von Amerika) gemacht. Hierfür wurden die vorbereiteten Excel-Dokumente der jeweiligen Parameter und Gruppe in *R Studio* importiert. Da nach dem Import die Zeitstempel nicht mit dem korrekten Datum verbunden waren, mussten diese mit dem korrekten Datum angepasst und verbunden werden. Somit konnte man die vielen Daten korrekt manipulieren und in Zeitabschnitte filtern.

Der Reinigung der Daten von fehlenden und unmöglichen Werten wurde besonderes Augenmerk gewidmet. Es wurden alle fehlenden Daten gesucht und als NA-Werte (für «not available») ohne gültigen Wert festgelegt. Nicht mögliche Werte wurden ebenfalls in NA-Werte ohne Wert umgewandelt. Als «nicht mögliche Werte» wurden einerseits zu grosse Veränderungen zwischen aufeinanderfolgende Werte definiert. Andererseits galten auch Ausreisser, die die möglichen Maximal- und Minimalwerte über- beziehungsweise unterschritten, als nicht mögliche Werte. Bei den Herzfrequenzen wurden somit aufeinanderfolgende Werte mit einer Differenz von > 20 bpm nach oben und unten als unmögliche Werte definiert (Goldberger et al., 2013). Werte unter 50 und über 240 bpm galten ebenfalls als unmögliche Werte. Für die

Reinigung von Artefakten bei der Körperkerntemperatur konnte keine geeignete Literatur gefunden werden. Somit wurden aufeinanderfolgende Werte auf eine Differenz > 0.1 °C nach oben und unten kontrolliert und als unmöglich definiert. All diese Werte wurden in NA-Werte umgewandelt. Somit konnten keine Mittelwerte beeinträchtigt und von falschen Werten verfälscht werden.

Bei den RR-Intervallen galten aufeinanderfolgende Werte, die 20 % nach oben oder unten abwichen, als unmöglich und wurden ganz entfernt (Karey et al., 2019; Malik, 1996). Diese Bearbeitung musste jeweils viermal auf die Daten angewendet werden, um unmögliche RR-Intervalle für den jeweiligen Zeitraum für die Analyse zu entfernen. Vergleicht man diese Methode mit den Korrekturmethoden der Software *Kubios* für die Verarbeitung von Herzfrequenzvariabilitätsdaten, kann man feststellen, dass den meisten Werten ein Schwellenwert zwischen 250 und 150 Millisekunden (ms) zugeordnet werden kann, und somit eine mittlere bis starke Korrekturstufe erreicht wird (Kubios, 2022). Zusätzlich wurden die Daten visuell mit Hilfe von Liniendiagrammen und der Maximal- und Minimalwerte kontrolliert. Schliesslich hatte man für die statistische Datenauswertung die gereinigten Daten für alle Parameter im *RStudio* bereit.

2.4.2 Deskriptive «Overall-Analyse»

Als erstes wurde eine deskriptive «Overall»-Analyse für die Herzfrequenzen vom Brustgurt *Polar H10 mit Vantage V2* und dem *Polar Verity Sense* und die Körperkerntemperatur über die gesamte Zeitdauer des 100-km-Marsches gemacht. Die in einem ersten Schritt zusammengetragenen, sortierten und gereinigten Daten der einzelnen Parameter wurden für jeden Teilnehmer mittels Mittel-, Maximal- und Minimalwert über den gesamten Zeitraum des Marsches beleuchtet. Dann wurden die Mittelwerte ± Standartabweichungen, sowie die Maximal- und Minimalwerte mit und ohne Pausen der drei Gruppen ermittelt. Anhand der gewonnenen Übersicht über die Daten wurde untersucht, welche Veränderungen und Trends bei den Verläufen der verschiedenen Parameter bei den einzelnen Teilnehmern und in der Gruppe im Verlauf des 100-km-Marsches ersichtlich waren. Hierfür wurden in *R Studio* Liniendiagramme erstellt, welche die Werte über den gesamten Zeitraum des Marsches visualisierten. Dafür wurden die Mittelwerte pro Minute in für die jeweiligen Gruppen benutzt. Diese erste Analyse sollte einen sauberen Verlauf der Daten während des 100-km-Marsches ermöglichen und erste Erkenntnisse über die gewonnenen Daten ermöglichen. Dank des Gesamtüberblickes ist erkennbar, dass die Zeitstempel der Daten mit den erfassten Marschzeiten übereinstimmten, bei der Datenerhebung

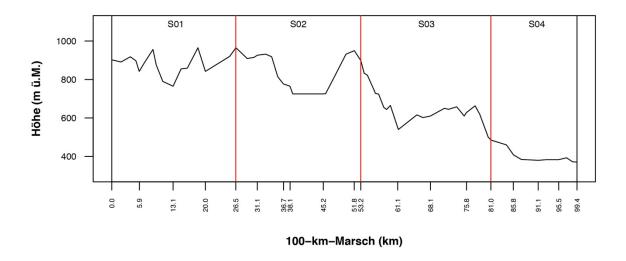
sinnvolle und richtige Daten erfasst wurden und die Säuberung von ausschweifenden und unmöglichen Daten erfolgreich war.

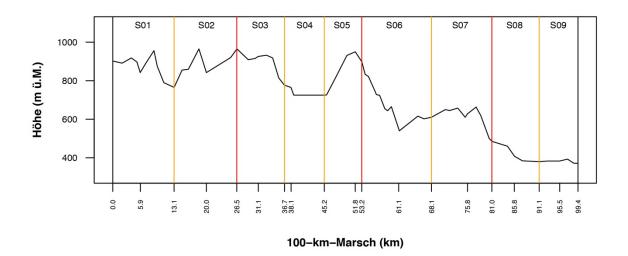
2.4.3 Statistische Analyse: Vergleich der Parameter zwischen Marschsektoren

Für eine genauere Betrachtung der Marsch-Daten wurden die einzelnen Parameter über verschiedene Zeitabschnitte (Sektoren) des 100-km-Marsches untersucht und miteinander verglichen. Mittels dem Prinzip des Versuchs und Irrtums (Lauth & Sareiter, 2005) wurden die sinnvollen Sektoren für die statistische Analyse ermittelt. Die Marschzeiten wurden schlussendlich anhand den erfassten Kontroll- und Verpflegungsposten aufgeteilt, weil nur so die erhobenen Daten über die drei Gruppen und nach Kilometern möglich war. Es gab 18 Sektoren (Mittelwert \pm Standardabweichung der Abstände: 5.5 ± 1.90 km), für die man die Datensätze für die statistische Analyse miteinander vergleichen konnte. Die relativ kleinen Sektoren hätten Varianzanalysen mit 18 Messwiederholungen erfordert, was den Überblick und Aussagen erschwert hätten. Die Analyse der Parameter zwischen neun Marschsektoren (Mittelwert ± Standardabweichung der Abstände: 11.0 ± 2.6 km) erschien als sinnvoller, um einen guten Überblick behalten zu können und trotzdem genügend detailliert, um sinnvolle Aussagen und Vergleiche mit unter anderem dem Höhenprofil oder der Marschgeschwindigkeit machen zu können. Zusätzlich wurden die Parameter noch zwischen vier grösseren Marschsektoren (Mittelwert ± Standardabweichung der Abstände: 24.8 ± 4.4 km) verglichen, wobei man grobe Trends erkennen sollte. Zusammenfassend wurden somit für die Analyse die Parameter in vier und neun Sektoren statistisch miteinander verglichen (Abbildung 2).

Zuerst wurde die Normalverteilung der zu untersuchenden Daten (Herzfrequenz und Körperkerntemperatur) mit dem Shapiro-Wilk-Test berechnet (*p < 0.05) und zusätzlich mit den Signifikanzkriterien der Schiefe (Skewness; *skewSE > 1) und Wölbung (Kurtosis; *kurtSE > 1) ermittelt (RDocumentation, 2022). Danach wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen für die Daten der verschiedenen Zeitabschnitte des Marsches berechnet. Bei Normalverteilung wurde anschliessend mit der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA-Test) ermittelt, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Marsch-Sektoren gab. Das Signifikanzniveau (α) wurde auf *p < 0.05 festgelegt. Die Erfüllung der Sphärizität wurde mit dem Mauchly-Test ermittelt (*p < 0.05). Bei Nichterfüllung der Sphärizität wurde eine Sphärizitätskorrektur nach Greenhouse-Geiser (bei Epsilon von Greenhouse-Geisser \mathcal{E} < 0.75) oder Huynh-Feldt (bei Epsilon von Greenhouse-Geisser \mathcal{E} > 0.75) gemacht (Methodenberatung Universität Zürich, 2022).

Abbildung 2Höhenprofil mit der Aufteilung in vier und neun Sektoren für die Varianzanalyse





Anmerkung. Aufteilung in Sektoren S01 bis S04 und S01 bis S09 zwischen den jeweiligen Verpflegungsposten. Die orangen Linien markieren die kurzen Pausen (< 13 min) und die roten Linien die längeren Pausen (mindestens 20 min).

2.4.4 Analyse des Physiological Strain Index (PSI)

Analog zu den Herzfrequenzen und Körperkerntemperaturen wurde auch für die Werte des PSI eine deskriptive «Overall»-Analyse gemacht. Der Wert des PSI wurde dafür für jede Sekunde aus den Herzfrequenzen HF(t) und Körperkerntemperaturen T_{core}(t) berechnet. Die originale Formel von Moran et al. (1998) für die Berechnung des PSI wurde dafür leicht angepasst. Als Ruhe-Wert der Körperkerntemperatur T_{core}(0) wurde die Körperkerntemperatur beim Start des jeweiligen Teilnehmers benutzt. Weil keine klar erkenntlichen Ruheherzfrequenzen HF(0) der einzelnen Teilnehmenden gemessen wurden und vorhanden waren, wurde für die PSI-Formel einen fixen Wert von 71 °C nach Buller et al. (2008) und Cuddy et al. (2013) für alle Teilnehmenden benutzt. Somit lautete die angepasste Formel zur Berechnung der PSI-Werte:

$$PSI = 5 \times \frac{T_{core}(t) - T_{core}(0)}{39.5 - T_{core}(0)} + 5 \times \frac{HF(t) - 71}{180 - 71}$$

Aus den PSI-Werten wurden dann die Mittelwerte ± Standardabweichungen, Maximal- und Minimalwerte inklusive und exklusive Pausen für alle 3 Gruppen ermittelt. Weiter wurden Liniendiagramme für jede Gruppe erstellt, die den Verlauf der PSI-Werte über die ganzen 100 km zeigen. Dafür wurden die Mittelwerte des PSI für jede Minute benutzt.

Für die statistische Analyse wurden ebenfalls die Mittelwerte des PSI für jede Minute benutzt. Es wurde, wie zuvor bei den Herzfrequenzen und den Körperkerntemperaturen, auch hier die Mittelwerte zuerst zwischen vier und dann zwischen neun Marschsektoren (Abbildung 2) mittels Varianzanalyse mit Messwiederholung verglichen. Für die statistische Analyse galten dabei dieselben Kriterien und Abläufe wie unter Punkt 2.4.3.

2.4.5 Analyse der Herzfrequenzvariabilität

Die Rohdaten für die Analyse der Herzfrequenzvariabilität waren die RR-Intervalle von den einzelnen Teilnehmenden. Da keine Zeitstempel bei den Rohdaten vorhanden, sondern nur die Anfangszeiten der Aufzeichnungen bekannt waren, musste man für die Datenübernahme in das Programm *R Studio* die RR-Intervalle, welche in Millisekunden erfasst waren, zuerst in Sekunden umwandeln, und dann ausgehend von der Anfangszeit nacheinander zur Uhrzeit aufsummieren. Somit hatte man zusätzlich zu den RR-Intervallen die passenden Zeiten, die für die Filterung in verschiedene Zeitabschnitte nötig war.

Für die Analyse der Herzfrequenzvariabilität wurde das RMSSD-Verfahren gewählt. Dafür wurden die RR-Intervalle jeweils in einem Zeitraum von 5 min in möglichst ruhender Phase

erfasst was sich für die Analyse mit dem RMSSD-Verfahren bewährt hat (Franke-Gricksch, 2017; Niedermeier et al., 2017; Sammito & Böckelmann, 2015; Shaffer & Ginsberg, 2017). Die Zeitpunkte der Erfassung der RR-Intervalle war somit 2 Stunden vor dem Marsch (RMSSD Pre), in der ersten Pause 10 Minuten nach Beginn der Pause bei 26.5 km (RMSSD 1), in der zweiten Pause 10 Minuten nach Beginn der Pause bei 51.2 km (RMSSD 2), in der dritten Pause 10 Minuten nach Beginn der Pause bei 81.0 km (RMSSD 3) und 5 min nach dem Ende des Marsches (RMSSD End). Zusätzlich wurden die RR-Intervalle für die ganze Marschdauer berechnet (RMSSD Full).

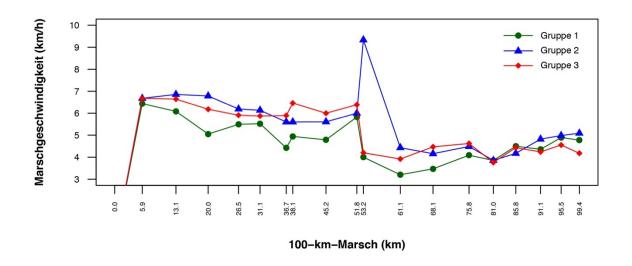
Bei der statistischen Analyse wurden die Mittelwerte der RMSSD der verschiedenen Zeitpunkte der Erfassung mittels einfaktorieller Varianzanalyse mit Messwiederholung auf signifikante Unterschiede untersucht. Die Normalverteilung wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test (*p < 0.05) und den Signifikanzkriterien der Schiefe (*skew.2SE > 1) und Wölbung (*kurt.2SE > 1) ermittelt. Anschliessend wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen für die einzelnen Zeitpunkte berechnet, und bei Normalverteilung der ANOVA-Test ausgeführt, bei dem das Signifikanzniveau (α) bei *p < 0.05 lag. Zusätzlich wurde die Sphärizität mit dem Mauchly-Test (*p < 0.05) abgeklärt, und bei Nichterfüllung nach Greenhouse-Geiser (\mathcal{E} < 0.75) oder Huynh-Feldt (\mathcal{E} > 0.75) korrigiert.

3 Resultate

3.1 Resultate Deskriptive «Overall-Analyse»

Gestartet wurde beim Kloster Einsiedeln auf 902 Meter über Meer (m ü. M.). Die Teilnehmenden mussten insgesamt einen Aufstieg von 936 m und einen Abstieg von 1466 m überwinden, um das Ziel in Bremgarten Siechenhaus auf 371 m ü. M. zu erreichen. Die Gruppe 1 hatte eine aktive Marschzeit von 21 h 43 min, insgesamt 122 min Pausen und war mit einer mittleren Geschwindigkeit von 4.58 km/h unterwegs. Die Gruppe 2 marschierte 18 h 57 min, hatte 88 min Pausen und eine mittlere Geschwindigkeit von 5.25 km/h. Die Marschzeit, Pausen und mittlere Geschwindigkeit der Gruppe 3 war 19 h 33 min, 108 min und 5.08 km/h. Der Verlauf der Geschwindigkeiten für die drei Gruppen werden in der Abbildung 3 gezeigt und die detaillierten Ablauf- und Ankunftszeiten, sowie die Gesamtzeiten in der Tabelle 3 und 4 dargelegt.

Abbildung 3 *Marschgeschwindigkeiten aller Gruppen während dem 100-km-Marsch*



Anmerkung. Marschgeschwindigkeiten in den jeweiligen Abschnitten der Gruppe 1 (grün + Kreis), Gruppe 2 (blau + Dreieck) und Gruppe 3 (rot + Diamant). km/h = Kilometer pro Stunde. km = Kilometer.

Tabelle 3 *Abmarsch- und Ankunftszeiten bei den Kontroll- und Verpflegungsposten*

	Distanz (km)	Gruppe 1 Zeiten (hh:mm)	Gruppe 2 Zeiten (hh:mm)	Gruppe 3 Zeiten (hh:mm)
Start	0.0	14:00	14:02	14:04
Kontrollposten 1	5.9	14:55	14:55	14:57
Posten 2 Verpflegung	13.1	16:06 16:09	15:58 15:59	16:02 16:05
Kontrollposten 3	20.0	17:31	17:00	17:12
Posten 4 Verpflegung	26.5	18:42 19:06	18:03 18:23	18:18 18:41
Kontrollposten 5	31.1	19:56	19:08	19:28
Posten 6 Verpflegung	36.7	21:12 21:23	20:08 20:12	20:25 20:37
Kontrollposten 7	38.1	21:40	_	20:50
Posten 8 Verpflegung	45.2	23:09 23:18	21:43 21:47	22:01 22:07
Kontrollposten 9	51.8	00:26	22:53	23:09
Posten 10 Verpflegung	53.2	00:47 01:16	23:02 23:23	23:29 23:56
Kontrollposten 11	61.1	03:44	01:10	01:57
Posten 12 Verpflegung	68.1	05:45 05:58	02:51 03:01	03:31 03:42
Kontrollposten 13	75.8	07:51	04:44	05:22
Posten 14 Verpflegung	81.0	09:12 09:37	06:05 06:31	06:45 07:07
Kontrollposten 15	85.8	10:41	07:40	08:12
Posten 16 Verpflegung	91.1	11:54 12:02	08:46 08:48	09:27 09:31
Kontrollposten 17	95.5	12:56	09:41	10:29
Ziel	99.4	13:45	10:27	11:25

Anmerkung. Die Tabelle zeigt die genauen Abmarsch- und Ankunftszeiten für jede Gruppe bei jedem Kontrollposten mit Distanz. hh:mm = Stunden:Minuten. km = Kilometer.

Tabelle 4Gesamtzeiten und Geschwindigkeit über den gesamten 100-km-Marsch

	Distanz (km)	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Marschzeit (hh:mm)	99.4	21:43	18:57	19:33
Total Pausen (hh:mm)	99.4	02:02	01:28	01:48
Total Zeit (hh:mm)	99.4	22:45	19:25	21:21
Marschgeschwindigkeit (km/h)	99.4	4.58	5.25	5.08

Anmerkung. hh:mm = Stunden:Minuten. km = Kilometer.

Die ausgerechneten Mittelwerte und Standartabweichungen, sowie die Minimal- und Maximalwerte für die mittleren, maximalen und minimalen Herzfrequenzen und Körperkerntemperaturen über die gesamte Distanz von 100 km wird in der Tabelle 5 dargestellt. Darin sind auch die Körperkerntemperaturen am Start der drei Gruppen enthalten.

Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen die Verläufe der Herzfrequenzen und der Körperkerntemperaturen der Gruppe 1, 2 und 3 über die gesamte Marschdauer mittels Liniendiagramm dar.

Die Linienverläufe der Herzfrequenzen von den drei Gruppen und die Linienverläufe der Körperkerntemperaturen von den drei Gruppen wurden in der Abbildung 7 in zwei neuen Liniendiagrammen übereinandergelegt.

 Tabelle 5

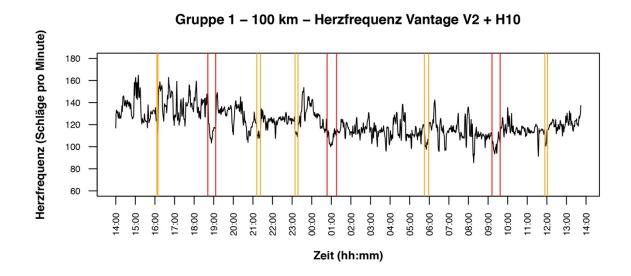
 Herzfrequenzen und Körperkerntemperatur während des 100-km-Marsches (exklusive Pausen)

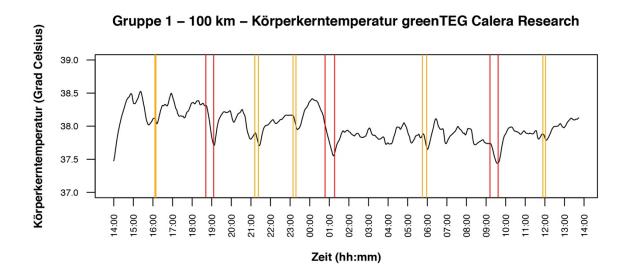
	M ± SD [Bereich: min, max]			
Polar H10+Vantage V2	Gruppe 1 (n = 6)	Gruppe 2 (n = 6)	Gruppe 3 (n = 6)	
HF Mittelwert (bpm)	123 ± 10 [109, 134]	128 ± 7 [115, 133]	$125 \pm 6 [120, 134]$	
HF Max (bpm)	$168 \pm 9 \ [155, 178]$	$176 \pm 9 [162, 188]$	177 ± 7 [166, 185]	
HF Min (bpm)	$66 \pm 11 [54, 85]$	78 ± 7 [68, 85]	$77 \pm 7 \ [63, 83]$	
HF Min (inkl. Pausen) (bpm)	66 ± 11 [54, 85]	$68 \pm 12 [53, 85]$	70 ± 5 [63, 76]	
Polar Verity Sense	Gruppe 1 (n = 6)	Gruppe 2 (n = 6)	Gruppe 3 $(n = 6)$	
HF Mittelwert (bpm)	123 ± 10 [109, 135]	128 ± 7 [115, 133]	126 ± 6 [120, 134]	
HF Max (bpm)	$169 \pm 10 [155, 180]$	$176 \pm 9 [163, 188]$	$176 \pm 8 [166, 185]$	
HF Min (bpm)	$69 \pm 13 \ [52, 86]$	$80 \pm 10 \ [63, 88]$	$77 \pm 8 \ [62, 84]$	
HF Min (inkl. Pausen) (bpm)	69 ± 13 [52, 86]	$67 \pm 15 [50, 84]$	$70 \pm 5 \ [62, 74]$	
greenTEG Calera Research	Gruppe 1 (n = 5)	Gruppe 2 (n = 5)	Gruppe 3 (n = 6)	
BCT Start (°C)	$37.5 \pm 0.1 [37.3, 37.6]$	$37.5 \pm 0.1 [37.3, 37.6]$	$37.4 \pm 0.1 [37.3, 37.6]$	
BCT Mittelwert (°C)	$38.0 \pm 0.2 [37.8, 38.4]$	$38.1 \pm 0.1 [37.9, 38.3]$	$38.0 \pm 0.1 [37.8, 38.2]$	
BCT Max (°C)	$38.6 \pm 0.3 \; [38.2, 39.0]$	$38.6 \pm 0.1 \; [38.5, 38.8]$	$38.5 \pm 0.2 [38.4, 38.9]$	
BCT Min (°C)	$37.4 \pm 0.1 \ [37.3, 37.6]$	$37.4 \pm 0.1 [37.1, 37.5]$	$37.3 \pm 0.0 [37.2, 37.4]$	
BCT Min (inkl. Pausen) (°C)	$37.3 \pm 0.1 [37.3, 37.6]$	$37.4 \pm 0.1 [37.1, 37.5]$	$37.3 \pm 0.0 [37.2, 37.4]$	

Anmerkung. Alle Werte wurden in Mittelwerte \pm Standardabweichungen (M \pm SD) mit dem Bereich vom Minimal- und Maximalwert [min, max] angegeben. Bei den Herzfrequenzen wurden die Werte für beide Aufzeichnungsinstrumente *Polar H10 mit Vantage V2* und *Polar Verity Sense* berechnet. HF Max = Maximale Herzfrequenz. HF Min = Minimale Herzfrequenz. bpm = Schläge pro Minute. BCT Max = Maximale Körperkerntemperatur. BCT Min = Minimale Körperkerntemperatur. $^{\circ}$ C = Grad Celsius. $^{\circ}$ n = Anzahl Teilnehmende.

Abbildung 4

Gruppe 1: Liniendiagramme der Herzfrequenz und Körperkerntemperatur über 100 km

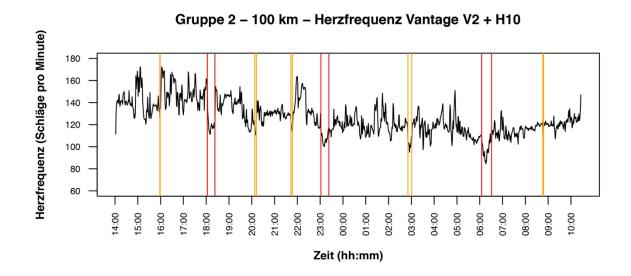


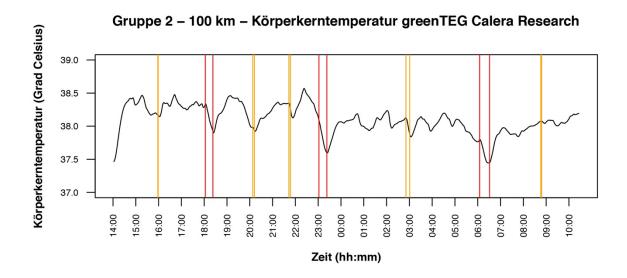


Anmerkung. Verlauf der Herzfrequenz und der Körperkerntemperatur über den gesamten 100-km-Marsch. Die Bereiche zwischen den orangen Linien stellen die kurzen Verpflegungspausen (< 13 min) und die Bereiche zwischen den roten Linien die längeren Verpflegungspausen (mindestens 20 min) dar. hh:mm = Stunden:Minuten. km = Kilometer.

Abbildung 5

Gruppe 2: Liniendiagramme der Herzfrequenz und Körperkerntemperatur über 100 km

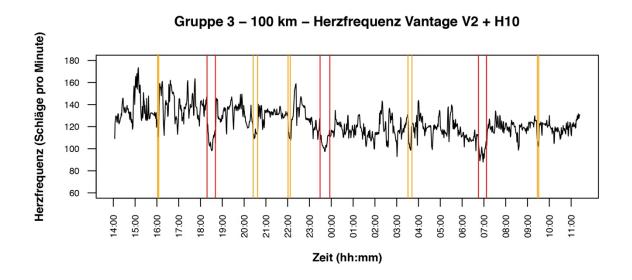


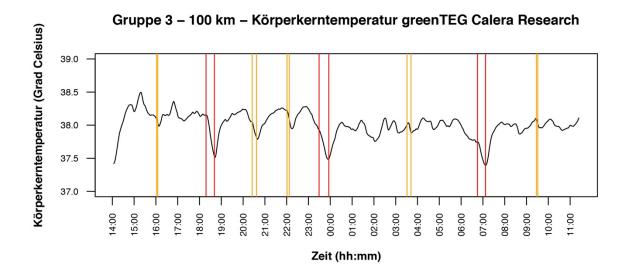


Anmerkung. Verlauf der Herzfrequenz und der Körperkerntemperatur über den gesamten 100-km-Marsch. Die Bereiche zwischen den orangen Linien stellen die kurzen Verpflegungspausen (< 13 min) und die Bereiche zwischen den roten Linien die längeren Verpflegungspausen (mindestens 20 min) dar. hh:mm = Stunden:Minuten. km = Kilometer.

Abbildung 6

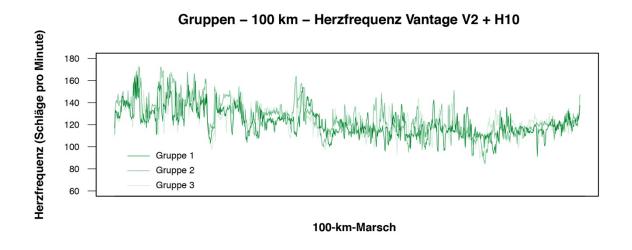
Gruppe 3: Liniendiagramme der Herzfrequenz und Körperkerntemperatur über 100 km

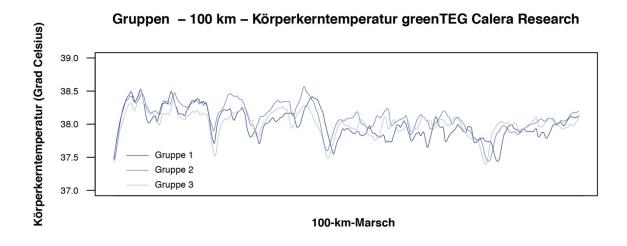




Anmerkung. Verlauf der Herzfrequenz und der Körperkerntemperatur über den gesamten 100-km-Marsch. Die Bereiche zwischen den orangen Linien stellen die kurzen Verpflegungspausen (< 13 min) und die Bereiche zwischen den roten Linien die längeren Verpflegungspausen (mindestens 20 min) dar. hh:mm = Stunden:Minuten. km = Kilometer.

Abbildung 7Liniendiagramme der Herzfrequenz und Körperkerntemperatur aller Gruppen über 100 km





Anmerkung. Verläufe der Herzfrequenzen und der Körperkerntemperaturen aller Gruppen über die gesamte Länge des Marsches zum Vergleich übereinandergelegt. Da die drei Gruppen die Distanzen in verschiedenen Marschgeschwindigkeiten absolviert haben, sind die Verläufe nicht genau deckungsgleich. km = Kilometer.

3.2 Resultate der Vergleiche zwischen Marschsektoren

3.2.1 Resultate der Herzfrequenzen zwischen vier Marschsektoren

Die erhobenen Daten der Herzfrequenzen waren bei der Aufteilung des Marsches in vier Sektoren über alle Gruppen normalverteilt. Die für die Normalverteilung berechneten Werte des Shapiro-Wilk-Tests, der Schiefe und der Wölbung (Tabelle 22), sowie das zur visuellen Darstellung erstellte Quantil-Quantil-Diagramm (Abbildung 16) sind im Anhang A aufgezeigt. Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ergab, dass sich die Mittelwerte der Herzfrequenzen der vier verschiedenen Marschsektoren nach den Sphärizitätskorrekturen (Mauchly-W = 0.383, p = 0.01 und Greenhouse-Geisser- \mathcal{E} = 0.614) statistisch signifikant unterscheiden, F(1.84, 31.32) = 128.75, p < 0.0001. Die berechneten Werte sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6Werte für ANOVA mit Messwiederholung für die Mittelwerte der Herzfrequenzen von vier Marschsektoren

		$M \pm SD$ [min, max]					
	S01	S02	S03	S04			
HF Mittelwert (bpm)	139 ± 10 [119, 155]	130 ± 9 [113, 142]	117 ± 8 [101, 128]	118 ± 7 [105, 127]			
	(<i>DFn</i> , <i>DFd</i>), <i>F</i> -Wert	Mauchly- <i>W</i> , <i>p</i> -Wert	GG <i>E</i> -Wert	GG <i>p</i> -Wert			
HF Mittelwert (bpm)	(1.84, 31.31), 128.75	0.383, *0.01	0.614	****p < 0.0001			

Anmerkung. M \pm SD = Mittelwert \pm Standardabweichung. [min, max] = Bereich vom Minimalund Maximalwert. F = F-Wert zur Bestimmung der ANOVA. DFn = Hypothesenfreiheitsgrade. DFd = Residualfreiheitsgrade. Sphärizitätkorrektur bei Mauchly-Test wenn p < 0.05. Sphärizitätskorrektur nach Greenhouse-Geisser (GG), wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} < 0.75$ oder Huyn-Feldt, wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} > 0.75$. Das Signifikanzniveau wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ****p < 0.001, ****p < 0.0001). HF = Herzfrequenz. bpm = Schläge pro Minute. Anzahl Teilnehmende: n = 18. Der Bonferroni-korrigierte Post-Hoc-Test zeigte, dass sich die Mittelwerte der Herzfrequenzen der vier Marschsektoren alle signifikant unterscheiden mit einem starken Effekt nach Cohen, ausser die von den zwei letzten Marschsektoren S03 und S04 nicht. Die Werte sind in der Tabelle 7 ersichtlich und der Box-Plot in der Abbildung 8 stellt die Resultate grafisch dar.

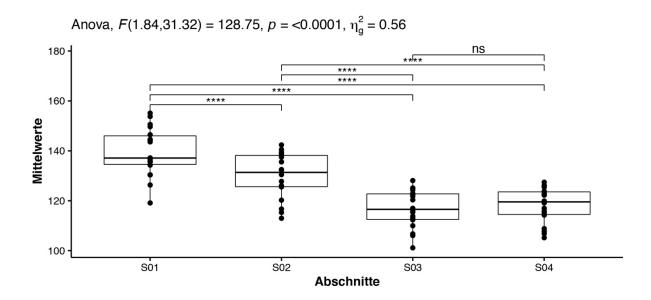
Tabelle 7Werte für den Bonferroni-post-hoc-Test für die Signifikanz und Cohen's d für die Effektstärke zwischen den vier Marschsektoren

Sektor 1	Sektor 2	n	Angepasster p-Wert	Fazit Signifikanz	Cohen's <i>d</i> -Wert (Effektstärke)
S01	S02	18	****p < 0.0001	S01 > S02****	2.17 (gross)
S01	S03	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S03****	3.47 (gross)
S01	S04	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S04****	2.84 (gross)
S02	S03	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S03****	2.86 (gross)
S02	S04	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S04****	1.94 (gross)
S03	S04	18	0.954	nicht signifikant	-0.35 (klein)

Anmerkung. Das Signifikanzniveau für Bonferroni wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ****p < 0.001, ****p < 0.0001). Einen Cohen's d-Wert von ± 0.20 entspricht einer kleinen, ± 0.50 einer mittleren und ± 0.80 einer grossen Effektstärke. S01 bis S04 = Marschsektoren 1 bis 4. n = Anzahl Teilnehmende.

Abbildung 8

Box-Plot der Resultate des Post-Hoc-Tests für die Mittelwerte der Herzfrequenzen



Anmerkung. Visualisierung der Resultate des Post-Hoc-Tests mittels Boxplot mit angepassten p-Werten anhand der Bonferroni-Korrekturmethode für die Mittelwerte der Herzfrequenzen der verschiedenen Marschsektoren. S01 bis S04 = Marschsektoren 1 bis 4. bpm= Schläge pro Minute. ns = nicht signifikant. *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001.

3.2.2 Resultate der Herzfrequenzen zwischen neun Marschsektoren

Bei der Aufteilung des Marsches in neun Sektoren waren die erhobenen Daten der Herzfrequenzen über alle Gruppen normalverteilt. Die berechneten Werte des Shapiro-Wilk-Tests, der Schiefe und der Wölbung (Tabelle 23), und das zur visuellen Darstellung erstellte Quantil-Quantil-Diagramm (Abbildung 17) belegen die Normalverteilung und sind im Anhang A aufgezeigt.

Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ergab, dass sich die Mittelwerte der Herzfrequenzen der neun verschiedenen Marschsektoren nach den Sphärizitätskorrekturen (Mauchly-W=0.0003, p<0.0001 und Greenhouse-Geisser- $\mathcal{E}=0.351$) statistisch signifikant unterscheiden, F(2.81, 47.71)=88.29, p<0.0001. Die berechneten Werte sind in der Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8

Werte für ANOVA mit Messwiederholung für die Mittelwerte der Herzfrequenzen von neun Marschsektoren

		$M \pm SD [min, max]$							
				1 V1 –		, max			
	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09
HF	137 ± 9	142 ± 11	132 ± 10	128 ± 9	132 ± 9	118 ± 9	116 ± 7	117 ± 7	121 ± 7
Mittelwert	[118,	[121,	[112,	[112,	[115,	[101,	[103,	[103,	[106,
(bpm)	149]	163]	147]	144]	143]	131]	127]	127]	131]
		(DFn, F-Wei	DFd),	Mauch p-Wer	•	GG <i>E</i> -Wert		GG p-Wert	
HF Mittelw	ert (bpm)	(2.81, 88.29	47.71),	0.0003 ****p	, < 0.0001	0.351		****p <	0.0001

Anmerkung. M \pm SD = Mittelwert \pm Standardabweichung. [min, max] = Bereich vom Minimalund Maximalwert. F = F-Wert zur Bestimmung der ANOVA. DFn = Hypothesenfreiheitsgrade. DFd = Residualfreiheitsgrade. Sphärizitätkorrektur bei Mauchly-Test wenn p < 0.05. Sphärizitätskorrektur nach Greenhouse-Geisser (GG), wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} < 0.75$ oder Huyn-Feldt, wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} > 0.75$. Das Signifikanzniveau wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001). S01 bis S09 = Marschsektoren 1 bis 9. HF = Herzfrequenz. bpm = Schläge pro Minute. Anzahl Teilnehmende: n = 18. Der Bonferroni-korrigierte Post-Hoc-Test zeigte, dass sich die meisten Mittelwerte der Herzfrequenzen der neun Marschsektoren signifikant unterscheiden und einen starken Effekt nach
Cohen haben. Die Werte in der Mitte des Marsches bei den Marschsektoren S04 und S05 unterscheiden sich nicht signifikant. Auch die Werte der hinteren Marschsektoren S06, S07 und
S08 unterscheiden sich nicht signifikant. Alle Werte sind in der Tabelle 9 ersichtlich und der
Box-Plot in der Abbildung 9 stellt die Resultate grafisch dar.

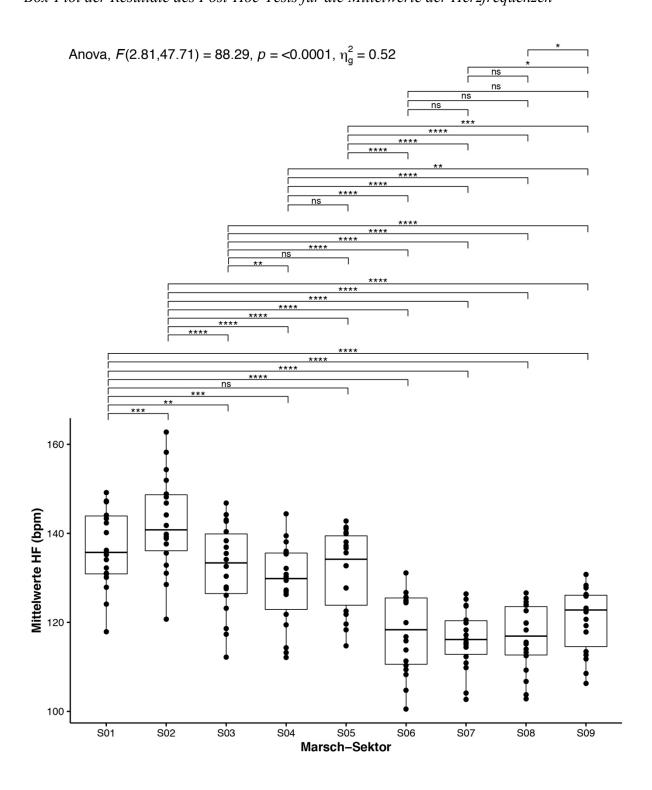
Tabelle 9Werte für den Bonferroni-Post-Hoc-Test und Effektstärke nach Cohen's d zwischen den neun Marschsektoren

Sektor 1	Sektor 2	n	Angepasster p-Wert	Fazit Signifikanz	d-Wert (Effektstärke)
S01	S02	18	0.0003***	S01 < S02***	-1.47 (gross)
S01	S03	18	0.006**	S01 > S03**	1.14 (gross)
S01	S04	18	0.0002***	S01 > S04***	1.52 (gross)
S01	S05	18	0.099	nicht signifikant	0.82 (gross)
S01	S06	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S06****	3.40 (gross)
S01	S07	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S07****	3.28 (gross)
S01	S08	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S08****	2.96 (gross)
S01	S09	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S09****	2.52 (gross)
S02	S03	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S03****	2.40 (gross)
S02	S04	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S04****	2.04 (gross)
S02	S05	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S05****	1.76 (gross)
S02	S06	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S06****	3.32 (gross)
S02	S07	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S07****	2.89 (gross)
S02	S08	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S08****	2.69 (gross)
S02	S09	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S09****	2.55 (gross)
S03	S04	18	0.002**	S03 > S04**	1.26 (gross)
S03	S05	18	1	nicht signifikant	0.08 (unbedeutend)
S03	S06	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S03 > S06****	3.00 (gross)
S03	S07	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S03 > S07****	2.36 (gross)
S03	S08	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S03 > S08****	2.25 (gross)

					-
S03	S09	18	****p < 0.0001	S03 > S09****	1.80 (gross)
S04	S05	18	0.821	nicht signifikant	-0.59 (moderat)
S04	S06	18	****p < 0.0001	S04 > S06****	2.50 (gross)
S04	S07	18	****p < 0.0001	S04 > S07****	2.15 (gross)
S04	S08	18	****p < 0.0001	S04 > S08****	2.08 (gross)
S04	S09	18	0.001**	S04 > S09**	1.29 (gross)
S05	S06	18	****p < 0.0001	S05 > S06****	2.92 (gross)
S05	S07	18	**** <i>p</i> < 0.0001	S05 > S07****	1.98 (gross)
S05	S08	18	****p < 0.0001	S05 > S08****	1.72 (gross)
S05	S09	18	0.0002***	S05 > S09***	1.56 (gross)
S06	S07	18	1	nicht signifikant	0.32 (klein)
S06	S08	18	1	nicht signifikant	0.19 (unbedeutend)
S06	S09	18	0.976	nicht signifikant	-0.57 (moderat)
S07	S08	18	1	nicht signifikant	-0.09 (unbedeutend)
S07	S09	18	0.023*	S07 < S09*	-0.98 (gross)
S08	S09	18	0.011*	S08 < S09*	-1.06 (gross)

Anmerkung. Das Signifikanzniveau für Bonferroni wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001). Einen Cohen's d-Wert von ± 0.20 entspricht einer kleinen, ± 0.50 einer mittleren und ± 0.80 einer grossen Effektstärke. S01 bis S09 = Marschsektoren 1 bis 9. n = Anzahl Teilnehmende.

Abbildung 9Box-Plot der Resultate des Post-Hoc-Tests für die Mittelwerte der Herzfrequenzen



Anmerkung. p-Werte anhand der Bonferroni-Korrekturmethode. bpm = Schläge pro Minute. S01 bis S09 = Marschsektoren 1 bis 9. ns = nicht signifikant. *p < 0.05, **p < 0.01, ****p < 0.001, ****p < 0.0001.

3.2.3 Resultate der Körperkerntemperatur zwischen vier Sektoren

Auch die erhobenen Daten der Körperkerntemperaturen waren bei der Aufteilung in vier Sektoren über alle Gruppen normalverteilt. Die für die Normalverteilung berechneten Werte des Shapiro-Wilk-Tests, sowie die Werte der Schiefe und der Wölbung (Tabelle 24), wie auch das zur visuellen Darstellung erstellte Quantil-Quantil-Diagramm (Abbildung 18) sind im Anhang A aufgezeigt.

Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ergab, dass sich die Mittelwerte der Herzfrequenzen der vier verschiedenen Marschsektoren nach den Sphärizitätskorrekturen (Mauchly-W = 0.421, p = 0.037 und Greenhouse-Geisser- $\mathcal{E} = 0.653$) statistisch signifikant unterscheiden, F(1.96, 29.39) = 28.92, p < 0.0001. Die berechneten Werte sind in der Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10Werte für ANOVA mit Messwiederholung für die Mittelwerte der Körperkerntemperaturen von vier Marschsektoren

		$M \pm SD [min, max]$					
	S01	S02	S03	S04			
BCT Mittelwert (°C)	38.2 ± 0.2 [38.0, 38.5]	38.1 ± 0.2 [37.8, 38.5]	37.9 ± 0.2 [37.6, 38.3]	38.0 ± 0.2 [37.6, 38.3]			
	(DFn, DFd), F-Wert	Mauchly- <i>W</i> , <i>p</i> -Wert	GG <i>€</i> -Wert	GG p-Wert			
BCT Mittelwert (°C)	(1.96, 29.39), 28.92	0.421, 0.037*	0.653	****p < 0.0001			

Anmerkung. M \pm SD = Mittelwert \pm Standardabweichung. [min, max] = Bereich vom Minimalund Maximalwert. F = F-Wert zur Bestimmung der ANOVA. DFn = Hypothesenfreiheitsgrade. DFd = Residualfreiheitsgrade. Sphärizitätkorrektur bei Mauchly-Test wenn p < 0.05. Sphärizitätskorrektur nach Greenhouse-Geisser (GG), wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} < 0.75$ oder Huyn-Feldt, wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} > 0.75$. Das Signifikanzniveau wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001). BCT = Körperkerntemperatur. °C = Grad Celsius. Anzahl Teilnehmende: n = 16. Der Bonferroni-korrigierte Post-Hoc-Test zeigte, dass sich die Mittelwerte der Körperkerntemperaturen der ersten beiden Sektoren S01 und S02 nicht signifikant unterscheiden. Auch die beiden letzten Sektoren unterscheiden sich nicht signifikant. Alle Werte der anderen Marschsektoren unterscheiden sich jedoch signifikant mit einem starken Effekt nach Cohen. Die Tabelle 11 zeigt die Werte und die Abbildung 10 den Box-Plot der Resultate.

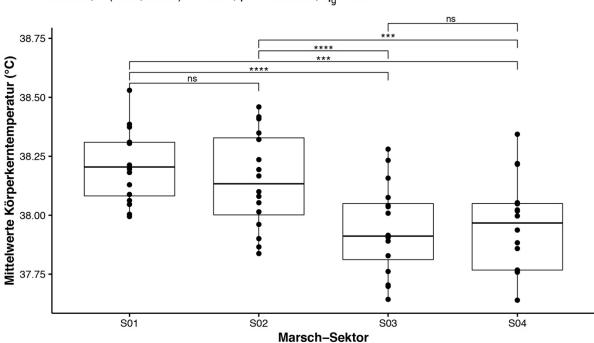
Tabelle 11Werte für den Bonferroni-post-hoc-Test für die Signifikanz und Cohen's d für die Effektstärke zwischen den vier Marschsektoren

Sektor 1	Sektor 2	n	Angepasster p-Wert	Fazit Signifikanz	d-Wert (Effektstärke)
S01	S02	16	0.443	nicht signifikant	0.48 (klein)
S01	S03	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S03****	1.61 (gross)
S01	S04	16	0.0005***	S01 > S04***	1.34 (gross)
S02	S03	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S03****	2.07 (gross)
S02	S04	16	0.0004***	S02 > S04***	1.37 (gross)
S03	S04	16	0.613	nicht signifikant	-0.13 (unbedeutend)

Anmerkung. Das Signifikanzniveau für Bonferroni wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001). Einen Cohen's d-Wert von ± 0.20 entspricht einer kleinen, ± 0.50 einer mittleren und ± 0.80 einer grossen Effektstärke. S01 bis S04 = Marschsektoren 1 bis 4. n = Anzahl Teilnehmende.

Abbildung 10

Box-Plot der Resultate des Post-Hoc-Tests für die Mittelwerte der Körperkerntemperaturen



Anova, F(1.96,29.39) = 28.92, p = <0.0001, $\eta_g^2 = 0.3$

Anmerkung. Visualisierung der Resultate des Post-Hoc-Tests mittels Boxplot mit angepassten p-Werten anhand der Bonferroni-Korrekturmethode für die Mittelwerte der Körperkerntemperaturen der verschiedenen Marschsektoren. S01 bis S04 = Marschsektoren 1 bis 4. °C = Grad Celsius. ns = nicht signifikant. *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001.

3.2.4 Resultate der Körperkerntemperatur zwischen neun Sektoren

Die Körperkerntemperatur-Werte waren bei der Aufteilung in neun Sektoren über alle Gruppen normalverteilt. Die berechneten Werte des Shapiro-Wilk-Tests, der Schiefe und der Wölbung sind in der Tabelle 25, sowie das zur visuellen Darstellung erstellte Quantil-Quantil-Diagramm in der Abbildung 19 im Anhang A aufgezeigt.

Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ergab, dass sich die Mittelwerte der Herzfrequenzen der neun verschiedenen Marschsektoren nach den Sphärizitätskorrekturen (Mauchly-W=0.0005, p<0.0001 und Greenhouse-Geisser- $\mathcal{E}=0.363$) statistisch signifikant unterscheiden, F(2.91,43.62)=24.81, p<0.0001. Die berechneten Werte sind in der Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12

Werte für ANOVA mit Messwiederholung für die Mittelwerte der Herzfrequenzen von neun Marschsektoren

	M ± SD [min, max]									
	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	
BCT Mittelwert (°C)	38.2 ± 0.1 [38.0, 38.5]	38.2 ± 0.2 [38.0, 38.6]	38.1 ± 0.2 [37.9, 38.4]	38.1 ± 0.2 [37.8, 38.5]	38.2 ± 0.2 [37.8, 38.6]	37.9 ± 0.2 [37.6, 38.3]	37.9 ± 0.2 [37.7, 38.3]	37.9 ± 0.2 [37.6, 38.3]	38.0 ± 0.2 [37.8, 38.5]	

	(DFn, DFd), F-Wert	Mauchly- <i>W</i> , <i>p</i> -Wert	GG <i>E</i> -Wert	GG p-Wert
BCT Mittelwert (°C)	(2.91, 43.62), 24.81	0.0005, **** <i>p</i> < 0.0001	0.363	****p < 0.0001

Anmerkung. M \pm SD = Mittelwert \pm Standardabweichung. [min, max] = Bereich vom Minimalund Maximalwert. F = F-Wert zur Bestimmung der ANOVA. DFn = Hypothesenfreiheitsgrade. DFd = Residualfreiheitsgrade. Sphärizitätkorrektur bei Mauchly-Test wenn p < 0.05. Sphärizitätskorrektur nach Greenhouse-Geisser (GG), wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} < 0.75$ oder Huyn-Feldt, wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} > 0.75$. Das Signifikanzniveau wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001). BCT = Körperkerntemperatur. °C = Grad Celsius. Anzahl Teilnehmende: n = 16. Der Bonferroni-korrigierte Post-Hoc-Test zeigte, dass sich die Mittelwerte der Körperkerntemperaturen der Marschsektoren von der ersten Hälfte des Marsches S01, S02, S03, S04 und S05 nicht signifikant unterscheiden. Auch die Sektoren der zweiten Hälfte S06, S07, S08 und S09 unterscheiden sich nicht signifikant, ausser S08 und S09. Die Werte der meisten Sektoren von der ersten Hälfte des Marsches unterscheiden sich jedoch signifikant von den Werten der meisten Sektoren der zweiten Hälfte. Alle signifikant unterschiedlichen Werte haben eine grosse Effektstärke nach Cohen. Die Tabelle 13 zeigt die Werte und die Abbildung 11 den Box-Plot der Resultate.

Tabelle 13Werte für den Bonferroni-post-hoc-Test für die Signifikanz und Cohen's d für die Effektstärke zwischen den neun Marschsektoren

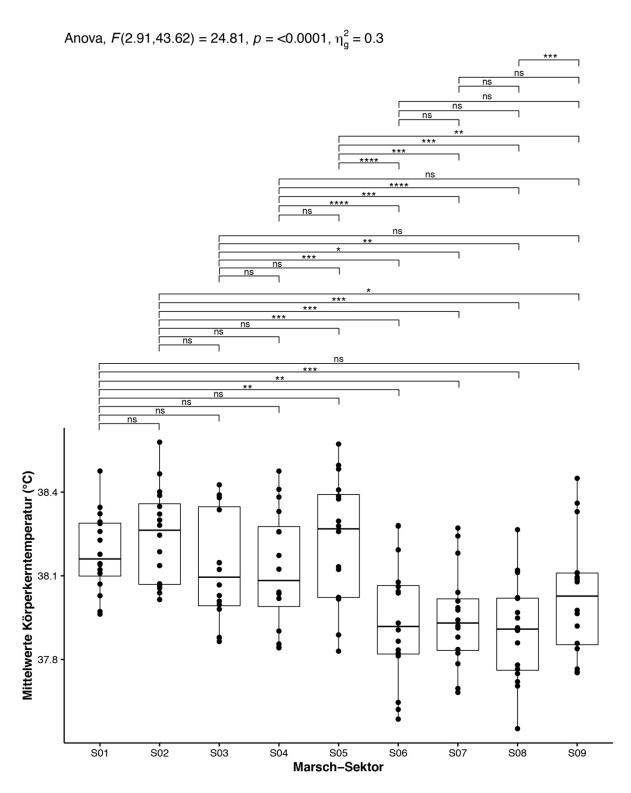
Sektor 1	Sektor 2	n	Angepasster <i>p</i> -Wert	Fazit Signifikanz	d-Wert (Effektstärke
S01	S02	16	0. 0.072	nicht signifikant	-0.93 (gross)
S01	S03	16	1	nicht signifikant	0.39 (klein)
S01	S04	16	1	nicht signifikant	0.37 (klein)
S01	S05	16	1	nicht signifikant	-0.24 (klein)
S01	S06	16	0.003**	S01 > S06**	1.34 (gross)
S01	S07	16	0.002**	S01 > S07**	1.40 (gross)
S01	S08	16	0.0005***	S01 > S08***	1.57 (gross)
S01	S09	16	0.251	nicht signifikant	0.78 (moderat)
S02	S03	16	0.077	nicht signifikant	0.93 (gross)
S02	S04	16	0.378	nicht signifikant	0.73 (moderat)
S02	S05	16	1	nicht signifikant	0.13 (unbedeutend)
S02	S06	16	0.0002***	S02 > S06***	1.68 (gross)
S02	S07	16	0.0007***	S02 > S07***	1.53 (gross)
S02	S08	16	0.0002***	S02 > S08***	1.70 (gross)
S02	S09	16	0.033*	S02 > S09*	1.03 (gross)
S03	S04	16	1	nicht signifikant	0.04 (unbedeutend)
S03	S05	16	0.059	nicht signifikant	-0.96 (gross)
S03	S06	16	0.0006***	S03 > S06***	1.56 (gross)
S03	S07	16	0.011*	S03 > S07 *	1.17 (gross)

S03	S08	16	0.002**	S03 > S08 **	1.37 (gross)
S03	S09	16	0.922	nicht signifikant	0.62 (moderat)
S04	S05	16	0.109	nicht signifikant	-0.88 (gross)
S04	S06	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S04 > S06 ****	2.07 (gross)
S04	S07	16	0.0005***	S04 > S07 ***	1.57 (gross)
S04	S08	16	****p < 0.0001	S04 > S08 ****	1.86 (gross)
S04	S09	16	0.159	nicht signifikant	0.84 (gross)
S05	S06	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S05 > S06 ****	2.52 (gross)
S05	S07	16	0.0006***	S05 > S07 ***	1.55 (gross)
S05	S08	16	0.0002***	S05 > S08 ***	1.73 (gross)
S05	S09	16	0.008**	S05 > S09 **	1.21 (gross)
S06	S07	16	1	nicht signifikant	-0.10 (unbedeutend)
S06	S08	16	1	nicht signifikant	0.25 (klein)
S06	S09	16	0.511	nicht signifikant	-0.69 (moderat)
S07	S08	16	1	nicht signifikant	0.55 (moderat)
S07	S09	16	0.214	nicht signifikant	-0.80 (gross)
S08	S09	16	0.0003***	S08 < S09 ***	-1.67 (gross)

Anmerkung. Das Signifikanzniveau für Bonferroni wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001). Einen Cohen's d-Wert von ± 0.20 entspricht einer kleinen, ± 0.50 einer mittleren und ± 0.80 einer grossen Effektstärke. S01 bis S09 = Marschsektoren 1 bis 9. n = Anzahl Teilnehmende.

Abbildung 11

Box-Plot der Resultate des Post-Hoc-Tests für die Mittelwerte der Körperkerntemperaturen



Anmerkung. p-Werte anhand der Bonferroni-Korrekturmethode. °C = Grad Celsius. S01 bis S09 = Marschsektoren 1 bis 9. ns = nicht signifikant. *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001.

3.3 Resultate der Analyse des PSI

3.3.1 Resultate der «Overall-Analyse» des PSI

Die ausgerechneten Mittelwerte und Standartabweichungen, sowie die Minimal- und Maximalwerte für die mittleren, maximalen und minimalen PSI-Werte über die gesamte Distanz von 100 km wird in der Tabelle 14 dargestellt. Es wurden jeweils die Werte ohne und mit Pausen berechnet und angegeben, ausser beim PSI Maximalwert.

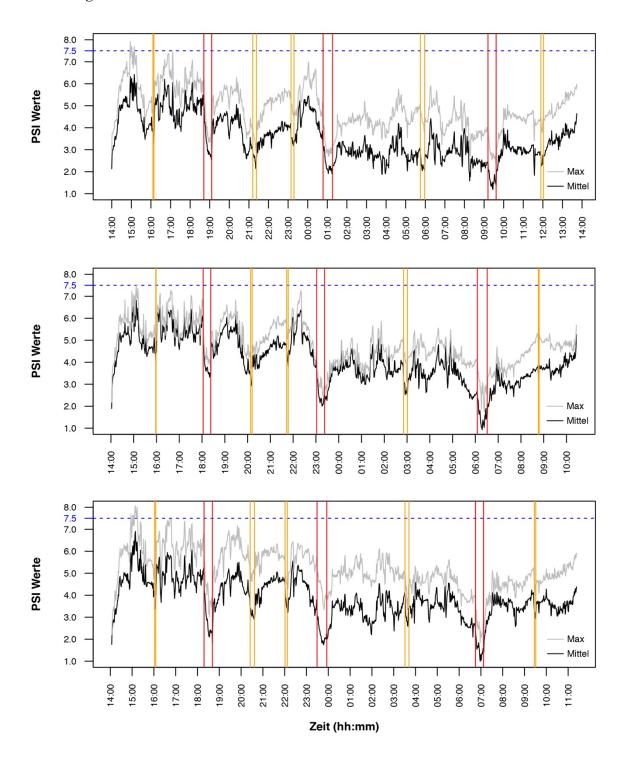
Die Abbildungen 12 zeigt die Verläufe der PSI-Mittelwerte der Gruppe 1, 2 und 3 über die gesamte Marschdauer mittels Liniendiagramm dar.

Tabelle 14Physiological strain index (PSI) über die gesamte Dauer des 100-km-Marsches

	M ± SD [Bereich: min, max]						
	Gruppe 1 (n = 5)	Gruppe 2 (n = 5)	Gruppe 3 (n = 6)				
PSI Mittelwert (exkl. Pausen)	$3.6 \pm 0.9 $ [2.8, 4.9]	4.2 ± 0.5 [3.4, 4.8]	4.0 ± 0.8 [3.1, 4.9]				
PSI Mittelwert (inkl. Pausen)	$3.5 \pm 0.9 $ [2.7, 4.8]	$4.1 \pm 0.5 [3.3, 4.7]$	$3.8 \pm 0.8 [3.0, 4.8]$				
PSI Max	6.8 ± 1.2 [5.5, 8.1]	$7.1 \pm 0.4 [6.6, 7.6]$	7.0 ± 0.7 [6.2, 8.1]				
PSI Min (exkl. Pausen)	0.3 ± 0.4 [-0.1, 1.0]	$0.5 \pm 0.2 \; [0.2, 0.8]$	$0.3 \pm 0.3 \; [0.0, 0.7]$				
PSI Min (inkl. Pausen)	0.2 ± 0.4 [-0.1, 1.0]	0.0 ± 0.8 [-1.1, 0.8]	$0.1 \pm 0.3 [-0.4, 0.4]$				

Anmerkung. Alle Werte wurden in Mittelwerte \pm Standardabweichungen (M \pm SD) mit dem Bereich vom Minimal- und Maximalwert [min, max] angegeben. PSI Max = Maximalwert Physiological Strain Index. PSI Min = Minimalwert Physiological Strain Index. n = Anzahl Teilnehmende.

Abbildung 12Liniendiagramme der PSI-Werte über 100 km



Anmerkung. Verläufe der Mittel- (= Mittel) und Maximalwerte (= Max) des Physiological Strain Index (= PSI) der Gruppe 1, 2 und 3. Bereiche zwischen orangen (< 13 min) und roten (> 20 min) Linien = Verpflegungspausen. hh:mm = Stunden:Minuten. min = Minute. Blau gestrichelte Linie (PSI = 7.5) = Gefährdungsschwelle.

3.3.2 Resultate des PSI zwischen vier Sektoren

Die erhobenen Daten der Körperkerntemperaturen waren bei der Aufteilung des Marsches in vier Sektoren über alle Gruppen normalverteilt. Die für die Normalverteilung berechneten Werte des Shapiro-Wilk-Tests, der Schiefe und der Wölbung (Tabelle 26), sowie das zur visuellen Darstellung erstellte Quantil-Quantil-Diagramm (Abbildung 20) sind im Anhang A aufgezeigt.

Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ergab, dass sich die Mittelwerte der Herzfrequenzen der vier verschiedenen Marschsektoren statistisch signifikant unterscheiden, F(3, 45) = 67.92, p < 0.0001. Die Sphärizität ist gegeben und es bedarf keiner Korrektur (Mauchly-W = 0.521, p = 0.112). Die berechneten Werte sind in der Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15Werte für ANOVA mit Messwiederholung für die Mittelwerte des PSI von vier Marschsektoren

	$M \pm SD [min, max]$					
	S01	S02	S03	S04		
PSI Mittelwert	4.9 ± 0.7 [3.8, 6.1]	4.3 ± 0.9 [2.9, 5.6]	3.3 ± 0.8 [2.1, 4.8]	3.4 ± 0.8 [2.4, 4.6]		
	(DFn, DFd), F-Wert	p-\	Wert	Mauchly- <i>W</i> , p-Wert		
PSI Mittelwert	(3, 45), 67.92	**	** <i>p</i> < 0.0001	0.521, 0.112		

Anmerkung. M \pm SD = Mittelwert \pm Standardabweichung. [min, max] = Bereich vom Minimalund Maximalwert. F = F-Wert zur Bestimmung der ANOVA. DFn = Hypothesenfreiheitsgrade. DFd = Residualfreiheitsgrade. Sphärizität gegeben bei Mauchly-Test wenn p > 0.05. Das Signifikanzniveau wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001). PSI = Physiological Strain Index. Anzahl Teilnehmende: n = 16. Der Bonferroni-korrigierte Post-Hoc-Test zeigte, dass sich die Mittelwerte des PSI aller Marschsektoren signifikant unterscheiden, ausser bei den letzten beiden Sektoren S03 und S04. Die Effektstärke nach Cohen ist bei allen signifikant unterschiedlichen Werten gross. Die Tabelle 16 zeigt die Werte und die Abbildung 13 den Box-Plot der Resultate.

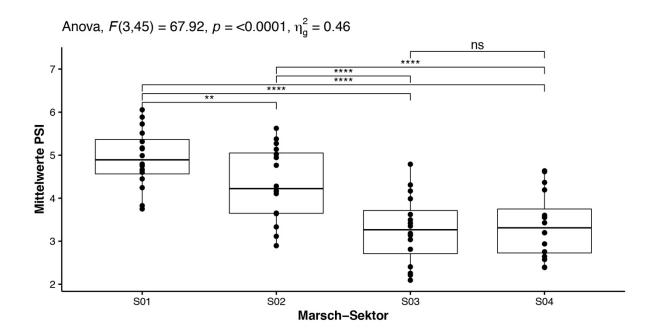
Tabelle 16Werte für den Bonferroni-post-hoc-Test für die Signifikanz und Cohen's d für die Effektstärke zwischen den vier Marschsektoren

Sektor 1	Sektor 2	n	Angepasster p-Wert	Fazit Signifikanz	d-Wert (Effektstärke)
S01	S02	16	0.002**	S01 > S02**	1.16 (gross)
S01	S03	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S03****	2.68 (gross)
S01	S04	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S04****	2.20 (gross)
S02	S03	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S03****	2.72 (gross)
S02	S04	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S04****	1.70 (gross)
S03	S04	16	1	nicht signifikant	-0.26 (klein)

Anmerkung. Das Signifikanzniveau für Bonferroni wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001). Einen Cohen's d-Wert von ± 0.20 entspricht einer kleinen, ± 0.50 einer mittleren und ± 0.80 einer grossen Effektstärke. S01 bis S04 = Marschsektoren 1 bis 4. n = Anzahl Teilnehmende.

Abbildung 13

Box-Plot der Resultate des Post-Hoc-Tests für die Mittelwerte des PSI



Anmerkung. Visualisierung der Resultate des Post-Hoc-Tests mittels Boxplot mit angepassten p-Werten anhand der Bonferroni-Korrekturmethode für die Mittelwerte des Physiological Strain Index (= PSI) der verschiedenen Marschsektoren. S01 bis S04 = Marschsektoren 1 bis 4. ns = nicht signifikant. *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001.

3.3.3 Resultate des PSI zwischen neun Sektoren

Die PSI-Werte waren bei der Aufteilung in neun Sektoren alle normalverteilt. Die Werte des Shapiro-Wilk-Tests, der Schiefe und der Wölbung (Tabelle 27), sowie das zur visuellen Darstellung erstellte Quantil-Quantil-Diagramm (Abbildung 21) sind im Anhang A zu finden. Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ergab, dass sich die Mittelwerte der Herzfrequenzen der neun verschiedenen Marschsektoren nach den Sphärizitätskorrekturen (Mauchly-W = 0.0005, p < 0.0001 und Greenhouse-Geisser- $\mathcal{E} = 0.363$) statistisch signifikant unterscheiden, F(2.91, 43.62) = 24.81, p < 0.0001. Die berechneten Werte sind in der Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17

Werte für ANOVA mit Messwiederholung für die Mittelwerte der Herzfrequenzen von neun Marschsektoren

	M ± SD [min, max]								
	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09
PSI Mittelwert	4.7 ± 0.6 [3.5, 5.8]	5.1 ± 0.7 [3.9, 6.3]	4.4 ± 0.8 [3.1, 5.9]	4.2 ± 0.9 [2.8, 5.8]	4.6 ± 0.9 [2.9, 5.7]	3.3 ± 0.9 [1.9, 5.0]	3.3 ± 0.7 [2.0, 4.5]	3.2 ± 0.7 [2.1, 4.4]	3.7 ± 0.8 [2.5, 5.0]

	(DFn, DFd), F-Wert	Mauchly- <i>W</i> , <i>p</i> -Wert	GG <i>E</i> -Wert	GG p-Wert
PSI Mittelwert	(3.13, 46.97), 48.69	0.0005, **** <i>p</i> < 0.0001	0.391	****p < 0.0001

Anmerkung. M \pm SD = Mittelwert \pm Standardabweichung. [min, max] = Bereich vom Minimalund Maximalwert. F = F-Wert zur Bestimmung der ANOVA. DFn = Hypothesenfreiheitsgrade. DFd = Residualfreiheitsgrade. Sphärizitätkorrektur bei Mauchly-Test wenn p < 0.05. Sphärizitätskorrektur nach Greenhouse-Geisser (GG), wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} < 0.75$ oder Huyn-Feldt, wenn Epsilon von GG $\mathcal{E} > 0.75$. Das Signifikanzniveau wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ****p < 0.001, ****p < 0.0001). PSI = Physiological Strain Index. Anzahl Teilnehmende: n = 16. Der Bonferroni-korrigierte Post-Hoc-Test zeigte, dass sich die Mittelwerte des PSI der Marschsektoren von der ersten Hälfte des Marsches praktisch alle nicht signifikant unterscheiden (S01, S03, S04 und S05), ausser die des zweiten Sektor S02. Die Werte von S02 unterscheiden sich mit allen ausser S05 signifikant. Auch die Sektoren der zweiten Hälfte S06, S07, S08 und S09 unterscheiden sich nicht signifikant, ausser S08 zu S09. Die Werte aller Sektoren von der ersten Hälfte des Marsches unterscheiden sich jedoch signifikant von den Werten aller Sektoren der zweiten Hälfte. Alle signifikant unterschiedlichen Werte haben eine grosse Effektstärke nach Cohen, ausser die von S03 und S09 haben eine moderate. Die Tabelle 18 zeigt die Werte und die Abbildung 14 den Box-Plot der Resultate.

Tabelle 18Werte für den Bonferroni-post-hoc-Test für die Signifikanz und Cohen's d für die Effektstärke zwischen den neun Marschsektoren

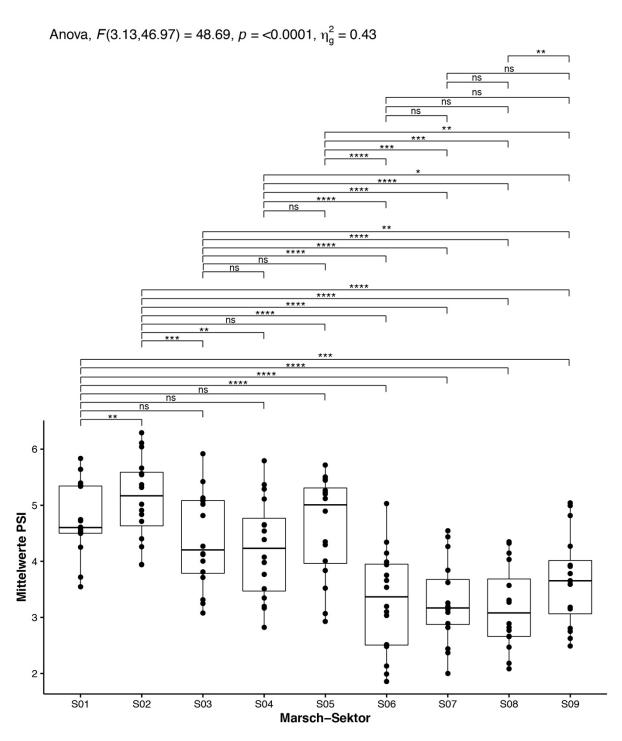
Sektor 1	Sektor 2	n	Angepasster p-Wert	Fazit Signifikanz	d-Wert (Effektstärke)
S01	S02	16	0.003**	S01 < S02**	-1.31 (gross)
S01	S03	16	0.529	nicht signifikant	0.69 (moderat)
S01	S04	16	0.152	nicht signifikant	0.84 (gross)
S01	S05	16	1	nicht signifikant	0.19 (unbedeutend)
S01	S06	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S06****	2.15 (gross)
S01	S07	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S07****	2.34 (gross)
S01	S08	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S01 > S08****	2.34 (gross)
S01	S09	16	0.0007***	S01 > S09***	1.53 (gross)
S02	S03	16	0.0003***	S02 > S03***	1.64 (gross)
S02	S04	16	0.002**	S02 > S04**	1.40 (gross)
S02	S05	16	0.1	nicht signifikant	0.89 (gross)
S02	S06	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S06****	2.71 (gross)
S02	S07	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S07****	2.43 (gross)
S02	S08	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S08****	2.46 (gross)
S02	S09	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S02 > S09****	1.90 (gross)
S03	S04	16	1	nicht signifikant	0.58 (moderat)
S03	S05	16	1	nicht signifikant	-0.54 (moderat)
S03	S06	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S03 > S06****	2.50 (gross)

S03	S07	16	****p < 0.0001	S03 > S07****	1.84 (gross)
S03	S08	16	****p < 0.0001	S03 > S08****	1.91 (gross)
S03	S09	16	0.007**	S03 > S09**	1.22 (moderat)
S04	S05	16	0.41	nicht signifikant	-0.72 (moderat)
S04	S06	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S04 > S06****	2.49 (gross)
S04	S07	16	****p < 0.0001	S04 > S07****	1.94 (gross)
S04	S08	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S04 > S08****	2.09 (gross)
S04	S09	16	0.017*	S04 > S09*	1.11 (gross)
S05	S06	16	**** <i>p</i> < 0.0001	S05 > S06****	2.86 (gross)
S05	S07	16	0.0002***	S05 > S07***	1.72 (gross)
S05	S08	16	0.0002***	S05 > S08***	1.71 (gross)
S05	S09	16	0.003**	S05 > S09**	1.35 (gross)
S06	S07	16	1	nicht signifikant	0.05 (unbedeutend)
S06	S08	16	1	nicht signifikant	0.05 (unbedeutend)
S06	S09	16	0.605	nicht signifikant	-0.67 (moderat)
S07	S08	16	1	nicht signifikant	0.241 (klein)
S07	S09	16	0.101	nicht signifikant	-0.89 (gross)
S08	S09	16	0.001**	S08 < S09**	-1.43 (gross)

Anmerkung. Das Signifikanzniveau für Bonferroni wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001). Einen Cohen's d-Wert von ± 0.20 entspricht einer kleinen, ± 0.50 einer mittleren und ± 0.80 einer grossen Effektstärke. S01 bis S09 = Marschsektoren 1 bis 9. n = Anzahl Teilnehmende.

Abbildung 14

Box-Plot der Resultate des Post-Hoc-Tests für die Mittelwerte des PSI



Anmerkung. p-Werte anhand der Bonferroni-Korrekturmethode. PSI = Physiological Strain Index. S01 bis S09 = Marschsektoren 1 bis 9. ns = nicht signifikant. *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ***p < 0.0001.

3.4 Resultate der Analyse der Herzfrequenzvariabilität

Die Tabelle 19 zeigt die aus den RR-Intervallen errechneten RMSSD-Werte für alle Teilnehmenden und alle sechs Messzeitpunkte, welche für die Analyse der Herzfrequenzvariabilität benutzt wurden.

Tabelle 19 *RMSSD-Werte der Herzfrequenzvariabilität von allen Teilnehmenden*

Teilnehmer	RMSSD Full (ms)	RMSSD Pre (ms)	RMSSD 1 (ms)	RMSSD 2 (ms)	RMSSD 3 (ms)	RMSSD End (ms)
A1	12.8	35.1	19.8	20.4	30.9	23.5
A2	4.9	25.4	13.4	6.7	9.1	6.7
A3	9.6	35.4	22.1	10.6	33.0	17.3
A4	7.9	31.1	20.3	14.4	32.6	25.6
A5	9.68	14.8	24.4	16.8	27.2	18.7
B1	8.0	34.0	8.1	14.7	33.2	9.0
B2	5.8	23.8	7.5	10.3	18.1	19.6
В3	9.8	21.7	19.3	29.2	21.3	15.0
B4	11.4	46.7	20.1	24.5	53.7	23.4
B5	8.0	23.2	12.9	21.0	43.6	9.0
B6	6.3	34.1	12.8	21.1	9.4	19.6
C1	11.6	36.9	25.5	26.0	31.3	25.1
C2	6.3	19.2	23.1	27.0	21.4	7.5
C3	11.1	33.6	32.7	26.5	27.9	13.9
C4	8.5	30.9	33.1	21.5	29.0	13.2
C5	3.9	14.3	14.0	3.1	10.0	4.7

Anmerkung. Werte der Herzfrequenzvariabilität nach dem RMSSD-Verfahren für sechs verschiedene Messzeitpunkten: RMSSD Pre = 2 Stunden vor Marsch, RMSSD 1 = bei 26.5 km, RMSSD 2 = bei 53.2 km, RMSSD 3 = bei 81 km, RMSSD End = 5 min nach Ende des Marsches, RMSSD Full = Ganze Marschlänge. A1–A5 = Teilnehmer Gruppe 1. B1–B6 = Teilnehmer Gruppe 2. C1–C5=Teilnehmer Gruppe 3. ms = Millisekunden. RMSSD = «Root mean square of successive differences» der RR-Intervalle. km = Kilometer.

Die mittleren RMSSD-Werte der Herzfrequenzvariabilität waren bei allen Messzeitpunkten über alle Gruppen normalverteilt. Im Anhang A sind die für die Normalverteilung berechneten Werte des Shapiro-Wilk-Tests, der Schiefe und der Wölbung, sowie das zur visuellen Darstellung erstellte Quantil-Quantil-Diagramm (Abbildung 22) abgebildet.

Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ergab, dass sich die Mittelwerte der RMSSD der verschiedenen Messzeitpunkten statistisch signifikant unterscheiden, F(5, 75) = 20.50, p < 0.0001. Die Sphärizität ist gegeben und es bedarf keiner Korrektur (Mauchly-W = 0.252, p = 0.211). Die berechneten Werte sind in der Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20Werte für ANOVA mit Messwiederholung für die Mittelwerte der RMSSD-Werte bei sechs Messzeitpunkten

	$M \pm SD [min, max]$							
	Full	Pre	1	2	3	End		
RMSSD Mittelwert (ms)	8.5 ± 2.6 [3.9, 12.8]	28.8 ± 8.8 [14.3, 46.7]	19.3 ± 7.6 [7.5, 33.1]	18.4 ± 7.8 [3.1, 29.2]	27.0 ± 12.1 [9.1, 53.7]	15.7 ± 6.9 [4.7, 25.6]		

	(DFn, DFd), F-Wert	<i>p</i> -Wert	Mauchly- <i>W</i> , <i>p</i> -Wert
RMSSD Mittelwert (ms)	(5, 75), 20.50	**** <i>p</i> < 0.0001	0.252, 0.211

Anmerkung. M \pm SD = Mittelwert \pm Standardabweichung. [min, max] = Bereich vom Minimalund Maximalwert. Full = ganzer Marsch. Pre = 2 Stunden vor dem Marsch. End = 5 Minuten nach dem Marsch. 1 = bei 26.5 km, Messung 2 = bei 53.2 km, Messung 3 = bei 81 km. F = F-Wert zur Bestimmung der ANOVA. DFn = Hypothesenfreiheitsgrade. DFd = Residualfreiheitsgrade. Sphärizität gegeben bei Mauchly-Test wenn p > 0.05. Das Signifikanzniveau wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ****p < 0.001, ****p < 0.0001). RMSSD = «Root mean square of successive differences» der RR-Intervalle. ms = Millisekunden. Anzahl Teilnehmende: n = 16. Der Bonferroni-korrigierte Post-Hoc-Test zeigte, dass die Mittelwerte des RMSSD für den ganzen Marsch signifikant tiefer waren als bei allen anderen Mittelwerte. Er zeigt auch, dass die Mittelwerte vor dem Marsch signifikant höher waren als bei alle anderen Messzeitpunkten, ausser bei der Messung 3. Die Messungen während den Pausen unterscheiden sich nicht signifikant, auch nicht zur Messung nach dem Marsch, ausser die Messung 3 ist signifikant höher als die Messung nach dem Marsch. Alle signifikant unterschiedlichen Werte haben eine grosse Effektstärke nach Cohen. Tabelle 21 zeigt alle Werte und die Abbildung 15 zeigt den Box-Plot.

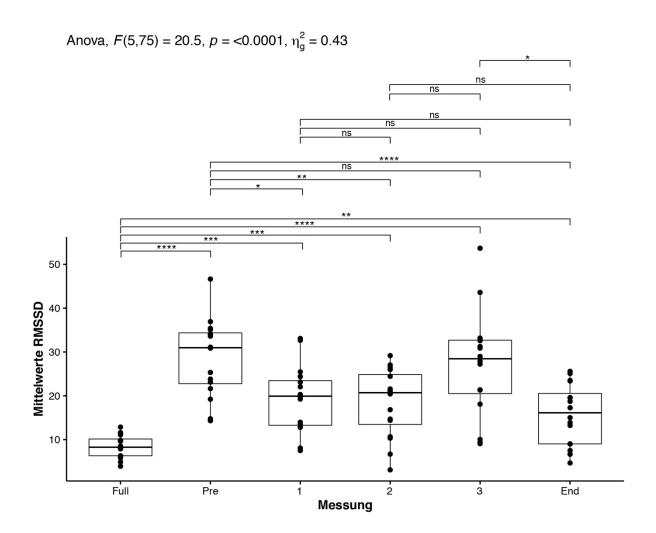
Tabelle 21Werte für den Post-Hoc-Test und Cohen's d für die 6 Messzeitpunkte

Messung 1	Messung 2	n	Angepasster p-Wert	Fazit Signifikanz	d-Wert (Effektstärke)
Full	Pre	16	****p < 0.0001	Full < Pre****	-2.65 (gross)
Full	1	16	0.0001***	Full < 1***	-1.64 (gross)
Full	2	16	0.0002***	Full < 2***	-1.52 (gross)
Full	3	16	**** <i>p</i> < 0.0001	Full < 3****	-1.75 (gross)
Full	End	16	0.001**	Full < End**	-1.28 (gross)
Pre	1	16	0.02*	Pre > 1*	0.89 (gross)
Pre	2	16	0.007**	Pre > 2**	1.05 (gross)
Pre	3	16	1	nicht signifikant	0.17 (unbedeutend)
Pre	End	16	**** <i>p</i> < 0.0001	Pre > End****	1.73 (gross)
1	2	16	1	nicht signifikant	0.12 (unbedeutend)
1	3	16	0.143	nicht signifikant	-0.61 (moderat)
1	End	16	0.552	nicht signifikant	0.39 (klein)
2	3	16	0.056	nicht signifikant	-0.75 (moderat)
2	End	16	0.738	nicht signifikant	0.30 (klein)
3	End	16	0.01*	3 > End*	0.99 (gross)

Anmerkung. Das Signifikanzniveau für Bonferroni wurde auf p < 0.05 gesetzt (*p < 0.05, **p < 0.01, ****p < 0.001, ****p < 0.0001). Einen Cohen's d-Wert von ± 0.20 entspricht einer kleinen, ± 0.50 einer mittleren und ± 0.80 einer grossen Effektstärke. S01 bis S09 = Marschsektoren 1 bis 9. n = Anzahl Teilnehmende. Full = ganzer Marsch. Pre = 2 Stunden vor dem Marsch. End = 5 Minuten nach dem Marsch.

Abbildung 15

Box-Plot der Resultate des Post-Hoc-Tests für die Mittelwerte des RMSSD



Anmerkung. p-Werte anhand der Bonferroni-Korrekturmethode. Full = ganzer Marsch. Pre = 2 Stunden vor dem Marsch. End = 5 Minuten nach dem Marsch. 1 = bei 26.5 km, Messung 2 = bei 53.2 km, Messung 3 = bei 81 km. ns = nicht signifikant. *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001.

4 Diskussion

Die Erhebung und Analyse der verschiedenen physiologischen Parameter über die lange Distanz von 100 km und über einen Zeitraum von über 20 Stunden setzte eine möglichst lückenlose Messung an möglichst vielen Teilnehmenden voraus. Dies war dank der zurzeit aktuellsten Technik der Geräte, sowie guter Instruktion und Installation bei den Teilnehmenden mehrheitlich möglich. Datenausfälle mussten trotzdem in Kauf genommen werden. So wurde bei jeweils einem Teilnehmenden aus der Gruppe 1 und 2 die Körpertemperatur nicht gemessen und bei jeweils einem Teilnehmenden aus der Gruppe 1 und 3 die RR-Intervalle nicht erfasst.

Obwohl viele unterschiedliche technische Geräte an den Teilnehmenden benutzt wurden, waren sie für die Marschierenden nicht ablenkend oder sogar störend. Sie konnten sogar zur Motivation einzelner Teilnehmer beitragen, da diese ihre Leistung zu einem späteren Zeitpunkt nachverfolgen und vielleicht sogar miteinander vergleichen konnten.

Man konnte feststellen, dass die gemessenen Daten präzise und die benutzten Geräte für den beladenen Langstreckenmarsch gut geeignet waren. Diese Erkenntnis wird ersichtlich, wenn man die Pausenzeiten mit den Kurven abgleicht und sieht, wie die sinkenden Werte mit den Pausenzeiten übereinstimmten. Ausserdem waren Mittel-, Maximal- und Minimalwerte jeweils mit anderen Studien vergleichbar, trotz kleinerer Distanz und somit kürzerer Dauer (Oeschger et al., 2022).

Die mittleren Werte der zwei unabhängig gemessenen Herzfrequenzen mit *Polar H10 mit Vantage V2* und *Polar Verity Sense* wiesen sehr grosse Ähnlichkeiten auf. Die statistischen Analysen wurden aber mit den von *Polar H10 mit Vantage V2* erhobenen Werten durchgeführt, da der *Polar H10*-Brustgurt sowohl bei der Herzfrequenzmessung, wie auch bei der Erfassung der RR-Intervalle als Goldstandard gilt (Gilgen-Ammann et al., 2019; Polar, 2021). Trotzdem eignete sich die Erhebung mit einem alternativen Instrument, da so Datenausfälle bei der langzeitigen Erhebung damit ersetzt und kompensiert werden könnten.

4.1 Erkenntnisse der «Overall-Analyse»

Es zeigte sich, dass über die gesamte Marschstrecke die drei Gruppen sehr ähnliche Mittelwerte und Standardabweichungen für die Werte der Herzfrequenzen (Gruppe 1: 122 ± 10 ; Gruppe 2: 126 ± 7 ; Gruppe 3: 124 ± 6 bpm) und Körperkerntemperaturen (Gruppe 1: 38.0 ± 0.2 ; Gruppe 2: 38.1 ± 0.1 ; Gruppe 3: 38.0 ± 0.1 °C) hatten. Das, obwohl die drei Gruppen erhebliche unterschiedliche Zeiten benötigten, um die 100 km zu absolvieren (Tabellen 3 und 4). Die schnellste Gruppe (Gruppe 2) war mit einem Schnitt von 5.25 km/h über einen halben Kilometer pro

Stunde schneller unterwegs als die langsamste Gruppe (Gruppe 1). Während die schnellste Gruppe (Gruppe 2) eine Marschzeit von 19 h 33 min aufwies, brauchte die langsamste Gruppe (Gruppe 1) 21 h 43 min für die gleiche Strecke. Somit war die langsamste Gruppe (Gruppe 1) mit ähnlichen Werten für die Herzfrequenz und Körperkerntemperatur über zwei Stunden länger der Ausdauerbelastung ausgesetzt. Trotz den ähnlichen Werten wies die schnellste Gruppe (Gruppe 2) im Vergleich zu den anderen Gruppen im Mittel die höchste Herzfrequenz (128 ± 7 bpm) und die höchste Körperkerntemperatur (38.1 ± 0.1 °C) aus. Die langsamste Gruppe (Gruppe 1) hatte zudem das tiefste Mittel (123 ± 10 bpm), sowie den tiefsten Maximalwert (168 ± 9 bpm) bei der Herzfrequenz.

Auffallend war ausserdem, dass die langsamste Gruppe (Gruppe 1) am meisten Pausenminuten einlegte. Mit total 122 min Pause hatten sie über 30 min mehr Pause als die schnellste Gruppe (Gruppe 2), die am wenigsten Pause (88 min) benötigte.

Die mittleren Herzfrequenzen aller Gruppen wiesen zudem Werte auf, die man mit üblichen Ausdauerbelastungen bei kleinerer Intensität bei 60 bis 80 % der maximalen Herzfrequenz einordnen würde (Carter et al., 2003). Dies wurde auch bei einer vergleichbaren Studie von Oeschger et al. (2022) über einen Marsch mit einer erheblich kleineren Distanz (34 km) beschrieben.

Die Verläufe der mittleren Herzfrequenzkurven waren über die gesamte Strecke bei allen drei Gruppen ähnlich. Dasselbe galt für die Verläufe der mittleren Körperkerntemperaturkurven (Abbildung 7). Dies wiederspiegelt die Beobachtung von den ähnlichen Mittelwerten ± Standardabweichungen, die oben beschrieben wurde. Man konnte beobachten, dass die Verläufe der Kurven beider Parameter in allen Gruppen in der ersten Hälfte des Marsches konstant höher waren als in der zweiten Hälfte. Auffallend war auch, dass die Ausschläge der Kurven nach oben und unten in der ersten Hälfte viel stärker ausfielen und zudem mehr variierten. Besonders im ersten Viertel des Marsches verliefen die Kurven auf einem hohen Niveau und es wurden hohe Spitzen erreicht. Ab etwa der Hälfte des Marsches flachten beide Kurven ab und die Verläufe verliefen auf einem tieferen Niveau. Im letzten Viertel und vor allem in den letzten 10 bis 15 km verliefen dann die Kurven beider Parameter wieder ansteigend und erreichten höhere Werte.

Eine mögliche Erklärung für diese Verläufe könnte sein, dass die Teilnehmenden im ersten Viertel des Marsches noch in besserer körperlicher Verfassung waren und ihr Marschtempo auf die äusserlichen Gegebenheiten bei An- und Abstiegen nicht ausreichend angepasst haben. So

könnte es zum Beispiel sein, dass bei einem Aufstieg das Marschtempo der Gruppen nicht stärker reduziert wurde und somit die Intensität stark anstieg. Dies wiederum führte zu erhöhten, sowie schneller und stärker variierten Herzfrequenzen und Körperkerntemperaturen.

Mit zunehmender Dauer könnten die Gruppen ihr Tempo an die äusserlichen Gegebenheiten besser angepasst haben und bei Steigungen ihre Geschwindigkeit stark reduziert haben. Folglich wurde der Marschrhythmus so angepasst, dass in einer konstanten Intensität marschiert wurde. Dies führte mit fortlaufender Dauer zu abgeflachten Herzfrequenz- und Körperkerntemperaturkurven. Hierbei könnte auch die Dunkelheit einen Einfluss gehabt haben. Ab der zweiten Hälfte, und vorwiegend im dritten Viertel des Marsches wurde durch die Nacht zwischen 23.00 und 9.00 Uhr marschiert. Die Dunkelheit bietet während dem Laufen kaum optische Ablenkung. Zusätzlich mit den kühleren Aussentemperaturen konnte das zu einem konzentrierteren Marschieren geführt haben, bei dem die Teilnehmenden den Fokus verstärkt auf sich und ihren eigenen Körper gerichtet hatten.

Eine weitere Möglichkeit ist, dass das Wetter und die unterschiedlichen Aussentemperaturen zwischen Tag und Nacht einen Einfluss auf die Körperkerntemperaturen und die Herzfrequenzen hatten. Sehr warme Aussenbedingungen haben einen steigenden Einfluss auf die beiden Parameter (Achten & Jeukendrup, 2003; Armstrong et al., 1996), jedoch ist zum Beispiel eine Anpassungsveränderung der Herzfrequenz bei kalten Bedingungen nicht üblich (Achten & Jeukendrup, 2003). Dies würde vermutlich nur die Körperkerntemperatur betreffen (Armstrong et al., 1996). Ausserdem hätte man, um diese Annahme zu stützen, genaue Wetter- und Temperaturangaben während dem Marsch erheben müssen.

Eine weitere Beobachtung war, dass die Kurven der mittleren Herzfrequenzen viel stärker nach oben und unten ausschlugen und variierten, als die Kurven der mittleren Körperkerntemperaturen. Es kann somit konstatiert werden, dass die Herzfrequenzen sehr schnell und fast direkt auf Änderungen im Marsch reagierten, während sich die Körperkerntemperatur langsamer und in kleineren Schritten anpassten. Das kann auch auf das Messinstrument und -methode für die Erfassung der Körperkerntemperatur zurückzuführen sein. Veränderungen der Temperatur im inneren des Körpers müssen demnach zuerst an die Oberfläche gelangen, um vom Messgerät erfasst zu werden. Das kann aufgrund der Wärmeträgheit von 5 bis 30 Minuten dauern (greenTEG, 2022a).

4.2 Erkenntnisse der Analyse der Marschsektoren

Bei der statistischen Analyse über vier und neun Marschsektoren wurden die Marschgruppen nicht berücksichtigt und alle Teilnehmenden zusammen analysiert. Dies machte Sinn und war möglich, da die Teilnehmenden nach Kompaniezug rein zufällig, und nicht nach physiologischen oder sportlichen Kriterien den Marschgruppen zugeteilt worden waren.

Im statistischen Mittelwertvergleich zwischen den vier Marschsektoren von etwa 25 km (Mittelwert \pm Standardabweichung der Abstände: 24.8 ± 4.4 km) zeigte sich, dass sich sowohl die mittlere Herzfrequenz wie auch die mittlere Körperkerntemperatur in fast allen Marschsektoren signifikant unterschieden F(1.84, 31.32) = 128.75, p < 0.0001). Folglich wurden die verschiedenen Abschnitte in verschiedenen Intensitäten absolviert. Dies kann auf unterschiedliche Marschgeschwindigkeiten zurückgeführt werden, oder auf das wechselnde Terrain. Es könnte aber auch auf eine Ermüdung ab der zweiten Hälfte des Marsches hindeuten, da Studien eine konstant niedrigere Herzfrequenz während Aktivitäten bei mittleren Intensitäten bei übertrainierten Athleten beobachtet haben (Achten & Jeukendrup, 2003; Billat et al., 1999). In diesem Fall könnte die enorme Belastung vom ersten Teil des Marsches schon dazu führen, dass die Herzfrequenz bei weiterer Belastung leicht sinkt.

Während die Herzfrequenz von Sektor S01 (139 \pm 10 bpm) über S02 (130 \pm 9 bpm) bis S03 $(117 \pm 8 \text{ bpm})$ kontinuierlich signifikant sank, gab es bei der Körperkerntemperatur zwischen dem Sektor S01 (38.2 \pm 0.2 °C) und S02 (38.1 \pm 0.2 °C) zwar eine Senkung, die jedoch nicht signifikant (p = 0.443) war. Erst vom Sektor S02 zu S03 (37.9 ± 0.2 °C) sank der Mittelwert der Körperkerntemperatur signifikant, F(1.96,29.39) = 28.92, p < 0.0001). In der zweiten Hälfte des Marsches, zwischen den Sektoren S03 und S04 gab es weder bei der mittleren Herzfrequenz, noch bei der mittleren Körperkerntemperatur einen signifikanten Unterschied. Die Werte beider Parameter waren im Sektor S04 aber wieder gestiegen. Daraus kann man schliessen, dass sich die Herzfrequenzen und Körperkerntemperaturen in der zweiten Hälfte des Marsches abflachten und konstanter waren. Die Analyse stützt und beweist somit die Beobachtung, dass die Intensitäten in der ersten Hälfte des Marsches höher waren als in der zweiten Hälfte. Die erhöhten Werte im letzten Abschnitt könnte man mit dem erhöhten Marschtempo in den letzten 20 km erklären. Jedoch zeigt die Analyse von vier Marschsektoren nur einen Trend. Genauer beobachten kann man die Erkenntnisse mit dem Vergleich über neun Sektoren von zirka 10 km (Mittelwert ± Standardabweichung der Abstände: 11.0 ± 2.6 km). Die mittlere Herzfrequenz unterschied sich auch hier fast über alle Sektoren signifikant, F(2.81, 47.71) =88.29, p < 0.0001. Von Sektor 01 bis in die Hälfte des Marsches zum Sektor 05 stieg und sank die mittlere Herzfrequenz signifikant und abwechselnd, blieb aber jeweils über einer mittleren Herzfrequenz von 128 bpm. Auffallend war, dass der höchste Mittelwert der Herzfrequenzen $(142 \pm 11 \text{ bpm})$ schon früh im Marsch im zweiten Sektor S02 (13.1 bis 21.5 km) erreicht wurde. Dies beweist, dass in der ersten Hälfte des Marsches die Intensität nicht konstant gehalten wurde und nach der ersten Verpflegungspause von etwa 2 bis 3.5 Stunden nach Beginn des Marsches die Intensität am höchsten war. In drei der vier letzten Abschnitte (S06 bis S08) unterschieden sich die mittleren Herzfrequenzen dann nicht signifikant und sie bewegten sich unter 120 bpm. Nur beim letzten Marschsektor S09 stieg der Mittelwert wieder signifikant an, F(2.81, 47.71) = 88.29, p = 0.011, was auf eine mögliche Willensleistung mit einem «Endspurt» in den letzten 10 km der Teilnehmenden schliessen könnte.

Die mittleren Körperkerntemperaturen wiederum bewegten sich im ersten Teil von Sektor 01 bis 05 zwischen 38.2 und 38.1 °C und veränderten sich von Sektor zu Sektor nicht signifikant. Erst in der Hälfte des Marsches vom Sektor S05 zu S06 sank das Mittel der Körperkerntemperatur signifikant F(2.91, 43.62) = 24.81, p < 0.0001. Danach veränderte sich der Mittelwert der Körperkerntemperatur von Sektor 06 bis 08, analog der Mittelwerte der Herzfrequenzen, nicht mehr signifikant. Auch hier war im letzten Sektor 09 der Mittelwert wieder signifikant gestiegen, F(2.91, 43.62) = 24.81, p = 0.0006.

Aus dieser Analyse lässt sich schliessen, dass die Körperkerntemperatur im Vergleich zur Herzfrequenz stabiler und konstanter war und Schwankungen während der körperlichen Aktivität geringer ausfielen. Es beweist, dass die Wärme im Körper länger gespeichert wird, und könnte somit auf die Gefahr hinweisen, dass bei anhaltend intensiven Aktivitäten (bei höherer Intensität, als beim 100-km-Marsch) die Kerntemperatur auf einen kritischen Wert ansteigen könnte. Somit könnte die Körperkerntemperatur einen Hinweis auf eine Überforderung oder einen Kollaps geben. Doch dafür müsste die Intensität wohl über einen längeren Zeitraum höher sein, was wiederum auf eine Aktivität nahe des anaeroben Bereichs oder sogar in diesem drin hindeutet. Oder die äusserlichen Bedingungen, wie zum Beispiel die Aussen- oder Raumtemperatur, müsste über eine längere Zeit stark erhöht sein (Al Mahri & Bouchama, 2018; Armstrong et al., 1996).

Die Herzfrequenz wiederum, ist wahrscheinlich kein sinnvoller oder einfacher Indikator für die Erkennung der Ermüdung oder sogar eines Kollapses, da sie sehr direkt und schnell ändert und kurzzeitig hohe Werte erreichen kann, ohne böse Folgen zu haben. Es lässt sich somit nur schwer einen Trend des Verlaufs der Herzfrequenz ermitteln. Ausserdem ist sie von vielen äusserlichen Bedingungen beeinflussbar und somit nicht immer akkurat (Achten & Jeukendrup,

2003). Gefährliche Werte für eine Erkennung zum Beispiel einer Kollaps-Gefahr wären deshalb eine Herzfrequenz unter dem eigenen üblichen Ruhepuls oder Herzfrequenzen im eigenen Maximalbereich, ohne dass die Intensität sehr hoch wäre, oder anhaltend hohe Herzfrequenzen bei sehr starken Belastungen. Die Messung der tiefen Herzfrequenzen ist wiederum sehr fehleranfällig und ungenau, was die Erkennung in dieser Hinsicht wieder schwierig gestaltet(Achten & Jeukendrup, 2003).

Es wurde darauf hingewiesen, dass die verschiedenen Marschstrecken in verschieden Intensitäten zurückgelegt wurden und dass dies einerseits auf unterschiedliche Marschgeschwindigkeiten zurückgeführt werden könnte, oder auf die Gegebenheit der Marschstrecke. Der Vergleich des Höhenprofils der Marschstrecke (Abbildung 1 oder 2) mit den Kurven der Herzfrequenzen und der Körperkerntemperaturen (Abbildungen 4 bis 7) lässt eine Korrelation vermuten. Besonders die Kurven der Körperkerntemperaturen ähneln dem Höhenprofil stark. Zudem zeigt die Abbildung 3 mit den Marschgeschwindigkeiten, dass diese in allen Gruppen in der zweiten Hälfte des Marsches abgenommen haben und konstanter waren, was im Vergleich zum Höhenprofil auf eine Anpassung der Intensität hindeutet. Dies scheint in der statistischen Analyse bestätigen zu werden.

4.3 Erkenntnisse der Analyse des PSI

Begutachtet man die Mittel- (Gruppe 1: 3.6 ± 0.9 ; Gruppe 2: 4.2 ± 0.5 ; Gruppe 3: 4.0 ± 0.8) und Maximalwerte (Gruppe 1: 6.8 ± 1.2 ; Gruppe 2: 7.1 ± 0.4 ; Gruppe 3: 7.0 ± 0.7) erkennt man, dass sich die Werte (exklusiv Pausenwerte) in allen Gruppen im nicht gefährdeten Bereich befanden. Man erkennt auch, dass die Gruppe 2 die höchsten Mittel- und Maximalwerte hatten, gefolgt von der Gruppe 3 und dann der Gruppe 1. Diese Reihenfolge finden wir auch bei den mittleren Marschgeschwindigkeiten (Tabelle 4 und Abbildung 3). Daraus kann man schliessen, dass im Allgemeinen die Gruppe 2 die höchste Intensität über den ganzen Marsch gehabt hat und die PSI-Werte mit den Geschwindigkeiten korrelieren. Es kann aber festgestellt werden, dass die mittleren PSI-Werte der Gruppen für die gesamte Marschstrecke bezüglich Ermittlung gefährlicher PSI-Werte nicht sehr aussagekräftig sind, da über die enorme Distanz längere Abschnitte in hohen Bereichen immer noch möglich gewesen wären. Die Abweichungen in den Gruppen bei den Maximalwerten zeigen denn auch, dass die PSI-Werte bis 8.1 reichten (Gruppe 1 und 3). Auch in der Gruppe 2 erreichte man mit 7.6 Werte im höheren Bereich, welcher nach (Buller et al., 2008) als gefährdet mit hohem Risiko klassifiziert wird. Die Verläufe (Abbildung 12) zeigen, dass die Maximalwerte bei allen Gruppen im ersten Viertel des Marsches die

kritische Grenze überschreiten. Dies lässt vermuten, dass die Belastung im ersten Abschnitt des Marsches sehr hoch und die Teilnehmenden sehr stark gefordert waren.

Die statistische Analyse in vier Sektoren zeigt eine schrittweise signifikante Abnahme der PSI-Mittelwerte im Verlauf des Marsches, F(3, 45) = 67.92, p < 0.0001. Dies beweist, dass die Belastung für die Teilnehmenden im ersten Viertel am höchsten (PSI 4.9 ± 0.7) und in der ersten Hälfte des Marsches grösser waren, als in der zweiten. Die Werte im Sektor 03 und 04 unterscheiden sich nicht signifikant, p = 1. Daraus kann geschlossen werden, dass der zweite Teil mit gleichmässiger Belastung marschiert wurde. Diese Resultate decken sich mit den vorherigen Beobachtungen und Erkenntnissen zu den Herzfrequenzen und Körperkerntemperaturen. Die Analyse über neun Marschsektoren deckt auf, dass der PSI im ersten Sektor 01 signifikant tiefer ist als im Sektor 02, F(3.13, 46.97) = 48.69, p = 0.003, obwohl die Werte, die den PSI-Wert 7.5 überschrittenen haben, im Sektor 01 liegen. Zu den anderen Sektoren S03, S04 und S05 in der ersten Hälfte des Marsches unterscheidet sich der Wert von Sektor 01 jedoch nicht signifikant. Sektor 02, der unmittelbar vor der ersten Pause ist, hatte die höchsten PSI-Mittelwerte und unterscheidet sich von allen anderen Sektoren signifikant, ausser von Sektor 05, dem Sektor vor der Hälfte des Marsches. Es kann konstatiert werden, dass die erste Hälfte im Bereich einer moderaten Belastung (Moran et al., 1998) marschiert wurde, jedoch mehr variierte als danach in der zweiten Marschhälfte. Die Werte der Marschsektoren S06, S07, S08 und S09 unterscheiden sich nicht signifikant untereinander, ausser S08 von S09, F(3.13, 46.97) = 48.69, p < 0.0001. Dafür unterscheiden sie sich alle von den Werten der Marschsektoren in der ersten Hälfte. Die Belastungen im zweiten Teil des Marsches waren dementsprechend nach (Moran et al., 1998) vermehrt im niedrigen Bereich. Auch diese Erkenntnisse decken sich mit den Beobachtungen der Herzfrequenzen und den Körperkerntemperaturen.

Im Allgemeinen kann man sagen, dass während dem Marsch hohe Belastungen bis in den Bereich der Gefährlichkeit erreicht wurden. Diese betraf aber nur einzelne Teilnehmende und wiederspiegelte nicht die gesamte Gruppe. Ausserdem variierte die Belastung in den ersten Sektoren stark und somit waren die hohen Werte nicht über einen längeren Zeitraum im kritischen Bereich. Es kam während dem Marsch zu keinen Zwischenfällen, bei denen Teilnehmende einen Kollaps oder sonstige Überbelastungen hatten, die sie gezwungen hätte, den Marsch abzubrechen. Deshalb ist es schwierig den PSI richtig einzuordnen. Vergleicht man aber die Verläufe und die Werte, kann man eine akkurate Wiedergabe der Belastung vermuten. Jedoch scheint der PSI nicht an die zunehmende Müdigkeit oder eine Erschöpfung aus thermoregulatorischen Gründen geknüpft zu sein, sondern eher an die marschierte Intensität. Eine Studie von

Davey et al. (2021) befindet den PSI denn auch als unzuverlässig für die Erkennung von Hitzeerkrankungen. Die tiefen mittleren PSI-Werte im niedrigen und moderaten Belastungsbereich decken sich auch mit anderen Studien, die ebenfalls keine zunehmend alarmierende PSI-Werte während langen Ausdauerbelastungen messen konnten (Pokora & Zebrowska, 2016; B. Poon et al., 2021; Schweizer et al., 2021).

4.4 Erkenntnisse der Analyse der Herzfrequenzvariabilität

Die Berechneten RMSSD-Werte bei der Erfassung 2 Stunden vor dem Marsch lagen bei den meisten Teilnehmenden zwischen 20 und 40 ms (RMSSD Pre: 28.8 ± 8.8 ms). Vergleicht man diese Werte (Tabelle 19) mit den Normwerten für die Altersgruppe von 20- bis 29-Jährigen, sehen wir, dass sie zwar leicht niedriger sind, jedoch noch in den Bereich der Norm liegen. Es muss aber erwähnt werden, dass diese Normwerte für die 24-Stunden-Herzfrequenzvariabilität bestimmt wurden (Umetani et al., 1998). Dass die Werte leicht tiefer waren als die Norm, kann bedeuten, dass die parasympathische Aktivität 2 Stunden vor dem Marsch leicht reduziert war. Dies kann aufgrund einer gewissen Nervosität auf die bevorstehende Belastung gewesen sein. Oder die Beanspruchung der Tage zuvor im militärischen Alltag hatten bereits einen Müdigkeitseffekt auf die Körper der Teilnehmenden.

Die vor dem Marsch gemessenen Werte (Pre) waren von allen Messzeitpunkten die höchsten RMSSD-Mittelwerte und unterschieden sich zu allen anderen Messzeitpunkten signifikant F(5, 75) = 20.5, p < 0.0001, ausser zu den Werten der 3. Pause (RMSSD 3), F(5, 75) = 20.5, p = 1. Daraus können wir deuten, dass während den ersten zwei Pausen (RMSSD 1 und 2) und am Schluss des Marsches (RMSSD End) die parasympathische Aktivität reduziert war und die sympathische Aktivität vom Marsch beeinflusst und signifikant erhöht war. Diese Erkenntnis deckt sich mit einer anderen Studie (Clemente-Suarez, 2015). Überraschenderweise war das bei der 3. Pause nicht der Fall, obwohl auch dort die Werte leicht tiefer waren im Vergleich zur Vormessung (Pre). Eine Studie über Effekte einer 3-Stunden-Wanderung konnte auch keine Änderungen bei der Herzfrequenzvariabilität feststellen (Niedermeier et al., 2017). Die Resultate der anderen gemessenen Parameter zeigen, dass die Marschsektoren direkt vor der 3. Pause S06 und S07 (bei der Aufteilung in vier Marschsektoren: S03) die tiefsten Werte erzielten. Folglich war die Belastung und Intensität bei diesen Sektoren am tiefsten während dem Marsch. Es könnte deshalb gedeutet werden, dass sich der Körper nach der tieferen Belastung vor der 3. Pause schneller wieder anpassen konnte. Dies widerspricht aber einer anderen Studie, die eine

anhaltend erhöhte Aktivität des Sympathikus nach langen Ausdauerbelastungen zeigen (Paech et al., 2021), obwohl die Intensität höher war.

Die RMSSD-Werte der Messzeitpunkte aller Pausen und am Schluss (RMSSD 1, 2, 3 und End) des Marsches waren wiederum nicht signifikant unterschiedlich, ausser zwischen den Messzeitpunkten der 3. Pause (RMSSD 3) und nach dem Marsch (RMSSD End), F(5, 75) = 20.5, p = 0.01. Dies deutet wieder auf eine erhöhte Belastung im letzten Marschabschnitt hin, was sich mit den anderen Resultaten deckt.

Die Werte des gesamten Zeitraums des Marsches (RMSSD Full) waren bei weitem am tiefsten und zu allen anderen Messzeitpunkten signifikant unterschiedlich. Sie weisen auf einen starken Rückgang der parasympathischen Aktivität während des gesamten Marsches hin. Die ist nicht weiter verwunderlich, da bei einer Aktivität der aktive sympathische Teil übertrumpft.

4.5 Stärken und Schwächen der Studie

Die Einteilung der Marschgruppen erfolgte nach Einteilung des Kompaniezuges. Es wurden deshalb weder die vor dem Marsch ermittelten Fitnessresultate, noch die Verletzungshistorie der Teilnehmenden beachtet. Dies konnte dazu führen, dass in einer Gruppe physiologisch starke und schwache Teilnehmende bei gleicher Geschwindigkeit marschieren mussten. Die physiologisch stärkeren Teilnehmenden mussten sich gezwungenermassen an die schwächeren anpassen. Vergleicht man die Mittelwerte der Herzfrequenzen und der Körperkerntemperaturen der einzelnen Teilnehmenden, konnte man in den Gruppen starke Unterschiede sehen.

Die Analyse über vier Sektoren von zirka 25 km gibt einen guten Überblick über Trends während dem ganzen Marsch. Die Entscheidung diese Sektoren zu analysieren ist meiner Meinung nach sinnvoll. Um tieferen Einblick zu bekommen, musste ich entscheiden, wie gross die Marschsektoren waren. Die Einteilung in 18 Marschsektoren von zirka 5 km wäre anhand den Pausen möglich gewesen, hätte aber Einbussen beim Überblick gegeben. Ausserdem waren die Sektoren von der Länge zum Teil stark variierend. Die Wahl auf die Einteilung in neun Sektoren von zirka 10 km gab Einblick auf relativ kleine Marschsektoren, ohne den Überblick zu verlieren. Diese Lösung kann somit als eine Stärke, aber auch eine Schwäche angesehen werden kann.

Die ursprüngliche Formel zur Bestimmung des PSI setzt den Ruhewerte der Herzfrequenz und der Körperkerntemperatur voraus. Weil diese Messungen nicht gezielt gemacht wurden, musste für die Herzfrequenz in Ruhe auf einen fixen Wert (71 bpm) (Buller et al., 2022; Cuddy et al., 2013) und bei der Körperkerntemperatur auf den Wert beim Start ausgewichen werden. Dies

kann womöglich Resultate negativ beeinflusst haben und könnte als eine Schwäche bei der Anwendung des PSI sein. Zum Beispiel könnten die Werte der Körperkerntemperatur beim Start bereits durch die Hektik und Anspannung über die bevorstehende Aufgabe erhöht gewesen sein.

Für die Analyse der Herzfrequenzvariabilität wurden die Messzeitpunkte nach der Erhebung der Daten ermittelt. Dies ist problematisch, da man nicht weiss, wie das Verhalten der Teilnehmenden während der Datenerfassung bei den jeweiligen Messzeitpunkten war. Eine gezielte und kontrollierte Messung in Ruhe müsste im vornherein geplant werden. So kann es zum Beispiel sein, dass die ausgewählten Daten von den Pausen durch die Verpflegung, Aufnahme von Nahrung oder andere Pausenaktivitäten verfälscht wurden (Chang et al., 2021).

Ein weiterer Schwachpunkt ist, dass man die Herzfrequenzvariabilität nach dem Ende des Marsches relativ schnell abgebrochen hat. So konnten über alle Gruppen hinweg nur Daten 5 bis 10 min nach dem Marsch erhoben werden. Eine Nachmessung wäre sinnvoll.

Die Reinigung der RR-Intervalle gestaltete sich als schwierig. Bei der bewährten gewählten Methode werden eventuell richtige Daten als Artefakte gelöscht.

5 Schlussfolgerung

Mit dieser Arbeit versuchte ich herauszufinden, wie sich die Parameter Herzfrequenz, Körperkerntemperatur und Herzvariabilität während einer sehr langen Ausdauerleistung bei niedriger Intensität veränderten. Zusätzlich wurde versucht die Belastung mittels PSI abzubilden.

Die Herzfrequenz und die Körperkerntemperatur passten sich während dem 100-km-Marsch laufend an. Während sich die Herzfrequenz besonders schnell und direkt an die Belastungsanforderung anpasste, veränderte sich die Körperkerntemperatur langsamer und fliessender.

Die Herzfrequenz änderte sich besonders in der ersten Marschhälfte immer wieder steigend und senkend. Die Körperkerntemperatur wiederum blieb relativ stabil und veränderte sich nur wenig. Beide Parameter nahmen gegen die Annahme mit zunehmender Dauer und Länge des Marsches nicht zu. Die Herzfrequenzen und Körperkerntemperaturen nahmen im Verlauf des Marsches sogar ab. Sie waren in der ersten Marschhälfte signifikant höher als in der zweiten Marschhälfte. Gleichzeitig wurde die erste Marschhälfte mit höherem Tempo absolviert als die zweite. Es konnte somit festgestellt werden, dass die Herzfrequenzen und Körperkerntemperaturen mehr von der Marschgeschwindigkeit und dem wechselnden Terrain beeinflusst waren, als von der Müdigkeit durch die zunehmende Dauer. Einen Kollaps oder eine Aufgabe aufgrund Hitzeerkrankung gab es während dem Marsch keine. Die Intensität wurde in der zweiten Marschhälfte von den Marschteilnehmenden angepasst, und somit auch ihre Belastung. Somit kann nicht belegt werden, ob die Herzfrequenz und die Körperkerntemperatur geeignet sind, um einen Kollaps frühzeitig zu erkennen. Die Körperkerntemperatur könnte aber aufgrund der Wärmespeicherkapazität im Körper und bei anhaltend höheren Intensitäten, sowie anhaltend höheren Aussentemperaturen einen Hinweis auf eine Hitzeerkrankung hinweisen.

Der PSI bestätigt, dass die Belastung und somit die Intensität in der ersten Marschhälfte (vor allem in den ersten 25 km des Marsches) erhöht war und in der zweiten Marschhälfte tiefer war. Obwohl im ersten Abschnitt PSI-Werte für einzelne Teilnehmer im gefährlichen Bereich berechnet wurden, kam es zu keinen Zwischenfällen mit Abbruch oder Kollaps. Der gesamte Marsch wurde anhand dem PSI mit einer moderaten bis niedrigen Belastung bewertet. Es ist deshalb sehr fraglich, ob der PSI eine Erschöpfung oder eine zunehmende Müdigkeit abbilden kann.

Die Herzfrequenzvariabilität war vor dem Marsch im normalen Bereich und hatte während dem Marsch und nach dem Marsch signifikant tiefere Werte. Dies deutet auf eine verstärkte sympathische und reduzierte parasympathische Aktivität des Körpers während den Marschpausen und nach dem Marsch hin, und somit auf eine erhöhte Stressbelastung für den Körper. Die Messung

der Herzfrequenzvariabilität kann sinnvoll sein, um den Körperzustand und seine Erholung und Regeneration zu messen. Für die Erkennung einer akuten Überbelastung anhand der Herzfrequenzvariabilität fehlen aber zurzeit noch genügend Erkenntnisse und die passenden Methoden dazu.

Literaturverzeichnis

- Achten, J., & Jeukendrup, A. E. (2003). Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports Med*, 33(7), 517-538. https://doi.org/10.2165/00007256-200333070-00004
- Al Mahri, S., & Bouchama, A. (2018). Heatstroke. *Handb Clin Neurol*, *157*, 531-545. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64074-1.00032-X
- Annunzio, G. (2017). Die HRV-Analyse als Präventionsinstrument gegen Stress der Mitarbeitenden im Unternehmen [Masterarbeit, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften]. ZHAW digitalcollection. https://doi.org/10.21256/zhaw-2081
- Armstrong, L. E., Epstein, Y., Greenleaf, J. E., Haymes, E. M., Hubbard, R. W., Roberts, W. O., & Thompson, P. D. (1996). American College of Sports Medicine position stand. Heat and cold illnesses during distance running. *Med Sci Sports Exerc*, 28(12), i-x. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8970149
- Baur, D. A., Bach, C. W., Hyder, W. J., & Ormsbee, M. J. (2016). Fluid retention, muscle damage, and altered body composition at the Ultraman triathlon. *Eur J Appl Physiol*, 116(3), 447-458. https://doi.org/10.1007/s00421-015-3291-9
- Billat, V. L., Flechet, B., Petit, B., Muriaux, G., & Koralsztein, J. P. (1999). Interval training at VO2max: effects on aerobic performance and overtraining markers. *Med Sci Sports Exerc*, 31(1), 156-163. https://doi.org/10.1097/00005768-199901000-00024
- Böckelmann, I. (2012). Analyse der Herzfrequenzvariabilität (HRV) praktische Relevanz. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie, 62(5), 275-279. https://doi.org/10.1007/BF03346164
- Buller, M., Fellin, R., Bursey, M., Galer, M., Atkinson, E., Beidleman, B. A., . . . Williamson, J. R. (2022). Gait instability and estimated core temperature predict exertional heat stroke. *Br J Sports Med*, *56*(8), 446-451. https://doi.org/10.1136/bjsports-2021-104081
- Buller, M. J., Latzka, W. A., Yokota, M., Tharion, W. J., & Moran, D. S. (2008). A real-time heat strain risk classifier using heart rate and skin temperature. *Physiol Meas*, 29(12), N79-85. https://doi.org/10.1088/0967-3334/29/12/N01
- Bundesamt für Statistik. (2020). Schweizerische Gesundheitsbefragung 2017: Übergewicht und Adipositas.

 Schweizerische Eidgenossenschaft.

 https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/gesundheit/determinanten.assetdetai

 1.14147720.html

- Carter, J. B., Banister, E. W., & Blaber, A. P. (2003). Effect of endurance exercise on autonomic control of heart rate. *Sports Med*, *33*(1), 33-46. https://doi.org/10.2165/00007256-200333010-00003
- Chambers, C., Noakes, T. D., Lambert, E. V., & Lambert, M. I. (1998). Time course of recovery of vertical jump height and heart rate versus running speed after a 90-km foot race. *Journal of sports science*, 16(7), 645-651. https://doi.org/10.1080/026404198366452
- Chang, J. C., Huang, W. L., Liu, C. Y., Tseng, M. M., Yang, C. C. H., & Kuo, T. B. J. (2021). Heart Rate Variability Reactivity to Food Image Stimuli is Associated with Body Mass Index. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 46(3), 271-277. https://doi.org/10.1007/s10484-021-09514-2
- Clemente-Suarez, V. J. (2015). Psychophysiological response and energy balance during a 14-h ultraendurance mountain running event. *Appl Physiol Nutr Metab*, 40(3), 269-273. https://doi.org/10.1139/apnm-2014-0263
- Compagno, T. (2017). *Wanderfreund: Schweizer Volkssport Wandern*. Coop Zeitung. https://www.coopzeitung.ch/themen/freizeit/tourismus/2017/wanderfreund-schweizer-volkssport-wandern-31338/
- Cuddy, J. S., Buller, M., Hailes, W. S., & Ruby, B. C. (2013). Skin temperature and heart rate can be used to estimate physiological strain during exercise in the heat in a cohort of fit and unfit males. *Mil Med*, *178*(7), e841-847. https://doi.org/10.7205/MILMED-D-12-00524
- Datasport. (2022). *Ultra Running*. Datasport. https://www.datasport.com/de/sportevents/running/ultra-running/
- Davey, S. L., Downie, V., Griggs, K., & Havenith, G. (2021). The physiological strain index does not reliably identify individuals at risk of reaching a thermal tolerance limit. *European journal of applied physiology*, 121(6), 1701-1713. https://doi.org/10.1007/s00421-021-04642-3
- Dräger. (2013). *Die Bedeutung der Kerntemperatur Pathophysiologie und Messmethoden*.

 Dräger Medical. Retrieved 2022 from https://www.draeger.com/library/content/t-core-booklet-br-9067939-de-1411-1-2.pdf
- Dressendorfer, R. H., Wade, C. E., & Scaff, J. H., Jr. (1985). Increased Morning Heart Rate in Runners: A Valid Sign of Overtraining? *Phys Sportsmed*, *13*(8), 77-86. https://doi.org/10.1080/00913847.1985.11708858

- Eyer, R. P. (2015). Der lange und beschwerliche Weg in die «Fremden Dienste». *ASMZ*: Sicherheit Schweiz: Allgemeine schweizerische Militärzeitschrift, 181(4), 52-53. https://doi.org/http://doi.org/10.5169/seals-513495
- Fischer, A., Lamprecht, M., & Bürgi, R. (2021). Wandern in der Schweiz 2020. Sekundäranalyse von «Sport Schweiz 2020» und Befragung von Wandernden in verschiedenen Wandergebieten (Materialien Langsamverkehr, Issue 148). B. Schweizer Wanderwege.
- Franke-Gricksch, N. (2017). *RMSSD der HRV-Wert für die Erholungsfähigkeit*. https://xn-hrv-herzratenvariabilitt-dcc.de/2017/09/rmssd-der-hrv-wert-fuer-die-erholungsfaehigkeit/
- Gilgen-Ammann, R., Schweizer, T., & Wyss, T. (2019). RR interval signal quality of a heart rate monitor and an ECG Holter at rest and during exercise. *Eur J Appl Physiol*, *119*(7), 1525-1532. https://doi.org/10.1007/s00421-019-04142-5
- Ginsburg, G. S., Agil, A., O'Toole, M., Rimm, E., Douglas, P. S., & Rifai, N. (1996). Effects of a single bout of ultraendurance exercise on lipid levels and susceptibility of lipids to peroxidation in triathletes. *JAMA*, *276*(3), 221-225. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8667567
- Goldberger, A. L., Goldberger, Z. D., & Shvilkin, A. (2013). Chapter 13 Sinus and Escape Rhythms. In A. L. Goldberger, Z. D. Goldberger, & A. Shvilkin (Eds.), *Goldberger's Clinical Electrocardiography (Eighth Edition)* (pp. 114-120). W.B. Saunders. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-08786-5.00013-0
- Gonzalez-Alonso, J., Mora-Rodriguez, R., & Coyle, E. F. (2000). Stroke volume during exercise: interaction of environment and hydration. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 278(2), H321-330. https://doi.org/10.1152/ajpheart.2000.278.2.H321
- Gonzalez-Alonso, J., Teller, C., Andersen, S. L., Jensen, F. B., Hyldig, T., & Nielsen, B. (1999). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol (1985)*, 86(3), 1032-1039. https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.3.1032
- greenTEG. (2022a). *Core Body Temperature Algorithm*. greenTEG. https://www.greenteg.com/heat-flux-sensor-technology/core-body-temperature-algorithm/
- greenTEG. (2022b). *CORE Body Temperature Monitor*. greenTEG. https://www.greenteg.com/products/core-body-temperature-monitor/

- greenTEG. (2022c). *Heat flux An introduction to heat flux: definition & equation*. greenTEG. https://www.greenteg.com/heat-flux-sensor-technology/heat-flux/
- Hedelin, R., Kentta, G., Wiklund, U., Bjerle, P., & Henriksson-Larsen, K. (2000). Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Med Sci Sports Exerc*, 32(8), 1480-1484. https://doi.org/10.1097/00005768-200008000-00017
- Hepa. (2013). Gesundheitswirksame Bewegung. Grundlagendokument. Bundesamt für Sport
 BASPO. https://www.hepa.ch/content/hepa-internet/de/bewegungsempfehlungen/jcr_content/contentPar/accordion/accordionIte
 https://www.hepa.ch/content/hepa-internet/de/bewegungsempfehlungen/jcr_content/contentPar/accordion/accordionIte
 https://www.hepa.ch/content/hepa-internet/de/bewegungsempfehlungen/jcr_content/contentPar/accordion/accordionIte
 https://www.hepa.ch/content/hepa-internet/de/bewegungsempfehlungen/jcr_content/contentPar/accordion/accordionIte
 https://www.hepa.ch/content/hepa-internet/de/bewegungsempfehlungen/jcr_content/contentPar/accordion/accordionIte
 https://ms/weitere_dokumente/accordionPar/downloadlist/downloadItems/12_148041608460
 <a href="mailto:ms/weitere_dokumente/accordionPar/downloadlist/d
- Hinde, K., White, G., & Armstrong, N. (2021). Wearable Devices Suitable for Monitoring Twenty Four Hour Heart Rate Variability in Military Populations. *Sensors (Basel)*, 21(4). https://doi.org/10.3390/s21041061
- Hoffman, M. D. (2016). State of the Science-Ultraendurance Sports. *Int J Sports Physiol Perform*, 11(6), 831-832. https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0472
- Hoffman, M. D., & Stuempfle, K. J. (2014). Hydration strategies, weight change and performance in a 161 km ultramarathon. *Res Sports Med*, 22(3), 213-225. https://doi.org/10.1080/15438627.2014.915838
- Holter, N. J. (1961). New method for heart studies. *Science*, *134*(3486), 1214-1220. https://doi.org/10.1126/science.134.3486.1214
- Hottenrott, L. (2021). Herzfrequenzvariabilität: Was du wissen musst und wie sie für dein Training nützlich ist. Polar. https://www.polar.com/blog/de/herzfrequenzvariabilitaet-was-du-wissen-musst-und-warum-sie-fuer-dein-training-nuetzlich-ist/
- Hymczak, H., Golab, A., Mendrala, K., Plicner, D., Darocha, T., Podsiadlo, P., . . . Kosinski, S. (2021). Core Temperature Measurement-Principles of Correct Measurement, Problems, and Complications. *Int J Environ Res Public Health*, 18(20). https://doi.org/10.3390/ijerph182010606
- Jorres, M., Gunga, H. C., & Steinach, M. (2021). Physiological Changes, Activity, and Stress During a 100-km-24-h Walking-March. *Front Physiol*, *12*, 640710. https://doi.org/10.3389/fphys.2021.640710
- Karey, E., Pan, S., Morris, A. N., Bruun, D. A., Lein, P. J., & Chen, C.-Y. (2019). The Use of Percent Change in RR Interval for Data Exclusion in Analyzing 24-h Time Domain

- Heart Rate Variability in Rodents [Methods]. *Frontiers in Physiology*, 10. https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00693
- Knechtle, B., & Nikolaidis, P. T. (2015). Ultra-marathon running. *Dansk Sportsmedicin*, *19*(4), 6-10. https://doi.org/10.5167/uzh-114975
- Knechtle, B., & Nikolaidis, P. T. (2018). Physiology and Pathophysiology in Ultra-Marathon Running. *Front Physiol*, *9*, 634. https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00634
- Knechtle, B., Salas Fraire, O., Andonie, J. L., & Kohler, G. (2008). Effect of a multistage ultra-endurance triathlon on body composition: World Challenge Deca Iron Triathlon 2006.
 Br J Sports Med, 42(2), 121-125; discussion 125. https://doi.org/10.1136/bjsm.2007.038034
- Krabak, B. J., Waite, B., & Lipman, G. (2014). Evaluation and treatment of injury and illness in the ultramarathon athlete. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 25(4), 845-863. https://doi.org/10.1016/j.pmr.2014.06.006
- Kubios. (2022). *Preprocessing of HRV Data*. Kubios. https://www.kubios.com/hrv-preprocessing/
- Lambert, M. I., Dugas, J. P., Kirkman, M. C., Mokone, G. G., & Waldeck, M. R. (2004). Changes in Running Speeds in a 100 KM Ultra-Marathon Race. *J Sports Sci Med*, *3*(3), 167-173. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24482594
- Lamprecht, M., Bürgi, R., & Stamm, H. (2020). Sport Schweiz 2020: Sportaktivität und Sportinteresse der Schweizer Bevölkerung. B. f. S. BASPO.
- Laukkanen, R. M., & Virtanen, P. K. (1998). Heart rate monitors: state of the art. *J Sports Sci*, *16 Suppl*, S3-7. https://doi.org/10.1080/026404198366920
- Lauth, B., & Sareiter, J. (2005). Versuch und Irrtum: Karl Popper und die «Logik der Forschung». *Wissenschaftliche Erkenntnis*(2. Auflage), 95-104. https://doi.org/https://doi.org/10.30965/9783957436986_009
- Leon, L. R., & Bouchama, A. (2015). Heat stroke. *Compr Physiol*, *5*(2), 611-647. https://doi.org/10.1002/cphy.c140017
- Malik, M. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, *93*, 1043-1065.
- McLaughlin, K. A., Townes, D. A., Wedmore, I. S., Billingsley, R. T., Listrom, C. D., & Iverson, L. D. (2006). Pattern of injury and illness during expedition-length adventure races. *Wilderness Environ Med*, *17*(3), 158-161. https://doi.org/10.1580/pr29-05

- Methodenberatung Universität Zürich. (2022). *Einfaktorielle Varianzanalyse (mit Messwiederholung*). Methodenberatung Universität Zürich. https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/evarianzmessw.html
- Moran, D. S., & Mendal, L. (2002). Core temperature measurement: methods and current insights. *Sports Med*, *32*(14), 879-885. https://doi.org/10.2165/00007256-200232140-00001
- Moran, D. S., Shitzer, A., & Pandolf, K. B. (1998). A physiological strain index to evaluate heat stress. *Am J Physiol*, 275(1), R129-134. https://doi.org/10.1152/ajpregu.1998.275.1.R129
- Mosso, A. (1915). Fatigue. Allen and Unwin Ltd.
- Murray, J. (2021). 'These races are epic': why ultrarunning is soaring in popularity. Retrieved 18.6.2022 from https://www.theguardian.com/lifeandstyle/2021/jun/14/these-races-are-epic-why-ultrarunning-is-soaring-in-popularity
- Niedermeier, M., Grafetstatter, C., Hartl, A., & Kopp, M. (2017). A Randomized Crossover Trial on Acute Stress-Related Physiological Responses to Mountain Hiking. *Int J Environ Res Public Health*, *14*(8). https://doi.org/10.3390/ijerph14080905
- Nystrom, M. (2021). *How optical heart rate monitoring works with polar precision prime*.

 Polar. https://www.polar.com/blog/optical-heart-rate-monitoring-polar-precision-prime/
- Oeschger, R., Roos, L., Wyss, T., Buller, M. J., Veenstra, B. J., & Gilgen-Ammann, R. (2022).

 Influence of Soldiers' Cardiorespiratory Fitness on Physiological Responses and
 Dropouts During a Loaded Long-distance March. *Mil Med.*https://doi.org/10.1093/milmed/usab540
- Paech, C., Schrieber, S., Daehnert, I., Schmidt-Hellinger, P. J., Wolfarth, B., Wuestenfeld, J., & Thouet, T. (2021). Influence of a 100-mile ultramarathon on heart rate and heart rate variability. *BMJ Open Sport Exerc Med*, 7(2), e001005. https://doi.org/10.1136/bmjsem-2020-001005
- Phillips, S. (2015). Fatigue in sport and exercise (1. ed.). Routledge.
- Pokora, I., & Zebrowska, A. (2016). Application of A Physiological Strain Index in Evaluating Responses to Exercise Stress A Comparison Between Endurance and High Intensity Intermittent Trained Athletes. *Journal of Human Kinetics*, 50. https://doi.org/10.1515/hukin-2015-0142

- Polar. (2021). *Polar H10 Gebrauchsanleitung*. Polar. https://support.polar.com/e_manuals/h10-heart-rate-sensor/polar-h10-user-manual-deutsch/manual.pdf
- Polar. (2022). *Polar Verity Sense Gebrauchsanleitung*. Polar. https://support.polar.com/e_manuals/verity-sense/polar-verity-sense-user-manual-deutsch/technical-specifications.htm
- Poon, B., Prakaash, S., Teo, Y., Fan, P., & Lee, J. (2021). Thermal strain and fluid balance during a 72-km military route march in a field setting. https://doi.org/10.11622/smedj.2021053
- Poon, B. H., Prakaash, S., Teo, Y. S., Fan, P. W., & Lee, J. K. W. (2021). Thermal strain and fluid balance during a 72-km military route march in a field setting. *Singapore Med J.* https://doi.org/10.11622/smedj.2021053
- RDocumentation. (2022). stat.desc: Descriptive statistics on a data frame or time series.

 RDocumentation.
 - https://www.rdocumentation.org/packages/pastecs/versions/1.3.21/topics/stat.desc
- Reynolds, K. L., White, J. S., Knapik, J. J., Witt, C. E., & Amoroso, P. J. (1999). Injuries and risk factors in a 100-mile (161-km) infantry road march. *Prev Med*, 28(2), 167-173. https://doi.org/10.1006/pmed.1998.0396
- Risk, M., Bruno, J., Llamedo, M., & Arini, P. (2005). *Measurement of QT interval and duration of the QRS complex at different ECG sampling rates*. https://doi.org/10.1109/CIC.2005.1588146
- Rosendal, L., Langberg, H., Skov-Jensen, A., & Kjaer, M. (2003). Incidence of injury and physical performance adaptations during military training. *Clin J Sport Med*, *13*(3), 157-163. https://doi.org/10.1097/00042752-200305000-00006
- Sammito, S., & Böckelmann, I. (2015). Analyse der Herzfrequenzvariabilität. *Herz*, 40(1), 76-84. https://doi.org/10.1007/s00059-014-4145-7
- Schweizer, T., Oeschger, R., & Gilgen-Ammann, R. (2021, 08.-10. Sept.). An evaluation of the physiological strain index during a prolonged submaximal exercise with sleep deprivation. The 26th Annual Congress of the European College of Sport Science, Virtual Congress.
- sda, S. D. (2017). *Der Schweizer Volkssport Wandern boomt*. Watson. https://www.watson.ch/464179916-der-schweizer-volkssport-wandern-boomt

- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Front Public Health*, *5*, 258. https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258
- Swiss Running. (2021). *Swiss Runners Veranstaltungen*. Swiss Running. https://www.swiss-running.ch/de/swiss-runners/
- Ultrarunners, I. A. o. (2022). *International Association of Ultrarunners*. International Association of Ultrarunners. http://iau-ultramarathon.org/
- Umetani, K., Singer, D. H., McCraty, R., & Atkinson, M. (1998). Twenty-four hour time domain heart rate variability and heart rate: relations to age and gender over nine decades. *J Am Coll Cardiol*, 31(3), 593-601. https://doi.org/10.1016/s0735-1097(97)00554-8
- Valentino, T. R., Stuempfle, K. J., Kern, M., & Hoffman, M. D. (2016). The influence of hydration state on thermoregulation during a 161-km ultramarathon. *Res Sports Med*, 24(3), 212-221. https://doi.org/10.1080/15438627.2016.1191491
- Volkssportverband Schweiz-Liechtenstein VSL. (2021). Was ist Volkssport?

 Volkssportverband Schweiz-Liechtenstein VSL. https://www.vsl.ch/das-volkssport/
 abzeichen/wie-funktioniert-volkssport/
- Whyte, G. (2014). Age, sex and (the) race: gender and geriatrics in the ultra-endurance age. Extrem Physiol Med, 3(1), 1. https://doi.org/10.1186/2046-7648-3-1
- Wyss, T., Kohler, U., Mäder, U., Marti, B., & Rossi, S. (2007). Assembling and verification of a fitness test battery for the recruitment of the swiss army and nation-wide use. Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie», 55(4), 126-131. https://doi.org/10.24451/arbor.11104
- Wyss, T., Roos, L., Hofstetter, M. C., Frey, F., & Mader, U. (2014). Impact of training patterns on injury incidences in 12 Swiss Army basic military training schools. *Mil Med*, *179*(1), 49-55. https://doi.org/10.7205/MILMED-D-13-00289
- Wyss, T., Scheffler, J., & Mader, U. (2012). Ambulatory physical activity in Swiss Army recruits. *Int J Sports Med*, 33(9), 716-722. https://doi.org/10.1055/s-0031-1295445
- Yankelson, L., Sadeh, B., Gershovitz, L., Werthein, J., Heller, K., Halpern, P., . . . Viskin, S. (2014). Life-threatening events during endurance sports: is heat stroke more prevalent than arrhythmic death? *J Am Coll Cardiol*, 64(5), 463-469. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2014.05.025

- Yanovich, R., Hadid, A., Erlich, T., Moran, D. S., & Heled, Y. (2015). Physiological and cognitive military related performances after 10-kilometer march. *Disaster Mil Med*, *1*, 6. https://doi.org/10.1186/2054-314X-1-6
- Zingg, M. A., Knechtle, B., Rosemann, T., & Rüst, C. A. (2015). Performance differences between sexes in 50-mile to 3'100-mile ultramarathons. *Open Access Journal of Sports Medicine*, 6, 7-21. https://doi.org/10.2147/OAJSM.S76490

Anhang

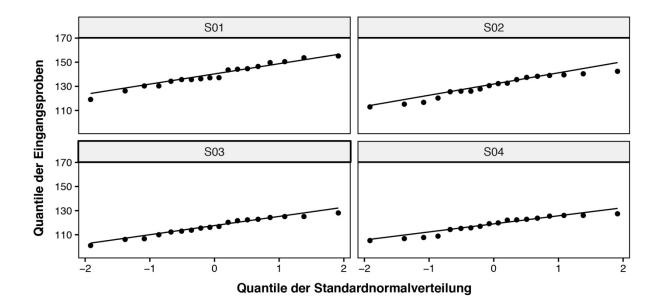
A Tests auf Normalverteilung

Tabelle 22Test auf Normalverteilung, Schiefe und Wölbung der vier Sektoren von allen Teilnehmenden für die Herzfrequenz gemessen mit Polar H10 mit Vantage V2

Marsch-Sektor	n	p-Wert	skew.2SE	kurt.2SE	Befund
S01 (0.0–26.5 km)	18	0.821	-0.145	-0.423	normalverteilt
S02 (26.5–53.2 km)	18	0.230	-0.361	-0.588	normalverteilt
S03 (53.2–81.0 km)	18	0.578	-0.340	-0.497	normalverteilt
S04 (81.0–99.4 km)	18	0.122	-0.415	-0.602	normalverteilt

Abbildung 16

Quantil-Quantil-Diagramm für die Herzfrequenzen über vier Sektoren



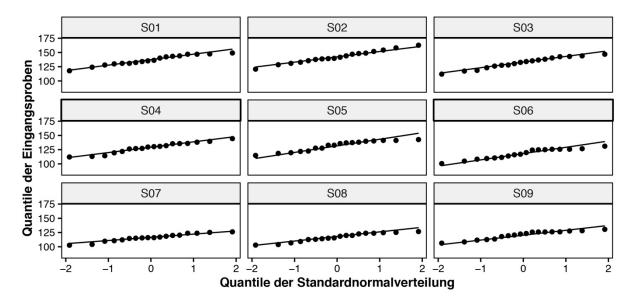
Anmerkung. Die Abbildung zeigt die Normalverteilung in allen Sektoren, da die Wertpunkte sich der Standardnormalverteilung annähern. S01 bis S04 = Marschsektoren.

Tabelle 23Test auf Normalverteilung, Schiefe und Wölbung der neun Sektoren von allen Teilnehmenden für die Herzfrequenz mit der Polar H10 mit Vantage V2

Marsch-Sektor	n	p-Wert	skew.2SE	kurt.2SE	Befund
S01 (0.0–13.1 km)	18	0.444	-0.271	-0.490	normalverteilt
S02 (13.1–26.5 km)	18	1.000	0.017	-0.352	normalverteilt
S03 (26.5–36.7 km)	18	0.695	-0.326	-0.506	normalverteilt
S04 (36.7–45.2 km)	18	0.541	-0.283	-0.491	normalverteilt
S05 (45.2–53.2 km)	18	0.079	-0.430	-0.643	normalverteilt
S06 (53.2–68.1 km)	18	0.201	-0.294	-0.616	normalverteilt
S07 (68.1–81.0 km)	18	0.627	-0.341	-0.334	normalverteilt
S08 (81.0–91.1 km)	18	0.270	-0.350	-0.567	normalverteilt
S09 (91.1–99.4 km)	18	0.098	-0.507	-0.547	normalverteilt

Abbildung 17

Quantil-Quantil-Diagramm für die Herzfrequenzen über neun Sektoren



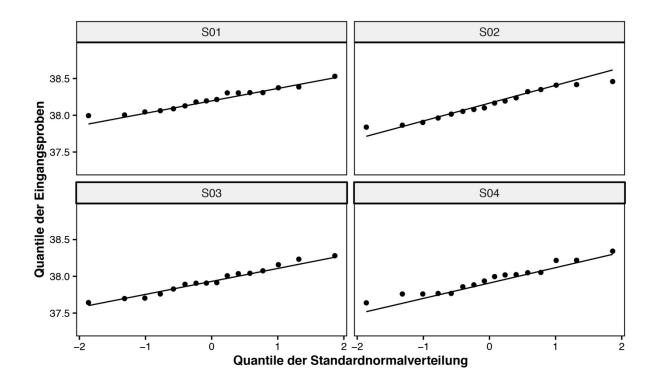
Anmerkung. Die Abbildung zeigt die Normalverteilung in allen Sektoren, da die Wertpunkte sich der Standardnormalverteilung annähern. S01 bis S09 = Marschsektoren.

Tabelle 24Test auf Normalverteilung, Schiefe und Wölbung der vier Sektoren von allen Teilnehmenden für die Körperkerntemperatur gemessen mit greenTEG Calera Research

Marsch-Sektor	n	p-Wert	skew.2SE	kurt.2SE	Befund
S01 (0.0–26.5 km)	16	0.569	0.189	-0.485	normalverteilt
S02 (26.5–53.2 km)	16	0.491	0.028	-0.664	normalverteilt
S03 (53.2–81.0 km)	16	0.793	0.112	-0.528	normalverteilt
S04 (81.0–99.4 km)	16	0.605	0.257	-0.455	normalverteilt

Abbildung 18

Quantil-Quantil-Diagramm für die Körperkerntemperaturen über vier Sektoren



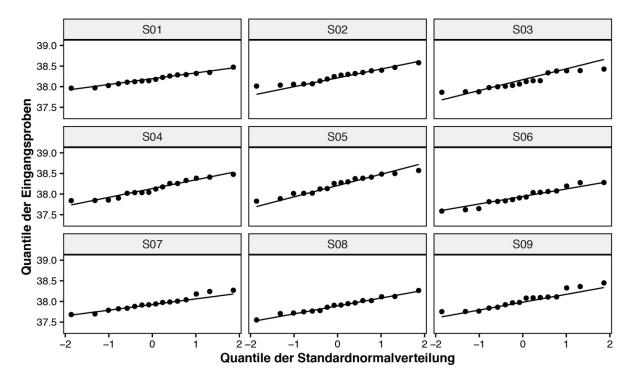
Anmerkung. Die Abbildung zeigt die Normalverteilung in allen Sektoren, da die Wertpunkte sich der Standardnormalverteilung annähern. S01 bis S04 = Marschsektoren.

Tabelle 25Test auf Normalverteilung, Schiefe und Wölbung der neun Sektoren von allen Teilnehmenden für die Körperkerntemperatur gemessen mit greenTEG Calera Research

Marsch-Sektor	n	p-Wert	skew.2SE	kurt.2SE	Befund
S01 (0.0–13.1 km)	16	0.916	0.165	-0.414	normalverteilt
S02 (13.1–26.5 km)	16	0.428	0.200	-0.555	normalverteilt
S03 (26.5–36.7 km)	16	0.070	0.212	-0.701	normalverteilt
S04 (36.7–45.2 km)	16	0.298	0.115	-0.658	normalverteilt
S05 (45.2–53.2 km)	16	0.600	-0.156	-0.614	normalverteilt
S06 (53.2–68.1 km)	16	0.557	-0.005	-0.537	normalverteilt
S07 (68.1–81.0 km)	16	0.576	0.300	-0.397	normalverteilt
S08 (81.0–91.1 km)	16	0.993	0.082	-0.369	normalverteilt
S09 (91.1–99.4 km)	16	0.237	0.370	-0.462	normalverteilt

Abbildung 19

Quantil-Quantil-Diagramm für die Körperkerntemperatur über neun Sektoren



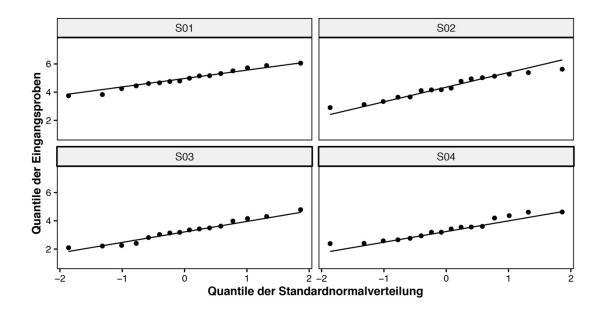
Anmerkung. Die Abbildung zeigt die Normalverteilung in allen Sektoren, da die Wertpunkte sich der Standardnormalverteilung annähern. S01 bis S09 = Marschsektoren.

Tabelle 26Test auf Normalverteilung, Schiefe und Wölbung der vier Sektoren von allen Teilnehmenden für den PSI

Marsch-Sektor	n	p-Wert	skew.2SE	kurt.2SE	Befund
S01 (0.0–26.5 km)	18	0.924	-0.072	-0.482	normalverteilt
S02 (26.5–53.2 km)	18	0.509	-0.135	-0.644	normalverteilt
S03 (53.2–81.0 km)	18	0.754	0.135	-0.495	normalverteilt
S04 (81.0–99.4 km)	18	0.209	0.286	-0.596	normalverteilt

Abbildung 20

Quantil-Quantil-Diagramm für die Werte des PSI über vier Sektoren



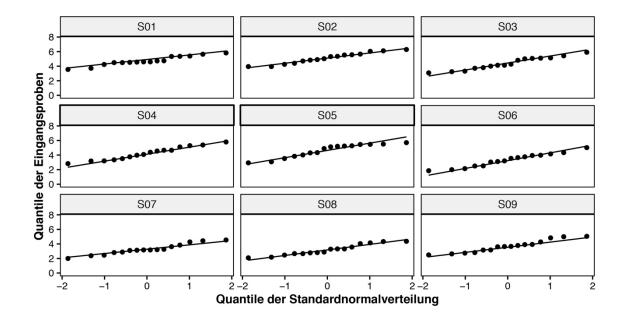
Anmerkung. Die Abbildung zeigt die Normalverteilung in allen Sektoren, da die Wertpunkte sich der Standardnormalverteilung annähern. S01 bis S04 = Marschsektoren.

Tabelle 27Test auf Normalverteilung, Schiefe und Wölbung der neun Sektoren von allen Teilnehmenden für die den PSI

Marsch-Sektor	n	p-Wert	skew.2SE	kurt.2SE	Befund
S01 (0.0–13.1 km)	16	0.343	-0.034	-0.387	normalverteilt
S02 (13.1–26.5 km)	16	0.645	-0.090	-0.588	normalverteilt
S03 (26.5–36.7 km)	16	0.565	0.057	-0.603	normalverteilt
S04 (36.7–45.2 km)	16	0.769	0.089	-0.607	normalverteilt
S05 (45.2–53.2 km)	16	0.072	-0.472	-0.573	normalverteilt
S06 (53.2–68.1 km)	16	0.796	-0.001	-0.524	normalverteilt
S07 (68.1–81.0 km)	16	0.497	0.211	-0.417	normalverteilt
S08 (81.0–91.1 km)	16	0.293	0.228	-0.608	normalverteilt
S09 (91.1–99.4 km)	16	0.350	0.236	-0.540	normalverteilt

Abbildung 21

Quantil-Quantil-Diagramm für die Werte des PSI über neun Sektoren

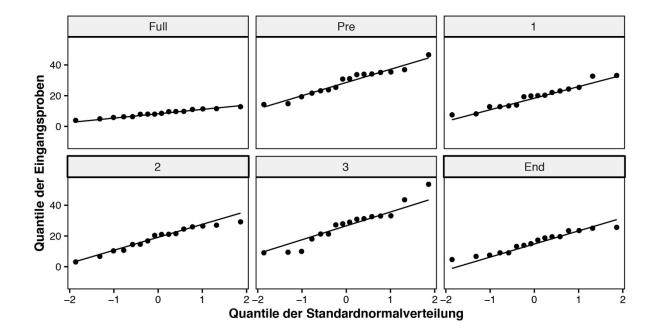


Anmerkung. Die Abbildung zeigt die Normalverteilung in allen Sektoren, da die Wertpunkte sich der Standardnormalverteilung annähern. S01 bis S09 = Marschsektoren.

Tabelle 28Test auf Normalverteilung, Schiefe und Wölbung von allen Teilnehmenden für die RMSSD der Herzfrequenzvariabilität

Messungen	n	p-Wert	skew.2SE	kurt.2SE	Befund
Full (Ganzer Marsch)	16	0.887	-0.063	-0.548	normalverteilt
Pre (2 h vor Marsch)	16	0.525	-0.003	-0.406	normalverteilt
S01 (26.5 km)	16	0.505	0.190	-0.425	normalverteilt
S02 (53.2 km)	16	0.469	-0.360	-0.515	normalverteilt
S03 (81.0 km)	16	0.344	0.229	-0.198	normalverteilt
S04 (99.4 km)	16	0.346	-0.074	-0.683	normalverteilt

Abbildung 22Quantil-Quantil-Diagramm für die RMSSD-Werte der Herzfrequenzvariabilität



Anmerkung. Die Abbildung zeigt die Normalverteilung in allen Sektoren, da die Wertpunkte sich der Standardnormalverteilung annähern. Full = 2 Stunden vor dem Marsch. Pre bis S04 = Marschsektoren. Full = ganzer Marsch. Pre = 2 Stunden vor dem Marsch. End = 5 Minuten nach dem Marsch. 1 = bei 26.5 km, Messung 2 = bei 53.2 km, Messung 3 = bei 81 km. RMSSD = «Root mean square of successive differences» der RR-Intervalle.

Dank

An dieser Stelle möchte ich folgenden Personen danken, die mich bei der Bewältigung meiner Masterarbeit unterstützt und motiviert haben:

- Meinen Betreuerinnen Theresa Schweizer und Rahel Gilgen-Ammann für die vielen Ratschläge und Themenvorschläge, sowie die sehr angenehme Betreuung und Zusammenarbeit mit spannenden thematischen Austausche.
- Meiner Familie meinen Freuden für die enorme Unterstützung und vielen motivierenden Zusprüche und Geduld.
- Meinem Arbeitsgeber für das grosse Vertrauen und das starke Entgegenkommen.