

Fachgebiet
(Sportwissenschaft)

**Zu den Auswirkungen externer Hautkühlung auf die
Ausdauerleistungsfähigkeit von Mitgliedern der Deutschen
Nationalmannschaften des Maritimen und Militärischen Fünfkampfes
unter moderaten Umgebungstemperaturen**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der

Philosophischen Fakultät

der

Westfälischen Wilhelms-Universität

zu

Münster (Westf.)

vorgelegt von

Matthias Marckhoff

aus Bielefeld

2011

Tag der mündlichen Prüfung: 29. August 2011

Dekan der Philosophischen Fakultät: Prof. Dr. Christian Pietsch

Erstgutachter: Prof. Dr. med. Klaus Völker

Zweitgutachter: Prof. Dr. Heiko Wagner

Inhalt

I.	Einführung.....	5
I.1	Die Bedeutung der Homöothermie für die sportliche Leistungsfähigkeit.....	5
I.2	Effekte der Hyperthermie auf die Ausdauerleistungsfähigkeit und ihre physiologischen Ursachen	8
I.2.1	Effekte der Hyperthermie auf das Herzkreislaufsystem	9
I.2.2	Effekte der Hyperthermie auf den Energiestoffwechsel.....	10
I.2.3	Effekte der Hyperthermie auf das neuronale System	11
I.3	Effekte externer Kühlung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit und ihre physiologischen Ursachen	13
I.3.1	Effekte externer Kühlung auf das Herzkreislaufsystem	15
I.3.2	Effekte externer Kühlung auf den Energiestoffwechsel.....	17
I.3.3	Effekte externer Kühlung auf das neuronale System.....	18
I.4	Zusammenfassende Problembeschreibung und Ableitung der erkenntnisleitenden Fragestellung	19
I.5	Synoptische Übersicht des Forschungsstandes.....	22
II.	Methode	27
II.1	Untersuchungsdesign	27
II.2	Probanden	27
II.3	Untersuchungsgang.....	30
II.3.1	Sportmedizinische Eingangsuntersuchung	31
II.3.2	Kälteapplikation.....	31
II.3.3	Laboruntersuchung	32
II.3.4	Felduntersuchung.....	35
II.3.5	Messmethoden	39
II.4	Statistische Auswertung.....	42
II.5	Apparatur	43
II.5.1	Die Kühlweste.....	43
II.5.2	Das Laufbandergometer.....	44
II.5.3	Das Ohrthermometer.....	45
II.5.4	Das Oberflächenthermometer	45
II.5.5	Das Herzfrequenzmesssystem	45
II.5.6	Das Blutanalyzesystem	46
II.5.7	Das Spirometriesystem	46
II.5.8	Die Borg RPE-Skala	47

III.	Ergebnisse.....	48
III.1	Laboruntersuchung - Schellongtests.....	48
III.1.1	Vorbelastungsphase (Schellongtest I).....	48
III.1.2	Zwischenbelastungsphase (Schellongtest II).....	52
III.1.3	Nachbelastungsphase (Schellongtest III).....	56
III.2	Laboruntersuchung – Laktatsenkentest.....	60
III.2.1	Hauttemperatur.....	60
III.2.2	Körperkerntemperatur.....	65
III.2.3	Gewichtsverlust.....	66
III.2.4	Herzfrequenz.....	67
III.2.5	Blutlaktat.....	69
III.2.6	Maximale Sauerstoffaufnahme.....	71
III.2.7	Maximaler Respiratorischer Quotient.....	72
III.2.8	Belastungsempfinden nach Borg.....	74
III.3	Feldtest - Maritime Fünfkämpfer.....	76
III.3.1	Hauttemperatur.....	76
III.3.2	Körperkerntemperatur.....	79
III.3.3	Gewichtsverlust.....	79
III.3.4	Herzfrequenz.....	80
III.3.5	Blutlaktat.....	81
III.3.6	Belastungsempfinden nach Borg.....	81
III.4	Feldtest - Militärische Fünfkämpfer.....	82
III.4.1	Herzfrequenz.....	82
III.4.2	Blutlaktat.....	83
III.4.3	Körperkerntemperatur.....	84
III.4.4	Belastungsempfinden.....	85
IV.	Diskussion.....	86
IV.1	Effekte vasokonstriktionsbedingter Blutvolumenverschiebung.....	88
IV.1.1	Unter Ruhebedingungen.....	88
IV.1.2	Unter Belastungsbedingungen.....	91
IV.2	Effekte der Hautkühlung auf das Herzzeitvolumen unter Belastung.....	93
IV.2.1	Effekte peripherer Reperfusion.....	95
IV.2.2	Effekte auf die Sympathikusaktivität.....	96
IV.2.3	Effekte auf den Wasserhaushalt.....	97
IV.3	Effekte der Kälteapplikation auf die Substratbereitstellung.....	100
IV.4	Effekte der Kälteapplikation auf die Muskelfunktion.....	103
IV.5	Effekte der Hautkühlung auf das Belastungsempfinden.....	106
IV.6	Abschlussfazit.....	110

V.	Literatur.....	114
VI.	Anhang.....	135
VI.1	Abbildungsverzeichnis.....	135
VI.2	Tabellenverzeichnis	137
VI.3	Abstract	138
VI.4	Der Maritime Fünfkampf (Naval Pentathlon).....	140
VI.5	Der Militärische Fünfkampf (Military Pentathlon).....	141
VI.6	Ausgewählte Ergebnisse der Korrelationsanalyse	142
	Lebenslauf.....	144

“It is the fixity of the ‘milieu intérieur’ which is the condition of free and independent life.”

(Claude Bernard, 1878)

I. Einführung

I.1 Die Bedeutung der Homöothermie für die sportliche Leistungsfähigkeit

In umfangreichen Forschungsarbeiten widmete sich der französische Physiologe Claude Bernard (1813-1878) dem Zusammenhang von physiologischem System und dem umgebenden Milieu (Bernard, 1878). Hierbei bezog er sich nicht allein auf die verschiedenen Milieus innerhalb des Gesamtorganismus, im Sinne eines geschlossenen Systems, sondern konstatierte, dass das „milieu intérieur“ auch unablässig mit der den Körper umgebenden Umwelt kommuniziert (Bernard, 1878: S. 113). Diese Verbindungen bedingen eine gegenseitige Einflussnahme, die, ohne entsprechende Regulationsmechanismen und eine gewisse Abweitungstoleranz vom status quo, zu völliger Abhängigkeit des Menschen von seiner Umwelt führen würde. Die Tatsache, dass der Mensch eine Vielzahl unterschiedlichster Umweltbedingungen dauerhaft oder zumindest kurzfristig tolerieren kann, zeigt, in welchem breitem Spektrum die Regelmechanismen des Körpers ein gewisses Maß an Konstanz im *milieu intérieur* aufrechterhalten können.

Für diesen Zustand des inneren Gleichgewichts, der dem Menschen seine Existenz als „self-balanced unity“ (Sherrington, 1941: S. 84) ermöglicht, prägte Walter B. Cannon, bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, den Begriff der Homöostase, also der ‚Ähnlichkeit des Zustandes‘, und erklärte das Streben nach ihr zum Grundprinzip des menschlichen Organismus‘ (Cannon, 1929). Das Konzept des *milieu intérieur* wurde also insofern ergänzt, als dass der Körper hier nicht eine ‚Gleichheit‘ (fixity) der Verhältnisse, sondern ein

dynamisches Equilibrium zu erreichen versucht, welches sich insgesamt durchaus verschieben kann, um auf einem anderen Niveau erneut einen Zustand des Gleichgewichts einzunehmen.

Unablässig wirkt nun eine Vielzahl von Stimuli auf den Organismus, die die lebensnotwendige Aufrechterhaltung der Homöostase stören. In Anlehnung an Hans Selye, einen der Gründerväter der experimentellen Stressforschung, werden diese Stimuli als Stressoren bezeichnet (Selye, 1956: S. 4ff). Abhängig von ihrem Ursprung lassen sie sich in internale und externale Stressoren unterteilen. In aller Regel wirken mehrere dieser Stimuli gleichzeitig auf den Körper, so dass eine Vielzahl an Regulationsmechanismen parallel ablaufen müssen und die Bemühungen des Organismus um Ausgleich im Bereich eines Stressors auch vielfach selbst als neuer Stressor wirken, dessen Effekte in der Folge ausgeglichen werden müssen.

Parallel auftretende thermische Stressoren und ihre Auswirkungen auf die Homöothermie, also das homöostatische Gleichgewicht der Körpertemperaturen, wird in der Literatur zusammenfassend als Hitze- oder Kältestress bezeichnet (Wilmore et al. 2008, S.252ff). Je nach Intensität und Dauer des Stresses, verändert sich dessen Bedeutung zunächst für die Leistungsfähigkeit, später aber auch mitunter für das Überleben des betroffenen Organismus. Eine wichtige Ursache hierfür scheint in der Thermosensitivität der Enzymkinetik (Melkani et al., 2006; Banfi et al., 2010) zu liegen.

Wie auch bei chemischen Reaktionen außerhalb des Organismus, nimmt die Geschwindigkeit der von Enzymen im Körper katalysierten Reaktionen mit steigender Temperatur zunächst einmal zu (Bisswanger, 2008: S. 154). Da jedoch die Proteinstruktur der Enzyme ab einer, je nach Protein unterschiedlichen, kritischen Temperatur an Stabilität verliert und somit auch die Katalysationsrate schließlich auf Null sinkt, ist die Enzymtoleranz in Richtung hoher Temperaturen eng begrenzt (Bisswanger, 2008: S. 154). Die Optimaltemperaturen für die Aktivität der verschiedenen Enzyme liegen demnach möglichst hoch, um, entsprechend der *van t'Hoff Regel*, eine hohe Reaktionsrate zu ermöglichen, ohne jedoch zu nahe in den Bereich biologisch kritischer Temperaturen zu kommen.

Abweichungen von der Optimaltemperatur nach unten reduzieren zwar die Katalysationsrate in mitunter lebensbedrohende Bereiche, verursachen jedoch erst ab Temperaturen unter dem Gefrierpunkt irreversible Schäden an den Enzymen (Romanovsky, 2007). Der Toleranzraum in Richtung niedriger Temperaturen ist damit insgesamt deutlich größer.

Wenn nun jede Abweichung von der aktuellen Körpertemperatur unmittelbare Auswirkungen auf die Enzymkinetik, dadurch auf die biochemische Reaktionsrate und somit auf alle physiologischen Prozesse hat, kann auch die sportliche Leistungsfähigkeit davon nicht unbeeinflusst bleiben (Chance et al., 2006).

Die Voraussetzung sportlicher, wie physikalischer Leistung ist Energie. Je mehr chemisch gespeicherte Energie der Sportler pro Zeiteinheit in Bewegungsenergie umsetzt, desto höher sind seine physikalische und damit vielfach auch seine sportliche Leistung (McArdle et al., 2009, S. 126ff). Obwohl, je nach Sportart, andere Faktoren als die physikalische Leistung an Bedeutung gewinnen können, bleibt der Energiestoffwechsel des Sportlers Voraussetzung jeder zellulären Aktivität, der sportlichen Leistungsfähigkeit und schließlich des Lebens an sich (Markworth, 2001, S. 232ff).

Nun beeinflussen Störungen der Homöothermie die sportliche Leistungsfähigkeit sehr unterschiedlich, je nach Größe, Ort, Richtung, Ursprung und zeitlicher Komponente des Stressors. Die Größe des Stressors wird in aller Regel in °C angegeben, zumeist gepaart mit dem Ort der Temperaturveränderung (IUPS Thermal Commission, 2001), da beispielsweise der Anstieg der Temperatur um einen bestimmten Betrag im Bereich des Gehirns eine andere Bedeutung und damit Größe hat als im Bereich peripherer Hautschichten (Maughan et al., 2007). Die Dimension der Richtung erfasst das Vorzeichen der Temperaturveränderung, während der Ursprung Auskunft darüber gibt, ob es sich um einen internen (z.B. metabolische Wärme) oder externen (z.B. kalte Umgebungsluft) Stressor handelt (Chrousos, 2009). Die zeitliche Komponente beschreibt den Verlauf der induzierten Veränderungen über die Zeit.

Der Gebrauch der Begriffe Hyper-, Hypo- und Normothermie (Cenothermie) birgt das Problem der Eindimensionalität, da sie sich, per definitionem, allein auf die Körperkerntemperatur beziehen (IUPS Thermal Commission, 2001).

Da jedoch die Effekte von Temperaturveränderungen in anderen Körperregionen auch direkten Einfluss auf leistungsrelevante Parameter haben können, ohne den Umweg über eine sequentielle Körperkern-temperaturveränderung zu nehmen (Romanovsky, 2007), erscheint es sinnvoll, diese drei Begriffe auf alle relevanten Körperregionen auszuweiten. Dabei wird, in Anlehnung an die Definitionen der IUPS, ab einer Veränderung der jeweiligen Normtemperatur um circa $\pm 1^{\circ}\text{C}$, von Hypo- beziehungsweise Hyperthermie einer Körperregion gesprochen.

Bei der Untersuchung der Einflüsse der Hyperthermie auf die sportliche Leistungsfähigkeit sollte darüber hinaus, neben der Qualität der thermischen Einflüsse, auch die Art der untersuchten Belastung berücksichtigt werden (Gavhed, 1991). Eine Kategorisierung in „prolonged exercise“, „maximal exercise“ und “maximal voluntary contractions” (MVC), wie sie in der Literatur vorgeschlagen wird (Nybo, 2008), erscheint hier sinnvoll.

I.2 Effekte der Hyperthermie auf die Ausdauerleistungsfähigkeit und ihre physiologischen Ursachen

Auf Grund der bis dato durchgeführten Untersuchungen zu den Zusammenhängen von Hyperthermie und Ausdauerleistungsfähigkeit herrscht mittlerweile relative Einigkeit darüber, dass die sportliche Leistung durch hohe Körpertemperaturen negativ beeinflusst wird (Nybo, 2008; Gonzalez-Alonso et al., 2008; Tucker, 2008; Wendt et al., 2007).

Auf der Suche nach den Ursachen temperaturinduzierter Leistungseinbußen wird das Konzept Ausdauerleistung in aller Regel in seine konstituierenden Faktoren zerlegt und die Einflüsse thermoregulatorischer Mechanismen hierauf diskutiert. Zumeist werden das Herzkreislaufsystem, der Energiestoffwechsel sowie neuronale Faktoren auf ihre leistungslimitierende Wirkung hin untersucht (Wilmore, 2008: S. ix).

1.2.1 Effekte der Hyperthermie auf das Herzkreislaufsystem

Da die Steuerung des Blutflusses über Vasokonstriktion und –dilatation das Hauptstellglied des trockenen Wärmeaustausches ist (Sawka und Young, 2006: S. 536), hat jeder thermische Reiz unmittelbare Auswirkungen auf das Herzkreislaufsystem. In Abhängigkeit von Größe und Geschwindigkeit der Temperaturveränderung sowie der Anzahl und der Position der erregten Thermorezeptoren in den thermischen Schichten des Körpers, variieren diese Effekte deutlich (Stocks et al., 2004). Bei einem Anstieg der Temperaturen kommt es durch neuronal-endokrine Mechanismen (Bennett et al., 2003) zu einer Erweiterung der peripheren Venen und Arteriolen und somit zur Vergrößerung des Gesamtgefäßvolumens. Während der Blutfluss durch die Hautgefäße in Ruhe und unter thermoneutralen Umgebungsbedingungen bei circa 200-500 ml/Min. liegt, kann er bei ausgeprägter aktiver Vasodilatation Werte von annähernd 8 l/Min. erreichen. Hierbei werden dann bis zu 60% der gesamten kardialen Auswurfleistung für die Hautperfusion eingesetzt (Johnson und Proppe, 1996). Allerdings kommen Gonzalez-Alonso und Mitarbeiter (Gonzalez-Alonso et al., 2008) durch Extrapolation der Durchblutungswerte im Unterarm, die in einer früheren Studie von Johnson und Rowell (Johnson und Rowell, 1975) unter Belastung gemessen wurden, lediglich auf eine Zunahme der Hautdurchblutung von etwa 3 l/Min. für die gesamte Körperoberfläche. Unter submaximaler Belastung scheint die Hautdurchblutung also, bei vergleichbarer thermischer Belastung des Organismus, geringer zu sein als in Ruhe, was den Schluss erlaubt, dass der Körper hier eine Erhöhung der Temperaturen zulässt, um den Blutdruck zu stabilisieren (Gonzalez-Alonso et al., 2008; Crandall, 2008). Trotz dieser belastungsinduzierten Limitierung der Hautdurchblutung bleibt ein nicht unerheblicher Mehrbedarf an Blut in der Peripherie unter Hitzebedingungen bestehen. Dieser wird jedoch offenbar im submaximalen Belastungsbereich nicht durch eine Reduktion der Muskeldurchblutung ausgeglichen (Nybo, 2008;). Vielmehr scheinen eine Vasokonstriktion im Bereich der viszeralen Organe und der Nieren (Nielsen et al., 1990; Savard et al., 1988; Farquhar und Kenney, 1999), als auch die Erhöhung der Herzfrequenz, mit sequentieller Aufrechterhaltung des Herz-Zeit-Volumens, hierfür auszureichen (Nybo und Nielsen, 2001a; Gonzalez-Alonso et al., 2000).

Bei maximaler Belastung jedoch kommt es in Wettkampf und Training unter Hitzebedingungen häufig zu einer kombinierten Hyperthermie und Dehydration (Crandall und Gonzalez-Alonso, 2010). Dies führt zu einer weitaus höheren Beanspruchung des Herzkreislaufsystems als bei submaximaler Belastung mit einem geringeren Anstieg der Körperkerntemperatur. Diese Kombination von Hyperthermie und Dehydration führt bei hoher Belastung, durch Reduktion des Plasmavolumens, zu einer starken Abnahme des Herzschlag- und Herzzeitvolumens, welche im Sinne der Aufrechterhaltung des arteriellen Blutdrucks durch eine Verringerung der Muskeldurchblutung ausgeglichen wird (Gonzalez-Alonso et al., 2008). Im Grenzbereich der menschlichen Leistungsfähigkeit führen demnach hohe Körper- und Umgebungstemperaturen, gepaart mit Dehydration, zu einem geringeren Blutfluss in die Arbeitsmuskulatur, was zu einer Verringerung der Sauerstoffaufnahme führt (Nybo et al., 2001). Im submaximalen Belastungsbereich jedoch, bei weniger ausgeprägter Hyperthermie und Dehydration, scheint dies nicht der Fall zu sein.

1.2.2 Effekte der Hyperthermie auf den Energiestoffwechsel

Wenn es als Folge der Kombination von Hyperthermie, Dehydration und hoher Belastung zu einer Verringerung der muskulären Durchblutung kommt, könnte dieser Befund, zumindest im Grenzbereich der Ausdauerleistungsfähigkeit, zur Erklärung der verringerten Leistung unter Hitzebedingungen dienen.

Die unter Hyperthermie, bei hoher Belastung, deutlich verringerte maximale Sauerstoffaufnahme (Nybo et al., 2001) und die ebenfalls eingeschränkte Sauerstoffbereitstellung und -aufnahme im Bereich der arbeitenden Muskelzellen (Gonzalez-Alonso und Calbet, 2003; Mortensen et al., 2005) bestätigen diesen Effekt. Da die Bereitstellung von Glucose und freien Fettsäuren im Muskel durch Dehydration und Hyperthermie offenbar nicht beeinflusst wird (Gonzalez-Alonso et al., 1999a), könnten die unter diesen Bedingungen beobachteten Erhöhungen des muskulären Glukosestoffwechsels sowie die erhöhten Laktatkonzentrationen in der Nachbelastungsphase (Febbraio et al., 1996a) als eine Folge der geringeren Sauerstoffversorgung des

Muskels interpretiert werden. Auf Grund der unterschiedlichen Thermokinetik der verschiedenen am Fett- und Kohlehydratstoffwechsel beteiligten Enzyme wäre es allerdings auch denkbar, dass die Kohlehydratstoffwechselrate bei steigender Temperatur stärker zunimmt als die des Fettstoffwechsels und es dadurch zu einer Verschiebung des Substratverbrauches kommt (Bisswanger, 2008: S. 154f).

Darüber hinaus konnten Febbraio und Mitarbeiter zeigen (Febbraio et al., 1998), dass die unter Hitzestress verstärkte Ausschüttung von Adrenalin, über β -adrenerge Rezeptoren, zu einer Stimulation der Glykogenphosphorylase führt. Ein solcher Effekt könnte also ebenso für die Veränderungen im Laktatstoffwechsel verantwortlich sein.

1.2.3 Effekte der Hyperthermie auf das neuronale System

Neben den thermo-induzierten Effekten auf das Herzkreislaufsystem und den Folgen für den Energiestoffwechsel wird neuronalen Faktoren ein besonderer Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Temperaturbedingungen zugeschrieben (Rutkove, 2001). Weiterhin unklar ist jedoch, auf welcher Ebene des Gesamtnervensystems temperaturbedingte Veränderungen auftreten, die eine Reduktion der Ausdauerleistungsfähigkeit erklären könnten. Auf Grund der Komplexität neuronaler Prozesse erscheint es sinnvoll, zunächst nur grob in peripheres und zentrales Nervensystem zu differenzieren. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, ob die Temperaturveränderung passiv oder aktiv induziert wurde und ob es sich in den zu betrachtenden Untersuchungen um kurze, wenige Sekunden dauernde Muskelkontraktionen oder um Dauerkontraktionen im Bereich von bis zu mehreren Minuten handelt. Bei kurzen, maximalen, willkürlichen Kontraktionen konnte bisher kein kraftreduzierender Effekt der Hyperthermie festgestellt werden (Nybo 2008). Dies gilt sowohl bei belastungsinduzierter (Nybo und Nielsen, 2001b; Nielsen et al., 1993), als auch bei passiv hervorgerufener Hyperthermie (Morrison et al., 2004; Todd et al., 2005). Es konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass auch bei Dauerkontraktionen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Temperaturbedingungen auftreten, wenn die betreffenden Motoneurone, zusätzlich zur willentlichen

Aktivierung, elektrisch stimuliert werden (Nybo und Nielsen, 2001b). Auch das Ergebnis einer Studie von Melissa Thomas und Mitarbeitern, wonach die willentliche Muskelaktivierung offenbar eher von der Kern-, denn der Muskeltemperatur beeinflusst wird (Thomas et al., 2006), stützt die Annahme, dass die neuronalen Anteile an der Muskelermüdung unter Umständen weniger im peripheren als mehr im zentralen Bereich des Nervensystems zu verorten sind. Das schließt nicht aus, dass Chemo- und Metaborezeptoren in der Muskulatur, zum Beispiel bei Hypoxie und einem Anstieg der Laktatkonzentrationen, dies über afferente Bahnen ans Zentralnervensystem übermitteln und somit möglicherweise die Peripherie zur zentralen Ermüdung beiträgt (Amann et al., 2006; Noakes et al., 2001; Kent-Braun, 1999). Auf Grund dieser Defizite des peripheren Ermüdungsmodells im Bereich der Kraftfähigkeiten sowie dem Befund, dass, im Gegensatz zu allen anderen leistungsrelevanten Parametern, einzig das Belastungsempfinden bei Ermüdung maximal ist (Noakes, 2004), folgern Noakes und St Clair Gibson, dass dieses Modell zur Erklärung der Ermüdung in Ausdauerbelastungen ebenfalls nicht herangezogen werden kann (Noakes, 2007; Noakes und St Clair Gibson, 2004).

Zur Erklärung der Leistungsreduktion oder gänzlichen –Einstellung, stellen sie dem Modell der peripheren Ermüdung das des Central Governors gegenüber (Noakes und St Clair Gibson, 2004). Dieses Modell geht von der Vorstellung aus, dass der Central Governor, der in bewussten und unterbewussten Gehirnbereichen angenommen wird, über eine unterschiedlich umfangreiche Rekrutierung motorischer Einheiten die Leistung steuert und begrenzt, um eine ‚katastrophale‘ Störung der Homöostase zu verhindern. In Bezug auf die früher auftretende Ermüdung unter Hyperthermie unterstützen verschiedene Autoren diese Hypothese (Thomas et al., 2006; Martin et al., 2004; Tucker et al., 2004; Nielsen et al., 2001; Nybo und Nielsen, 2001b), auch wenn hier vielfach allgemeiner von zentraler Ermüdung gesprochen wird als vom spezifischen Central Governor Modell von Noakes und St Clair Gibson.

Den beiden Autoren wird aber vorgeworfen, eine nicht zu belegende Dichotomie zwischen peripherer und zentraler Ermüdung zu konstruieren (Weir et al., 2006). Als Beleg dieses Vorwurfes führen Weir und Mitarbeiter

(2006) die fehlende Differenzierung nach verschiedenen Belastungsformen sowie die in Folge elektrischer Stimulation zu beobachtende Ermüdung von Beinmuskulatur bei Querschnittsgelähmten an, also Sportlern, bei denen die neuronale Verbindung zwischen Muskel und Gehirn zumindest erheblich eingeschränkt ist. Darüber hinaus kann dem Central Governor Modell entgegen gehalten werden, dass die bei Ermüdung auftretenden biochemischen Veränderungen (Dempsey et al., 2008; Paterson, 1996; Enoka und Stuart, 1992) sehr wohl als deutliche Störung der Homöostase interpretiert werden können, welche der Central Governor, würde er existieren, hätte verhindern müssen.

Demzufolge schlagen Weir und Mitarbeiter die Annahme einer interdependenten Abhängigkeit zentraler und peripherer Faktoren vor, die gemeinsam das Phänomen der Ermüdung und damit das der Ausdauerleistungsfähigkeit konstituieren (Weir et al., 2006).

I.3 Effekte externer Kühlung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit und ihre physiologischen Ursachen

Wenn der aus hoher Umgebungstemperatur und sportlicher Belastung resultierende Hitzestress für die beobachtbare Abnahme der Ausdauerleistung unter Hitzebedingungen als ursächlich anzunehmen ist, liegt es nahe, durch externe Kühlmaßnahmen den thermoregulatorischen Stress zu reduzieren.

Zu den Effekten solcher Maßnahmen sind zahlreiche Untersuchungen am Menschen durchgeführt worden. Aus Gründen besserer Übersichtlichkeit sind die Methodiken und Ergebnisse ausgewählter Untersuchungen in Tabelle 1 zusammengefasst.

Der Auswahl liegen drei Hauptkriterien zu Grunde:

- 1.) Gegenstand der Studie ist eine direkt gemessene Ausdauerleistung oder die Erhebung mehrerer physiologischer Parameter, welche Rückschlüsse auf die Ausdauerleistungsfähigkeit erlaubt.
- 2.) Die Kühlung erfolgte extern. Invasive Methoden der intravaskulären Kühlung, wie sie zur Herabsetzung des Energiestoffwechsels bisweilen

in der Intensivmedizin eingesetzt werden (Sahuquillo et al., 2008; Holzer, 2008; Hoedemaekers et al., 2007), wurden auf Grund des fehlenden sportlichen Kontextes nicht aufgenommen.

- 3.) Die Studie ist in einer internationalen Fachzeitschrift mit Peerreview-Verfahren publiziert worden.

Trotz der bisweilen erheblichen Heterogenität der betrachteten Studien im Hinblick auf die Methodik lässt sich erkennen, dass die angewandten Kühlmethoden in der Mehrzahl eine Reduktion des Hitzestresses während der nachfolgenden Ausdauerbelastungen unter Hitzebedingungen herbeiführten (Daanen et al., 2006; Arngrimsson et al., 2004; Booth et al., 2001). Besonders wirksam scheint hier die Wasserimmersion zu sein, da sie in den dargestellten Untersuchungen zu einem deutlichen und schnellen Absinken der Körpertemperaturen führte und die Wärmespeicherkapazität des Organismus erhöhte (O'Brien et al., 2007; Gonzalez-Alonso et al., 1999b; Bergh und Ekblom, 1979).

Weniger eindeutig ist die Situation bezogen auf den Aspekt der Leistungsveränderung. Obwohl auch hier zumeist nach Kühlung eine Verbesserung der Ausdauerleistung festgestellt wurde (Morrison et al., 2006; Hornery et al., 2005; Cotter et al., 2001), fanden sich, vor allem nach intensivem Precooling und Testbelastungen unter Normalbedingungen, auch Leistungsverschlechterungen und Negativveränderungen im Bereich leistungsrelevanter Parameter wie der Sauerstoffaufnahme, dem Energiestoffwechsel oder psychologischen Faktoren (O'Brien et al., 2007; Mitchell et al., 2003; Blomstrand et al., 1984).

Es ergibt sich hieraus die Frage, welche Ursachen diesen Leistungsveränderungen durch Temperaturmanipulation zu Grunde liegen. Marino (2002) schlägt in diesem Zusammenhang eine Ordnung nach den Effekten auf das Herzkreislaufsystem (Kap.: 1.3.1), den Energiestoffwechsel (Kap.: 1.3.2) und das neuronale System (Kap.: 1.3.3) vor.

1.3.1 Effekte externer Kühlung auf das Herzkreislaufsystem

Bei allen dargestellten Kühlmethoden (Wasserimmersion, Wasserdusche, Kaltluftgebläse, Absenkung der Umgebungstemperatur, Kühlbekleidung sowie Kombinationen von diesen) kommt es zunächst zu einer Verringerung der Hauttemperatur. Der Herabsetzung der Hauttemperatur, mit einhergehender Vasokonstriktion in den gekühlten Arealen, wird von vielen Autoren eine zentrale Bedeutung für die leistungsverändernden Effekte der externen Kühlung zugeschrieben (Quod et al. 2005; Arngrimsson et al. 2004; Cotter et al. 2001). Es wird hier angenommen, dass die unter Hitzestress auftretende sogenannte *cardiovascular drift*, die sich vor allem in einer Erhöhung der Herzfrequenz sowie einer Abnahme des Herzschlagvolumens zeigt, ihre Ursache in einem venösen Blutpooling im Bereich der Haut hat, was das enddiastolische Volumen im rechten Ventrikel verringert und dadurch insgesamt eine Reduktion des Schlagvolumens bedingt. Kälteinduzierte Vasokonstriktion könnte nach dieser Argumentation die Belastung des Herzkreislaufsystems reduzieren und damit möglicherweise die sportliche Ausdauerleistungsfähigkeit positiv beeinflussen.

Unabhängig von den vielfach gezeigten abschwächenden Effekten des Precoolings auf die *cardiovascular drift* (Daanen et al., 2006; Kay et al., 1999) wird der Kausalzusammenhang zur Hautdurchblutung immer wieder in Zweifel gezogen. So beobachteten Gonzalez-Alonso und Mitarbeiter (2000) bei einer Ausdauerbelastung unter Hitzebedingungen (35°C) und bei Kälte (8°C) keine Unterschiede im Schlagvolumen, obwohl die Hautdurchblutung im ersten Fall um den Faktor vier höher lag. Daraus ergibt sich die Frage, welcher Mechanismus dann für die Abnahme des Schlagvolumens verantwortlich ist, sollte es die Hautdurchblutung nicht sein. Fritzsche et al. (1999) nennen den Anstieg der Herzfrequenz als Ursache des verringerten Schlagvolumens, da sie zeigen konnten, dass bei medikamentös konstant gehaltener Herzfrequenz während einer Belastung (β -Rezeptoren Blockade) auch das Schlagvolumen konstant blieb. Legt man der Analyse der precoolinginduzierten Auswirkungen auf das Herzkreislaufsystem diese Hypothese zu Grunde, so müsste eine Kühlung vor der Belastung in der Lage sein, die Herzfrequenz während der Belastung zu senken, wie dies

beispielsweise von Marsh und Sleivert (1999) und Cotter und Mitarbeitern (2001) beobachtet wurde. Coyle und Gonzalez-Alonso (2001) nennen vor allem zwei Mechanismen, die zur Erklärung einer solchen Herzfrequenzsenkung in Betracht gezogen werden können:

1.) Durch eine Verringerung der hitzeinduzierten Sympathikusaktivität nach Precooling könnte es zu einer Abschwächung der sonst unter Hitzestress auftretenden Herzfrequenzerhöhung kommen.

2.) Durch eine Verlangsamung der Dehydration im Zuge der Herabsetzung der Schweißrate, wie sie verschiedentlich beobachtet wurde (Kay et al., 1999; Wilson et al., 2002), könnte es zu einer Verlangsamung der Blutvolumenreduktion kommen (Fritzsche et al. 1999; Montain und Coyle 1992). Ein daraus resultierendes höheres Blutangebot am rechten Ventrikel könnte das Schlagvolumen erhöhen und der Anstieg der Herzfrequenz würde verzögert.

Beide Mechanismen ließen sich in Einklang zu den dargestellten Ergebnissen des vorherigen Kapitels bringen. Hiernach tritt unter Hitzestress, bei submaximaler Belastung, zwar eine Zunahme der Herzfrequenz auf, diese scheint aber in der Regel nicht die Folge eines verringerten Schlagvolumens zu sein (Gonzalez-Alonso et al., 2008; Crandall, 2008). Tritt allerdings eine ausgeprägte Dehydration hinzu und kann, bei sehr hoher Belastung, die Vasokonstriktion in den viszeralen Organen und den Nieren den thermoregulatorischen Mehrbedarf an Blut nicht ausgleichen, so ist eine leistungsmindernde Wirkung der Hitze auf das Herzkreislaufsystem im Grenzbereich der Ausdauerleistungsfähigkeit denkbar (Nybo, 2008).

Im Sinne einer Verzögerung der Dehydration durch Verringerung der Schweißrate, kann, nach aktuellem Forschungsstand, eine herzkreislaufentlastende Wirkung der Kühlung angenommen werden. Die Hypothese einer direkten Erhöhung des venösen Rückstromes zum Herzen durch Vasokonstriktion in peripheren Gewebsschichten allerdings, ist nach den jüngsten Ergebnissen vermutlich nicht haltbar. Offenbar setzt der Organismus unter sportlicher Belastung, im Gegensatz zum Ruhezustand, den Blutdruck und den kardialen Preload nicht zu Gunsten einer verbesserten Wärmeabgabe aufs Spiel.

1.3.2 Effekte externer Kühlung auf den Energiestoffwechsel

Wie oben beschrieben, kommt es bei Ausdauerbelastungen unter Hitzestress zu Veränderungen im Energiestoffwechsel, die sich vor allem in einer erhöhten Kohlehydratstoffwechselrate zeigen. Bei einer Verlangsamung des Kerntemperaturanstieges durch externe Kühlung müssten diese Effekte demnach zu verringern sein. Febbraio und Mitarbeiter (Febbraio et al., 1996b) fanden auch in der Tat eine Abnahme der muskulären Glykogenolyse unter diesen Bedingungen. Die Veränderungen im Energiestoffwechsel durch Kühlung sind jedoch insgesamt nicht eindeutig. So kommen Booth und Mitarbeiter (Booth et al., 2001) zu dem Schluss, dass im submaximalen Belastungsbereich ein Ganzkörperprecooling keine Veränderungen im muskulären Energiestoffwechsel hervorruft. Die Frage allerdings, ob die durchgeführte Kälteapplikation nicht in der Lage war, die hitzeinduzierten Veränderungen zu revidieren, oder ob vielmehr die Kälte ihrerseits selbst zu einer Erhöhung der Glykogenolyse führte und sich somit die Effekte gegenseitig überdecken, bleibt weiterhin offen.

Betrachtet man maximale Belastungen im Grenzbereich der menschlichen Kurzzeitausdauer, so scheint den metabolischen Veränderungen durch den hier auftretenden Hitzestress eine größere Bedeutung im Bezug auf die Ermüdung zuzukommen. Da in der Folge hoher Temperaturen im Bereich von Haut und Körperkern, unter diesen Belastungsbedingungen, eine Abnahme sowohl der muskulären als auch der pulmonalen Sauerstoffaufnahme beobachtet wurde (Gonzalez-Alonso und Calbet, 2003; Nybo et al., 2001), kann angenommen werden, dass dies der verursachende Mechanismus für die hier auftretende Verschiebung zu einem stärker anaeroben Stoffwechsel ist. Eine Abnahme der Sauerstoffaufnahme wurde allerdings nicht beobachtet, wenn allein die Kerntemperatur stieg, die Hauttemperatur jedoch niedrig gehalten wurde (Mortensen et al., 2005; Nybo et al., 2001). Die Ursache dieses Phänomens ist jedoch bisher unklar.

Die Veränderungen des Energiestoffwechsels durch Hyperthermie scheinen im submaximalen Bereich nur geringen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit zu haben. Ein leistungsfördernder Effekt durch Kühlung ist hier demnach nicht zu erwarten. Bei maximaler Belastung jedoch scheint die kälteinduzierte

Aufrechterhaltung der Sauerstoffnahme ein längeres Arbeiten im aeroben Bereich zu ermöglichen und damit die Anhäufung von Laktat und H^+ -Ionen zu reduzieren (Gonzalez-Alonso und Calbet, 2003). Dies ist aber jedoch keine direkte Wirkung der Kühlung auf den Energiestoffwechsel, sondern eine indirekte Folge von kälteinduzierten Effekten auf das Herz-Kreislaufsystem.

1.3.3 Effekte externer Kühlung auf das neuronale System

Es wurde oben gezeigt, dass nach aktuellem Stand der Forschung die Ausdauerleistungsfähigkeit, auch auf Grund neuronaler Effekte, unter Hitzebedingungen verringert ist. Nybo und Nielsen (2001b) beobachteten, dass nach einer Ausdauerbelastung mit deutlicher Hyperthermie die Kraftentwicklungsfähigkeit der Muskulatur unverändert erhalten bleibt, wenn die Motoneuronen lokal zusätzlich elektrisch stimuliert werden. Eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit durch Kühlung im Bereich der Muskulatur ist also, zumindest auf neuronaler Ebene, nicht zu erwarten. Vielmehr konnten Daanen und Mitarbeiter (2006) zeigen, dass eine Verringerung der Muskeltemperatur unter das Ausgangsniveau vor der Belastung zu einer Abnahme der Kraftentwicklungsfähigkeit führt. Neben den Kühleffekten auf die Enzymkinetik im Bereich des Energiestoffwechsels wird hier auch die kälteinduzierte Herabsetzung der Nervenleitgeschwindigkeit als Ursache der geringeren Kraftwerte diskutiert.

Die Tatsache jedoch, dass es einer elektrischen Stimulation bedurfte, um die Kraftentwicklungsfähigkeit unter Normaltemperaturbedingungen wieder herzustellen, wurde oben als Hinweis darauf interpretiert, dass unterbewusste, zentralnervöse Areale für die Abnahme der muskulären und gesamtsystemischen Leistungsfähigkeit unter Hyperthermie verantwortlich sein könnten. Gelingt es hier, durch Kälteapplikation den Anstieg der Gehirntemperatur zu verlangsamen, so öffnet sich das Zeitfenster bis zum Erreichen kritischer Temperaturen und eine Verlängerung der Ausdauerleistung wird möglich. So stellten Gonzalez-Alonso und Mitarbeiter (1999b) fest, dass die Probanden ihres Tests immer bei Erreichen einer Körperkerntemperatur von etwa $40^{\circ}C$ die Arbeit einstellten, unabhängig davon, ob sie mit normaler, erhöhter oder abgesenkter Temperatur in den Test

hineingegangen waren. Die Zeit, in der sie unter den gegebenen Hitzebedingungen in der Lage waren, ihre sportliche Leistung aufrecht zu erhalten, war im Test mit zuvor abgesenkter Kerntemperatur im Mittel etwa dreimal so lang wie die nach angehobener Kerntemperatur. Die Hypothese der Existenz kritischer Körperkerntemperaturen wird durch die Befunde weiterer Autoren gestützt (Tucker et al., 2006; Walters et al., 2000; Gonzalez-Alonso et al., 1999b; Nielsen et al., 1993).

Aus den bisherigen Ergebnissen der Forschung im Bereich der Temperatureffekte auf das Nervensystem lässt sich zusammenfassen, dass eine lokale Kühlung der Arbeitsmuskulatur aus neuronaler Sicht entweder keinen oder aber einen negativen Effekt auf die Leistungsfähigkeit hat.

Demgegenüber sind die leistungsfördernden Auswirkungen einer langsamer steigenden Körperkerntemperatur auf die zentralnervöse Steuerung der sportlichen Leistung recht gut belegt.

I.4 Zusammenfassende Problembeschreibung und Ableitung der erkenntnisleitenden Fragestellung

Wie oben gezeigt wurde, werden bei sportlicher Ausdauerbelastung unter Hitzebedingungen mitunter deutliche Leistungseinbußen beobachtet. Die Ursachen hierfür sind bisher nur in Teilen bekannt. Eine früher oder ausgeprägter auftretende Dehydration scheint sich negativ auf die Sauerstoffaufnahme auszuwirken, was in der Folge, bei maximaler Belastung, zu einer Minderversorgung der Arbeitsmuskulatur führen kann. Die daraus resultierende Erhöhung anaerober Anteile am Energiestoffwechsel könnte, im Sinne des peripheren Ermüdungsmodells, als Erklärung der Leistungsverringerung dienen. Darüber hinaus scheint das zentrale Nervensystem eine wichtige Rolle bei der Ermüdung unter Hitzebedingungen zu spielen. Mit dem Ziel, auch bei hohen Umgebungstemperaturen optimale Leistungen zu ermöglichen, sind seit etwa dreißig Jahren zahlreiche Untersuchungen zu den Effekten externer Kühlung durchgeführt worden.

Betrachtet man diese Studien zusammenhängend (vgl. Tab. 1), so zeigt sich ein allgemeiner Trend zu einer Verbesserung der Leistung unter

Hitzebedingungen. Bei Precooling im Zusammenhang mit einer Zielbelastung unter Normaltemperaturbedingungen stellt sich die Forschungssituation deutlich heterogener dar. Offenbar spielt hier die eingesetzte Kühlmethode eine stärkere Rolle, so dass, je nachdem welche Körpertemperaturen in welchem Maße manipuliert wurden, gegensätzliche Leistungseffekte beobachtet werden können. Des Weiteren fällt ein Vergleich zwischen den Untersuchungen bei Normalbedingungen schwer, da die wenigen existierenden Untersuchungen mit sehr unterschiedlichen Probandengruppen und Testprotokollen arbeiteten. Ob eine kälteinduzierte Verzögerung der Körpertemperaturanstiege im Niedertemperaturbereich, also bei Belastungen, in denen es auch ohne Kühlung nur zu einer leichten Hyperthermie kommt, positive Leistungseffekte hat, ist bisher unklar.

Unabhängig davon, ob die Testprotokolle unter Normal- oder Hitzebedingungen durchgeführt wurden, ist darüber hinaus festzuhalten, dass nur in Ausnahmefällen Hochleistungssportler untersucht wurden. Da jedoch, wie oben beschrieben, einige Effekte erst bei maximalen Belastungen zum Tragen kommen, besteht hier ein besonderer Untersuchungsbedarf. Auch konnten keine Untersuchungen gefunden werden, die der Frage nachgehen, ob bestimmte Sportlergruppen, möglicherweise in Abhängigkeit von ihrer Trainingsorientierung auf unterschiedliche Wettkampfdistanzen, verschiedene Reaktionen auf die Kälteapplikation zeigen.

In Bezug auf die dem Precooling zu Grunde liegenden physiologischen Wirkmechanismen lässt sich zusammenfassend sagen, dass die vielfach vertretene Hypothese von der kutanen Vasokonstriktion, in deren direkter Folge sich die cardiovascular drift verzögerte, nicht haltbar zu sein scheint. Die oft beobachtete, offenbar kälteinduzierte Verringerung der Herzfrequenz im submaximalen und maximalen Belastungsbereich kann weiterhin nicht abschließend erklärt werden. Möglicherweise trägt aber die geringere Herzfrequenz, vor allem nach Hautkühlung, zu einer verbesserten Sauerstoffaufnahme bei. Dies würde es dem Sportler unter Umständen ermöglichen, die nötige Energie länger auf vornehmlich aerobem Wege bereitzustellen. Ob eine solche kälteinduzierte Abschwächung oder Verlangsamung der Laktatazidose auch auftritt, wenn der Hitzestress für den

Sportler auf Grund gemäßigter Umgebungstemperaturen relativ gering gehalten wird, ist nicht bekannt. Gleiches gilt für die Frage, welche Bedeutung die zentralnervöse Ermüdung besitzt, wenn die Körpertemperaturen, auch ohne Kühlung, nicht in hyperthermische Bereiche ansteigen.

Für die vorliegende Arbeit lassen sich aus den bisherigen Überlegungen folgende erkenntnisleitende Fragestellungen ableiten:

- 1.) Wie verändern sich die unterschiedlichen Körpertemperaturen von Hochleistungssportlern durch Kälteapplikation vor und während einer anschließenden, submaximalen bis maximalen Ausdauerbelastung unter Normaltemperaturbedingungen?
- 2.) Welche kälteinduzierten Veränderungen zeigen sich unter diesen Bedingungen in Bezug auf den Laktatstoffwechsel als Indikator der sportlichen Ausdauerleistungsfähigkeit und welche physiologischen Mechanismen liegen diesen zu Grunde?
- 3.) Welchen Einfluss hat die Kälteapplikation unter Normaltemperaturbedingungen auf das Belastungsempfinden als Ausdruck zentralnervöser Ermüdung?
- 5.) Lässt sich die Kälteapplikation unter Normaltemperaturbedingungen in der Trainings- und Wettkampfpraxis sinnvoll einsetzen?

I.5 Synoptische Übersicht des Forschungsstandes

Autoren	Kühlung (Zeitpunkt)	Kühlung (Art)	Kühlung (Dauer)	Belastung (Art)	Belastung (Umfang)	UT (ca.)	Δ KT	Δ HS	Δ P	Fazit
Arngrimsson et al. (2004)	SC	Kühlweste (0°C)	38 Min. (Während AW)	Lauf (5 km maximal)	5 km	32°C	KKT: ↓ HT: ↓	↓	↑	Die Verbesserung der Ausdauerleistung wird auf die geringere kardiovaskuläre Beanspruchung und das geringere Hitzeempfinden zurückgeführt
Bennett et al. (1995)	SC	Kühlweste (anfangs -28°C)	max. 120 Min.	Gehen mit Feuerwehr- anzug (1,12 m/s)	VF (max. 120 Min.)	34°C	KKT: ↓ HT: ↓	↓	↑	Das Tragen einer Kühlweste unter dem Feuerwehranzug verringerte den HS und verbesserte die Leistung
Bergh & Ekblom (1979)	PC	H ₂ O (GK) 13-15°C	Max. 25 Min.	Arm- /Beinergometer (110% VO _{2max})	VF (5-8 Min.)	20- 22°C	KKT: ↓ HT: ↓ MT: ↓	↓	↓	Die Abnahme der Ausdauerleistung wird auf die verringerte KKT und MT, nicht aber die HT, zurückgeführt
Blomstrand et al. (1984)	PC	H ₂ O (UK) 10-12°C	30 Min.	Rad (Ausbelastung < 2 Min.)	Max. 2 Min.	28- 30°C	Muskel: ↓		↓	Absenkung der Muskeltemperatur führte zu einer Verringerung der Leistung
Bogerd et al. (2010)	PC	leichtes Kühlshirt	45 Min. bei UT von ca. 24,6°C	Rad (65% VO _{2peak})	VF	29,3° C	KKT: ↓	↓	↑	Die milde Kühlung führte zwar zu einer Verbesserung der Leistung, jedoch war der Effekt bei intensiverer Kühlung (Eisweste) deutlicher
Bolster et al. (1999)	PC	H ₂ O (GK) 26°C	31 Min.	Schwimmen + Rad (bis zu 75% VO _{2peak})	Schwim- men: 15 Min. Rad : 45 Min.	27°C	KKT: ↓ HT: →	→		Durch den Wärmeverlust beim Schwimmen werden die Effekte des PC aufgehoben. PC vor einem Triathlon ohne Neoprenanzug wird nicht empfohlen
Booth et al. (1997)	PC	H ₂ O (GK) 29-23°C	60 Min.	Lauf (max. Dist. in 30 Min.)	30 Min.	32°C	KKT: ↓ HT: ↓	↓	↑	Die Verbesserung der Ausdauerleistung wird auf die Verringerung des Hitzestresses und die erhöhte Wärmespeicherung zurückgeführt

Booth et al. (2001)	PC	H ₂ O (GK) 29-24 °C	ca. 52 Min.	Rad (60% VO _{2peak})	35 Min.	35 °C	KKT: ↓ MT: ↓	↓	PC verringerte den HS, hatte aber keinen Einfluss auf den Energiestoffwechsel in der Arbeitsmuskulatur
Clarke et al. (2010)	PC	Kühlweste	60 Min.	Lauf (fußball-spezifisch)	90 Min.	30,5° C	KKT: ↓ MT: ↓	↓ ↑	PC erhöhte fußballspezifische Laufleistung
Cotter et al. (2001)	PC	Luft/Kühlweste (3°C/ 0°C)	45 Min.	Rad (65% VO _{2peak} - Max)	35 Min.	35 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓ ↑	PC führte zu einer Verringerung des HS und verbesserte die Ausdauerleistung, unabhängig davon, ob die Arbeitsmuskulatur während des PC gewärmt wurde
Daanen et al. (2006)	PC	Kühlanzug (GK/OK/UK) 5 °C	45 Min.	Rad (60% VO _{2max})	40 Min.	30 °C	KKT: →	↓	Zwischen der Kühlung von OK, UK und GK ergaben sich keine Unterschiede bezüglich des Hitzestresses und der Brutto-Arbeitsleistung
Drust et al. (2000)	PC	H ₂ O (GK-Dusche) 26 °C	60 Min.	Lauf (fußball-spezifisch)	90 Min.	20 °C	KKT: ↓	→	Unter Normalbedingungen führte das durchgeführte PC zu keinen sig. physiologischen Veränderungen
Duffield et al. (2010)	PC	H ₂ O (UK) 14 °C	20 Min.	Rad (self-paced)	40 Min.	33 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓ ↑	PC führte zu einer Verbesserung der Leistung, die jedoch erst sichtbar wurde, nachdem keine Temperatureffekte mehr messbar waren
Febbraio et al. (1996b)	SC	Umgebungs-luft 3° vs. 20 °C	40 Min.	Rad (65% VO _{2max})	40 Min.	3 °C vs. 20 °C	KKT: ↓ MT: ↓	↓	In der Kälte verringerte sich die CHO-Stoffwechselrate
Alonso et al. (1999b)	PC	H ₂ O (GK) 17 °C	30 Min.	Rad (60% VO _{2max})	VF	40 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓ ↑	Geringere Körpertemperaturen zu Beginn der Belastung verlängerten die Zeit bis zur VF
Tolfrey et al. (2008)	PC	Handkühlung	10 Min.	Lauf (Ausbelastung)	3 km	31 °C	KKT: ↓	↓ ↑	Handkühlung allein verringerte den HS und verbesserte die Laufleistung

Hasegawa et al. (2006)	PC	H ₂ O (UK) 25 °C H ₂ O (orale Aufnahme entsprechend Schweißver- lust)	30 Min.	Rad (60% VO _{2max} , dann 80% VO _{2max} bis VF)	60 Min. (60% VO _{2max}) VF (80% VO _{2max})	32 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓ ↑	Kombination von PC und Wasseraufnahme verringerte den Hitzestress und erhöhte die Leistung durch verbesserte Wärmeaufnahmekapazität
Hessemer et al. (1984)	PC	Umgebungs- luft (5 °C)	30 Min. PC 20 Min. Pause 20 Min. PC	Rad (Ausbelastung – self-paced)	60 Min.	18 °C	KKT: → HT: ↓	↓ ↑	Die Erhöhung der Leistung wurde auf eine Verbesserung der O ₂ - Versorgung der Arbeitsmuskulatur zurückgeführt
Hornery et al. (2005)	PC	Kühlweste	10 Min.	Rad (20 Min. 75% VO _{2max} , dann 10 Min. maximal)	30 Min.	21 °C	KKT: → HT: →	→ ↑	Die Leistung verbesserte sich, ohne dass es zu einer signifikanten Abnahme der Körpertemperaturen kam. Die Autoren nehmen einen Placebo-Effekt an.
Kay et al. (1999)	PC	H ₂ O (GK) 30-18 °C	60 Min.	Rad (max. Dist. in 30 Min.)	30 Min.	31 °C	KKT:→ HT: ↓	↓ ↑	Das durchgeführte PC führte zu einer Abnahme der HT, ohne die KKT zu senken, und zu einer Verbesserung der Ausdauerleistung
Kruk et al. (1990)	PC	Umgebungs- luft 5 °C	30 Min.	Rad (50% VO _{2max})	30 Min.	5 °C	KKT: ↓ HT: ↓		Durch eine erhöhte Wärmebildung in PC wird hier für die gleiche Leistung mehr Energie benötigt.
Layden et al. (2002)	SC	Umgebungs- luft -10/0/10/20 °C	90 Min.	Rad (64% VO _{2peak})	90 Min.	-10 bis +20 ° C	KKT:→ HT: ↓	↓	Mit sinkender Umgebungstemp. kam es zu einer Abnahme des Hitzestresses und einer Verringerung des Fettstoffwechsels
Lee & Haymes (1995)	PC	Umgebungs- luft 5 °C	30 Min.	Lauf (82% VO _{2max})	VF	24 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓ ↑	Die Verbesserung der Ausdauerleistung wird auf die Entlastung des metabolischen und kardiovaskulären Systems zurückgeführt
Leweke et al. (1995)	PC	Umgebungs- luft (5 °C)	30 Min. PC 20 Min. Pause 20 Min. PC	Rad (35-65% VO _{2peak})	16 Min.	18 °C	KKT: ↓	↓	PC führte zu einer thermoregulatorischen Entlastung während des Ausdauer-tests

Marsh & Sleivert (1999)	PC	H ₂ O (OK) 18 °C	30 Min.	Rad (max. Leistung)	70 Sek.	29 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓	↑	Die Verbesserung der Leistung in PC wird auf ein höheres Blutangebot in der Arbeitsmuskulatur zurückgeführt
Mitchell et al. (2003)	PC	Luft/ H ₂ O (GK) (Sprühnebel) 22 °C	20 Min.	Lauf (100% VO _{2max})	VF	38 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓	↓	PC führte zwar zu einer Verringerung des Hitzestresses, dennoch kam es zu einer Abnahme der Ausdauerleistung
Morrison et al. (2006)	PC	H ₂ O (UK) 24 °C	Max. 60 Min.	Rad (95% Ventilations-schwelle)	VF (28-58 Min.)	30 °C	KKT: ↓	↓	↑	PC verbesserte die Ausdauerleistung, dieser Effekt konnte jedoch auch durch ein Luftgebläse (Fahrtwindsimulation) erreicht werden
Mündel et al. (2007)	SC	4 °C Sprühnebel (Gesicht)	40 Min.	Rad (65% VO _{2peak})	40 Min.	33 °C	Stirnte mp.: ↓ KKT: →	↓		Gesichtskühlung reduzierte den Hitzestress und das Belastungsempfinden
O'Brien et al. (2007)	PC	H ₂ O (UK/ OK) 10-15 °C	Bis KKT auf 35,5 °C	Stufensteigen (max. Geschw.)	1 Min.	10 °C	KKT: ↓ HT: ↓ MT: ↓		↓	Die abgesenkte MT wird für die Verringerung der Leistung verantwortlich gemacht und nicht die KKT
und Brück (1998)	PC	Umgebungs-luft (5 °C)	30 Min. PC 20 Min. Pause 20 Min. PC	Rad (40%/80% VO _{2peak})	16 Min. 40% VF 80%	18 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓	↑	Das leichte Absenken von KKT und HT führte zu einer Verbesserung der Ausdauerleistung
Mather (2004)	SC	Eispacks (OK/ UK)	30 Min.	Handdreh-kurbel (50% VO _{2peak})	30 Min.	40 °C	KKT: → HT: ↓	↓		Kühlung des UK reduzierte den Hitzestress stärker als OK-Kühlung
Price et al. (2009)	PC/SC	Kühlweste	Test 1: 20 Min. (PC-Test) Test 2: 20 Min. (PC) + 15 Min. (SC)	Lauf (fußball-spezifisch)	2 x 45 Min.	30 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓		Beide Maßnahmen (PC allein und PC + SC) reduzieren den Hitzestress, jedoch ist die Kombimethode am effektivsten
Quod et al. (2005)	PC	1.) H ₂ O (GK) 29-24 °C 2.) Kühlweste (OK) 0 °C	30 Min. (H ₂ O) + 40 Min. (Kühlweste)	Rad (max. Leistung)	40 Min.	34,3 °C	KKT: ↓	→	↑	Die Kombination von Immersion, gefolgt von Kühlweste, verbesserte die Zeitfahrleistung. Bei Weste allein wurden keine signifikanten Veränderungen gefunden.

Quod et al. (2008)	PC	H ₂ O (GK) (29°-24 °C) oder/und Kühlweste	30 Min. (H ₂ O) 40 Min. (Kühlweste)	Rad (closed-loop: fahren, bis eine best. Leistung erbracht wurde)	40 Min.	34 °C	KKT: ↓ (H ₂ O u. Weste) KKT: → (Nur Weste)	↓	↑	Allein die kombinierte Methode senkte die KKT und verbesserte die Leistung
Schmidt und Brück (1981)	PC	Umgebungs- luft (5 °C)	30 Min. PC 20 Min. Pause 20 Min. PC	Rad (80-300 Watt)	VF	18 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓	↑	Die PC-induzierte thermoregulatorische Entlastung führte zu einer Verbesserung der Ausdauerleistung
Sleivert et al. (2001)	PC	Luft/Kühlweste (3 °C/ 0 °C)	45 Min.	Rad (maximal)	45 Sek.	33 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓	→	PC führte zu einer Verschlechterung der hoch- intensiven Ausdauerleistung, wenn die Arbeitsmuskulatur nicht gleichzeitig gewärmt wurde
Sunderland (2011)	SC	Kühlkragen	ca. 43 Min.	Lauf (70% VO _{2max})	VF	32,2° C	KKT _{max} : ↑ HT _{Hals} : ↓	→	↑	Die Kühlung des Halses verringerte den empfundene Hitzestress und verlängerte so die Zeit bis zur VF
Tyler et al. (2010)	SC	Kühlkragen	90 Min.	Lauf (Min. 0-75: 60% VO _{2max} Min. 76-90: self-paced)	90 Min.	30 °C	KKT: →	→	↑	Wird eine (nicht weiter bestimmte) Schwelle der Hitzbelastung erreicht, kann die Halskühlung die Leistung verbessern
Ückert und Joch (2007)	PC	Kühlweste (0°-5 °C)	20 Min.	Lauf (Stufentest)	VF (ca. 32 Min.)	30- 32 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓	↑	Im Vergleich zum Test mit Aufwärmen war der HS in PC reduziert und die Leistung verbessert
White et al. (2003)	PC	H ₂ O (GK/UK) 20 °C	30 Min.	R (60% VO _{2max})	30 Min.	30 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓		Sowohl GK- als auch UK- Kühlung reduzierten den HS, wobei letztere jedoch als angenehmer empfunden wurde
Wilson et al. (2002)	PC	H ₂ O (UK) 18 °C	30 Min.	R (60% VO _{2max})	60 Min.	21 °C	KKT: ↓ HT: ↓	↓		Die Kühlung allein des UK verringerte den HS bei Belastung unter Normalbedingungen

Tabelle 1 Synoptische Übersicht des Forschungsstandes

AW – Aufwärmen; GK – Ganzkörper; HS – Hitzestress; HT – Hauttemperatur;
 KKT – Körperkerntemperatur; KT – Körpertemperatur; MT – Muskeltemperatur;
 OK – Oberkörper; P – Leistung; PC – Precooling; SC – Syncooling; UK – Unterkörper;
 UT – Umgebungstemperatur; VF – Volitional Fatigue

II. Methode

II.1 Untersuchungsdesign

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine Kohortenstudie, mit zwei Kohorten. In jeder Kohorte wird unter Labor- und Feldbedingungen eine randomisierte Querschnittsuntersuchung im cross-over Design durchgeführt. Diese Intrakohortenstudie wird durch einen Interkohortenvergleich beider Gruppen ergänzt.

II.2 Probanden

Bei allen Teilnehmern beider Kohorten handelt es sich um Mitglieder aus Sportfördergruppen der Bundeswehr. Durch die Kooperation des Instituts für Sportmedizin des Universitätsklinikums Münster, unter der Leitung von Prof. Dr. Klaus Völker, und dem Sportmedizinischen Institut der Bundeswehr in Warendorf, unter der Leitung von Oberstarzt Dr. Johann Hutsteiner, konnte der Kontakt zu den Athleten der Sportfördergruppen hergestellt und die Bereitschaft zur Teilnahme an der Studie erreicht werden.

Die erste Kohorte setzt sich aus 8 aktiven Mitgliedern der Deutschen Nationalmannschaft im Maritimen Fünfkampf zusammen (Maritimer Fünfkampf – siehe Kapitel VI.4).

Maritime Fünfkämpfer (1. Kohorte)					
	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung
Alter (in Jahren)	8	21	38	27,75	5,60
Gewicht (in kg)	8	73,0	78,0	75,90	1,74
K-Länge (in cm)	8	174	192	179,63	6,05
BSA (in m ²)	8	1,884	2,059	1,949	0,060
Geschlecht	männlich				

Tabelle 2 Minima, Maxima, Mittelwerte und Standardabweichungen der biometrischen Basisdaten der Maritimen Fünfkämpfer (die Berechnung der Körperoberfläche [BSA] erfolgte nach dem vereinfachten Verfahren nach Mosteller [1987]).

Die Teilnehmer sind als amtierende Welt- und Europameister international erfolgreich, betreiben ihren Sport professionell und trainieren in der Sportfördergruppe der Bundeswehr in Eckernförde.

Die Sportsoldaten des Maritimen Fünfkampfes sind auf Grund ihrer Trainingsumfänge und –intensitäten sowie ihrer internationalen Wettkampferfolge als Hochleistungssportler einzustufen, was eines der zentralen Auswahlkriterien darstellt. Des Weiteren wurden aus ihren Reihen ausschließlich Sportler ausgewählt, die umfangreiche Erfahrung mit sportmedizinischen Leistungstests im Allgemeinen und Laufbandergometeruntersuchungen im Speziellen besitzen, sich freiwillig zur Testteilnahme bereit erklärt hatten und seit mindestens einem Jahr in der Sportfördergruppe trainieren.

Die Maritimen Fünfkämpfer legen in Training und Wettkampf einen Schwerpunkt im Bereich des Laufes. Das Training ist hierbei auf Distanzen zwischen 400 und 2500 Metern ausgerichtet. Es handelt sich bei den Athleten somit um Kurz- bis Mittelzeitausdauerläufer (Martin et al., 2001: S. 174).

Die zweite Kohorte besteht aus 10 aktiven Mitgliedern der Deutschen Nationalmannschaft im Militärischen Fünfkampf (Militärischer Fünfkampf – siehe Kapitel VI.5).

Militärische Fünfkämpfer (2. Kohorte)					
	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung
Alter (in Jahren)	10	22	32	25,00	2,79
Gewicht (in kg)	10	70,0	84,0	75,64	5,15
K-Länge (in cm)	10	176	193	182,70	5,96
BSA (in m ²)	10	1,856	2,144	1,971	0,103
Geschlecht	männlich				

Tabelle 3 Minima, Maxima, Mittelwerte und Standardabweichungen der biometrischen Basisdaten der Militärischen Fünfkämpfer (die Berechnung der Körperoberfläche [BSA] erfolgte nach dem vereinfachten Verfahren nach Mosteller [1987]).

Die teilnehmenden Sportler sind als amtierende Europameister international erfolgreich und betreiben ihren Sport, wie die Maritimen Fünfkämpfer, professionell. Sie trainieren in der Sportfördergruppe der Bundeswehr in Neubiberg bei München.

Die Auswahl der Teilnehmer erfolgte nach den gleichen allgemeinen Kriterien wie im Falle der Maritimen Fünfkämpfer. Im Gegensatz zu diesen ist das Lauftraining der Militärischen Fünfkämpfer jedoch auf Distanzen zwischen 4000 und 10 000 Metern ausgerichtet. Die 2. Kohorte setzt sich somit aus Langzeitausdauerläufern zusammen (Martin et al., 2001: S. 174).

II.3 Untersuchungsgang

Abbildung 1 zeigt eine vereinfachte schematische Übersicht des Untersuchungsgangs. Die Teilnehmer absolvierten die Untersuchungen in zwei Testblöcken von jeweils einer Woche. Im ersten Block fand die Laboruntersuchung, im zweiten die Felduntersuchung statt. Der Labor- als auch der Felduntersuchung war eine sportmedizinische Eingangsuntersuchung vorgeschaltet.

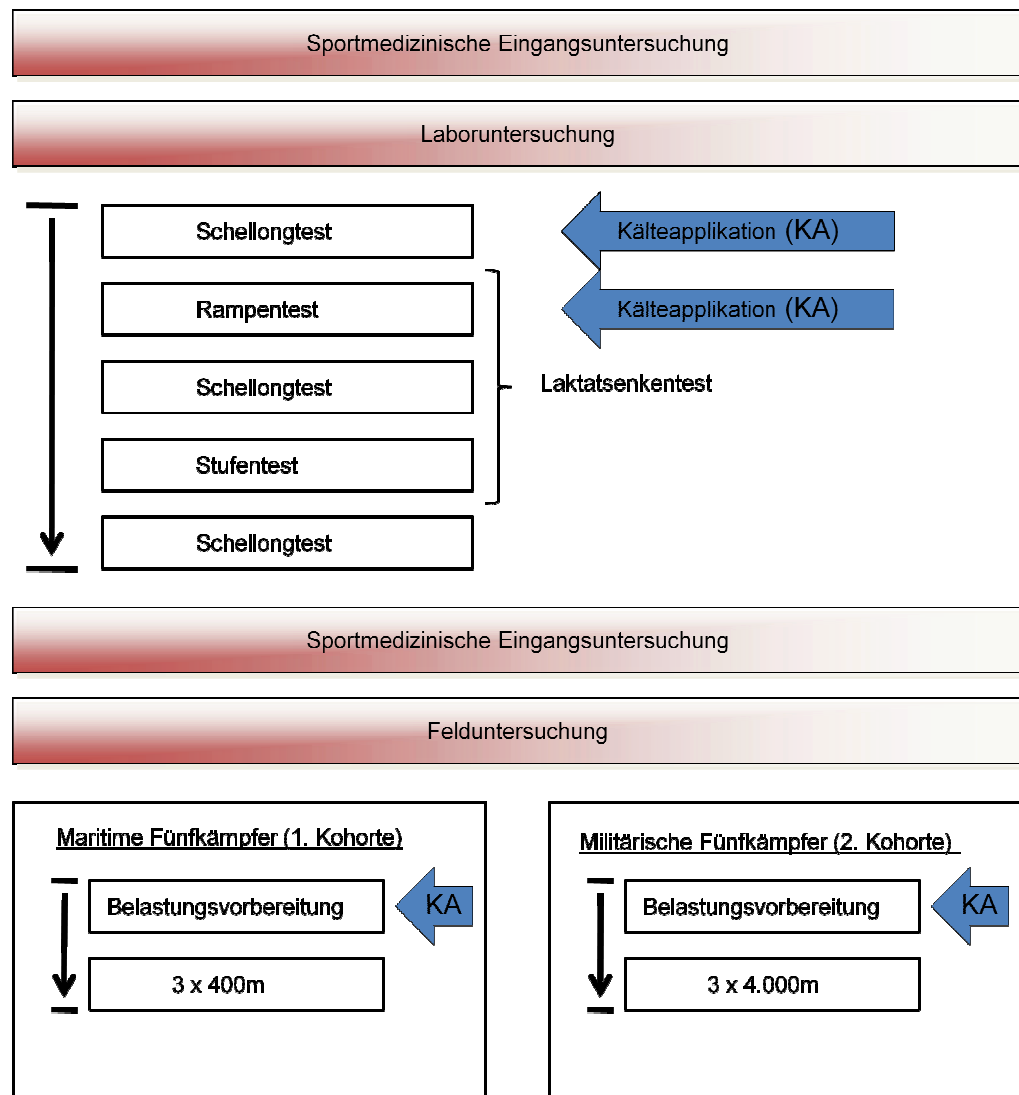


Abbildung 1 Vereinfachte, schematische Übersicht des Untersuchungsgangs (KA – Kälteapplikation).

II.3.1 Sportmedizinische Eingangsuntersuchung

Die Labor- als auch die Felduntersuchung begann für alle Teilnehmer mit einer obligatorischen sportmedizinischen Untersuchung durch einen Internisten und einen Orthopäden zur Feststellung der gesundheitlichen Eignung für die Testteilnahme. Im Rahmen dessen wurden ebenfalls Alter, Körpergröße und Gewicht erfasst. Die Untersuchung fand jeweils am Vortag des ersten Belastungstests statt.

II.3.2 Kälteapplikation

Im Labortest sowie im Feldtest erfolgte die Kälteapplikation im Bereich des Torsos, mit Hilfe einer Kühlweste. Diese hatte beim Anlegen eine Temperatur von $-3,4 (\pm 1,6)^{\circ}\text{C}$, die im Verlauf der Kühlmaßnahme auf $+14,3 (\pm 2,1)^{\circ}\text{C}$ anstieg. Die Weste wurde von den Probanden direkt auf der Haut getragen.

In der Laboruntersuchung wurden zwei Kühlphasen durchgeführt. Die erste während des ersten Schellongtests, die zweite während des Rampentests. Die Kälteapplikation fand demzufolge sowohl in Ruhe als auch unter Belastung statt. Es handelt sich hier um eine Kombination von vorbereitender (Precooling) und begleitender (Syncooling)¹ Kühlung.

In der Felduntersuchung gab es nur eine Kühlphase. Die Kälteapplikation erfolgte hier während des Belastungsvorbereitungsprogramms. Grundsätzlich ist eine solche Kühlmaßnahme daher zunächst als Syncooling zu bezeichnen. Da sie jedoch, wie die Belastungsvorbereitung selbst, auf eine später erfolgende Testbelastung zielt, ist die Kälteapplikation der Felduntersuchung primär als Precooling-Maßnahme einzustufen.

¹ Der Begriff des *Syncoolings* existiert in der Literatur nicht. Er bezieht sich hier auf eine Kälteapplikation, die während einer Zielbelastung durchgeführt wird und ist somit vom Terminus des *Precoolings* abgegrenzt, der eine Kälteapplikation im Vorfeld einer Zielbelastung beschreibt. Der Begriff des Syncoolings leitet sich morphologisch, in Anlehnung an den des Precoolings, aus dem griechischen Präfix σύν (syn) und dem englischen Wort für Kühlung (cooling) her.

II.3.3 Laboruntersuchung

II.3.3.1 Schema

Die Laboruntersuchung, wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist, gliedert sich in drei Hauptbestandteile. Den Rampentest, den Stufentest sowie eine Gruppe von drei Schellongtests. Rampen- und Stufentest gemeinsam werden zu einem sogenannten Laktatsenkentest kombiniert. Jeder Proband absolvierte das in Abbildung 2 gezeigte Protokoll einmal mit Kälteapplikation (Kältetest) und einmal ohne (Kontrolltest). Zwischen beiden Durchgängen lagen bei jedem Probanden mindestens 48 Stunden.

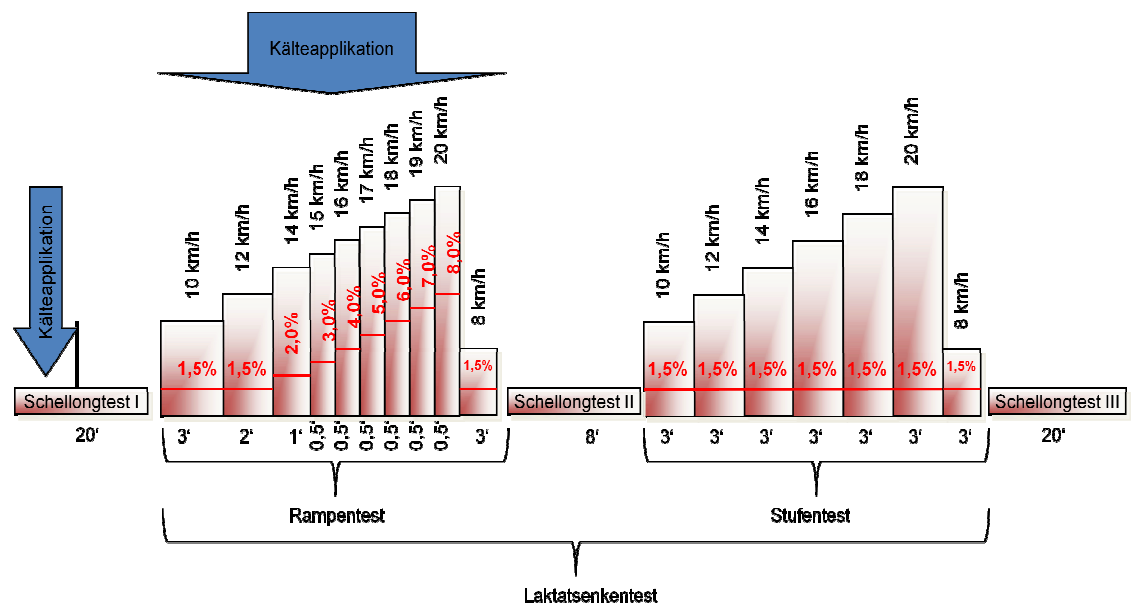


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Laboruntersuchung (neben der Zeitdauer der einzelnen Abschnitte in Minuten, sind die Laufbandgeschwindigkeit sowie die Laufbandsteigung der jeweiligen Stufe dargestellt)

II.3.3.1.1 Laktatsenkentest

Der Laktatsenkentest, wie er von Braumann und Mitarbeitern (1991) konzipiert wurde, setzt sich aus zwei aufeinander folgenden Belastungen zusammen. Zwischen diesen liegt eine Ruhepause von 8 Minuten. Die erste Belastung wird als Rampentest, die zweite als Stufentest bezeichnet. Zwar steigt die Belastung in beiden Fällen stufenförmig an, jedoch sind die Stufen im Rampentest kürzer und die Steigung des Laufbandes nimmt über den Verlauf des Tests zu. Die Geschwindigkeit der Belastungszunahme ist in

diesem Test somit höher und wird daher eher mit einer Rampe denn mit mehreren Stufen assoziiert.

Der Laktat-Senkentest wurde als Methode zur Ermittlung der individuellen Dauerleistungsgrenze entwickelt (Braumann et al., 1991). Im Rampentest kommt es auf Grund der hohen Belastungsintensität zu einer starken Laktatakkumulation. Folgt man der Laktatleistungskurve von diesem hohen Wert aus, so fällt sie in der Ruhepause und am Anfang des Stufentest ab, wird dann mit zunehmender Belastung flacher und steigt schließlich wieder an. Es konnte gezeigt werden, dass der Scheitelpunkt dieser Kurve ein verlässlicher Indikator für das maximale Laktat-steady-state ist (Tegtbur et al., 2001; Braumann et al., 1991).

Die im Rahmen des Laktatsenkentests ermittelten Messparameter und die zugehörigen Messzeitpunkte sind in Abbildung 3 dargestellt.

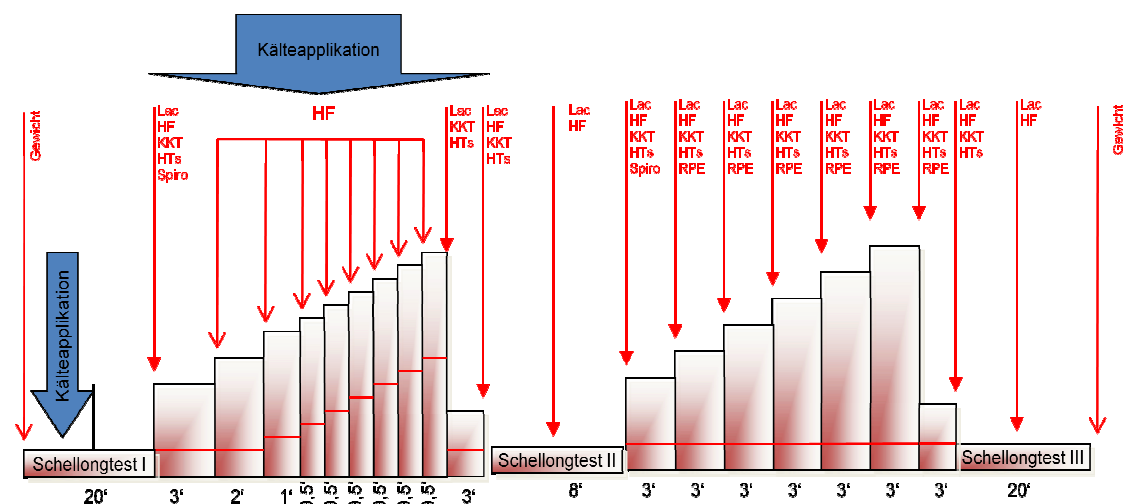


Abbildung 3 Schematische Darstellung der ermittelten Messparameter und die zugehörigen Messzeitpunkte im Laktatsenkentest (HF – Herzfrequenz; HT – Hauttemperatur; KKT – Körperkerntemperatur; Lac – Laktat; RPE – Rating of perceived exertion; Spiro – Spirometrie)

II.3.3.1.2 Schellongtest

Die Schellongtests orientieren sich an dem von Winker und Mitarbeitern (2005) beschriebenen Verfahren. In einem ruhigen Raum nehmen die Testpersonen zunächst für 10 Minuten eine liegende Position ein. Unmittelbar danach wechseln die Probanden in eine stehende Position und verharren so für weitere 10 Minuten. Während des gesamten Tests werden sowohl der Blutdruck als auch die Herzfrequenz überwacht.

Der nach dem Internisten Fritz Schellong benannte Test stellt ein Verfahren zur Einschätzung der orthostatischen Toleranz dar. Zentral sind hier die Veränderungen von Blutdruck und Herzfrequenz nach dem Einnehmen der Stehendposition. Um ein Absinken des Blutdrucks auf Grund der auftretenden Gravitationskräfte zu verhindern, erhöht sich die Herzfrequenz und kompensiert so den Blutvolumenverlust in der oberen Körperhälfte. Stärke und zeitlicher Verlauf dieser Gegenregulation geben Aufschluss über die Fähigkeit des Herzkreislaufsystems, physikalisch induzierte Blutdruckveränderungen auszugleichen (Winker et al., 2005).

Auf Grund des von Braumann und Mitarbeitern (1991) vorgeschlagenen Zeitfensters zwischen dem Rampen- und dem Stufentest wurde der zweite Schellongtest auf 8 Minuten gekürzt. Liegend- und Stehendphase waren somit jeweils nur 4 Minuten lang.

Die während der Schellongtests ermittelten Messparameter und die zugehörigen Messzeitpunkte sind in Abbildung 4 dargestellt.

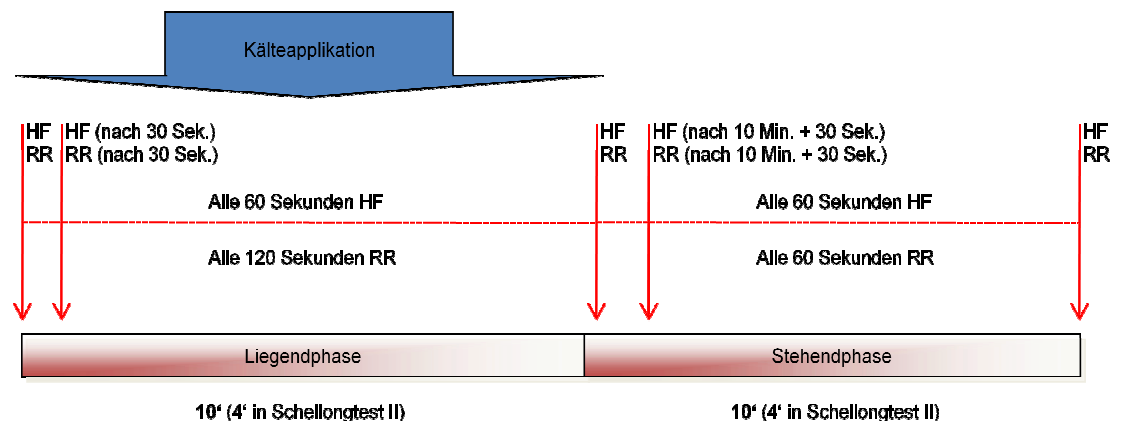


Abbildung 4 Schematische Darstellung der ermittelten Messparameter und die zugehörigen Messzeitpunkte in den Schellongtests (HF – Herzfrequenz; RR – Blutdruck [gemessen nach Riva-Rocci])

Der systolische und diastolische Blutdruck wurden sphygmomanometrisch bestimmt. Die Messung erfolgte alle zwei Minuten mit einer zusätzlichen Messung unmittelbar nach dem Aufstehen des Probanden aus der Liegendphase. Bei allen Schellongtests einer Teilnehmergruppe wurde die Blutdruckmessung von der gleichen Mitarbeiterin durchgeführt.

Um externe Einflüsse auf den Probanden zu minimieren, wurden die Schellongtests in einem durch einen Vorhang abgetrennten separaten Raum

durchgeführt, in dem allein der Proband und die durchführende Mitarbeiterin anwesend waren.

II.3.3.2 Ablauf Laboruntersuchung

Die Laboruntersuchung wurde im Sportmedizinischen Institut der Bundeswehr in Warendorf durchgeführt. Für die Dauer der Testwoche waren die Probanden in Unterkünften der angrenzenden Sportschule der Bundeswehr untergebracht. In dieser Zeit fand, abgesehen von leichtem Ausgleichssport, kein Training statt. Die Testpersonen reisten am Montag der Testwoche an und absolvierten die sportmedizinische Eingangsuntersuchung. An den weiteren Tagen folgten die Tests der Laboruntersuchung.

Hierzu begaben sich die Probanden in ein sportmedizinisches Labor, in dem die Raumtemperatur bei circa 22°C und die relative Luftfeuchtigkeit bei etwa 40% konstant gehalten wurden.

Der erste Schellongtest fand in einem ruhigen, abgetrennten Raum statt. Die Testpersonen trugen hierbei im Kontrolltest einen langen Trainingsanzug, während sie im Kältetest eine lange Trainingshose und im Oberkörperbereich allein die Kühlweste trugen. Nach Beendigung der Liegendphase legten die Teilnehmer die Kühlweste für die Dauer der Stehendphase ab.

Nach Abschluss des Schellongtests begann unmittelbar der Rampentest. Die Teilnehmer absolvierten diesen in kurzer Hose und unbekleidetem Oberkörper (Kontrolltest), beziehungsweise mit angelegter Kühlweste (Kältetest). Nach Ende dieser ersten Belastung wurde die Kühlweste abgelegt (Kältetest) und der zweite Schellongtest durchgeführt. Hierauf folgte unmittelbar der Stufentest, in dessen Anschluss die Testteilnehmer den dritten Schellongtest absolvierten. Hatten die Probanden das Testprotokoll beendet, so bestand die Möglichkeit, sich auf dem nahe gelegenen Sportplatz auszulaufen.

II.3.4 Felduntersuchung

II.3.4.1 Schema Maritime Fünfkämpfer

Die Felduntersuchung, wie sie in Abbildung 5 dargestellt ist, gliedert sich in zwei Hauptbestandteile, die Belastungsvorbereitung und den intervallisierten

Lauftest. Jeder Proband absolvierte das Protokoll einmal mit Kälteapplikation (Kältetest) und einmal ohne (Kontrolltest). Zwischen beiden Durchgängen lagen bei jedem Probanden mindestens 46 Stunden.

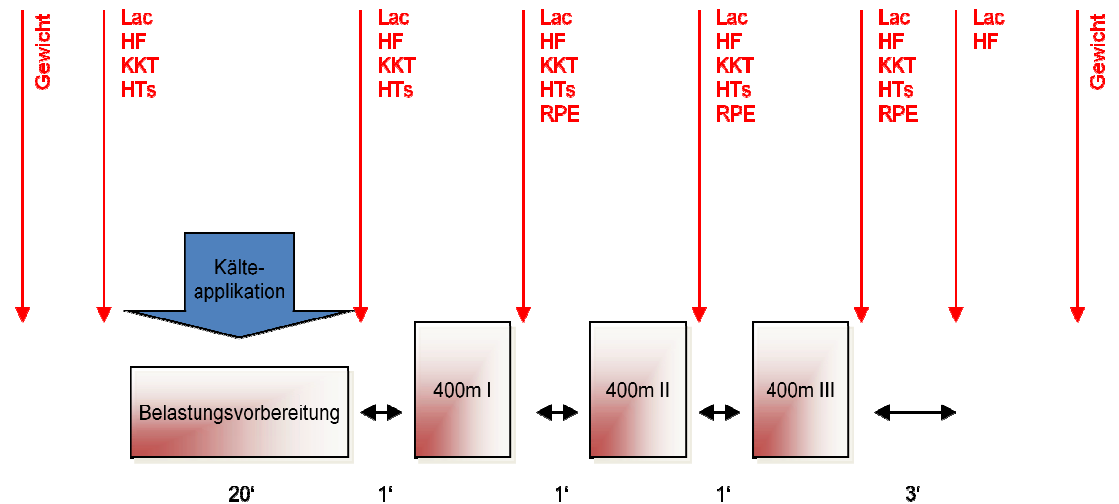


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Felduntersuchung der Maritimen Fünfkämpfer mit den ermittelten Messparametern und den zugehörigen Messzeitpunkten (HF – Herzfrequenz; HT – Hauttemperatur; KKT – Körperkerntemperatur; Lac – Laktat; RPE – Rating of perceived exertion)

II.3.4.1.1 Belastungsvorbereitung

Das Belastungsvorbereitungsprogramm besteht aus zwei Teilen, einem etwa 15 Minuten dauernden, lockeren Lauf bei einer Geschwindigkeit von circa 10-14 km/h und einer anschließenden Dehnphase mit kurzen, intensiven Sprintintervallen von je etwa 50-70 Metern Länge. Die Sportler absolvierten die Belastungsvorbereitung gemäß ihrer Gewohnheiten und ihrem Leistungsstand, waren aber angehalten, vor den beiden Testdurchläufen jeweils identische Programme durchzuführen.

Das durchgeführte Belastungsvorbereitungsprogramm ist eine Form des aktiven Precoolings, mit dem Ziel, die Körpertemperaturen während des herkömmlichen Aufwärmens weniger stark ansteigen zu lassen.

II.3.4.1.2 Lauftest

Der Lauftest setzt sich aus drei intervallierten 400m-Läufen zusammen. Die Laufgeschwindigkeit der ersten beiden Läufe richtete sich nach den sportlerspezifischen Vorgaben des Trainers. Diese waren für den Kältetest und

den Kontrolltest identisch. Auf Basis der Vorgaben liefen die Teilnehmer im ersten Lauf eine mittlere Zeit von 73,13 (\pm 9,05)s [Kontrolltest] beziehungsweise von 73,10 (\pm 8,53)s [Kältetest]. Im zweiten Lauf betragen die Zeiten im Mittel 69,20 (\pm 6,78)s im Kontrolltest und 68,73 (\pm 6,85)s unter Kältebedingungen. Im dritten Lauf wurden die Sportler aufgefordert, die 400m bei maximaler Geschwindigkeit zu absolvieren. Die Zeiten beliefen sich hier auf 66,63 (\pm 7,32)s unter Kontrollbedingungen und 65,98 (\pm 8,43)s im Kältetest.

Zwischen den Läufen liegt eine Ruhepause von 1 Minute.

Das Ziel der intervallierten 400m-Läufe ist es, die Auswirkungen der Kälteapplikation im Rahmen einer den Sportlern bekannten Testbelastung zu ermitteln. Da die Maritimen Fünfkämpfer dieses Protokoll vielfach zur Leistungsüberprüfung im Training einsetzen und die Belastung individualisiert ist, weist das Feldtestprotokoll eine große Nähe zur Trainingsrealität der Sportler auf.

II.3.4.2 Schema Militärische Fünfkämpfer

Das Feldtestprotokoll der Militärischen Fünfkämpfer, wie es in Abbildung 6 dargestellt ist, besteht, anders als bei den Maritimen Fünfkämpfern, einzig aus einem intervallierten Lauftest. Eine Belastungsvorbereitung findet nicht statt. Jeder Proband absolvierte das Protokoll einmal mit Kälteapplikation (Kältetest) und einmal ohne (Kontrolltest). Zwischen beiden Durchgängen lagen bei jedem Probanden mindestens 48 Stunden.

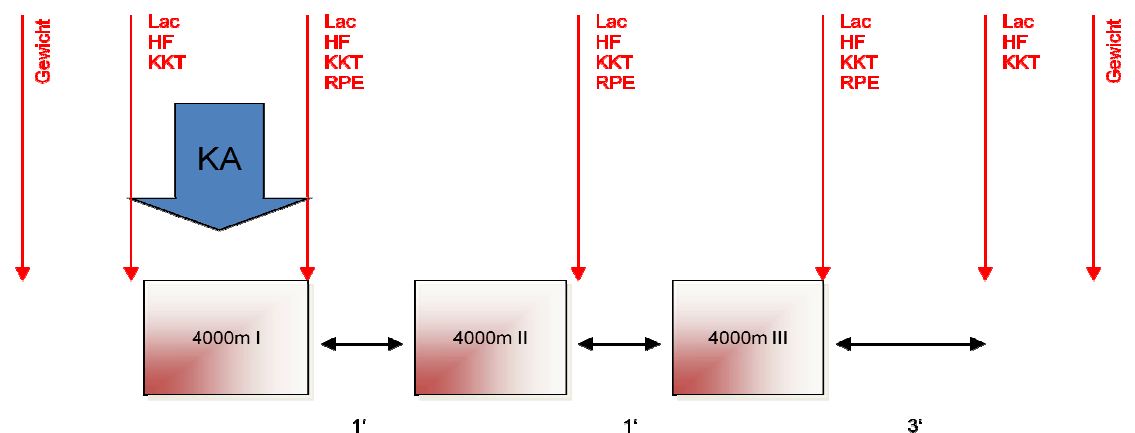


Abbildung 6 Schematische Darstellung der Felduntersuchung der Militärischen Fünfkämpfer mit den ermittelten Messparametern und den zugehörigen Messzeitpunkten (HF – Herzfrequenz; HT – Hauttemperatur; KKT – Körperkerntemperatur; Lac – Laktat; RPE – Rating of perceived exertion)

Der Lauftest setzt sich aus drei intervallisierten 4.000m-Läufen zusammen. Anders als bei den Maritimen Fünfkämpfern wird im Lauftest der Militärischen Fünfkämpfer keine individuelle Leistungsdifferenzierung vorgenommen. Die Vorgaben von 18 Minuten (1. Lauf), 16 Minuten (2. Lauf) und 14 Minuten (3.Lauf) galten für alle Testteilnehmer und wurden in der Regel auch erfüllt. So belief sich die mittlere Laufzeit während des ersten Laufes auf 1094,67 (\pm 8,64) Sekunden unter Kontrollbedingungen und auf 1089,83 (\pm 9,58) Sekunden im Kältetest. Im zweiten Lauf betragen die Zeiten 957,17 (\pm 5,60) [Kontrolltest] beziehungsweise 957,67 (\pm 4,93) Sekunden [Kältetest]. Im dritten Lauf erreichten die Sportler im Mittel eine Zeit von 835,00 (\pm 8,51) Sekunden im Kontrolltest und von 837,17 (\pm 6,68) Sekunden unter Kühlbedingungen.

Zwischen den Läufen liegt eine Ruhepause von 1 Minute.

Die Kälteapplikation erfolgt während des ersten Laufes. Somit handelt es sich hier in erster Linie um eine Syncooling-Maßnahme. Da jedoch noch zwei weitere Läufe ohne Kühlung folgen, liegt, bezogen auf diese, ebenso ein aktives Precooling vor.

Wie bei den Maritimen Fünfkämpfern ist den Militärischen Fünfkämpfern das Lauftestprotokoll bekannt, da es regelmäßig zur Leistungsüberprüfung eingesetzt wird. Auf Grund dessen ermöglicht es eine sehr trainingsnahe Untersuchung der Kälteeffekte.

II.3.4.3 Ablauf Felduntersuchung

Die Felduntersuchung wurde an den jeweiligen Standorten der beiden Sportfördergruppen in Eckernförde und in Neubiberg bei München durchgeführt. Die Sportler konnten somit während der Testwoche in ihren eigenen Unterkünften wohnen. Während dieser Zeit fand, wie auch bei der Laboruntersuchung, kein Training statt.

Die sportmedizinische Eingangsuntersuchung absolvierten die Teilnehmer am ersten Tag der Testwoche.

Am Dienstag und Donnerstag erfolgten die Belastungstests. Bei den Maritimen Fünfkämpfern herrschten während der Tests am ersten Untersuchungstag eine mittlere Umgebungstemperatur von 21,88°C und einer mittleren relativen Luftfeuchtigkeit von 39,33%. Am zweiten

Untersuchungstag beliefen sich diese Umgebungsparameter auf 22,50°C und 38,17%. Der Himmel war über den Verlauf beider Testtage stark bewölkt. Eine direkte Sonneneinstrahlung bestand zu keinem Zeitpunkt.

Bei den militärischen Fünfkämpfern in Neubiberg herrschte am ersten Testtag eine mittlere Lufttemperatur von 24,30°C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 29,00%. Am zweiten Testtag lag die Lufttemperatur im Mittel bei 26,10°C mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 34,00%. Während der Himmel am ersten Testtag stark bewölkt war und keine direkte Sonneneinstrahlung bestand, zeigten sich am zweiten Tag immer wieder kürzere Wolkenlücken mit Sonnenschein.

Zu Beginn des jeweiligen Untersuchungsprotokolls erschienen die Testpersonen in kurzer Sportbekleidung in einem Raum des jeweiligen Unterkunftsgebäudes. Nach dem Wiegen der Sportler wurden die ersten Werte für das Blutlaktat, die Herzfrequenz, die Körperkerntemperatur und die Hauttemperatur² erhoben. Bei den Maritimen Fünfkämpfern wurden nun, im Falle des Kältetests, die Kühlwesten angelegt. Im Anschluss begann in dieser Gruppe das Belastungsvorbereitungsprogramm direkt an der Unterkunft, während sich die Militärischen Fünfkämpfer zunächst zur Außensportanlage begaben und erst dort die Westen anlegten.

Nach Abschluss des Testprotokolls begaben sich die Sportler zum „Auslaufen“ auf die jeweilige kaserneninterne Joggingstrecke.

II.3.5 Messmethoden

II.3.5.1 Körperkerntemperatur

Als Maß für die Körperkerntemperatur wird die Temperatur des Tympanums herangezogen. Auf Grund der besonderen Relevanz der Temperatur im Bereich des Hypothalamus sowie der hohen Praktikabilität wurde dieser Messort gewählt. Die etwas höhere Messgenauigkeit der Tympanaltemperaturmessung, im Vergleich zur Rektal- oder

² Die Hauttemperatur wurde bei den Militärischen Fünfkämpfern nicht gemessen. Auf Grund enger Terminvorgaben im Zusammenhang mit der anstehenden Weltmeisterschaft in Ankara, mussten alle Teilnehmer zeitlich mit dem Protokoll beginnen. In der nur kurzen Belastungspause zwischen den Läufen wäre eine Hauttemperaturmessung nicht durchführbar gewesen.

Ösophagalmessung, wird zu Gunsten der größeren Nähe zum Hypothalamus in Kauf genommen (Nybo, 2008; Brengelmann, 1993).

Zur Messung wird der Messkopf des Ohrthermometers so weit wie möglich in den Gehörgang eingeführt. Um Messungenauigkeiten durch die belastungsbedingte Bewegung des Probanden und Schmerzen durch einen beispielsweise zu weit in den Gehörgang eingeführten Messkopf zu vermeiden, wurden die Testpersonen im Vorfeld mit der Benutzung des Thermometers vertraut gemacht und führten die Messung im Testverlauf selbständig durch.

II.3.5.2 Hauttemperatur

Die Oberflächentemperatur der Haut wurde mit einem Infrarotthermometer bestimmt. Zur Messung wird der Messkopf circa 5 cm über die Haut gehalten, so dass der integrierte Laserpointer exakt über den zuvor mit einem wasserfesten Hautstift aufgebrachten Punkten lag.

Die Hauttemperaturmessung erfolgte jeweils an drei unterschiedlichen Stellen der Körperoberfläche: In der Mitte der Stirn, in der Mitte des Sternums sowie mittig auf dem M. gastrocnemius.

II.3.5.3 Herzfrequenz

Die Herzfrequenz wurde mit einem Funkmesssystem der Firma Polar ermittelt. Zur Messung wurde den Sportlern der angefeuchtete Brustgurt angelegt, dessen Daten am Empfänger angezeigt wurden. An den entsprechenden Messpunkten wurden diese Werte abgelesen und in den Protokollbögen notiert.

II.3.5.4 Blutlaktat

Zur Feststellung der Blutlaktatkonzentration wurde eine Probe Kapillarblutes entnommen und in einem Analysator ausgewertet.

Zur Herstellung der Probe wurde bei den Testteilnehmern das linke Ohrfläppchen mit einer Blutentnahmelanzette punktiert und wenige Tropfen Kapillarblut entnommen. Davon wiederum wurden 10 µl Blut zur Analyse im Gerät mit 500 µl Hämolyserlösung gemischt.

Eine Hyperämisierung der Ohrläppchen wurde nicht durchgeführt.

II.3.5.5 Spirometrie

Zur Durchführung der Spirometrie im Rahmen der Laboruntersuchungen wurde ein mobiles Messsystem der Firma Cortex verwendet, das der Sportler mit Hilfe einer ergonomischen Tragevorrichtung direkt am Körper trägt. Über einen zugehörigen Empfänger werden die Daten zeitgleich auf einen PC übertragen. Das System arbeitet mit dem sogenannten *Breath-by-Breath* Verfahren, welches die Atemgase jedes Ein- und Ausatemvorganges analysiert und somit dynamisch und unmittelbar auf Beanspruchungsveränderungen reagieren kann.

Vor Beginn des Testprotokolls wurde den Probanden eine Atemmaske in entsprechender Größe angelegt, die mit dem am Körper fixierten mobilen System verbunden wurde. Die spirometrische Messung erfolgte während des Rampentests sowie des Stufentests. Im Verlauf der Schellongtests wurden keine spirometrischen Daten erhoben, da das System zu diesen Zeiten für die Messung des jeweils nächsten Probanden benötigt wurde.

II.3.5.6 Belastungsempfinden

Die Messung des Belastungsempfindens, auch als *Rating of Perceived Exertion (RPE)* bezeichnet, erfolgte an Hand der *Borg RPE Scale*. Diese von Gunnar Borg entwickelte und erstmals 1966 vorgestellte Skala verfolgt den Zweck, die psychophysiologische Beanspruchung eines Menschen quantitativ zu erfassen.

Da alle Testteilnehmer die Borg RPE Skala bereits häufig verwendet hatten, erfolgte keine gesonderte Einweisung, sondern lediglich der Hinweis darauf, dass die „6“ in etwa den Ruhezustand repräsentiert und die „20“ eine maximale Ausbelastung beschreibt, die die Athleten vermutlich bestenfalls im Wettkampf erreichen könnten.

Da die Spirometriemaske, die hohe körperliche Beanspruchung in den jeweils höheren Belastungsstufen sowie die Geräusche des Laufbandes das Sprechen erschwerten, zeigten die Testpersonen die Stufen der Skala mit den Fingern an oder der Versuchsleiter fuhr mit einem Stift die auf ein Poster gedruckte Skala

hinauf, bis die Athleten das Erreichen der empfundenen Stufe nonverbal signalisierten.

II.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit Hilfe des Programms *SPSS für Windows* (Version 11.5.1) durchgeführt und erfolgte grundsätzlich in drei Schritten. Am Anfang stand die Überprüfung der ermittelten Daten auf Eingabefehler und Normalverteilung. Daran schlossen sich die deskriptive und analytische Auswertung der Daten an.

II.4.1 Die Überprüfung der Daten

Die Eingabe ermittelter Werte in den Daten-Editor ist grundsätzlich fehleranfällig. Um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Eingabefehlern so gering wie möglich zu halten, wurden die Daten unmittelbar am Ende eines Testtages, also in einer geringen Datenmenge, direkt in eine Excel Maske übertragen und später zur Analyse per copy and paste in den SPSS Daten-Editor eingefügt. Darüber hinaus wurden Häufigkeitsanalysen durchgeführt, deren Darstellung im SPSS Viewer einen guten Überblick über die eingegebenen Werte gibt und somit sachlogisch unmögliche Werte leicht erkennbar sind (Bühl und Zöfel 2002, S. 215).

Zur Überprüfung der intervallskalierten Variablen auf Normalverteilung wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test durchgeführt. Da das Vorliegen einer Normalverteilung Voraussetzung der in dieser Untersuchung durchgeführten analytischen Verfahren ist, steht es am Anfang der statistischen Auswertung der Untersuchungsergebnisse. Eine im Kolmogorov-Smirnov-Test ermittelte Irrtumswahrscheinlichkeit bezüglich einer Abweichung von der Normalverteilung von $p > 0.05$ wurde als hinreichend für die Annahme einer vorliegenden Normalverteilung festgelegt.

II.4.2 Die deskriptive Statistik

Im Rahmen der deskriptiven Statistik wurden neben den Minima und Maxima der beschriebenen Variablen der jeweilige Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung berechnet.

II.4.3 Die analytische Statistik

In der vorliegenden Untersuchung kamen in erster Linie Mittelwertvergleiche sowie Korrelations- und Regressionsanalysen zum Einsatz. Aus der Gruppe der Mittelwertvergleiche wurden die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung und der gepaarte t-Test durchgeführt. Zur Feststellung von Zusammenhangsbeziehungen wurde die Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson ermittelt und zur präziseren Feststellung der Art solcher Zusammenhänge wurden einfache und multiple lineare Regressionsanalysen vorgenommen.

II.5 Apparatur

II.5.1 Die Kühlweste

Zur Kälteapplikation wurde die *Reißverschlusskühlweste* der Firma Arctic Heat eingesetzt.

Die Weste besteht aus einem Fasermischmaterial mit dem Namen *Sportwool*, welches sich aus einem Anteil Merino-Wolle sowie verschiedenen Kunstfasern zusammensetzt.

Auf der Vorder- und Rückseite der Weste sind insgesamt zehn Geltaschen eingearbeitet, in denen sich die Kühlsubstanz befindet. Im mittleren bis unteren Rückenbereich befinden sich keine Geltaschen, um die kälteempfindlichen Nieren von der direkten Kühlung auszusparen. Im deaktivierten, trockenen Zustand besitzt die Kühlsubstanz eine kristalline Konsistenz. Sobald die Weste im Wasserbad aktiviert wird, quellen die Kristalle zu einer Gel-artigen Masse auf.

Im Anschluss an die Aktivierung wird die Weste zum Trocknen aufgehängt, so dass das Wasser aus dem Gewebe zwischen den Geltaschen verdunstet und sich so das Gewicht der Weste reduziert. Darauf werden die Westen in einem Gefrierschrank bei einer Temperatur von minus 12°C eingelagert.

Das Gewicht der Weste betrug in diesem Zustand, in Abhängigkeit von der Konfektionsgröße, circa 1,3 bis 1,5 Kilogramm.

Um den verschiedenen Oberkörpermaßen der Probanden Rechnung zu tragen, steht die Weste in allen gängigen Konfektionsgrößen zur Verfügung.³

II.5.2 Das Laufbandergometer

Bei den Labortests wurde das *ELG 70* der Firma Woodway eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein Laufband, dessen 87 gummibeschichtete Einzellamellen in ihrer Rotation um zwei Endrollen eine Lauffläche von 69 mal 224 cm bilden.

Die Rotations- und damit auch die Laufgeschwindigkeit können in Stufen von 0,1 km/h reguliert werden und erreichen ein Maximum von 40 km/h. Zusätzlich zur Geschwindigkeitsregulation kann die Steigung des Laufbandes in Gradschritten von -5 bis + 35° variiert werden. Durch sein Eigengewicht von 408 kg verfügt das Ergometer auch bei hohen Geschwindigkeiten über eine sehr gute Stabilität. Die Sicherheit der Sportler wird durch einen Magnetnotschalter, einen manuellen Notschalter und eine Haltekonstruktion gewährleistet, die bei einem Sturz das Laufband stoppen und ein Herunterfallen des Läufers verhindern.⁴

Die Steuerung des Laufbandes erfolgte über das Programm *Metasoft* des *Cortex Metamax 3B* Spirometriesystems, so dass das Belastungsprotokoll unabhängig vom Testleiter durchlief.

³ Die in diesem Kapitel dargestellten technischen Daten entstammen dem entsprechenden Datenblatt der Firma Arctic Heat zu ihrem Produkt *Reißverschlusskühlweste*, welches unter dem Link <http://www.arcticheat.eu/index.htm> (Stand: 10.08.2009; 15:12) einzusehen ist.

⁴ Die in diesem Kapitel dargestellten technischen Daten entstammen dem entsprechenden Datenblatt der Firma Woodway zu ihrem Produkt *ELG 70*, welches unter dem Link <http://www.de.woodway.com/productspecifications/Metric/ELGspecmetric.pdf> (Stand: 10.08.2009; 15:10) einzusehen ist.

II.5.3 Das Ohrthermometer

Bei der Labor- sowie der Felduntersuchung kam das Ohrthermometer *Thermoscan Pro 3000* der Firma Braun zum Einsatz.

Bei diesem Thermometer handelt es sich um ein Wärmestrahlungsmessgerät, das die vom Trommelfell und dem umgebenden Gewebe emittierte Infrarotstrahlung misst. Das *Thermoscan Pro 3000* führt 8 Messungen pro Sekunde durch, zeigt davon den jeweils höchsten Wert als gemessene Temperatur an und verfügt im Messbereich von 35,5 bis 40,2°C, bei einer Umgebungstemperatur zwischen +10 bis + 40°C, über eine Messgenauigkeit von 0,2°C.⁵

II.5.4 Das Oberflächenthermometer

Zur Messung der Hauttemperatur wurde das *TLC 720* der Firma Ebro eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein Infrarotthermometer. Die Sendekopf emittierte Infrarotstrahlung wird von der Hautoberfläche reflektiert und vom Messkopf des Gerätes empfangen. Ein integrierter Laserpointer zeigt dem Messenden den Punkt der Messung auf der Haut des Probanden an. Das Gerät besitzt bei einer Umgebungstemperatur zwischen 0 und 50°C im Messbereich von -18,0 bis +119,9°C eine Messgenauigkeit von 0,8°C.⁶

II.5.5 Das Herzfrequenzmesssystem

Die Messung der Herzfrequenz erfolgte im Labor über den *Polar T61* Brustgurt und den in das Laufband integrierten Polar-Empfänger als Bestandteil des *Metamax 3B* Spirometrysystems.

Im Feld diente der *Polar S810* Herzfrequenzmonitor mit dem zugehörigen *Polar T61* Brustgurt als Sender.

⁵ Die in diesem Kapitel dargestellten technischen Daten entstammen dem entsprechenden Datenblatt der Firma Braun zu ihrem Produkt *Thermoscan Pro 3000*, welches unter dem Link <http://www.schoolhealth.com> (Stand: 01.05.2009; 17:20) einzusehen ist.

⁶ Die in diesem Kapitel dargestellten technischen Daten entstammen der Betriebsanleitung der Firma Ebro zu ihrem Produkt *TLC 720*: Ingolstadt, 2004.

II.5.6 Das Blutanalysestystem

Die Bestimmung der Blutlaktatkonzentration erfolgte mit Hilfe des *Analysator Super GL* der Firma Dr. Müller Gerätebau GmbH. Die Analyse hat eine Genauigkeit von $< 2,5\%$.⁷

II.5.7 Das Spirometriesystem

Für die Spirometrie wurde das *Metamax 3B* Messsystem der Firma Cortex in der Version 2.1 eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein mobiles, 570 Gramm schweres System, das der Sportler direkt am Körper trägt. Über den zugehörigen Cortex *Telemetrieempfänger* werden die Daten auf einen PC übertragen. Der *Metamax 3B* arbeitet mit dem sogenannten *Breath-by-Breath* Verfahren, welches die Atemgase jedes Ein- und Ausatemvorganges analysiert und somit dynamisch und unmittelbar auf Beanspruchungsveränderungen reagieren kann.

Die Analyse erfolgt über einen digitalen Volumensensor, einen O₂- sowie einen CO₂-Sensor. Bei dem Volumensensor handelt es sich um ein Turbinen-System, *Triple V* genannt, das in einem Bereich von 0,05 bis 20 l/s bei einer Auflösung von 7 ml über eine Genauigkeit von 2% verfügt. Der O₂-Analysator besitzt eine elektrochemische Zelle mit einem Messbereich von 0-60%. Die Zelle erreicht eine 90%-ige Durchmischung des Gasgemisches in einer Zeit von 100 ms und verfügt über eine Genauigkeit von 0,1 Volumen %. Die CO₂-Analyse erfolgt über einen nicht-dispersiven Infrarotsensor, ein System also, bei dem das gesamte infrarote Lichtspektrum durch das Gasgemisch hindurch tritt und erst unmittelbar vor dem Absorptionsdetektor die für die Messung relevante Bandbreite durch einen Filter eingegrenzt wird. Das vorliegende System verfügt hierbei über einen Messbereich von 0-13%, erreicht die 90%-ige Durchmischung in 100 ms und besitzt auch hier eine Genauigkeit von 0,1 Volumen %. Über eine 60 cm lange Absaugstrecke wird dem Gasgemisch der

⁷ Die in diesem Kapitel dargestellten technischen Daten entstammen dem entsprechenden Datenblatt der Firma Dr. Müller Gerätebau GmbH zu ihrem Produkt *Analysator Super GL*, welches unter dem Link <http://vogt-medical.com/de/catalogue/index1/index1.html> (Stand: 11.08.2009; 17:40) einzusehen ist.

Wasserdampf entzogen, so dass keine Feuchtigkeit in den Analysator gelangen kann.⁸

II.5.8 Die Borg RPE-Skala

Die Messung des Belastungsempfindens, auch als *Rating of Perceived Exertion (RPE)* bezeichnet, erfolgte an Hand der *Borg RPE Scale*.

Die in Abbildung 7 dargestellte Skala umfasst 15 Zahlenstufen, welche mit 10 multipliziert, in etwa die Herzfrequenz bei der entsprechenden Beanspruchung ergeben sollen. Zusätzlich zu der verwendeten Zahlenkodierung sind die ungeraden Zahlen inklusive der „7,5“ mit sogenannten ‚Verbalankern‘ versehen, die der einfacheren Einschätzung des eigenen Belastungsempfindens dienen sollen (Borg, 1998: S. 29 ff).

6	No exertion at all
7	Extremely light
8	Very light
9	Light
10	Somewhat hard
11	Hard (heavy)
12	Very hard
13	Extremely hard
14	Maximal exertion
15	
16	
17	
18	
19	
20	

Abbildung 7 Borg RPE Scale (Borg, 1998: S. 31)

⁸ Die in diesem Kapitel dargestellten technischen Daten entstammen dem entsprechenden Datenblatt der Firma Cortex zu ihrem Produkt *Metamax 3B*, welches unter dem Link http://www.cortex-medical.de/public/metamax/CORTEX_Flyer_MetaMax_d.pdf (Stand: 11.08.2009; 17:20) einzusehen ist.

III. Ergebnisse

III.1 Laboruntersuchung - Schellongtests

III.1.1 Vorbelastungsphase (Schellongtest I)

III.1.1.1 Herzfrequenz

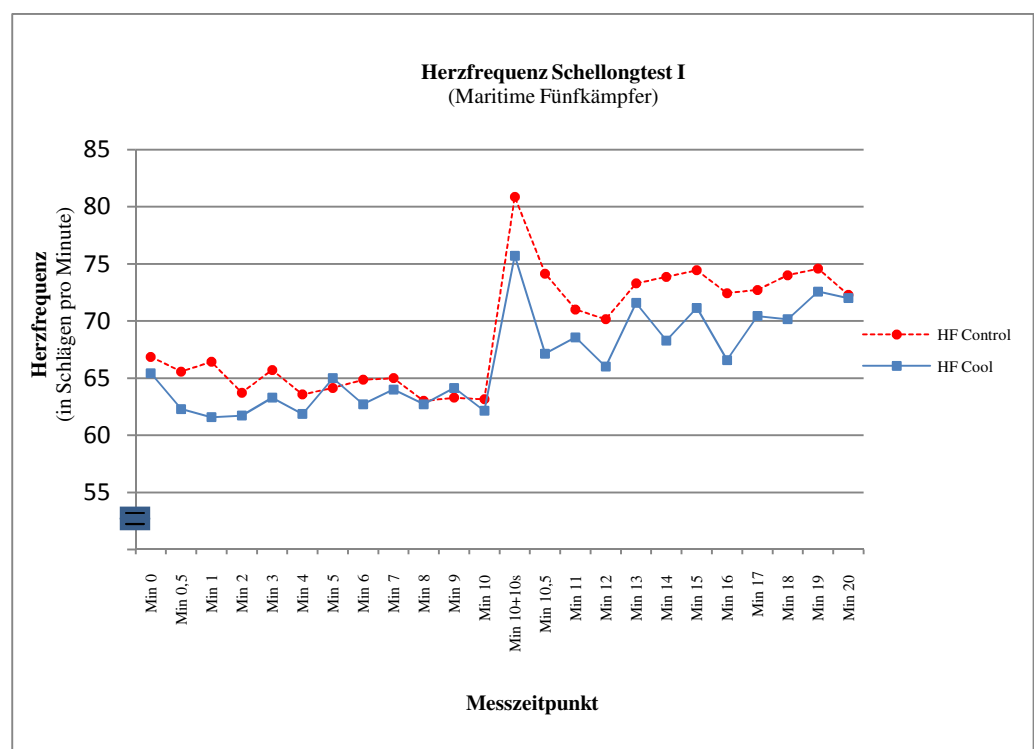


Abbildung 8 Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests I (Maritime Fünfkämpfer)

Nach leichter, anfänglicher Variation zwischen der mittleren Herzfrequenz im Kälte- und Kontrolltest, nähern sich die Werte im Verlauf der Liegendphase an. Unmittelbar nach Einnehmen der Stehendposition steigt die Herzfrequenz im Kontrolltest stärker an als in der Kältebedingung. Im Verlauf der Stehendphase liegt die Frequenz im Kälte-Test weiterhin durchweg unter der im Kontrolltest.

Der Unterschied zwischen beiden Testbedingungen, bezogen auf die maximale Herzfrequenz nach Verlassen der Liege, beträgt 5,14 Schläge und ist auf dem Niveau von $p \leq 0,208$ nicht signifikant.

Die mittlere Herzfrequenz über den Verlauf der Stehendphase beträgt 70,14 (\pm 6,41) Schläge pro Minute im Kältetest und 73,86 (\pm 9,46) Schläge in der Kontrollbedingung. Es liegt auch hier kein signifikanter Unterschied vor ($p \leq 0,133$).

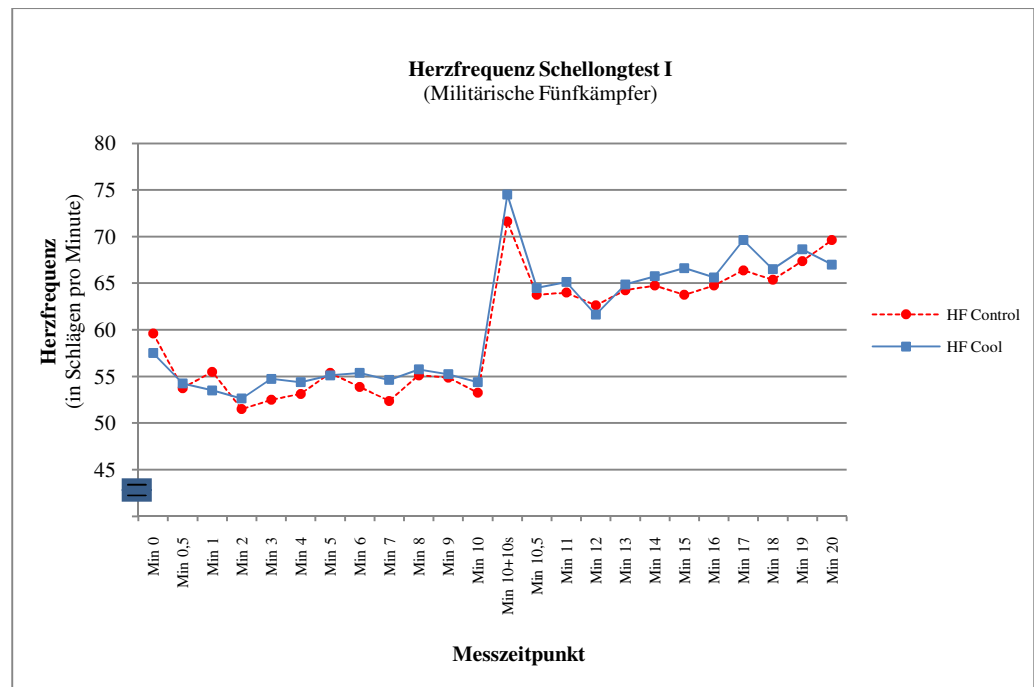


Abbildung 9 Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests I (Militärische Fünfkämpfer)

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** liegt die mittlere Herzfrequenz, über den Verlauf der Liegend- sowie der Stehendphase hinweg, im Kältetest leicht über den Werten der Kontrollbedingung. Auch liegt der maximale Anstieg nach Verlassen der Liege im Kältetest höher.

Die Werte der Liegendphase belaufen sich auf 54,24 (\pm 9,32) Schläge pro Minute im Kontrolltest und 54,88 (\pm 7,75) Schläge im Kühlttest. In der Stehendphase beträgt die Herzfrequenz im Mittel 65,88 (\pm 12,08) Schläge pro Minute im Kontrolltest und 66,88 (\pm 13,54) Schläge im Kühlttest. Der Anstieg der Frequenz nach Verlassen der Liege ist unter Kühlbedingungen um 2,87 Schläge höher.

Keiner dieser Unterschiede ist signifikant.

III.1.1.2 Blutdruck

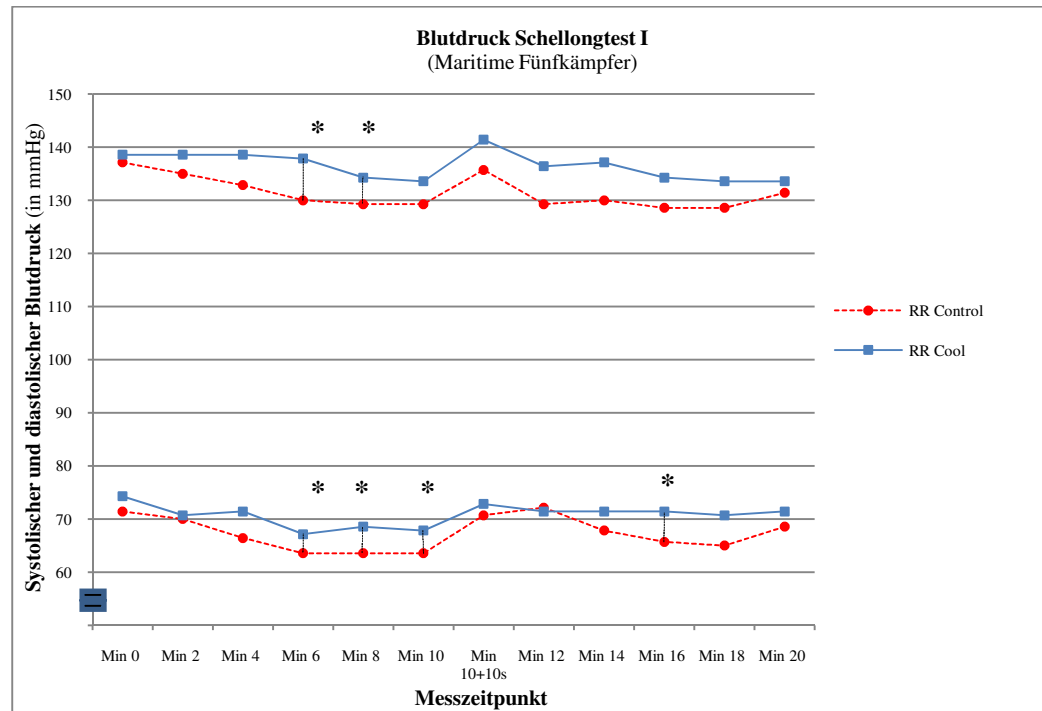


Abbildung 10 Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests I (Maritime Fünfkämpfer)

Der systolische wie auch der diastolische Blutdruck weisen bei den **Maritimen Fünfkämpfern** nahezu durchgängig höhere Mittelwerte nach Kühlung auf als bei der Kontrolluntersuchung.

Der systolische Blutdruck liegt unter Kältebedingungen im Mittel um 5,43 mmHG höher als im Kontrolltest. Der mittlere diastolische Wert ist um 4,43 mmHG höher.

Über den Verlauf der Liegendphase ist der Unterschied, bezogen auf den diastolischen Blutdruck, signifikant ($p \leq 0,028$). Der Unterschied im systolischen Mittelwert dieser Phase ist auf dem Niveau von $p \leq 0,081$ nicht signifikant. Die Unterschiede über den Verlauf der Stehendphase sind nicht signifikant. Jedoch unterscheidet sich der diastolische Blutdruck in dieser Phase am Messpunkt *Min 16* signifikant ($p \leq 0,047$).

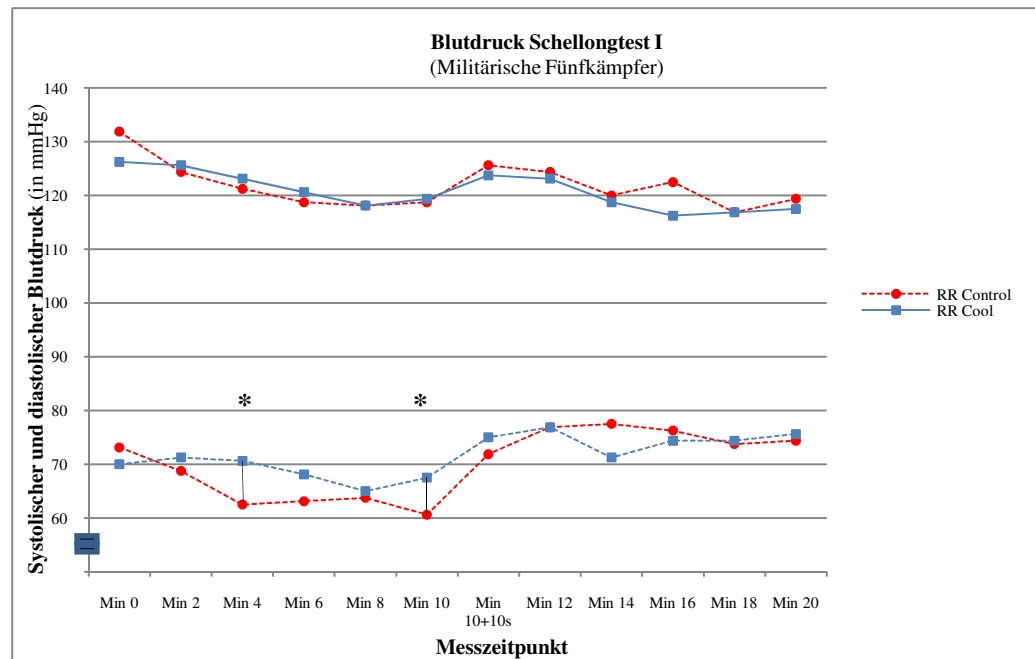


Abbildung 11 Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests I (Militärische Fünfkämpfer)

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** unterscheiden sich die Werte der Systole in beiden Testbedingungen über den Verlauf der Liegend- wie der Stehendphase nur geringfügig. Der diastolische Blutdruck liegt in der Kältebedingung während der Liegendphase nahezu durchgängig über den Werten des Kontrolltests. In der Stehendphase liegen die Werte dagegen erneut sehr nah beieinander.

Der diastolische Blutdruck beträgt im Kältetest in der Liegendphase $68,88 (\pm 7,26)$ mmHg. Unter Kontrollbedingungen beläuft er sich auf $65,13 (\pm 4,79)$ mmHG.

Die Unterschiede sind allein an den Messpunkten *Min 4* und *Min 10* signifikant ($p \leq 0,042$; $p \leq 0,036$).

III.1.2 Zwischenbelastungsphase (Schellongtest II)

III.1.2.1 Herzfrequenz

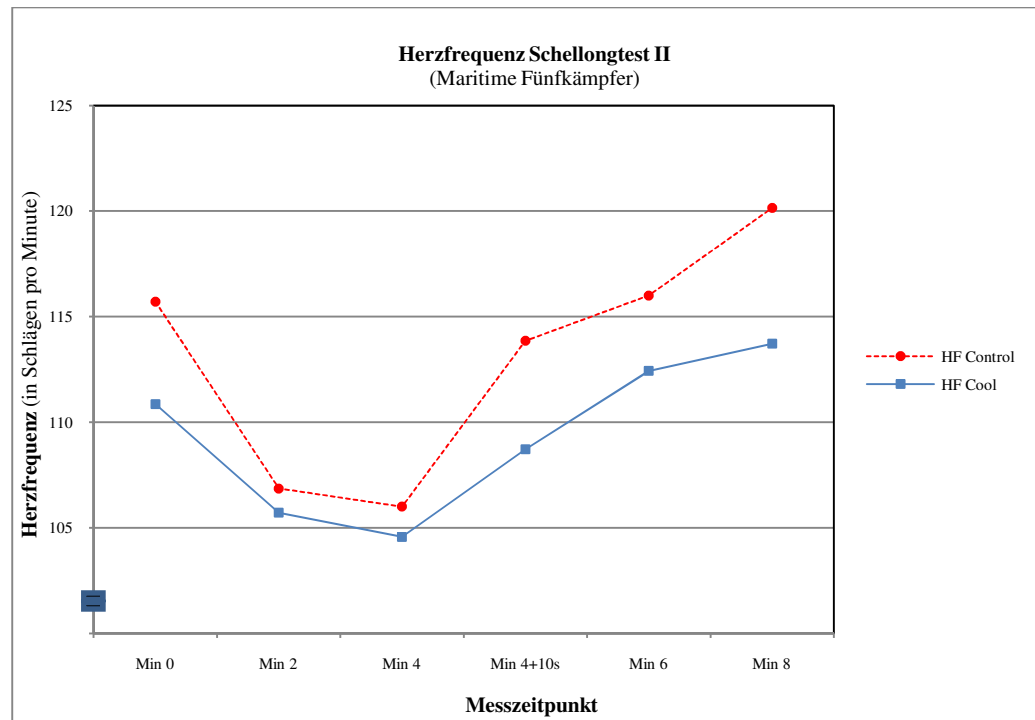


Abbildung 12 Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests II (Maritime Fünfkämpfer)

Im zweiten Schellongtest liegt die Herzfrequenz der **Maritimen Fünfkämpfer** in der Kontrollbedingung zu allen Messzeitpunkten über denen des Kältetests. In der Stehendphase zeigen sich größere Unterschiede als in der Liegendphase. In der Kontrollbedingung beträgt die mittlere Herzfrequenz hier $116,71 (\pm 13,33)$ Schläge pro Minute, unter Kältebedingungen liegt sie um $9,14$ Schläge niedriger ($106,86 [\pm 16,45]$). Dieser Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,032$ signifikant.



Abbildung 13 Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests II (Militärische Fünfkämpfer)

Die Herzfrequenzwerte der **Militärischen Fünfkämpfer** zeigen kein eindeutiges Bild. Zwar liegt die mittlere Herzfrequenz in der Liegendphase unter Kältebedingungen um 1,62 Schläge höher als im Kontrolltest; dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant ($p \leq 0,566$). Der um 2,87 Schläge höhere Mittelwert im Kälte-Test während der Stehendphase ist ebenfalls nicht signifikant ($p \leq 0,375$).

III.1.2.2 Blutdruck

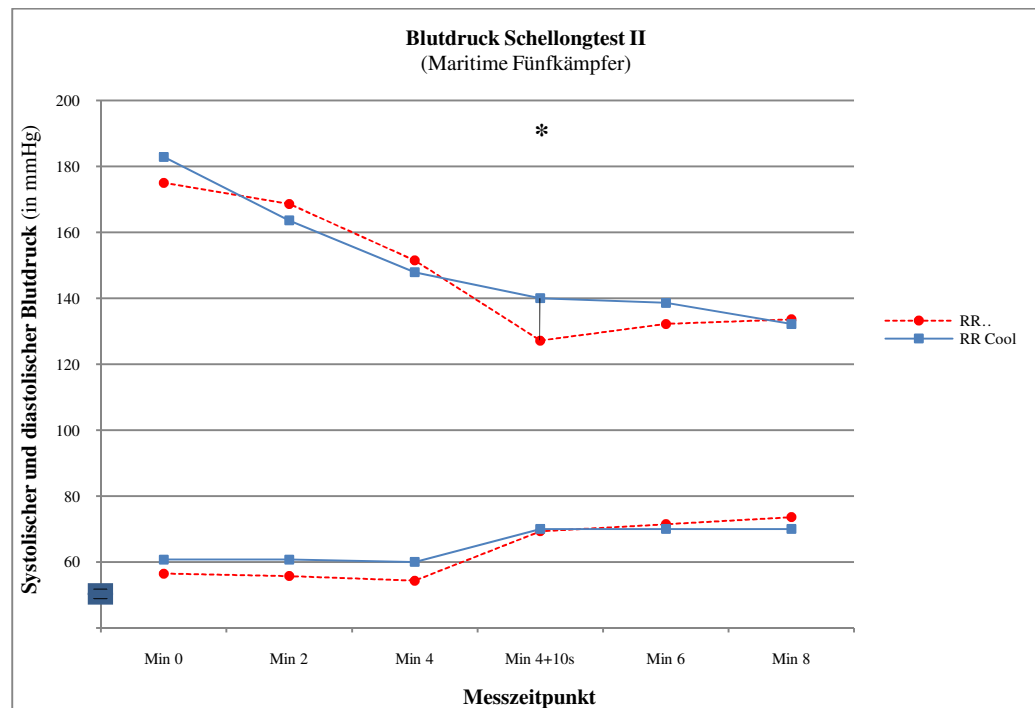


Abbildung 14 Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests II (Maritime Fünfkämpfer)

Die Werte des systolischen und diastolischen Blutdrucks liegen bei den **Maritimen Fünfkämpfern** in beiden Testbedingungen insgesamt dicht beisammen. Nach dem Aufstehen aus der Liegendposition flacht die Kurve des systolischen Druckes unter Kältebedingungen jedoch ab, während sie im Kontrolltest weiter fällt.

An diesem Messpunkt (Min 4+10s) liegt der systolische Blutdruck in der Kältebedingung um 12,86 mmHg höher als im Kontrolltest.

Der Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,032$ signifikant.

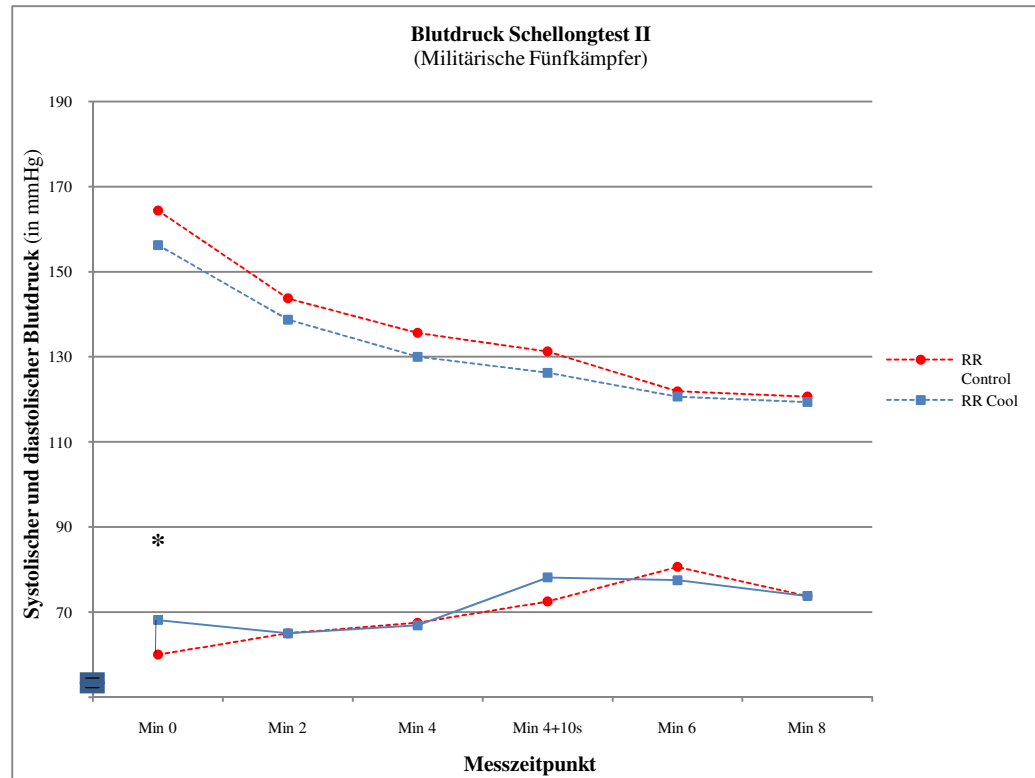


Abbildung 15 Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests II (Militärische Fünfkämpfer)

Bei den **militärischen Fünfkämpfern** liegt der systolische Blutdruck über beide Phasen hinweg in der Kontrollbedingung höher als im Kältetest. Im Bereich des diastolischen Blutdruckes zeigt sich kein eindeutiges Bild. Der hier zu Beginn gemessene Unterschied zwischen den Bedingungen besteht bereits am zweiten Messpunkt nicht mehr.

Der Unterschied im diastolischen Blutdruck zu Beginn des Schellongtests (Min 0) beträgt 8,00 mmHg und ist auf dem Niveau von $p \leq 0,035$ signifikant.

Der Unterschied von 4,25 mmHg im mittleren systolischen Blutdruck zwischen beiden Bedingungen ist nicht signifikant.

III.1.3 Nachbelastungsphase (Schellongtest III)

III.1.3.1 Herzfrequenz

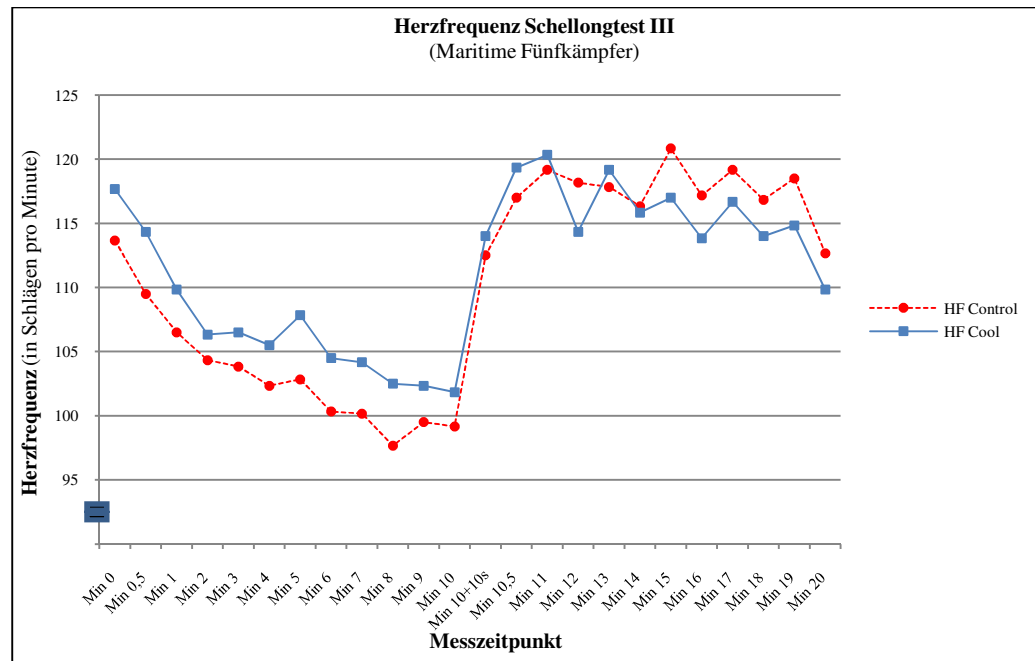


Abbildung 16 Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests III (Maritime Fünfkämpfer)

Die Herzfrequenz der **Maritimen Fünfkämpfer** liegt in der ersten Hälfte des Schellongtests unter Kontrollbedingungen durchweg unter der im Kältetest. In der Stehendphase nähern sich die Mittelwerte an, zeigen aber einen insgesamt sehr sprunghaften wenig eindeutigen Verlauf.

Die mittlere Herzfrequenz beträgt in der Liegendphase unter Kontrollbedingungen $103,32 (\pm 8,08)$ Schläge pro Minute und $106,94 (\pm 6,03)$ Schläge im Kältetest. Der Unterschied ist nicht signifikant ($p \leq 0,228$). In der Stehendphase zeigen sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede.

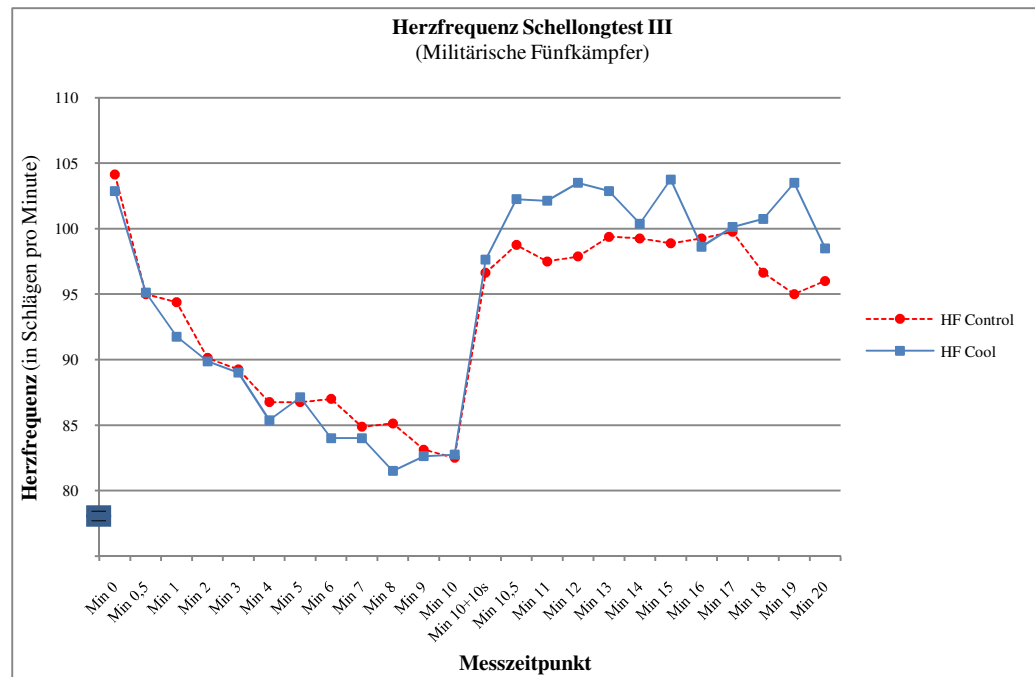


Abbildung 17 Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests III (Militärische Fünfkämpfer)

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** liegen die Herzfrequenzwerte in der Liegendphase sehr eng beieinander. In der Stehendphase zeigen sich etwas größere Unterschiede. Die Herzfrequenz liegt hier im Kältetest fast durchweg höher als in der Kontrollbedingung.

Der Unterschied in der Stehendphase beläuft sich auf mittlere 3,00 Schläge pro Minute, ist jedoch mit $p \leq 0,357$ nicht signifikant.

III.1.3.2 Blutdruck

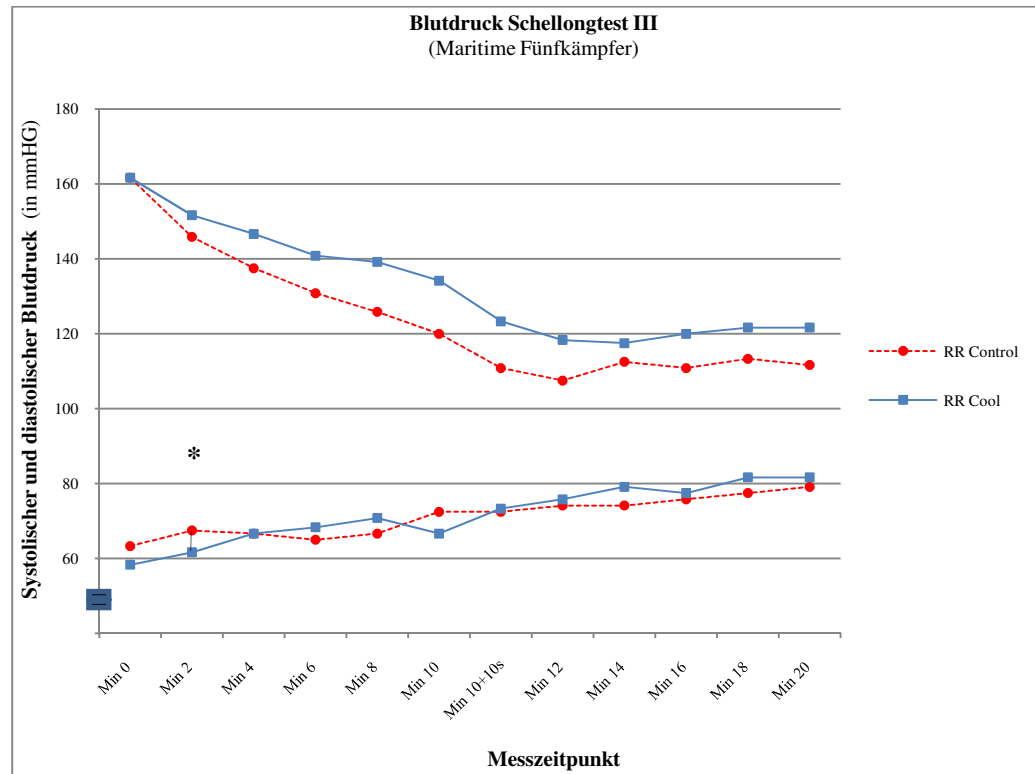


Abbildung 18 Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests III (Maritime Fünfkämpfer)

Der systolische Blutdruck der **Maritimen Fünfkämpfer** liegt im Kältetest nahezu durchweg über den Werten des Kontrolltests. Im Bereich des diastolischen Blutdrucks zeigt sich kein eindeutiger Trend.

Der systolische Blutdruck liegt im Kältetest um mittlere 9,03 mmHg über den Werten des Kontrolltests. Dieser Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,532$ nicht signifikant.

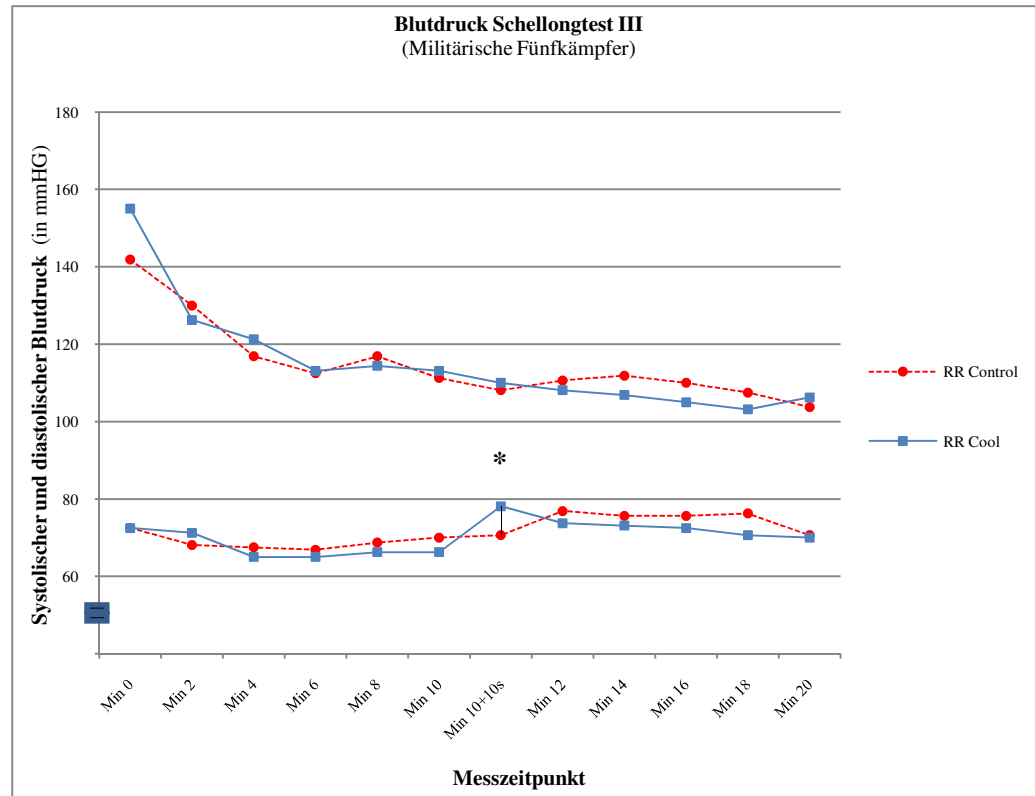


Abbildung 19 Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests III (Militärische Fünfkämpfer)

Die Mittelwerte des systolischen Blutdrucks der **Militärischen Fünfkämpfer** unterscheiden sich zwischen den Testbedingungen nur geringfügig. Beim diastolischen Blutdruck zeigt sich ein ähnliches Bild, allerdings steigt der Druck nach dem Aufstehen aus der Liegendphase unter Kältebedingungen erkennbar an, während er im Kontrolltest verzögert und flacher ansteigt. Der diastolische Blutdruck liegt an dieser Stelle unter Kältebedingungen bei 78,13 ($\pm 7,99$) mmHg und damit 7,50 mmHg über dem des Kontrolltests. Der Unterschied ist mit $p \leq 0,020$ signifikant.

III.2 Laboruntersuchung – Laktatsenkentest

Der Laktatsenkentest wird für die Ergebnisdarstellung in zwei Phasen unterteilt. Die erste Phase beginnt mit dem Start des Rampentests und endet drei beziehungsweise fünf Minuten nach Abbruch des Rampentests (post RT 3' bzw. post RT 5'). Die zweite Phase beginnt mit dem Start des Stufentests und endet drei beziehungsweise fünf Minuten nach Abbruch des Stufentests (post ST 3' bzw. post ST 5').

III.2.1 Hauttemperatur

III.2.1.1 Sternum

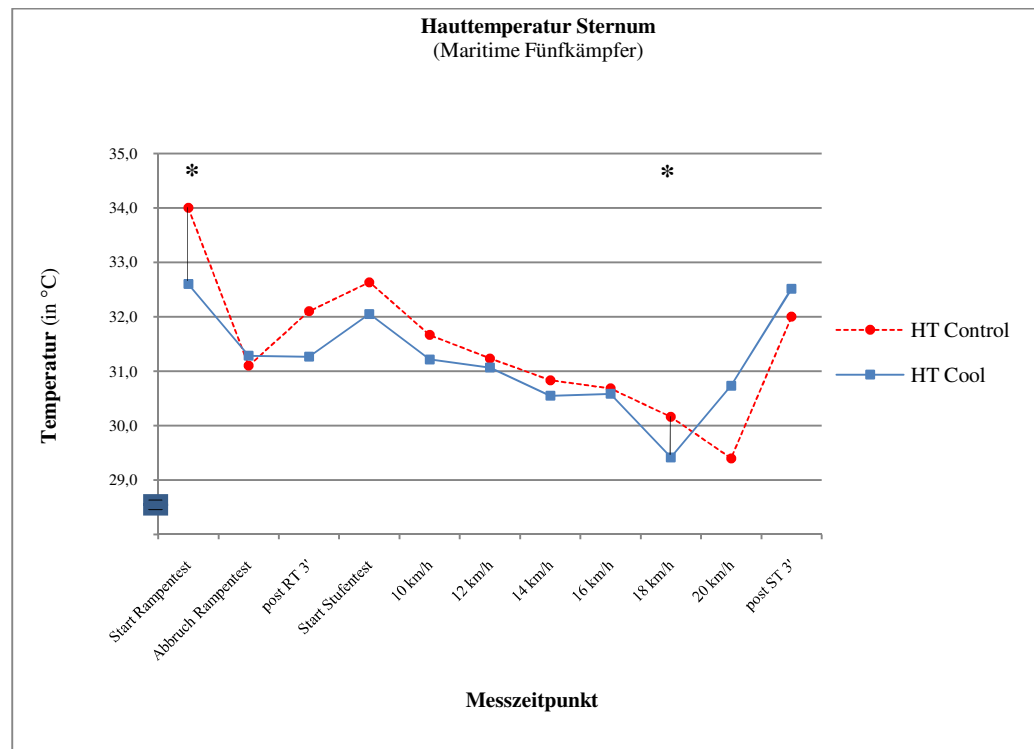


Abbildung 20 Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem Sternum) während des Laktatsenkentests (Maritime F5Kkämpfer)

Die Hauttemperatur auf der Mitte des Sternums liegt bei den **Maritimen F5Kkämpfern** nahezu über den gesamten Verlauf des Laktatsenkentests unter Kältebedingungen niedriger als im Kontrolltest.

Die Unterschiede zwischen den Bedingungen liegen im Mittel bei 1,15°C in der ersten Phase und bei 0,35°C in der zweiten. Die Unterschiede sind auf dem Niveau von $p \leq 0,062$ und $p \leq 0,342$ nicht signifikant.

Zu Beginn des Rampentests liegt die Hauttemperatur auf dem Sternum unter Kältebedingungen um $1,40^{\circ}\text{C}$ unter der im Kontrolltest. Dieser Unterschied ist signifikant ($p \leq 0,004$). Der Unterschied von $1,28^{\circ}\text{C}$ am Messpunkt 18 km/h ist auf dem Niveau von $p \leq 0,031$ signifikant.

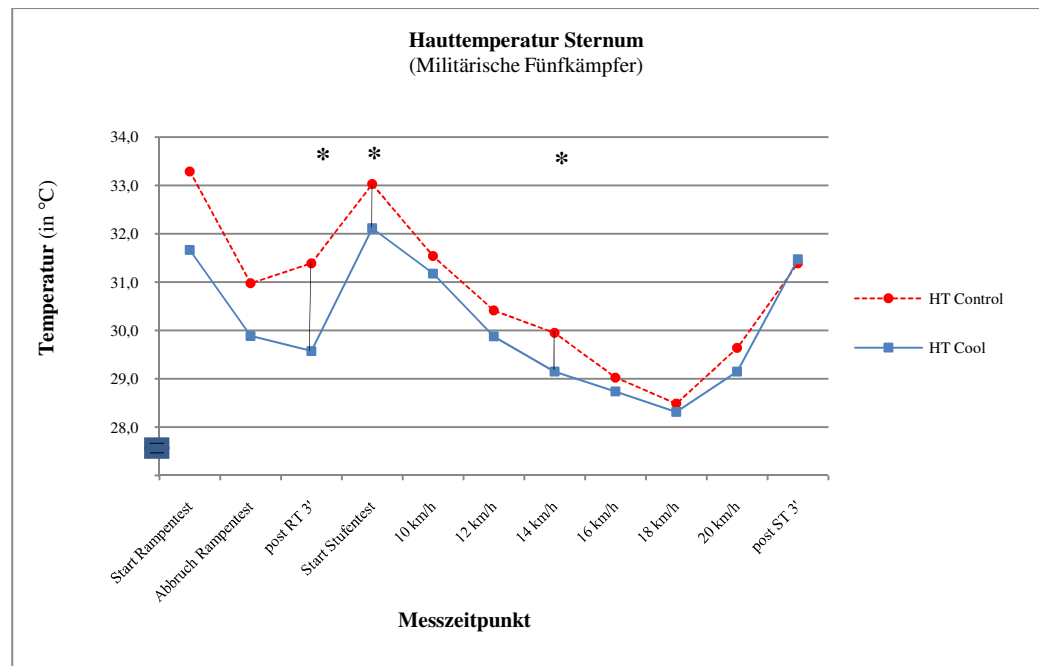


Abbildung 21 Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem Sternum) während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer)

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** liegt die Hauttemperatur auf dem Sternum unter Kältebedingungen fast durchgehend niedriger als im Kontrolltest. Im Verlauf des Stufentests nähern sich die Werte zunehmend an. Während der ersten Phase wurde unter Kühlbedingungen eine mittlere Hauttemperatur auf dem Sternum von $31,28 (\pm 0,89)^{\circ}\text{C}$ gemessen. Diese liegt um $1,17^{\circ}\text{C}$ niedriger als im Kontrolltest. Der Unterschied ist signifikant ($p \leq 0,008$).

Drei Minuten nach Abbruch des Rampentests ist der Unterschied zwischen den Bedingungen mit $1,80^{\circ}\text{C}$ am größten und auf dem Niveau von $p \leq 0,006$ signifikant.

III.2.1.2 Stirn

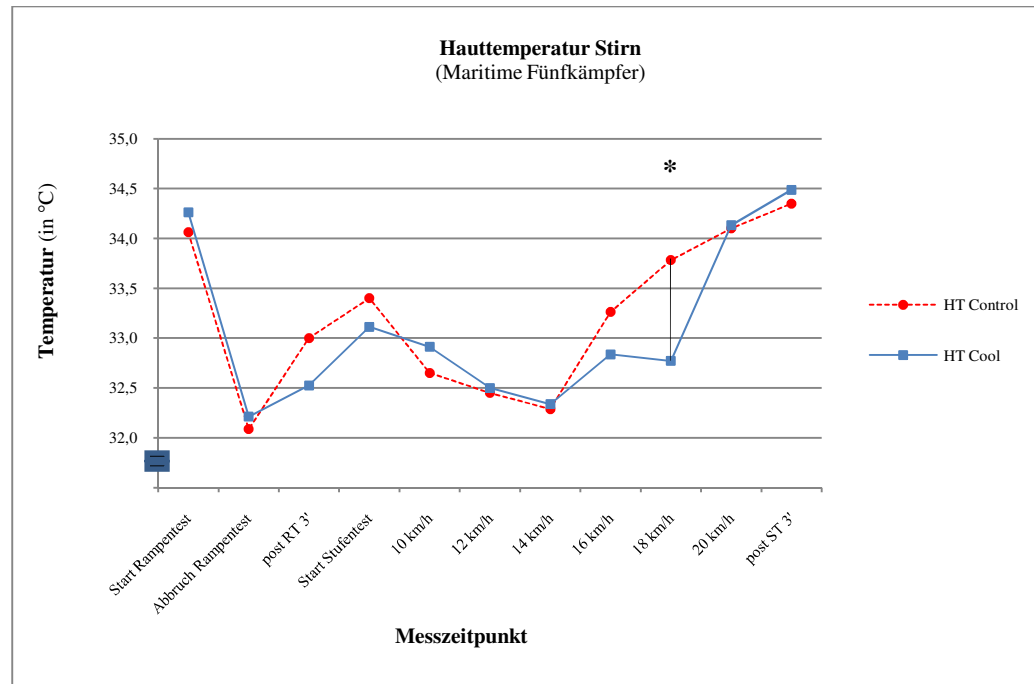


Abbildung 22 Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf der Stirn) während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer)

Bei den **Maritimen Fünfkämpfern** zeigt sich, bezogen auf die Hauttemperatur der Stirn, kein eindeutiger Trend. Zwischen dem Abbruch des Rampentests und dem Start des Stufentests liegen die Werte des Kontrolltests leicht über denen des Kältetests. Auch im Verlauf des Stufentests liegen die Kontrollwerte zwischenzeitlich über denen des Kältetests.

Während die Temperaturunterschiede im Zeitraum zwischen Rampen- und Stufentest mit maximal $0,5^{\circ}\text{C}$ nicht signifikant sind, zeigt sich am Messpunkt 18 km/h mit $1,03^{\circ}\text{C}$ ein signifikanter Unterschied ($p \leq 0,023$).

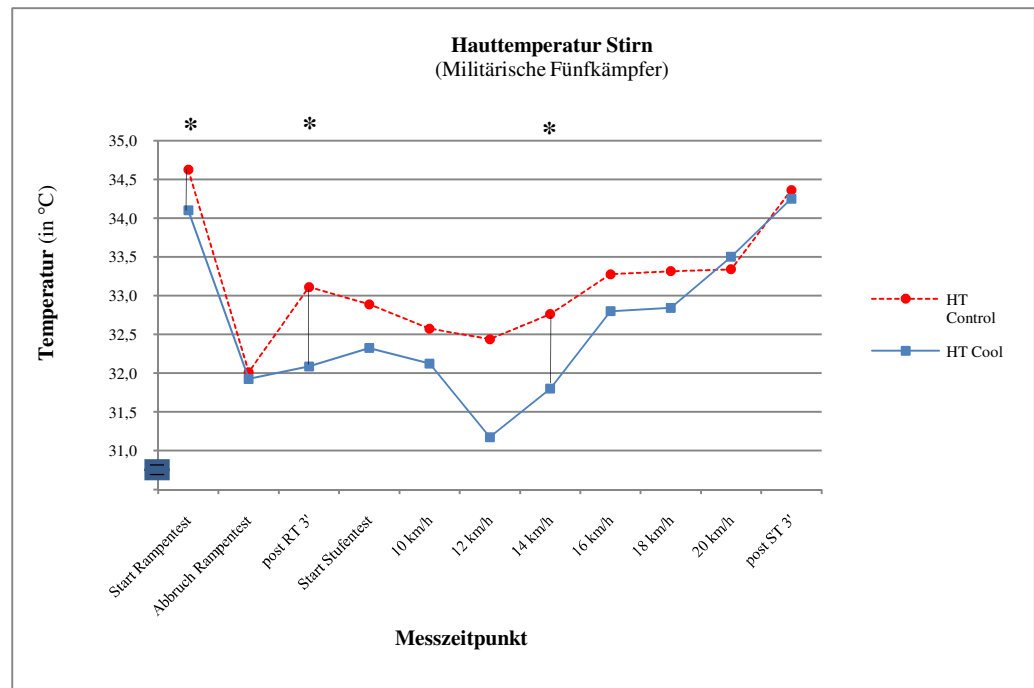


Abbildung 23 Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf der Stirn) während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer)

Die Hauttemperatur auf der Stirn liegt bei den **Militärischen Fünfkämpfern** im Kältetest nahezu durchgehend unter der im Kontrolltest. In der Nachbelastungsphase des Rampentests sowie auf den ersten Stufen des Stufentests sind die Unterschiede am größten.

Drei Minuten nach Abbruch des Rampentests beträgt die Temperaturdifferenz zwischen den Bedingungen 1,00°C. Der Unterschied ist signifikant ($p \leq 0,004$). Auf der Stufe 14 km/h liegt der Unterschied ebenfalls bei 1,00°C und ist auf dem Niveau von $p \leq 0,042$ signifikant.

III.2.1.3 M. gastrocnemius

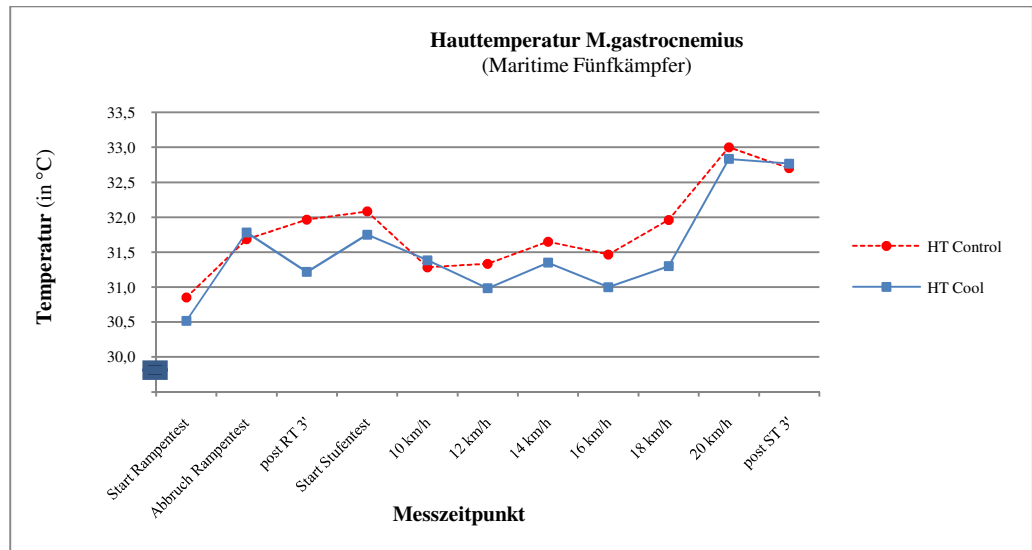


Abbildung 24 Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem M.gastrocnemius) während des Laktatsenkentests (Maritime F5kämpfer)

Die mittlere Hauttemperatur auf dem M. gastrocnemius zeigt bei den **Maritimen F5kämpfern** keinen eindeutigen Trend, auch wenn die Temperatur unter Kältebedingungen insgesamt etwas niedriger liegt als im Kontrolltest.

Die Temperaturunterschiede von $0,33^{\circ}\text{C}$ in Phase I und von $0,25^{\circ}\text{C}$ in Phase II sind nicht signifikant ($p \leq 0,394$; $p \leq 0,668$).

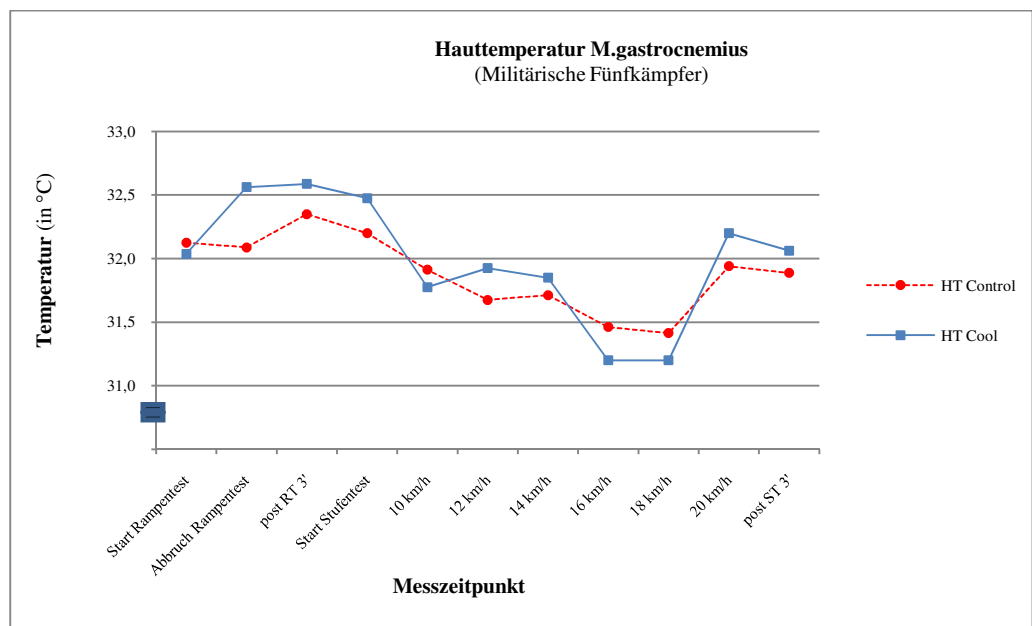


Abbildung 25 Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem M.gastrocnemius) während des Laktatsenkentests (Militärische F5kämpfer)

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** zeigt sich, wie bei den Maritimen Fünfkämpfern, kein eindeutiger Trend. Die größten Unterschiede zeigen sich nach Abbruch des Rampentests.

Die Differenz liegt hier bei $0,50^{\circ}\text{C}$ und ist auf dem Niveau von $p \leq 0,324$ nicht signifikant.

III.2.2 Körperkerntemperatur

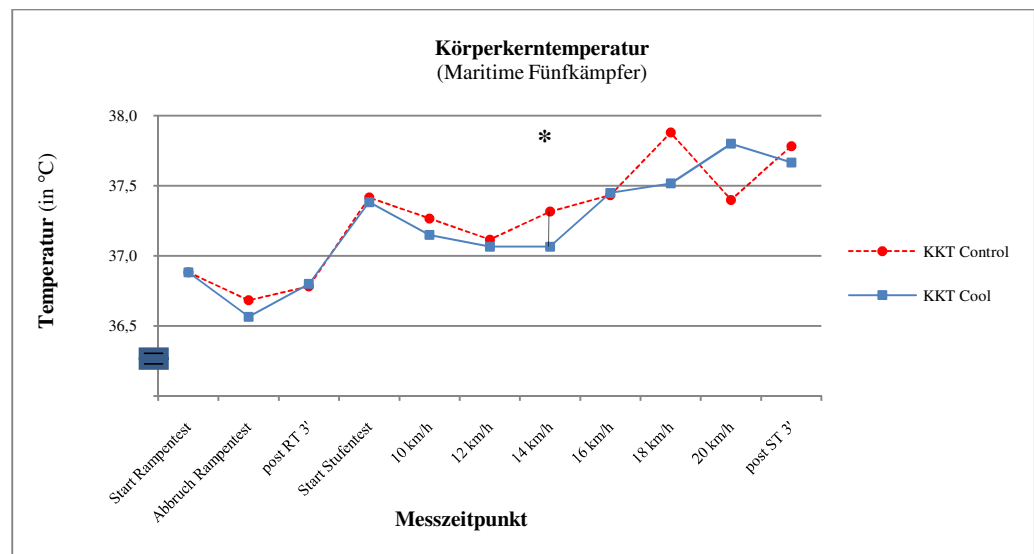


Abbildung 26 Körperkerntemperaturverlauf (tympanal gemessen) während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer)

Die Körperkerntemperaturwerte der **Maritimen Fünfkämpfer** liegen in beiden Testbedingungen dicht beisammen. In den Belastungsphasen des Testprotokolls finden sich zumeist geringere Körperkerntemperaturen in der Kältebedingung als im Kontrolltest.

Die mittleren Werte über den Verlauf der einzelnen Phasen unterscheiden sich nur minimal zwischen den Bedingungen und sind auf dem Niveau von $p \leq 0,883$ (Phase I) und $p \leq 0,110$ (Phase II) nicht signifikant.

Auf der Stufe 14 km/h liegt die Körperkerntemperatur im Kälte-Test um $0,20^{\circ}\text{C}$ niedriger als im Kontrolltest. Dieser Unterschied ist signifikant ($p \leq 0,022$).

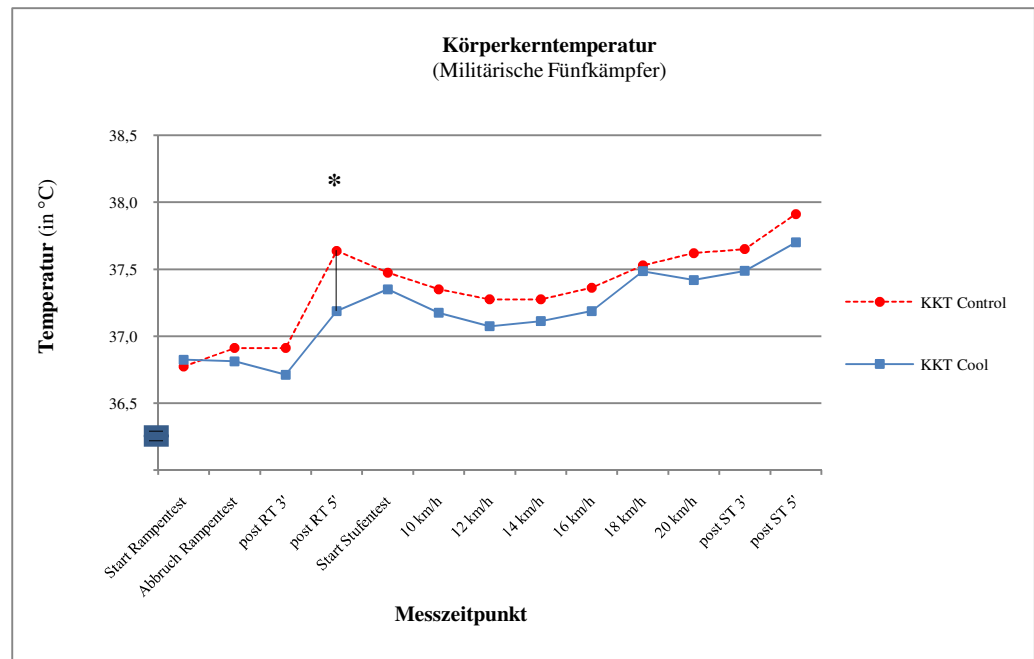


Abbildung 27 Körperkerntemperaturverlauf (tympanal gemessen) während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer)

Die Körperkerntemperaturwerte der **Militärischen Fünfkämpfer** sind nahezu über den gesamten Verlauf des Testprotokolls hinweg in der Kältebedingung leicht niedriger als im Kontrolltest. In der unmittelbaren Nachbelastungsphase des Rampentests sind die Unterschiede am größten.

Die mittlere Körperkerntemperatur in Phase I liegt bei $36,81 (\pm 0,23)^{\circ}\text{C}$ im Kontrolltest und $36,74 (\pm 0,34)^{\circ}\text{C}$ im Kühlttest. Der Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,433$ nicht signifikant. In Phase II betragen die Mittelwerte im Kontrolltest $37,45 (\pm 0,30)^{\circ}\text{C}$ und im Kühlttest $37,25 (\pm 0,38)^{\circ}\text{C}$. Die Werte beider Bedingungen unterscheiden sich in dieser Phase ebenfalls nicht signifikant ($p \leq 0,086$).

Die Temperaturdifferenz zwischen den Testbedingungen ist fünf Minuten nach Abbruch des Rampentests mit $0,40^{\circ}\text{C}$ am größten. Der Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,020$ signifikant.

III.2.3 Gewichtsverlust

Im Verlauf des Belastungsprotokolls verlieren die **Maritimen Fünfkämpfer** im Mittel $1,06 (\pm 0,25)$ kg unter Kontrollbedingungen und $0,90 (\pm 0,34)$ kg im Kühlttest. Der Unterschied zwischen beiden Bedingungen ist auf dem Niveau von $p \leq 0,164$ nicht signifikant.

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** liegt der Gewichtsverlust im Kontrolltest bei 0,90 ($\pm 0,31$) und im Kältetest bei 0,86 ($\pm 0,28$) kg. Der Gewichtsverlust zwischen beiden Bedingungen unterscheidet sich auch hier nicht signifikant ($p \leq 0,757$).

III.2.4 Herzfrequenz

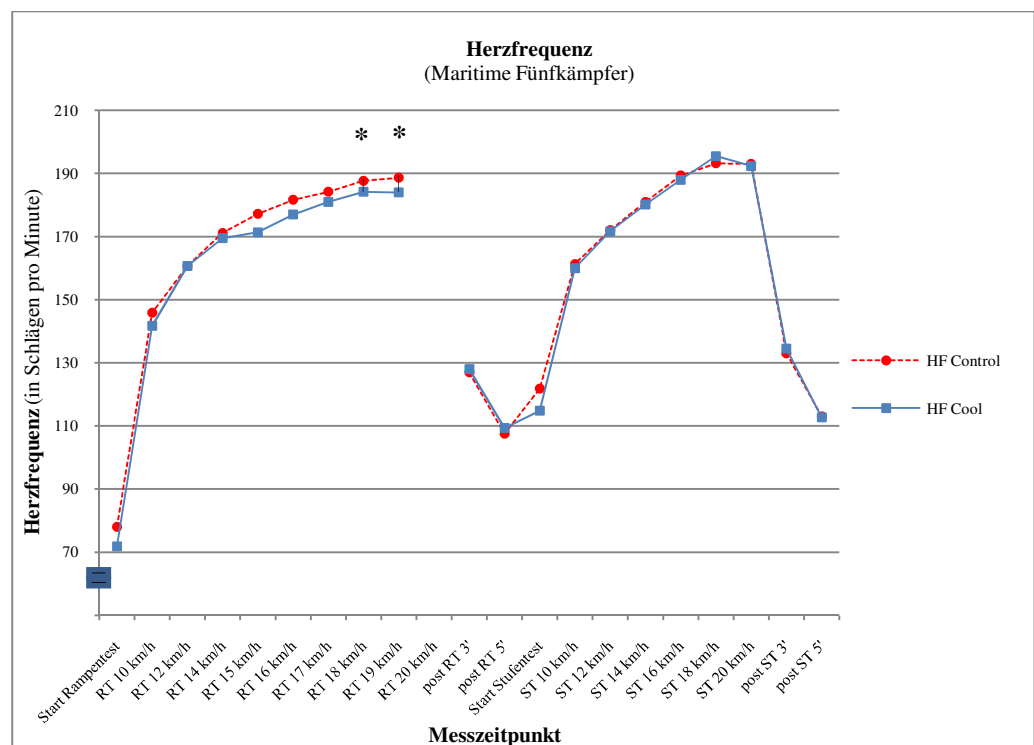


Abbildung 28 Herzfrequenzverlauf während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer)

Die Herzfrequenz der **Maritimen Fünfkämpfern** liegt im Rampentest unter Kältebedingungen fast durchweg niedriger als im Kontrolltest. Während des Stufentests zeigen sich keine erkennbaren Unterschiede zwischen den Bedingungen.

In Phase I liegt die mittlere Herzfrequenz im Kontrolltest bei 146,00 ($\pm 4,86$) Schlägen pro Minute und im Kältetest bei 143,17 ($\pm 4,88$) Schlägen. Der Unterschied ist nicht signifikant ($p \leq 0,194$). In Phase II liegt die mittlere Herzfrequenz unter Kontrollbedingungen bei 158,17 ($\pm 6,46$) Schlägen pro Minute und unter Kühlbedingungen bei 159,33 ($\pm 5,02$) Schlägen. Der Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,482$ nicht signifikant.

In der letzten Phase vor Abbruch des Rampentests liegen die Werte unter Kühlbedingungen um 4 (*RT 18 km/h*) beziehungsweise 5 Schläge (*RT 19 km/h*) unter denen des Kontrolltests. Die Unterschiede sind signifikant ($p \leq 0,007$; $p \leq 0,005$).

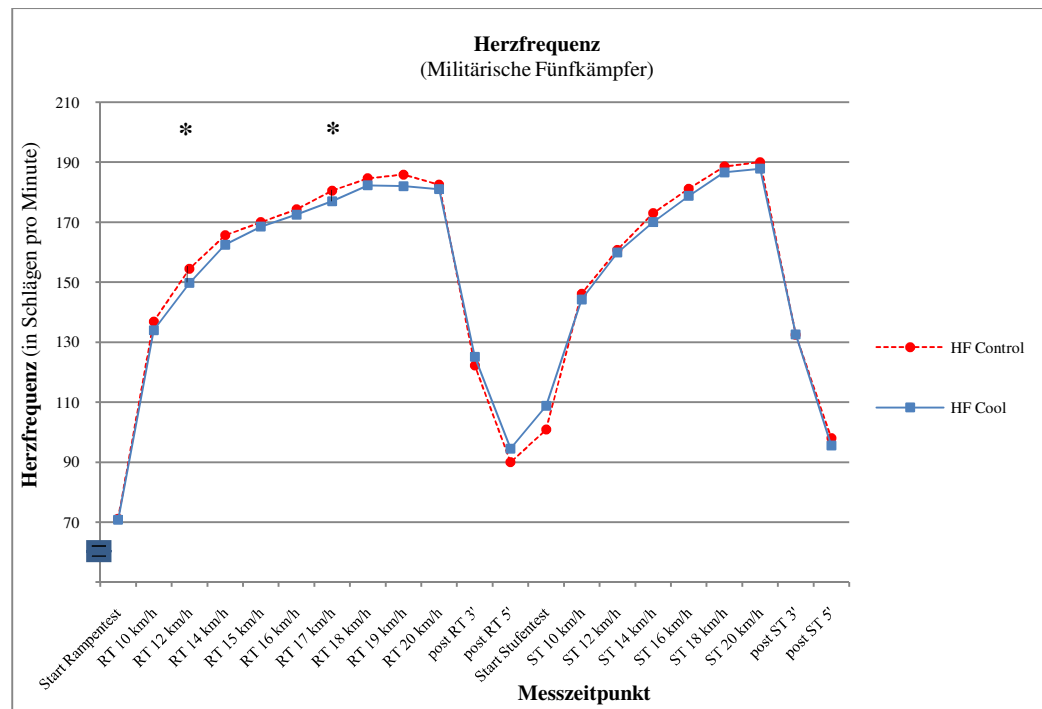


Abbildung 29 Herzfrequenzverlauf während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer)

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** liegen die Herzfrequenzwerte während des Rampentests unter Kühlbedingungen leicht unter denen des Kontrolltests. Im Stufentest ist kein eindeutiger Trend erkennbar.

Die mittlere Herzfrequenz in Phase I liegt unter Kühlbedingungen um 0,88 Schläge unter der im Kontrolltest. Dieser Unterschied ist nicht signifikant ($p \leq 0,653$).

Zu Beginn (*RT 12 km/h*) und gegen Ende des Rampentests (*RT 17 km/h*) liegen die Werte des Kühltests 5 beziehungsweise 4 Schläge unter denen der Kontrollbedingung. Diese Unterschiede sind signifikant ($p \leq 0,001$; $p \leq 0,026$).

III.2.5 Blutlaktat

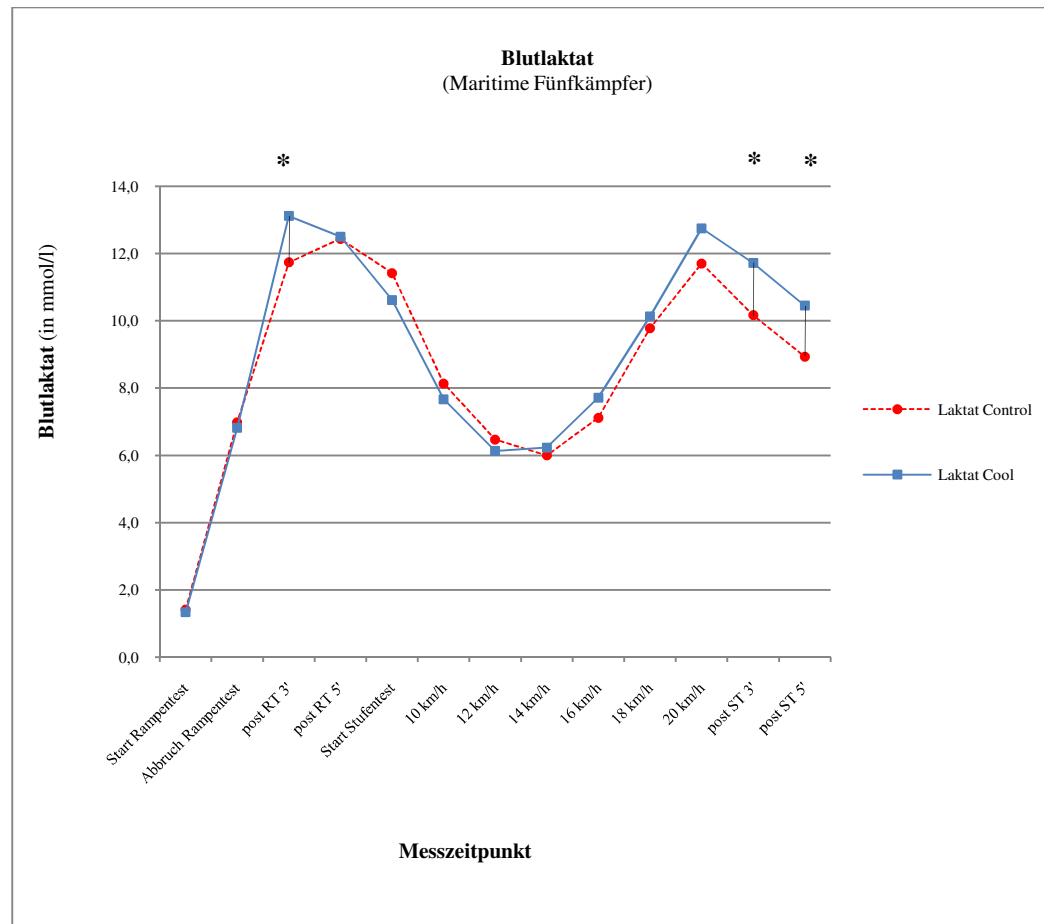


Abbildung 30 Blutlaktatkurve während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer)

Die Laktatkurve der **Maritimen Fünfkämpfer** zeigt jeweils in der Nachbelastungsphase von Rampen- und Stufentest unter Kühlbedingungen höhere Werte als im Kontrolltest.

Nach Abbruch des Rampentests liegt die Blutlaktatkonzentration im Kältetest um 1,4 mmol/l über der im Kontrolltest. Der Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,004$ signifikant.

In der Nachbelastungsphase des Stufentests liegen die Blutlaktatkonzentrationen im Kältetest um 1,5 mmol/l (Messpunkt: *post ST 3'*) beziehungsweise 1,6 mmol/l (Messpunkt: *post ST 5'*) höher als in der Kontrollbedingung. Die Unterschiede sind signifikant ($p \leq 0,043$; $p \leq 0,050$).

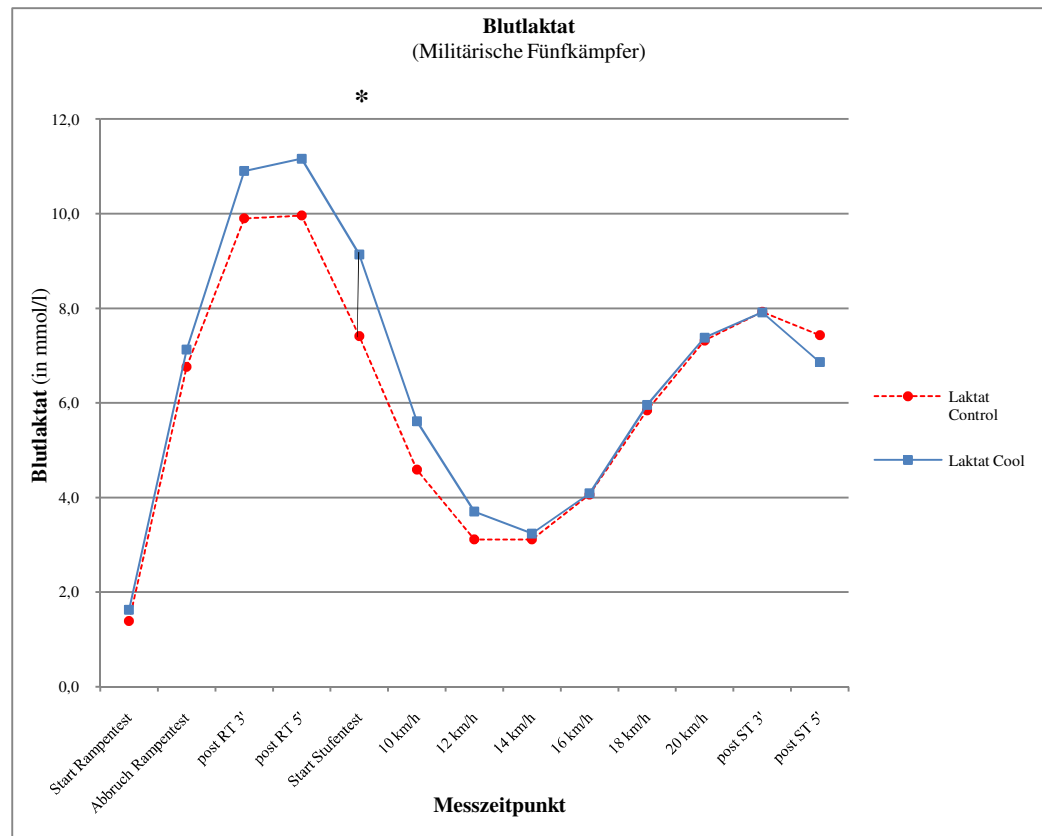


Abbildung 31 Blutlaktatkurve während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer)

Die Blutlaktatkurve der **Militärischen Fünfkämpfer** zeigt im Kältetest erhöhte Werte vom Ende des Rampentests bis etwa zur Hälfte des Stufentests. Ab hier zeigen sich keine erkennbaren Unterschiede zwischen den Bedingungen.

In der Nachbelastungsphase des Rampentests und zu Beginn des Stufentests sind die Differenzen zwischen Kälte- und Kontrolltest mit 1,00 mmol/l (*post RT 3'*), 1,20 mmol/l (*post RT 5'*) und 1,72 mmol/l (*Start Stufentest*) am größten. Der Unterschied zu Beginn des Stufentests ist mit $p \leq 0,026$ signifikant.

III.2.6 Maximale Sauerstoffaufnahme

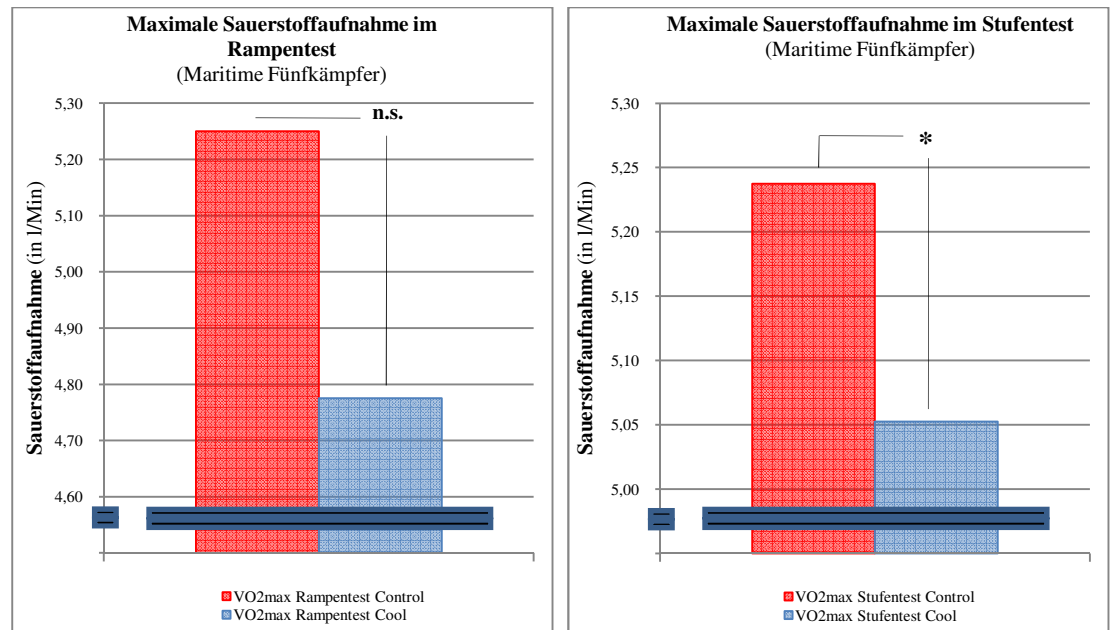


Abbildung 32 Maximale Sauerstoffaufnahme im Rampentest und im Stufentest (Maritime Fünfkämpfer)

Die maximale Sauerstoffaufnahme der **Maritimen Fünfkämpfer** ist unter Kältebedingungen, sowohl im Rampen- als auch im Stufentest, geringer als im Kontrolltest.

Die Differenz von 0,47 Litern pro Minute im Rampentest ist nicht signifikant ($p \leq 0,174$). Im Stufentest liegt die maximale Sauerstoffaufnahme unter Kältebedingungen bei 5,05 ($\pm 0,32$) Litern pro Minute, im Kontrolltest bei 5,24 ($\pm 0,38$) Litern pro Minute. Dieser Unterschied ist mit $p \leq 0,021$ signifikant.

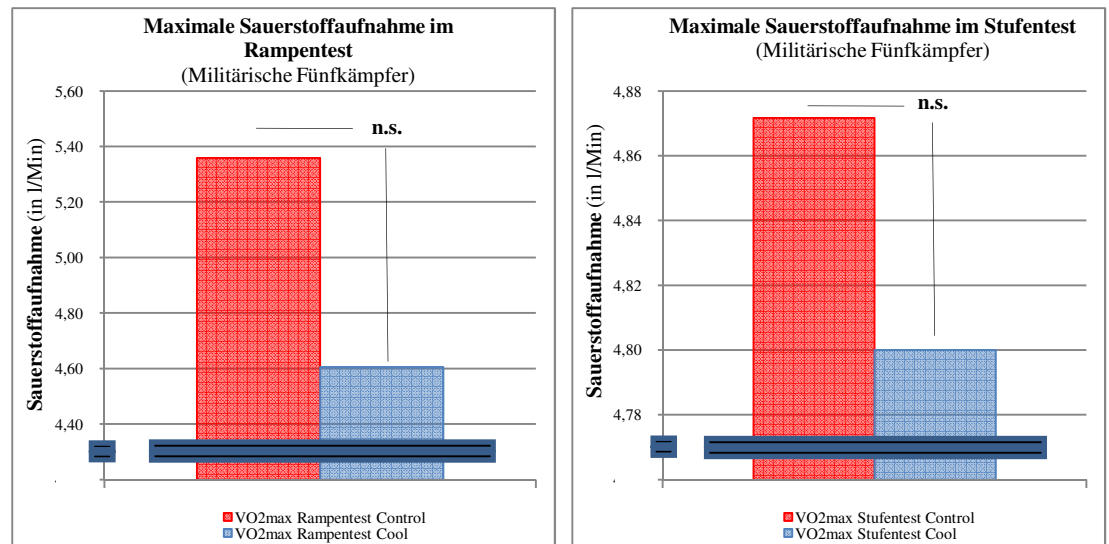


Abbildung 33 Maximale Sauerstoffaufnahme im Rampentest und im Stufentest (Militärische Fünfkämpfer)

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** liegt die maximale Sauerstoffaufnahme im Rampentest unter Kältebedingungen niedriger als im Kontrolltest. Im Stufentest zeigen sich nur geringfügige Unterschiede.

Im Rampentest findet sich eine in der Kältebedingung um 0,75 Liter pro Minute geringere maximale Sauerstoffaufnahme. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p \leq 0,076$ liegt hier keine Signifikanz vor.

III.2.7 Maximaler Respiratorischer Quotient

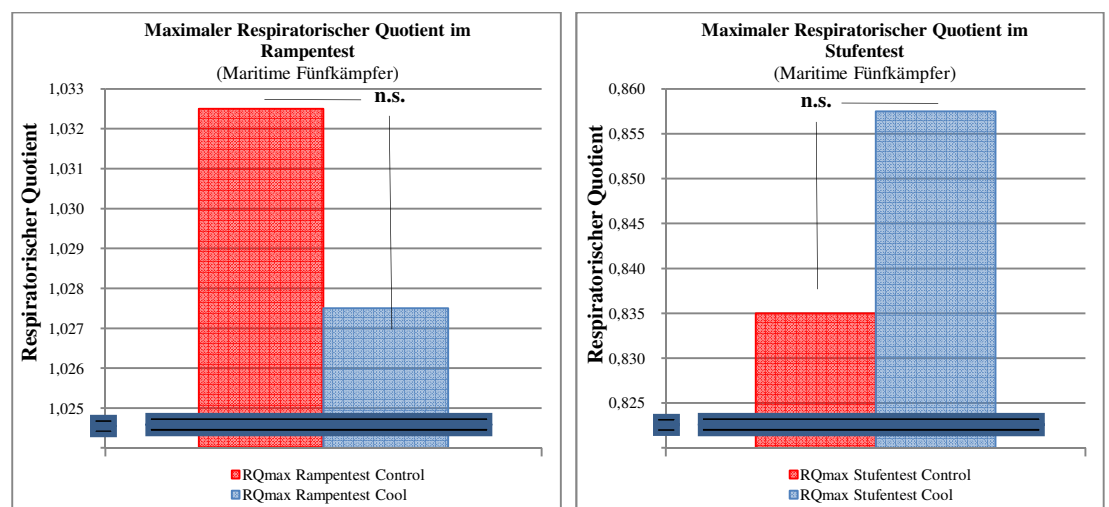


Abbildung 34 Maximaler Respiratorischer Quotient im Rampentest und im Stufentest (Maritime Fünfkämpfer)

Bei den **Maritimen Fünfkämpfern** sind die Unterschiede zwischen den Testbedingungen, bezogen auf den maximalen respiratorischen Quotienten, im Rampen- sowie im Stufentest sehr gering.

Die Werte beider Testbedingungen unterscheiden sich weder im Rampentest noch im Stufentest signifikant ($p \leq 0,852$; $p \leq 0,547$).

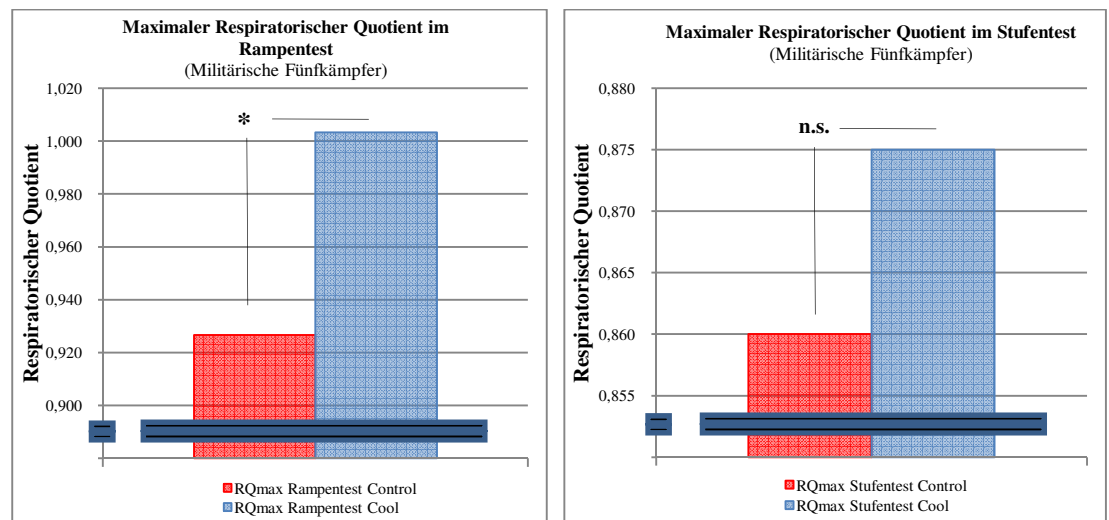


Abbildung 35 Maximaler Respiratorischer Quotient im Rampentest und im Stufentest (Militärische Fünfkämpfer)

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** liegt der maximale respiratorische Quotient im Rampentest unter Kältebedingungen höher als unter Kontrollbedingungen. Die Differenz im Stufentest ist sehr gering.

Im Rampentest liegt der maximale respiratorische Quotient unter Kältebedingungen bei $1,003 (\pm 0,05)$. Der Wert der Kontrollbedingung beträgt $0,927 (\pm 0,09)$. Dieser Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,024$ signifikant.

III.2.8 Belastungsempfinden nach Borg

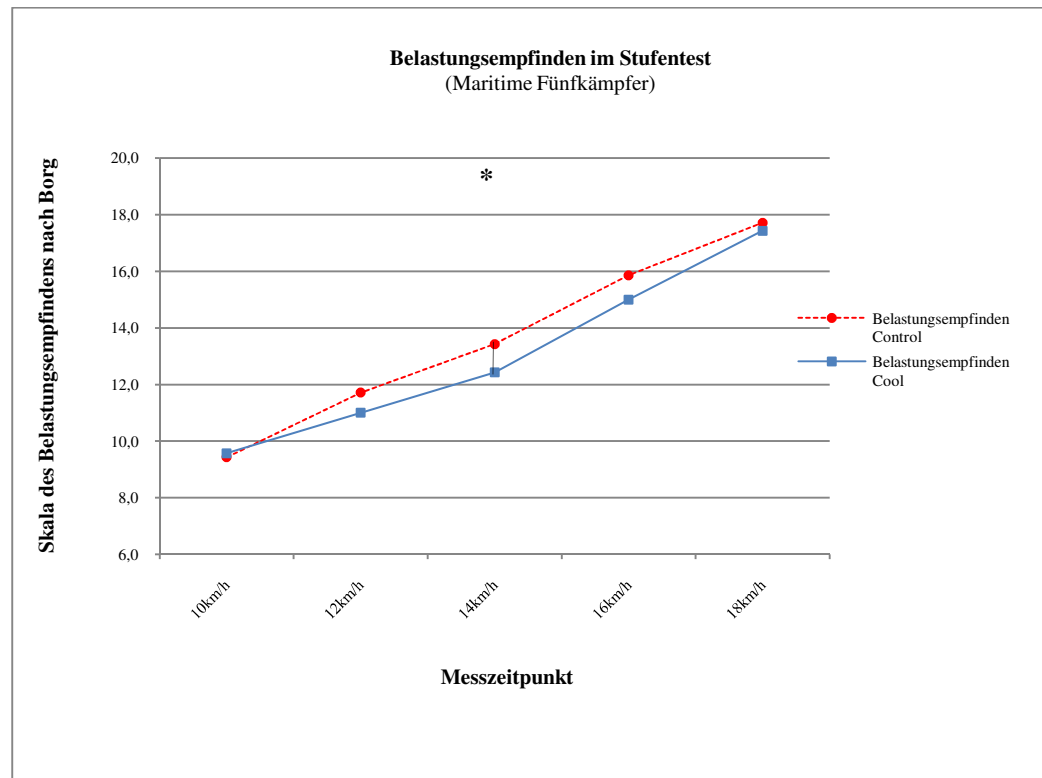


Abbildung 36 Belastungsempfinden nach Borg im Stufentest (Maritime Fünfkämpfer)

Das Belastungsempfinden der **Maritimen Fünfkämpfer** während des Stufentests ist nahezu durchweg unter Kältebedingungen geringer als im Kontrolltest. Am größten sind die Unterschiede auf den drei mittleren Stufen des Stufentests.

Im Mittel liegt das Belastungsempfinden nach Kälteapplikation um 0,54 Punkte unter dem des Kontrolltests. Dieser Unterschied ist nicht signifikant ($p \leq 0,106$).

Nach der Hälfte des Tests bei 14 km/h ist die Differenz mit 1,00 Punkten am größten. Der Unterschied ist mit $p \leq 0,018$ signifikant.

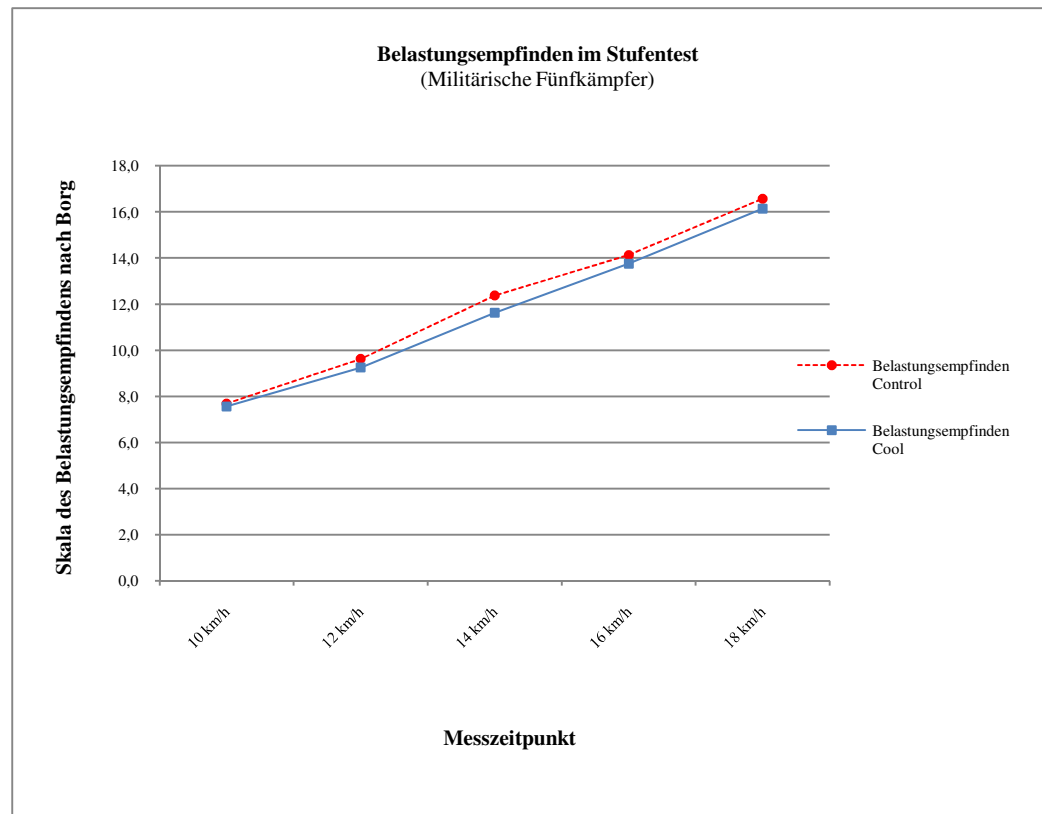


Abbildung 37 Belastungsempfinden nach Borg im Stufentest (Militärische Fünfkämpfer)

Bei den **Militärischen Fünfkämpfern** ist das Belastungsempfinden nach Kälteapplikation durchweg geringer als im Kontrolltest. Die Unterschiede zwischen den Bedingungen sind jedoch kleiner als bei den Maritimen Fünfkämpfern.

Im Mittel liegen die Werte in der Kältebedingung um 0,40 Punkte unter denen des Kontrolltests. Dieser Unterschied ist nicht signifikant ($p \leq 0,237$).

Nach der Hälfte des Tests zeigt sich mit 0,80 Punkten die größte Differenz zwischen den Testbedingungen. Der Unterschied ist mit $p \leq 0,097$ nicht signifikant.

III.3 Feldtest - Maritime Fünfkämpfer

III.3.1 Hauttemperatur

III.3.1.1 Sternum

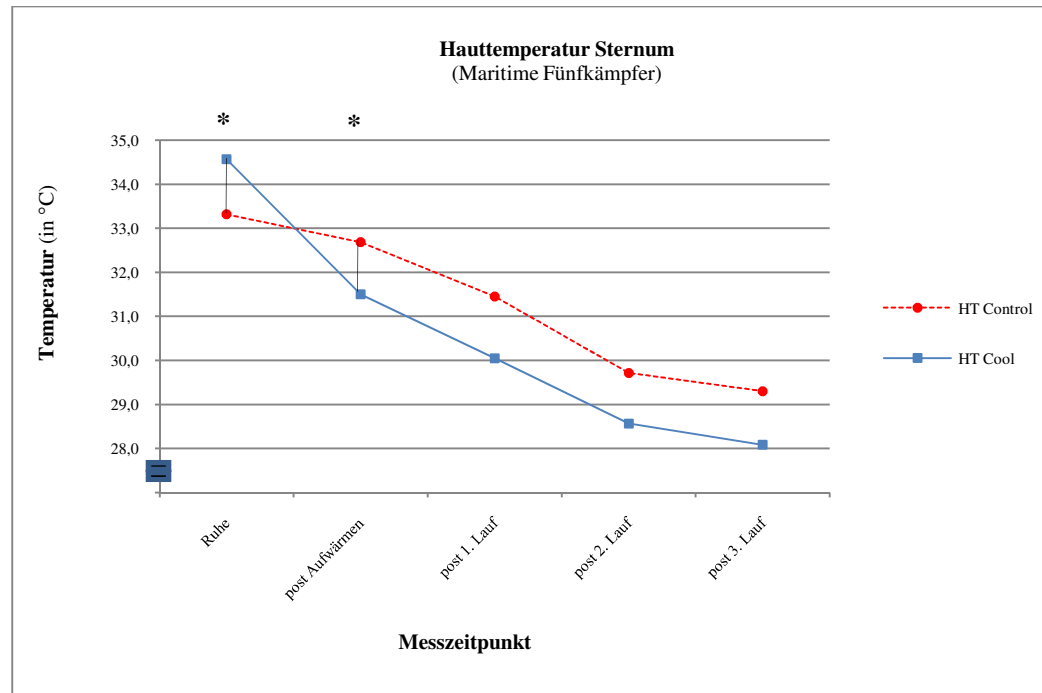


Abbildung 38 Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem Sternum) während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)

Nach erfolgter Kälteapplikation während des Aufwärmens (Kältetest) liegt die Hauttemperatur auf dem Sternum durchweg niedriger als in der Kontrollbedingung.

Im Mittel zeigt sich ab hier über den weiteren Verlauf des Tests eine um 1,21°C geringere Hauttemperatur. Der Unterschied ist nicht signifikant ($p \leq 0,113$).

Allein die Werte unmittelbar nach Ende der Kälteapplikation (*post Aufwärmen*) weisen mit 1,18°C einen signifikanten Unterschied auf ($p \leq 0,036$).

III.3.1.2 Stirn

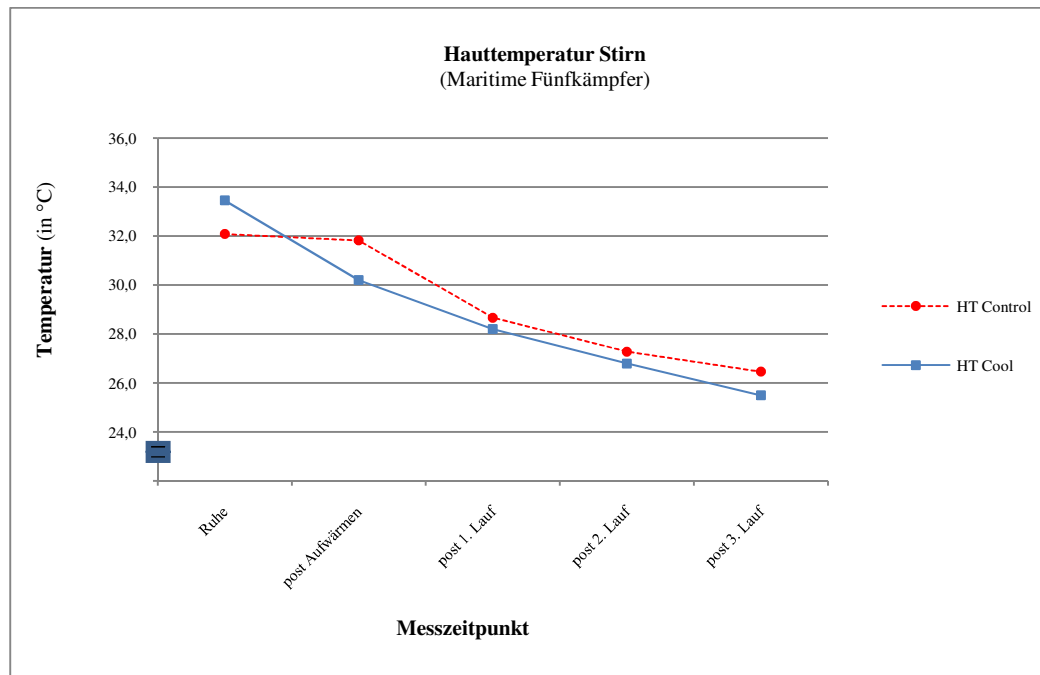


Abbildung 39 Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf der Stirn) während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)

Nach der Kälteapplikation während des Aufwärmens (Kältetest) liegt die Hauttemperatur auf der Stirn über den gesamten Testverlauf unter der in der Kontrollbedingung. Unmittelbar nach Abschluss der Kühlmaßnahme liegen die Werte beider Bedingungen am weitesten auseinander und nähern sich in der Folge weiter an.

Die mittlere Temperatur in dieser Phase liegt unter Kontrollbedingungen bei $28,57 (\pm 0,89)^{\circ}\text{C}$ und nach Kälteapplikation bei $27,68 (\pm 2,72)^{\circ}\text{C}$. Der Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,530$ nicht signifikant.

Die Werte unmittelbar nach Ende der Kälteapplikation (*post Aufwärmen*) liegen mit $1,60^{\circ}\text{C}$ am weitesten auseinander, unterscheiden sich jedoch nicht signifikant ($p \leq 0,089$).

III.3.1.3 M.gastrocnemius

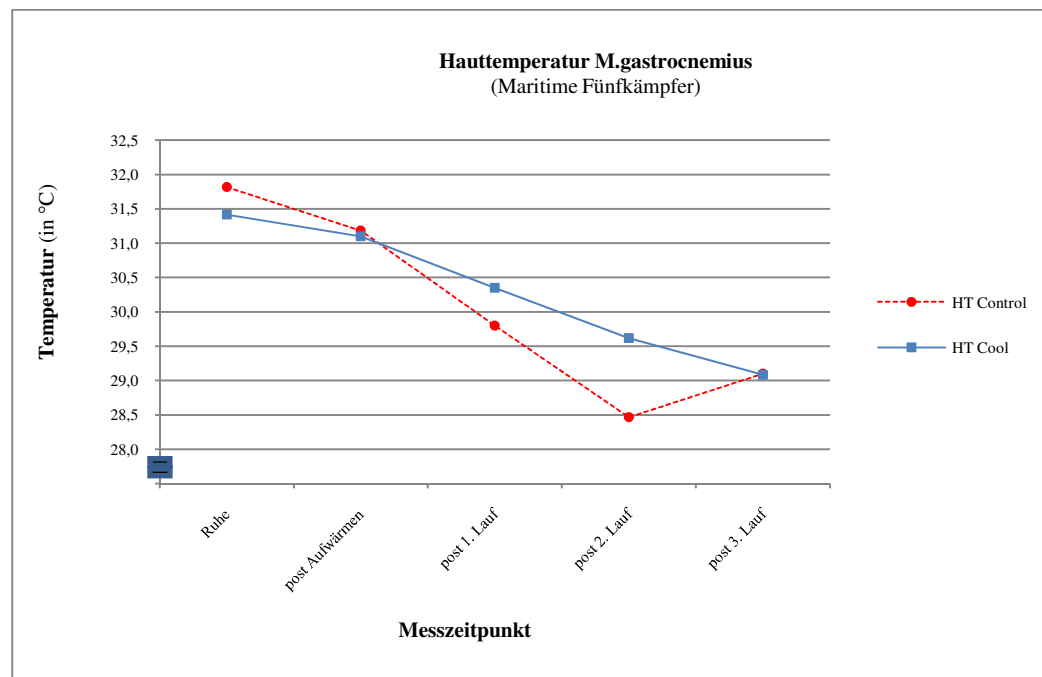


Abbildung 40 Hauttemperaturverlauf auf dem M.gastrocnemius (gemessen mittig auf dem M. gastrocnemius) während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)

Nach Abschluss der Kühlmaßnahme während der ersten beiden Läufe fällt die Hauttemperatur auf der Wade im Kontrolltest stärker ab als unter Kältebedingungen.

Während der drei Läufe liegen die Werte im Mittel bei $29,65 (\pm 3,01)^\circ\text{C}$ unter Kontrollbedingungen und $30,03 (\pm 1,97)^\circ\text{C}$ unter Kältebedingungen. Der Unterschied ist mit $p \leq 0,736$ nicht signifikant. An den einzelnen Messpunkten liegen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede vor.

III.3.2 Körperkerntemperatur

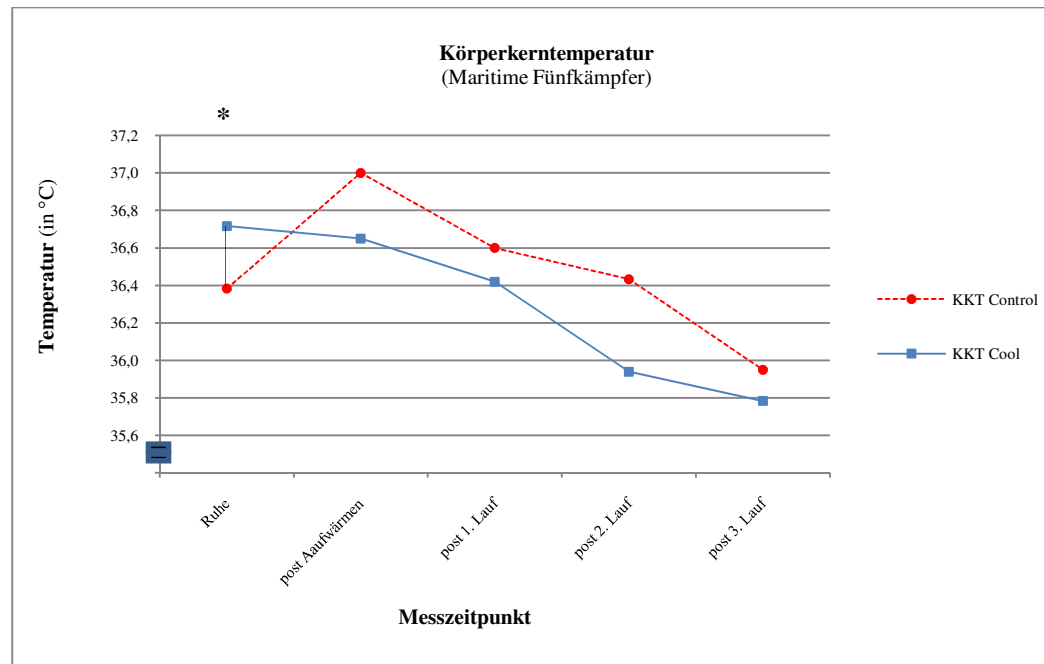


Abbildung 41 Körperkerntemperaturverlauf während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)

In der Belastungsvorbereitungsphase (*Ruhe – post Aufwärmen*) steigt die Körperkerntemperatur in der Kontrollbedingung an, während sie mit Kälteapplikation geringfügig absinkt. Im weiteren Testverlauf liegt die Körperkerntemperatur im Kältetest durchweg unter der im Kontrolltest.

Im Mittel liegt die Temperatur nach Abschluss der Kühlmaßnahme bei 36,50 ($\pm 0,33$)°C im Kontrolltest und 36,25 ($\pm 0,69$)°C im Kältetest. Dieser Unterschied ist nicht signifikant ($p \leq 0,571$).

III.3.3 Gewichtsverlust

Der Gewichtsverlust über den gesamten Testverlauf ist nach Kälteapplikation geringer als in der Kontrollbedingung.

Im Kontrolltest beträgt er 0,52 ($\pm 0,26$) kg. Dieser Wert liegt um 0,32 kg höher als im Kältetest (0,20 [$\pm 0,15$] kg). Der Unterschied ist signifikant ($p \leq 0,020$).

III.3.4 Herzfrequenz

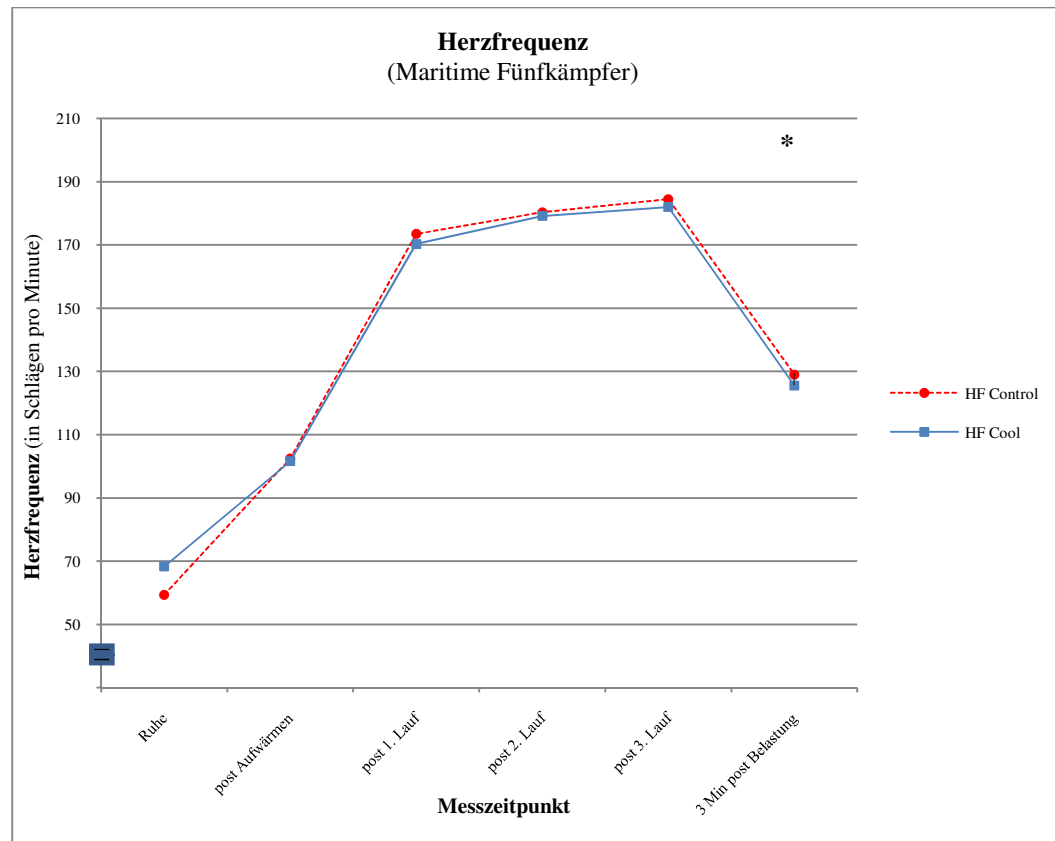


Abbildung 42 Herzfrequenzverlauf während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)

Vor Beginn des Testprotokolls ist die mittlere Herzfrequenz im Kühlttest höher als im Kontrolltest. Nach erfolgter Kälteapplikation liegt die Herzfrequenz dann durchgehend unter der der Kontrollbedingung.

Im Mittel beträgt die Herzfrequenz in dieser Phase 158,33 (\pm 7,84) Schläge pro Minute im Kältetest und 160,17 (\pm 10,48) Schläge in der Kontrollbedingung. Der Unterschied ist mit $p \leq 0,309$ nicht signifikant.

In der Nachbelastungsphase (3 Min post Belastung) ist die Herzfrequenz im Kältetest um 3,50 Schläge signifikant ($p \leq 0,005$) geringer als im Kontrolltest.

III.3.5 Blutlaktat

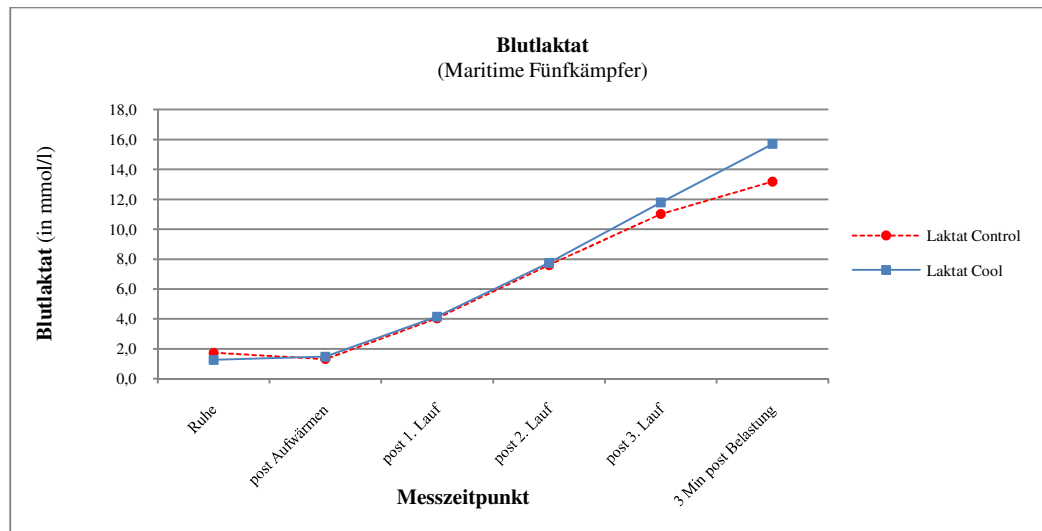


Abbildung 43 Laktatkurve während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)

Die Blutlaktatwerte beider Testbedingungen liegen nach dem Aufwärmen und nach Abschluss des ersten und zweiten Laufes sehr dicht beisammen. Nach dem dritten Lauf sowie in der Nachbelastungsphase liegen die Werte des Kälte-tests höher als die der Kontrollbedingung.

Die Differenz ist in der Nachbelastungsphase (3 Min post Belastung) mit 2,5 mmol/l am größten. Der Unterschied ist nicht signifikant ($p \leq 0,103$).

III.3.6 Belastungsempfinden nach Borg

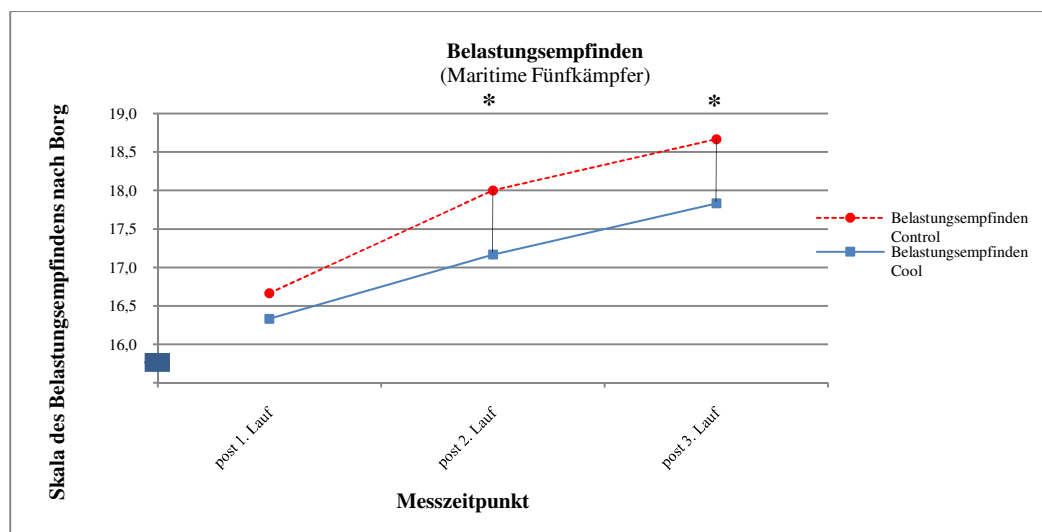


Abbildung 44 Belastungsempfinden nach Borg während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)

Das Belastungsempfinden ist an allen Messpunkten unter Kühlbedingungen geringer als im Kontrolltest.

Im Mittel beträgt das Belastungsempfinden nach Kälteapplikation 17,10 (\pm 0,68) Skalenpunkte, im Kontrolltest 17,78 (\pm 0,60). Der Unterschied ist mit ($p \leq 0,000$) höchst signifikant.

Am Ende des zweiten und dritten Laufes sind die Unterschiede von 0,8 beziehungsweise 0,9 Skalenpunkten ebenfalls signifikant ($p \leq 0,004$; $p \leq 0,004$).

III.4 Feldtest - Militärische Fünfkämpfer

III.4.1 Herzfrequenz

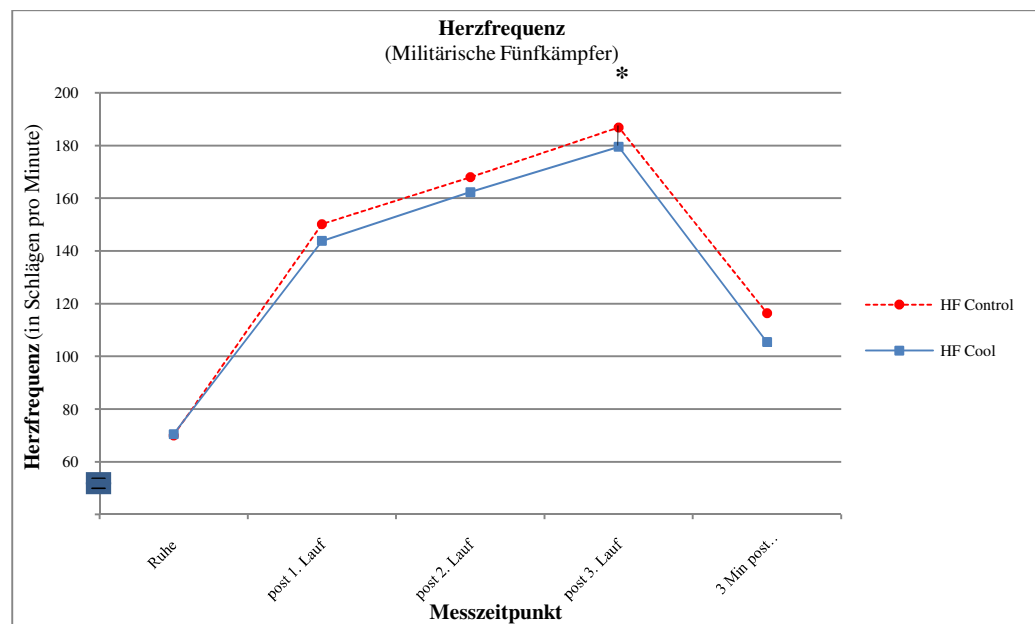


Abbildung 45 Herzfrequenzverlauf während des Feldtests (Militärische Fünfkämpfer)

Am Ende der durchgeführten 4km-Läufe liegt die Herzfrequenz im Kühltest durchweg unter der der Kontrollbedingung. In der Nachbelastungsphase ist der Unterschied zwischen den Bedingungen am größten.

Die Herzfrequenz ist am Ende der drei Läufe nach Kälteapplikation im Mittel um 6,33 Schläge pro Minute geringer als im Kontrolltest. In Minute drei der Nachbelastungsphase ist die Differenz mit 11 Schlägen am größten. Dieser Unterschied ist mit $p \leq 0,051$ nicht mehr signifikant.

Die Werte am Ende des dritten Laufes von $186,83 (\pm 6,27)$ im Kontrolltest und $179,50 (\pm 10,46)$ im Kältetest unterscheiden sich signifikant ($p \leq 0,030$).

III.4.2 Blutlaktat

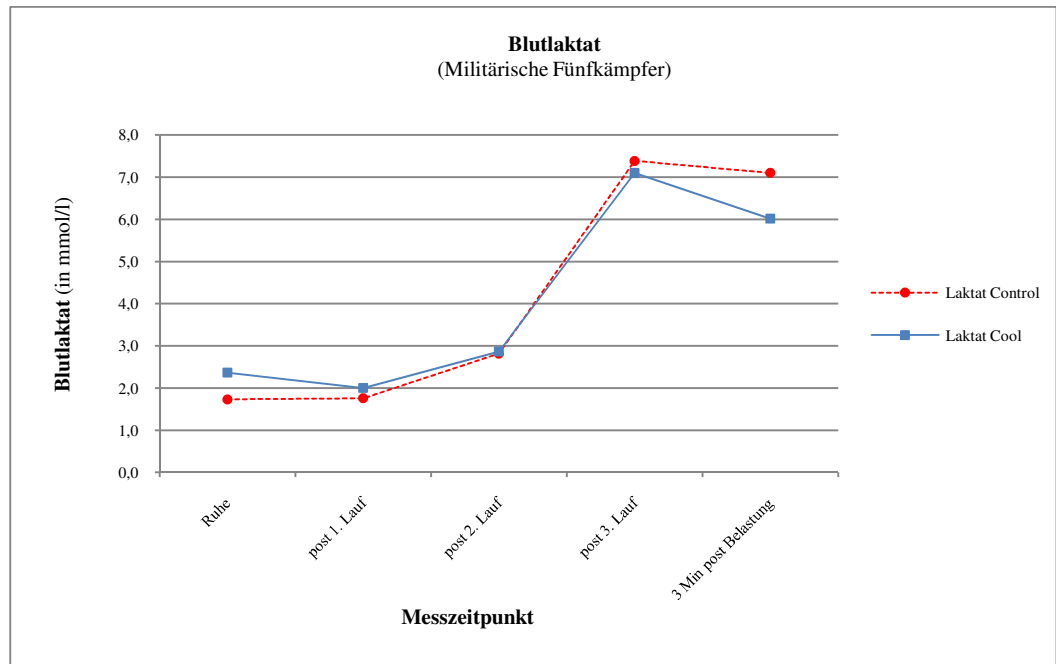


Abbildung 46 Blutlaktatkurve während des Feldtests (Militärische Fünfkämpfer)

Nach einem in der Kältebedingung höheren Blutlaktatwert in Ruhe nähern sich die Werte beider Testbedingungen im ersten und zweiten Lauf an. Nach Abschluss des dritten Laufes sowie in der Nachbelastungsphase liegen die Blutlaktatwerte des Kältetests niedriger als die des Kontrolltests.

In der Nachbelastungsphase beträgt der Blutlaktatwert $7,10 (\pm 1,50)$ mmol/l im Kontrolltest und $6,02 (\pm 2,10)$ mmol/l im Kältetest. Die Werte unterscheiden sich nicht signifikant ($p \leq 0,119$).

III.4.3 Körperkerntemperatur

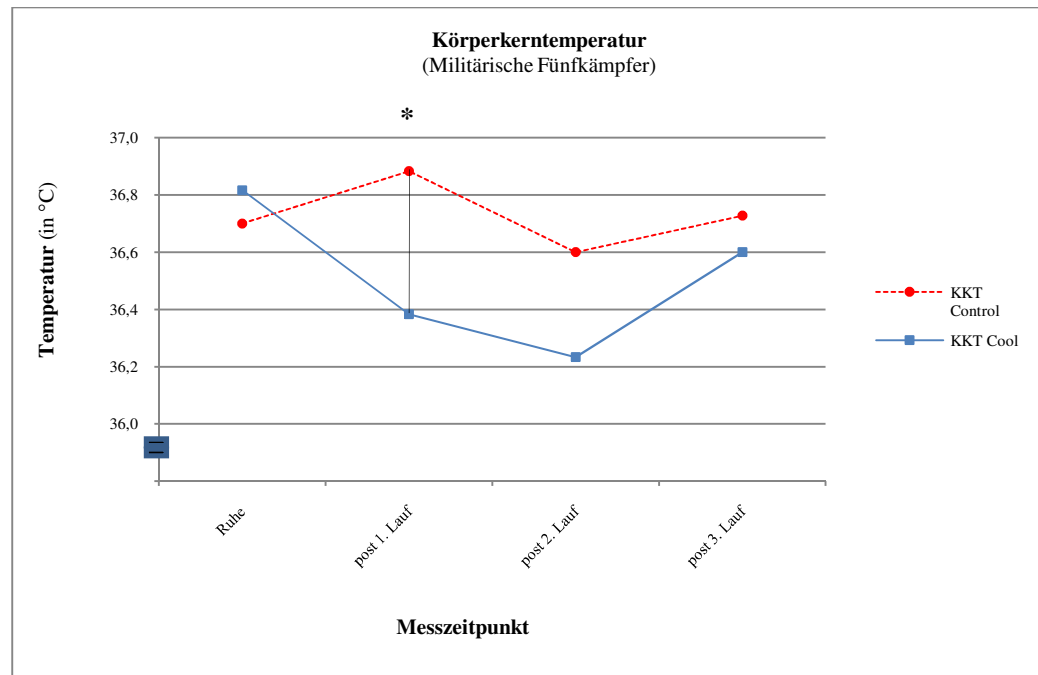


Abbildung 47 Körperkerntemperaturverlauf während des Feldtests (Militärische Fünfkämpfer)

Die Körperkerntemperatur liegt in Ruhe, vor dem Anlegen der Kühlweste, im Kältetest höher als in der Kontrollbedingung. Mit Einsetzen der Kühlung sinkt sie ab und ist am Ende jedes Laufes im Kältetest geringer als unter Kontrollbedingungen.

Die Körperkerntemperatur beträgt nach den drei Belastungen im Mittel $36,75 (\pm 0,41)^{\circ}\text{C}$ im Kontrolltest und $36,42 (\pm 0,26)^{\circ}\text{C}$ im Kältetest. Der Unterschied ist nicht signifikant ($p \leq 0,073$).

Nach Abschluss des ersten Laufes beträgt die Temperatur im Körperkern $36,38 (\pm 0,19)^{\circ}\text{C}$ im Kältetest und $36,88 (\pm 0,048)^{\circ}\text{C}$ im Kontrolltest. Der Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,041$ signifikant.

III.4.4 Belastungsempfinden

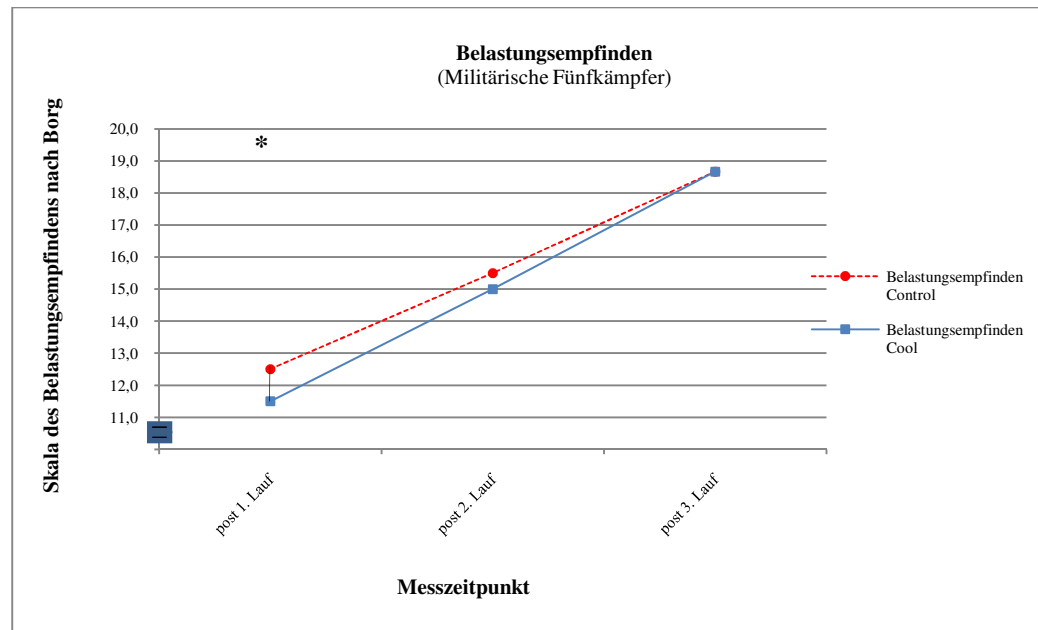


Abbildung 48 Belastungsempfinden nach Borg während des Feldtests (Militärische Fünfkämpfer)

Das Belastungsempfinden ist nach Kälteapplikation am Ende des ersten und zweiten Laufes geringer als in der Kontrollbedingung. Im letzten Lauf zeigt sich kein Unterschied zwischen den Bedingungen.

Das Belastungsempfinden liegt unter Kühlbedingungen im Mittel bei 15,10 ($\pm 0,50$) Punkten auf der Borg Skala und unter Kontrollbedingungen bei 15,57 ($\pm 0,36$) Punkten. Der Unterschied ist signifikant ($p \leq 0,006$).

Am Ende des ersten Laufes ist das Belastungsempfinden im Kühltest um 1,00 Punkte signifikant geringer als im Kontrolltest ($p \leq 0,041$).

IV. Diskussion

Die vorliegende Studie befasste sich mit den Auswirkungen externer Hautkühlung auf die sportliche Leistungsfähigkeit von Hochleistungssportlern. Hierbei bildete die Betrachtung der Kühleffekte auf den Laktatstoffwechsel den Kern des Untersuchungsinteresses.

Die Mitglieder der deutschen Nationalmannschaften im Maritimen Fünfkampf sowie im Militärischen Fünfkampf unterzogen sich jeweils einer Labor- und einer Felduntersuchung. Der im Labor durchgeführte Laktatsenkentest setzte sich aus einer hochintensiven Rampentestbelastung und einem ausdauerorientierten Stufentest zusammen. Begleitet wurde der Laktatsenkentest von drei Schellongtests zur Untersuchung der orthostatischen Effekte der Kälteapplikation. Diese wurden in der Vor-, Zwischen- und Nachbelastungsphase durchgeführt. Im Feld absolvierten die Athleten einen aus drei intervallierten Läufen bestehenden Leistungstest. Bei den Maritimen Fünfkämpfern: 3 x 400m; bei den Militärischen Fünfkämpfern: 3 x 4.000m. Die Laboruntersuchung sowie die Felduntersuchung wurden von den Teilnehmern in randomisierter Reihenfolge je einmal als Kältetest (mit Kälteapplikation) sowie einmal als Kontrolltest (ohne Kälteapplikation) durchgeführt.

Im Labortest zeigten sich nach Kälteapplikation im Vergleich zur Kontrollbedingung signifikant höhere Blutlaktatwerte. Bei den Maritimen Fünfkämpfern liegen die Unterschiede bei bis zu 1,60 mmol/l ($p \leq 0,050$). In der Gruppe der Militärischen Fünfkämpfer ergeben sich zwischen den Testbedingungen Differenzen von bis zu 1,72 mmol/l ($p \leq 0,026$). Die erhöhten Blutlaktatwerte traten vor allem in den unmittelbaren Nachbelastungsphasen des Rampentests und des Stufentests auf. Auf Grund der zeitlich verzögerten Nachweisbarkeit der muskulären Laktatazidose im Kapillarblut (Bourdon, 2000: S. 60), deuten die zu diesen Zeitpunkten gemessenen Werte auf eine erhöhte Laktatproduktion auf den letzten Stufen des Rampen- und Stufentests hin.

Der zentrale Befund höherer Blutlaktatwerte nach Kälteapplikation steht im Widerspruch zu der in verschiedenen Publikationen postulierten Verbesserung der muskulären Sauerstoffversorgung nach externer Hautkühlung. (Quod et al., 2005; Arngrimsson et al., 2004; Stocks et al., 2004; Marino, 2002; Cotter et al. 2001). Käme es durch Hautkühlung tatsächlich zu einer Verbesserung der muskulären Sauerstoffversorgung, wäre ein vermehrt aerober Energiestoffwechsel in den Zellen der Arbeitsmuskulatur zu erwarten, was mit geringeren Blutlaktatwerten einherginge (McArdle et al., 2009: S. 139 ff).

In der Folge ist somit zunächst zu prüfen, wie sich die durchgeführte Kälteapplikation auf die Sauerstoffversorgung der Arbeitsmuskulatur in den vorliegenden Tests ausgewirkt hat. Dies geschieht an Hand einer kritischen Überprüfung der von den obigen Autoren postulierten Wirkmechanismen.

Die muskuläre Sauerstoffversorgung wird nach Kälteapplikation, so die Annahme, durch folgende Mechanismen positiv beeinflusst:

- 1.) Eine vasokonstriktionsbedingte Blutvolumenverschiebung aus den gekühlten Hautbereichen sowie den viszeralen Organen in den zentralen Blutkreislauf (siehe Kapitel IV.1) und
- 2.) eine Erhöhung des Herzzeitvolumens (siehe Kapitel IV.2).

Neben den Auswirkungen auf die Sauerstoffversorgung der Muskulatur werden der Kälteapplikation in der Literatur vielfach auch weitere Effekte zugeschrieben, die zur Erklärung der festgestellten Veränderungen im Laktatstoffwechsel herangezogen werden können (Quod et al., 2006; Reilly et al., 2006; Marino, 2002):

- 3.) Kälteinduzierte Einflüsse auf die Substratbereitstellung (siehe Kapitel IV.3);
- 4.) kälteinduzierte Einflüsse auf die Muskelfunktion (siehe Kapitel IV.4) und
- 5.) Effekte der Hautkühlung auf das Belastungsempfinden und die zentrale Ermüdung (siehe Kapitel IV.5).

IV.1 Effekte vasokonstriktionsbedingter Blutvolumenverschiebung

IV.1.1 Unter Ruhebedingungen

Zu Beginn des Labortests, der ersten Belastung im Rampentest vorgeschaltet, absolvierten die Testteilnehmer einen zwanzigminütigen Schellongtest. Hierbei nahmen die Probanden zunächst eine liegende Position ein und wechselten nach der Hälfte der Zeit in die Stehendposition. Der Test wurde wie die übrigen Teile des Protokolls auch sowohl mit Kälteapplikation (Kältetest) als auch ohne (Kontrolltest) durchgeführt. Die Kühlung erfolgte hierbei einzig in der Liegendphase, also während der ersten zehn Minuten des Tests. Über den gesamten Schellongtest hinweg wurden Herzfrequenz und Blutdruck überwacht.

In beiden Probandengruppen (Maritime und Militärische Fünfkämpfer) zeigten sich unter Kältebedingungen in der Liegendphase signifikant höhere diastolische Blutdruckwerte als in der Kontrollbedingung (Maritime Fünfkämpfer: Im Mittel +4,43 mmHG [$p \leq 0,028$]; Militärische Fünfkämpfer: Maximal +8,0 mmHG [$p \leq 0,042$]). In Übereinstimmung mit den Ergebnissen weiterer Untersuchungen (Cooke et al., 2004; Harms et al., 2003; Kinsella und Tuckey, 2001; Kelsey et al., 2000; Park et al., 1999) wird eine Erhöhung des peripheren Gefäßwiderstandes als ursächlich für diesen Befund angenommen. Auslöser hierfür kann nach Ansicht der oben genannten Autoren eine lokale, kälteinduzierte Vasokonstriktion in den gekühlten Hautarealen sein. Darüber hinaus wird von verschiedenen Autoren ein direkter vasokonstriktiver Einfluss der Hautkühlung auf die Gefäße viszeraler Organe postuliert, der neben der Verengung der Hautgefäße ebenfalls zu einer Erhöhung des diastolischen Blutdrucks und in der Folge zu einer Verbesserung der orthostatischen Toleranz führen könnte (Wilson et al., 2007; Momen et al., 2006; Wilson et al., 2002). Die genannten Autoren beschreiben die orthostatische Toleranz als die Fähigkeit, den Blutdruck bei Veränderungen der Körperposition im Raum so zu regulieren, dass es nicht auf Grund der Schwerkraft zu einer zerebralen Minderperfusion kommt.

Beim Aufrichten aus der Liegendposition zeigt sich bei den Maritimen wie den Militärischen Fünfkämpfern in beiden Testbedingungen (Kältebedingung und Kontrollbedingung) ein Anstieg der Herzfrequenz von circa 15 bis 20 Schlägen pro Minute. Dieser Effekt lässt sich darauf zurückführen, dass der Organismus die gravitationsbedingte Reduktion des venösen Rückstroms durch eine Erhöhung der Schlagfrequenz auszugleichen versucht (Matzen et al., 1991). Dieser Anstieg der Herzfrequenz ist bei den Maritimen Fünfkämpfern in der Kühlbedingung um etwa 5,14 Schläge geringer als im Kontrolltest. Bei den Militärischen Fünfkämpfern liegt der Anstieg in der Kühlbedingung um 2,87 Schläge über dem des Kontrolltests. Die Werte liegen hier jedoch durchweg sehr nah beisammen, so dass sich kein eindeutiger Trend abzeichnet.

In der nachfolgenden Stehendphase liegt die Herzfrequenz der Maritimen Fünfkämpfer im Kühltest durchweg niedriger als in der Kontrollbedingung. Im Mittel beläuft sich die Differenz auf 3,72 Schläge pro Minute. Dieser Befund sowie der geringere Anstieg der Herzfrequenz unmittelbar nach dem Aufstehen aus der Liegendposition stehen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen verschiedener weiterer Autoren (Cui et al., 2005; Durand et al., 2004; Wilson et al., 2002). Auch hier traten bei Veränderungen der Körperposition unter Kühlbedingungen geringere Anstiege der Herzfrequenz auf, als dies ohne Kühlung der Fall war. Ein weniger starker Anstieg der Herzfrequenz wird von den Autoren als Indikator einer stabileren Blutdruckregulation und damit einer Verbesserung der orthostatischen Toleranz nach Kälteapplikation interpretiert. Da die Unterschiede jedoch mit $p \leq 0,208$ (Anstieg unmittelbar nach dem Aufstehen) und $p \leq 0,133$ (mittlere Herzfrequenz in der Stehendphase) nicht signifikant sind, kann hier lediglich ein Trend zu einer verbesserten orthostatischen Toleranz festgestellt werden.

Wenn der Herzfrequenzanstieg bei den Maritimen Fünfkämpfern in Folge orthostatischen Stresses nach Kälteapplikation geringer ausfällt, dies aber bei den Militärischen Fünfkämpfern nicht zu beobachten ist, obwohl beide Gruppen einen unter Kälte höheren diastolischen Blutdruck zeigen, reicht dessen Erhöhung durch lokale kälteinduzierte Vasokonstriktion

möglicherweise nicht zur Erklärung der veränderten orthostatischen Toleranz aus. Zusätzliche Effekte müssen daher im Weiteren geprüft werden.

Eine mögliche weitere Erklärung der unterschiedlich veränderten orthostatischen Toleranz bietet die Annahme, dass die Herzfrequenz unter orthostatischem Stress, nicht allein in Abhängigkeit von afferenten Impulsen arterieller Barorezeptoren geregelt wird, sondern ebenso arterielle und zentrale Thermorezeptoren eine Rolle spielen (Yamazaki und Sone, 2000; Ebert et al., 1982; Heistad et al., 1973). Die Autoren nehmen an, dass eine verringerte Körperkerntemperatur, über diese Thermorezeptoren vermittelt, zu einer gedämpften Reaktion der Herzfrequenz auf orthostatischen Stress führt. Da sich jedoch die Körperkerntemperaturen beider Probandengruppen während des ersten Schellongtests nicht signifikant unterscheiden, wird ein solcher Effekt hier nicht angenommen.

Bei den Maritimen Fünfkämpfern fanden sich unter Kältebedingungen allerdings signifikant höhere systolische Blutdruckwerte als im Kontrolltest (Minute 6: +7,86 mmHG [$p \leq 0,017$]; Minute 8: +5,00 [$p \leq 0,017$]). Bei den Militärischen Fünfkämpfern zeigten sich keine Unterschiede in den systolischen Werten. Möglicherweise führt der Kältereiz bei den Maritimen Fünfkämpfern zu einer insgesamt größeren Zunahme der Sympathikusaktivität und damit zu einer Verstärkung der adrenerg vermittelten gesamtsystemischen Gefäßkonstriktion (Cui et al., 2007; Ifuku et al., 2007). Ein stärkerer sympathischer Einfluss könnte ebenfalls erklären, weshalb die Herzfrequenz der Maritimen Fünfkämpfer während des ersten Schellongtests unter Kältebedingungen deutlich über der der Militärischen liegt. Für einen derartigen Zusammenhang spricht ebenfalls die deutlich stärkere Ausdauerorientierung der Militärischen Fünfkämpfer im Training, die möglicherweise zur sogenannten Trainingsvagotonie führte, einer schon zur Mitte des vorigen Jahrhunderts beobachteten, chronischen Zunahme parasymphatischer Aktivität unter Ruhebedingungen (Astrand und Rhymin, 1954).

VI.1.2 Unter Belastungsbedingungen

Bei den Maritimen Fünfkämpfern zeigen sich im Kontrolltest signifikante bis hoch signifikante positive Korrelationen zwischen der Hauttemperatur (HT-Sternum) beim Abbruch des Rampentests und den Körperkerntemperaturen während des späteren Stufentests (siehe Kapitel VI.6). Ein ähnlich starker Zusammenhang besteht auch unter Kältebedingungen, jedoch korreliert hier erst die Hauttemperatur zu Beginn des Stufentests signifikant mit den Körperkerntemperaturen während der weiteren Stufen dieses Tests (siehe Kapitel VI.6). Offenbar kommunizieren Kern und Schale, bezogen auf ihren gegenseitigen Temporaustausch, unmittelbar nach der Kälteapplikation nicht so stark, wie sie es später nach einer längeren Belastung tun. Als Ursache hierfür kann die kälteinduzierte Vasokonstriktion peripherer Blutgefäße angenommen werden, die bereits ab einer Hauttemperatur von circa 35°C beginnt und schon bei etwa 31°C ihr Maximum erreichen kann (Veicsteinas et al., 1982). Folgt man den Beobachtungen Pérgolas und Mitarbeitern (1993), so scheint es sich beim Vasokonstriktionsreflex (zumindest im Bereich des Unterarms, die Autoren nehmen dies aber auch für die übrigen großen Hautareale des Körpers an) um eine vor allem lokale Reaktion auf den Kältereiz zu handeln. Johnson und Mitarbeiter (2004) postulieren, dass in den ersten Minuten der Kühlung die Erregung von Kälterezeptoren in der Haut zur Stimulation sympathischer Vasokonstriktorneuronen führt, die ihrerseits über die Ausschüttung von Noradrenalin zu einer Tonuserhöhung in der glatten Gefäßmuskulatur und zur Verengung von Arteriolen und Anastomosen führt. Nach länger andauernder Kühlung jedoch, kommt es, auch bei experimentell herbeigeführter Blockade der sensorischen Bahnen sowie der noradrenergen Rezeptoren, zur Vasokonstriktion in den gekühlten Arealen (Johnson et al., 2004). Dies deutet darauf hin, dass an einer mehr als wenige Minuten dauernden Vasokonstriktion auch nichtneuronale Effekte beteiligt sind, deren Wirkmechanismen allerdings bisher unbekannt sind. Johnson und Mitarbeiter (2004) spekulieren, dass hier Auswirkungen der Kälte auf den Energiestoffwechsel der glatten Muskulatur oder Veränderungen im Bereich der Blutviskosität und der Endothelfunktion eine Rolle spielen.

Die unter Kältebedingungen nach Abbruch des Rampentests zunächst konstant bleibende Hauttemperatur, die nicht wie im Kontrolltest unmittelbar dem belastungsinduzierten Anstieg der Körperkerntemperatur folgt, spricht ebenfalls für eine eingeschränkte thermische Kommunikation zwischen Kern und Schale im Kältetest. Offenbar bedarf es eines Körperkerntemperaturanstiegs über eine gewisse Schwellentemperatur hinaus, um die Blutflussrate in die Haut wieder zu erhöhen (González-Alonso et al., 2008; Kenny et al., 2006). Der starke, kälteinduzierte, noradrenerge Vasokonstriktortonus reduziert sich hier mit steigender Körperkerntemperatur zunächst nur langsam, bis die entsprechende Schwellentemperatur erreicht ist und aktive, cholinerge Vasodilatationsmechanismen aktiviert werden, deren genaue Wirkung allerdings bisher nicht abschließend geklärt werden konnte (Kellogg, 2006; Kenny et al. 2006; Cotter und Taylor, 2005).

Vergleicht man die Ergebnisse der Korrelationsanalysen beider Probandengruppen, so stellt sich die Frage, weshalb bei den Maritimen Fünfkämpfern eine Häufung der Korrelationen zwischen Haut- und Körperkerntemperatur auftritt und bei den Militärischen nur wenige (Kontrolltest) bis gar keine (Kältetest) Korrelationen gefunden wurden (siehe Kapitel VI.6). Als mögliche Erklärung könnte die „Trainierbarkeit“ der vasomotorischen Aktivität in der Körperschale dienen (Young et al., 1995), welche eine unterschiedlich starke Ausprägung der Vasokonstriktionsreaktion bedingen könnte, jedoch bisher vor allem im Tierversuch untersucht wurde (Heylen et al., 2008).

Da die Militärischen Fünfkämpfer im Training mit deutlich geringeren Intensitäten arbeiten als die Maritimen und die Wärmeabgabe hierbei von geringerer Bedeutung ist als bei den hochintensiven Belastungen der Maritimen Fünfkämpfer, ist eine trainingsbedingte chronische Heraufsetzung der kutanen, vasodilatatorischen Schwellentemperatur denkbar (Johnson und Park, 1981). Ein derartiger Effekt könnte desweiteren erklären, weshalb die Maritimen Fünfkämpfer im ersten Schellongtest deutliche hämodynamische Unterschiede zwischen Kälte- und Kontrolltest zeigen und die Militärischen Fünfkämpfer nicht.

Zwischenfazit

Trotz der beschriebenen Unterschiede zwischen den Probandengruppen deuten die Ergebnisse des Schellongtests (Ruhebedingung), des Laktatsenkontests (Belastungsbedingung) sowie die Ergebnisse der besprochenen Studien insgesamt auf das Vorliegen einer stärkeren peripheren und möglicherweise viszeralen Vasokonstriktion und einer damit einhergehenden Blutvolumenverschiebung unter Kältebedingungen hin. Ob die Sauerstoffversorgung der Muskulatur durch einen derartigen Mechanismus positiv beeinflusst werden kann, ist bisher unklar (Gonzalez-Alonso et al., 2008). Eine Blutvolumenverschiebung, zum Beispiel aus der gekühlten Peripherie, kann sich jedoch, wenn überhaupt, nur dann auf die Muskulatur auswirken, wenn durch sie zunächst auch das Herzzeitvolumen zunimmt.

IV.2 Effekte der Hautkühlung auf das Herzzeitvolumen unter Belastung

Die Hauttemperatur (gemessen auf dem Sternum) liegt im Kältetest in beiden Probandengruppen über den Verlauf des gesamten Testprotokolls hinweg unter den Werten des Kontrolltests. Besonders große Unterschiede zwischen den Bedingungen finden sich während des Rampentests und in der zugehörigen Nachbelastungsphase. Die maximale Hauttemperaturdifferenz beträgt hier bei den Militärischen Fünfkämpfern $1,80^{\circ}\text{C}$ (Messzeitpunkt: 3 Minuten nach Abbruch des Rampentests). Der Unterschied ist auf dem Niveau von $p \leq 0,006$ signifikant. Die mittlere Hauttemperatur der Maritimen Fünfkämpfer liegt während des Rampentests und der Nachbelastungsphase unter Kältebedingungen um $1,15^{\circ}\text{C}$ niedriger als im Kontrolltest. Der Unterschied ist allerdings mit $p \leq 0,062$ nicht signifikant.

Folgt man den Schlussfolgerungen Parks und Mitarbeitern (1999), so führt die Herabsetzung der Hauttemperatur zu einer Zunahme des Herzschlagvolumens. Die Autoren konnten zeigen, dass eine Kühlung der Haut zu einer Zunahme des zentralvenösen Blutdrucks führt, wie dies auch schon zuvor bei Wasserimmersion beobachtet wurde (Gabrielsen et al., 1993; Christie et al., 1990). Eine Erhöhung des zentralnervösen Blutdrucks ist ihrerseits eng mit einer enddiastolischen Vergrößerung des linken Ventrikels assoziiert (Schertel,

1998). Die Kühlung der Haut scheint demnach über die Anhebung des venösen Preloads den diastolischen Füllvorgang zu erleichtern (Parks et al., 1999). Ist nun der venöse Füllungsdruck erhöht, kommt es zu einer stärkeren Dehnung der Herzmuskulatur und in deren Folge, wie sie der Frank-Starling-Mechanismus beschreibt, zu einer Erhöhung der Kontraktionskraft, welche mit einem vergrößerten Herzschlagvolumen einhergeht (Deetjen et al., 2005: S. 422f).

Nach Deussen (2007) führt eine solche Zunahme des Schlagvolumens jedoch nicht zwingend auch zu einer Vergrößerung des Herzzeitvolumens, da sich gleichzeitig die Herzfrequenz entsprechend reduziert. Der Befund leicht geringerer Herzfrequenzwerte während des Rampentests (Maritime Fünfkämpfer: 2,83 Schläge; Militärische Fünfkämpfer: 0,88 Schläge) ließe sich somit als Kompensation eines kälteinduziert vergrößerten Schlagvolumens interpretieren.

Die zwischen den Bedingungen unveränderte Herzfrequenz im anschließenden Stufentest lässt sich über diesen Mechanismus nicht erklären, da die Hauttemperatur in der Kältebedingung weiterhin unter der des Kontrolltests liegt und somit auch hier eine verringerte Herzfrequenz zu erwarten wäre. Diese fand sich hier jedoch nicht. Drei Deutungsansätze sind für diesen Effekt denkbar:

- 1.) Während der Belastung kommt es trotz der geringeren Hauttemperatur unter Kältebedingungen zu einer Reperfusion peripherer Gewebsschichten, der diastolische Preload reduziert sich, das Schlagvolumen nimmt ab und die Herzfrequenz nimmt im Sinne der Aufrechterhaltung des Herzzeitvolumens zu (siehe Kapitel IV.2.1).
- 2.) Das Absinken der Körperkerntemperatur während des Stufentests löst eine Zunahme der sympathischen Aktivität aus, die ihrerseits mit einem Anstieg der Herzfrequenz einhergeht und so eine zu erwartende Verringerung der Herzfrequenz kompensiert (siehe Kapitel IV.2.2).
- 3.) Die Verringerung von Körperkern- und Hauttemperatur führt zu einer Zunahme der Diurese, welche eine möglicherweise auftretende Hypovolämie verstärken könnte (siehe Kapitel IV.2.3).

IV.2.1 Effekte peripherer Reperfusion

Der hier skizzierte Ansatz entspricht den Annahmen des *Kern-Schale-Modells* der Thermoregulation (Deetjen et al., 2005: S.669ff). Auf den Kältereiz hin verengen sich die Gefäße der gekühlten Peripherie und verringern so die Perfusion des betroffenen Gewebes. Steigt nun bei Belastung die Körperkerntemperatur an, so weiten sich die Gefäße erneut, es kommt zur Reperfusion des gekühlten Gewebes, das Blut kühlt sich, ähnlich der Funktionsweise eines Wärmetauschers, ab, fließt zurück zum Herzen und reduziert so auf konvektivem Wege die Temperatur im Kern. Vor dem Hintergrund dieses Mechanismus' ließe sich erklären, weshalb die Körperkerntemperatur in der Kältebedingung auf den ersten Stufen des Stufentests weiter absinkt. Dieses Phänomen wird in der Literatur als *afterdrop-effect* bezeichnet (Giesbrecht et al., 1997; Giesbrecht und Bristow, 1992; Bristow und Giesbrecht, 1988). Da allerdings in beiden Probandengruppen die Hauttemperatur, auch während des Stufentests, nach Kälteapplikation signifikant (Maritime Fünfkämpfer: $p \leq 0,031$ [18 km/h]; Militärische Fünfkämpfer: $p \leq 0,016$ [14 km/h]) unter der in der Kontrollbedingung lag, wäre nach oben stehender Argumentation anzunehmen, dass die daraus resultierende, stärkere Vasokonstriktion der Peripherie auch hier zu einer Absenkung der Herzfrequenz führte. Dies ist jedoch nicht der Fall. Nach dem oben beschriebenen Modell, müsste es durch die wieder einsetzende Belastung dazu kommen, dass sich Hautgefäße weiten, um gleichsam antizipativ eine im Laufe der Belastung erforderlich werdende erhöhte Wärmeabgabe vorzubereiten. Auch wenn die komplexen Interaktionsprozesse der Vasodynamik unter Belastung bisher nicht abschließend geklärt werden konnten (Romanovsky, 2007), wurde eine antizipative Wärmeabgabe bisher nur im Bereich der Perspiration beobachtet (Kondo et al., 2010; Yanagimoto et al., 2003; Kondo et al., 2000). Die genannten Autoren nehmen an, dass Thermosensoren in der Arbeitsmuskulatur, Mechanorezeptoren in aktiven Muskeln und Gelenken und psychische Effekte für das Einsetzen der Perspiration vor Erreichen einer erhöhten Körperkern- und Hauttemperatur ursächlich sind. In Bezug auf die Hautperfusion wird bei einsetzender Belastung auf Grund der in Kapitel IV.2.2

zu besprechenden Sympathikusaktivierung eher eine Vasokonstriktion, denn eine –dilatation beobachtet (Sarelius und Pohl, 2010; Joyner und Casey, 2009). Das Vorliegen einer mit Beginn der Belastung einsetzenden Vasodilatation in der Haut, trotz der im Kältetest geringeren Haut- und Körperkerntemperaturen, ist demnach sehr unwahrscheinlich.

IV.2.2 Effekte auf die Sympathikusaktivität

Eine weitere Erklärung für das Ausbleiben einer nach Kälteapplikation verringerten Herzfrequenz trotz niedrigerer Haut- und Kerntemperatur, bietet die Annahme einer verstärkten Sympathikusaktivität in Folge der abgesenkten Körperkerntemperatur (Frank et al. 2002). Obwohl die gemessenen Unterschiede in der Körperkerntemperatur während des Stufentests mit circa 0,2°C recht gering sind, hat sich gezeigt, dass selbst solche Temperaturunterschiede im Körperkern zu einer deutlichen Zunahme der Noradrenalin-Konzentration im Plasma führen können (Mourot et al., 2008; Jansky et al., 1996). Ein katecholamin-vermittelter Anstieg der Herzfrequenz wäre somit als Ursache für die im Stufentest fehlenden Unterschiede in der Herzfrequenz zwischen den Testbedingungen denkbar.

Auch die Hauttemperatur, die unter Kältebedingungen ebenfalls niedriger ist, könnte eine Erhöhung der sympathischen Aktivität bedingen (Kregel et al., 1992). Allerdings besteht während des Stufentests, im Gegensatz zum Rampentest, kein *akuter* Kältereiz mehr. Gerade jedoch der akute und intensive Charakter der Hautkühlung scheint für eine deutliche Sympathikusaktivierung erforderlich (Ifuku et al. 2007; Jansky et al. 1996). Ein zunächst spontaner Anstieg der Herzfrequenz, wie er nach Kälteapplikation auf der Haut typisch ist (Wilmore et al., 2008: S.273ff), nivelliert sich jedoch offenbar bereits in den ersten 60 bis 90 Sekunden nach Einsetzen der Kühlung (Kregel et al., 1992).

Die Annahme einer adrenerg vermittelten Frequenzzunahme, die eine erwartete Reduktion der Herzfrequenz nach Kälteapplikation kompensiert, kann demnach nicht ausgeschlossen werden, sie dürfte allerdings eher in

Zusammenhang mit der verringerten Körperkerntemperatur als mit einem fortbestehenden Kältereiz auf der Haut stehen.

IV.2.3 Effekte auf den Wasserhaushalt

Im Verlauf des Stufentests kommt es zunächst zu einer Abnahme der Körperkerntemperatur in beiden Probandengruppen und unter beiden Bedingungen. Im Kontrolltest beginnt die Temperatur im Kern jedoch wieder früher anzusteigen als im Kältetest. Der erst auf einer etwas höheren Belastungsstufe auftretende Wiederanstieg der Kerntemperatur unter Kältebedingungen fällt dafür etwas steiler aus, so dass es gegen Ende des Stufentests zu einer Annäherung der Werte kommt. In beiden Fällen entsteht demnach eine thermische Beanspruchung des Organismus', auch wenn diese, auf Grund der niedrigen, absoluten Temperaturen unterhalb der 38°C-Marke, recht gering ist (Nybo, 2008). Dennoch deuten die zunächst sinkenden Körperkerntemperaturen und die gegen Ende des Tests sprunghaft ansteigenden Hauttemperaturen auf eine Reperfusion des peripheren Gewebes hin. Zur Aufrechterhaltung von Blutdruck und Leistung wird folglich ein erhöhtes Herzzeitvolumen benötigt (Nybo, 2008). Der erhöhte Blutbedarf in der Körperschale führt jedoch offenbar nur dann zu einer Verringerung des Blutangebotes in der Arbeitsmuskulatur, wenn der belastungsinduzierte Anstieg der Körpertemperaturen von Dehydration und folgender Hypovolämie begleitet wird (Gonzalez-Alonso et al., 2008; Coyle und Gonzalez-Alonso, 2001; Gonzalez-Alonso et al., 1998).

Die Gewichtsabnahme der Probanden liegt in beiden Testbedingungen bei circa 1 Kilogramm. Der daraus abgeleitete Wasserverlust von circa 1 Liter unterscheidet sich zwischen den Testbedingungen nicht signifikant und wäre auch insgesamt zu gering, um eine Hypovolämie zu bedingen (Nybo, 2008). Denkbar wäre allerdings ein leicht höherer Volumenverlust im Kältetest auf Grund einer kälteinduziert deutlich stärker ausgeprägten Diurese (um bis zu 168%), wie sie Sramek und Mitarbeiter (2000) nach Kälteapplikation fanden. Diese führte bei Kaltwasserimmersion zu einer Plasmavolumenreduktion von bis zu 20%. Nun spielen bei einer Immersion auch hydrostatische Effekte auf den Blutdruck und die resultierende Hemmung der Vasopressinausschüttung

(Jimenez et al., 2010; Mourot et al., 2008) eine gewichtige Rolle. Dennoch zeigen Untersuchungen mit Luftkühlung, die einer Kälteapplikation über Kühlweste ähnelt, dass auch hier Reduktionen des Plasmavolumens im Bereich von 7-15% auftreten können (Stocks et al., 2004; Morimoto und Itoh, 1998; Wittert et al., 1992). Geht man von einem durchschnittlichen Blutvolumen von circa 5 Litern aus, so beläuft sich das Plasmavolumen auf etwa 2,8 Liter, von dem wiederum etwa 2,6 Liter Wasser sind (Deetjen et al., 2005: S.340). Nimmt man eine Plasmareduktion von 7% an, beliefe sich ein möglicher diuresebedingter Wasserverlust auf 182 Milliliter. Der Gesamtwasserverlust während des Testverlaufes beliefe sich demnach auf circa 1,2 Liter in der Kältebedingung (1 Liter über Perspiration + ca. 0,2 Liter über kälteinduziert zusätzliche Diurese). Bei einem durchschnittlichen Körpergewicht der Probanden von etwa 75 Kilogramm, entspricht dies einem Verlust von circa 1,6% der Körpermasse. Obwohl McArdle und Mitarbeiter (2009: S.297) annehmen, dass bereits Verluste von 1% ausreichen können, um einen Anstieg der Herzfrequenz auszulösen, gehen zahlreiche andere Autoren davon aus, dass erst ab etwa 2% messbare Effekte auf das Herzkreislaufsystem auftreten (Coyle, 2004; Maughan und Sherriffs, 2004; Chevront et al., 2003; Shibasaki et al., 2003).

Vor diesem Hintergrund sind dehydrationsbedingte Einflüsse auf das Herzkreislaufsystem während des Testprotokolls in beiden Bedingungen zwar nicht auszuschließen, allerdings ist das Abschätzen von Wasserverlusten auf der Basis eines gemessenen Gewichtsverlustes grundsätzlich stark fehlerbehaftet, da hier Komponenten Einfluss nehmen, die in aller Regel nicht exakt quantifizierbar sind (Maughan et al., 2007). Die Autoren nennen in diesem Zusammenhang vor allem das im Substratstoffwechsel frei werdende Oxidationswasser, fäkale Flüssigkeitsverluste sowie Wasser, welches frei wird, wenn sich beim belastungsinduzierten Glycogenabbau die osmotischen Verhältnisse im Bereich der Muskelzellen verschieben.

Die berechneten, zusätzlichen Verluste durch eine möglicherweise kälteinduzierte Diurese sind mit 182 Millilitern sehr gering. Darüber hinaus kommt es bei sportlicher Belastung grundsätzlich zu einer vasopressinvermittelten Diuresehemmung (Hew-Butler, 2010), die eine zeitliche Verzögerung mit sich brächte, so dass denkbare Effekte auf den

Flüssigkeitshaushalt vermutlich nur geringen Einfluss im Testzeitraum haben dürften.

Insgesamt wird daher nicht davon ausgegangen, dass eine stärkere Reduktion des Plasmavolumens die unter Kältebedingungen erwartete Zunahme des Schlagvolumens kompensiert.

Zwischenfazit

Die Kälteapplikation über Kühlweste scheint zu einer verstärkten Vasokonstriktion in der Peripherie zu führen. Während des Rampentests bewirkte die sequentielle Blutvolumenverschiebung offenbar einen verstärkten Preload am rechten Herzen und eine damit einhergehende Erhöhung des Schlagvolumens. Diese wiederum äußerte sich in einer Abnahme der Herzfrequenz bei gleichbleibender Belastung. Für den Rampentest besteht daher kein Anlass anzunehmen, dass die Kälteapplikation zu einer Verringerung des Blut- und damit des Sauerstoffangebotes in der Arbeitsmuskulatur führte, die die unter Kältebedingungen erhöhten Laktatwerte erklären könnte.

Während des späteren Stufentests wurden bezogen auf die Herzfrequenz keine Unterschiede zwischen den Testbedingungen gefunden, obwohl die Effekte der Kälteapplikation in Form geringerer Haut- und Körperkerntemperaturwerte weiterhin messbar waren. In diesem Zusammenhang scheinen vor allem eine durch die geringeren Körpertemperaturen induzierte, verstärkte Sympathikusaktivität als auch eine metabolisch vermittelte Vasodilatation in der Arbeitsmuskulatur Einfluss zu nehmen. Beide Mechanismen hätten eine Zunahme der Herzfrequenz zur Folge, welche die erwartete Verringerung der Frequenz nach Kälteapplikation kompensieren könnte. Auch hier wird daher nicht von einer Verschlechterung der muskulären Sauerstoffversorgung durch Hautkühlung ausgegangen.

Auch lokale *Steal-Effekte*, wie sie durch eine kälteinduzierte Hyperämisierung der Haut hervorgerufen werden könnten, werden hier nicht angenommen, da die Kälteapplikation zum Einen nicht direkt an der Arbeitsmuskulatur erfolgte und zum Anderen unter Belastung vermutlich eher der Muskel von der Haut „stiehlt“ und nicht umgekehrt (Wolff, 2007).

IV.3 Effekte der Kälteapplikation auf die Substratbereitstellung

Der maximale respiratorische Quotient liegt unter Kältebedingungen während des Stufentests in beiden Probandengruppen geringfügig höher als unter Normalbedingungen (Maritime Fünfkämpfer: +0,023 [$p \leq 0,547$]; Militärische Fünfkämpfer: +0,015 [$p \leq 0,567$]). Dieser Effekt wird von Febbraio und Mitarbeitern (1996b) sowie weiteren Autoren bestätigt (Layden et al., 2002; Galloway und Maughan, 1997; Shepard et al. 1993). In diesen Untersuchungen liegen die Haut- und Körperkerntemperaturen der Testpersonen jedoch deutlich niedriger, als dies im durchgeführten Stufentest der Fall ist, zu dessen Beginn die Körpertemperaturen bereits in Folge der Rampentestbelastung deutlich angestiegen sind. Darüber hinaus sind die gemessenen Unterschiede, bezogen auf den maximalen respiratorischen Quotienten, zwischen den Testbedingungen sehr gering und nicht signifikant. Die diesbezüglichen Werte des Stufentests sind somit wenig aussagekräftig.

Während des hochintensiven Rampentests, bei fortgesetzter Kälteapplikation durch die Kühlweste und in direkter zeitlicher Nähe zur Kühlmaßnahme des vorgeschalteten Schellongtests, zeigt sich bei den Militärischen Fünfkämpfern jedoch ein in der Kältebedingung signifikant ($p \leq 0,024$) höherer maximaler respiratorischer Quotient (Kältetest: 1,003; Kontrolltest: 0,927). Die Ursache für diesen Effekt könnte im Bereich der vorgeschalteten Kälteapplikation in Ruhe liegen, in der fortgesetzten Kühlung während des Rampentests oder in einer Kombination von beidem.

Eine Kälteexposition des menschlichen Körpers in Ruhe führt zu einem allgemeinen Anstieg der Stoffwechselrate über die Aktivierung beta-adrenerger Rezeptoren und die folgende Katecholaminausschüttung (Stocks et al., 2004; Refinetti, 1997; Kraeuchi und Wirz-Justice, 1994; Kobayashi, 1988). Durch die Erhöhung des Muskeltonus' und das bei weiter sinkenden Körpertemperaturen schließlich einsetzende Kältezittern steigt der Grundumsatz zusätzlich an (Deetjen et al., 2005: S.682). Nach Vallerand und Jacobs (1989) tragen zu diesem allgemeinen Anstieg sowohl eine Zunahme der Fett- als auch der Kohlehydratstoffwechselrate bei. Da die Thermogenese durch Kältezittern aber vornehmlich auf dem Kohlehydratstoffwechsel basiert

(Haman et al., 2002), kommt es zu einer Verschiebung der Substratanteile zu Gunsten der Kohlehydrate.

Hierzu erhöhen sich unter Kältebedingungen offenbar der Abbau intramuskulären Glykogens und die Aufnahme von im Blut zirkulierender Glucose in die Muskelzellen (Vallerand und Jacobs, 1992). Die Autoren führen letzteren Effekt auf eine im Tierversuch gefundene, insulin-mimetische Wirkung der Kälte zurück. Ein genauer Wirkmechanismus konnte zwar bisher nicht gefunden werden (Ikeda et al., 2006), jedoch beobachteten Wang und Mitarbeiter (2003) nach Kälteapplikation einen Anstieg der GLUT 4 mRNA im *M. gastrocnemius* von Mäusen. Ob dieser Glukosetransporter (GLUT 4) auch für die unter Kältebedingungen beim Menschen erhöhte Aufnahme von Blutzucker in die Muskelzellen verantwortlich ist, wie sie Vallerand und Jacobs (1992) fanden, ist bisher ungeklärt.

Nach den bisherigen Überlegungen ist demnach davon auszugehen, dass die Kälteapplikation während des Schellongtests zu einer Zunahme des Kohlehydratstoffwechsels führt, was in der Folge eine Erhöhung der Laktatproduktion bedingen könnte (Gladden, 2004). Es ist dabei allerdings zu berücksichtigen, dass nur bei einzelnen Probanden überhaupt ein Kältezittern zu beobachten war, welches darüber hinaus sehr mild verlief und nicht über die gesamte Kühlphase hinweg anhielt.

Bei einsetzender Belastung verschieben sich die Substratanteile des Energiestoffwechsels unabhängig von thermischen Einflüssen in Richtung einer stärkeren Kohlehydratnutzung (Brooks und Mercier, 1994). In Kombination mit dem entsprechenden metabolischen Effekt der Kälteapplikation in Ruhe bedeutete dies eine weitere Prononcierung des Kohlehydratstoffwechsels. Der bei den militärischen Fünfkämpfern signifikant höhere maximale respiratorische Quotient im Rampentest unter Kältebedingungen (+0,077 [$p \leq 0,024$]) sowie die Ergebnisse von Galloway und Maughan (1997) bestätigen dies. Der bei den militärischen Fünfkämpfern unter Kältebedingungen ebenfalls erhöhte maximale Laktatwert in der Nachbelastungsphase des Rampentests (+1,72 mmol/l [$p \leq 0,026$]) legt die Annahme eines Zusammenhangs zur veränderten Substratnutzung nahe. Eine

kälteinduziert erhöhte Glykolyse, die durch die hochintensive Belastung des Rampentests noch einmal deutlich ansteigt, könnte die gegen Ende des Rampentest ohnehin eintretende Überlastung der Atmungskette beschleunigen. Somit käme es unter Kältebedingungen früher zu einer verstärkten Bindung überschüssiger Wasserstoffionen an das Pyruvat und damit zu einem Anstieg der Laktatkonzentrationen (McArdle et al., 2009: S.139ff; Philp et al., 2005).

Dem entgegen stehen aber die Ergebnisse des Rampentests bei den Maritimen Fünfkämpfern. Diese Probandengruppe ist in Training und Wettkampf auf deutlich kürzere Distanzen und damit höhere Intensitäten ausgerichtet als die Militärischen Fünfkämpfer. Es ist davon auszugehen, dass ein solches Training die Leistungsfähigkeit des Kohlehydratstoffwechsels verbessert (Carter et al., 2001). Die deutlich höheren Werte des maximalen respiratorischen Quotienten unter Kontrollbedingungen bei den Maritimen im Vergleich zu den Militärischen Fünfkämpfern können als Hinweis auf das Vorliegen eines derartigen Trainingseffektes interpretiert werden (Maritime Fünfkämpfer: 1,032; Militärische Fünfkämpfer: 0,930). Auf Grund des schon in der Kontrollbedingung maximal hohen respiratorischen Quotienten finden sich, bezogen auf diesen Parameter, in der Gruppe der Maritimen Fünfkämpfer keine signifikanten Unterschiede zum Kältetest. Dennoch zeigen die Maritimen Fünfkämpfer wie die Militärischen unter Kälte erhöhte maximale Laktatwerte und, sowohl im Rampen- als auch im Stufentest, eine geringere maximale Sauerstoffaufnahme (Maritime Fünfkämpfer: Rampentest (-0,47 l/min [$p \leq 0,174$]), Stufentest (-0,19 l/min [$p \leq 0,021$]; Militärische Fünfkämpfer: Rampentest (-0,75 l/min [$p \leq 0,076$]), Stufentest (-0,072 l/min [$p \leq 0,846$])). Folglich kann ein unter Kälte verstärkter katecholamin-induzierter Kohlehydratstoffwechsel nicht die alleinige Ursache für die in der Kältebedingung erhöhten Laktatwerte sein.

Zwischenfazit

Nach den bisherigen Überlegungen ist anzunehmen, dass die Kälteapplikation zu einer katecholamin-vermittelten Erhöhung der Stoffwechselrate im Allgemeinen und einer Prononcierung des Kohlehydratstoffwechsels im

Speziellen führt. Da jedoch der respiratorische Quotient bei den Maritimen Fünfkämpfern bereits unter Kontrollbedingungen maximal ist, auch diese Gruppe aber dennoch unter Kältebedingungen signifikant erhöhte Laktatwerte zeigt, müssen weitere Effekte hinzukommen, um diese erhöhten Laktatmaxima im Kältetest erklären zu können.

IV.4 Effekte der Kälteapplikation auf die Muskelfunktion

Die externe Kälteapplikation während des Schellongtests und dem anschließenden Rampentest erfolgte ausschließlich im Bereich des Torsos. Ein möglicherweise eingetretener Kühleffekt auf die Beinmuskulatur auf Grund der Raumtemperatur von 21°C, die den nur mit einer kurzen Sporthose bekleideten Sportlern keine thermoneutrale Umgebung (ca. 28°C) bot (Drinkwater, 2008: S.76), läge in beiden Testbedingungen vor und hätte folglich keine Auswirkung auf mögliche Unterschiede zwischen Kälte- und Kontrolltest.

Im anschließenden Rampentest allerdings sinkt die Körperkerntemperatur unter Kühlbedingungen leicht ab (-0,20°C), während sie im Kontrolltest ansteigt (Militärische Fünfkämpfer) oder zumindest weniger stark abfällt (Maritime Fünfkämpfer). Demzufolge ist davon auszugehen, dass auch die intramuskuläre Temperatur im Kältetest während der Rampentestbelastung etwas niedriger liegt als in der Kontrollbedingung, auch wenn hier nur ein indirekter Rückschluss auf die tatsächliche intramuskuläre Temperatur möglich ist. Da aber bereits geringfügige Verringerungen der Muskeltemperatur, besonders im Niedertemperaturbereich, zu Veränderungen lokaler Muskelfunktionscharakteristika führen (Drinkwater, 2008: S.76; Wilmore et al., 2008: S.273f; Cornwall, 1994), kann dieser Aspekt nicht unberücksichtigt bleiben. Es ist jedoch zu betonen, dass die gemessenen Temperaturunterschiede gering und allein bei den Militärischen Fünfkämpfern in Minute fünf nach Abbruch des Rampentests signifikant sind ($p \leq 0,020$).

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Verringerung der Muskeltemperatur zu einer Zunahme der im EMG gemessenen elektrischen Aktivität führt (Drinkwater und Behm, 2007; Oksa, 2002; Rutkove, 2001;

Rissanen et al., 1996). Die Ursache hierfür liegt in einer unter Kältebedingungen erhöhten Zahl rekrutierter motorischer Einheiten der Arbeitsmuskulatur begründet (Rome, 1990). Die Aktivierung einer größeren Zahl von Muskelfasern als unter Normaltemperaturbedingungen ist notwendig, da zwar die isometrische Kraftentwicklungsfähigkeit bei nur geringfügig niedrigerer Muskeltemperatur in etwa erhalten bleibt (Drinkwater und Behm, 2007; De Ruiten et al., 1999; Ranatunga et al., 1987), sich jedoch die Kontraktionsrate reduziert (Drinkwater, 2008: S.80; De Ruiten und De Haan, 2000; Faulkner et al., 1990). Zwei Mechanismen zeichnen möglicherweise hierfür verantwortlich: Erstens eine Abnahme der Kontraktionsgeschwindigkeit, zweitens eine Verlängerung des Zeitraums bis zur Relaxation der Fasern.

Auf Basis der bisher geringen Anzahl an Untersuchungen zum Einfluss der Kälte auf die Kraft-Geschwindigkeits-Relation der Muskeltätigkeit beim Menschen (Jones et al., 2006; Geurts et al., 2004; De Ruiten und De Haan, 2000; Bergh und Ekblom, 1979), die allerdings durch weitere Studien im Tierversuch gestützt werden (Haeufle et al., 2010; Asmussen et al., 1994), nehmen die genannten Autoren eine unter Kälteeinfluss reduzierte Aktivität der Aktomyosin ATPase an, was zu einer Abnahme der ATP-Hydrolyse führen würde (Deetjen et al., 2005), die wiederum eine Verringerung der Kontraktionsgeschwindigkeit zur Folge hätte.

Ein zweiter Aspekt, der besonders bei dynamischer Muskelaktivität von Bedeutung ist, ist die Dauer bis zur Relaxation der Muskelfaser, die in der sogenannten Halb-Relaxations-Zeit (half relaxation time) angegeben wird (Hsu et al., 2009). Diese verlängert sich unter Kälteeinfluss (Jones et al., 2006) und führt dazu, dass die betroffene Faser erst verzögert wieder zur Kontraktion gebracht werden kann. Der so erhöhte Gesamttonus der Arbeitsmuskulatur (Geurts et al., 2004) wirkt sich seinerseits negativ auf die intra- und intermuskuläre Koordination und damit auf die Flüssigkeit der Laufbewegung aus (O'Brien et al., 2007). Als Ursache einer unter Kälte verlängerten Halb-Relaxations-Zeit nehmen Faulkner und Mitarbeiter (1990)

eine kälteinduziert verlangsamte Bindung des ATP an die Myosinköpfchen an, was zu einer verzögerten Lösung der Aktin-Myosin-Brücken führte.

Trotz einer bei leichter Kühlung unveränderten Kraftentwicklungsfähigkeit, würde somit die Leistung der betroffenen Muskelbereiche durch die genannten Faktoren abnehmen.

Nun wird nach Kühlung der Muskulatur nicht nur eine größere Zahl von motorischen Einheiten rekrutiert, sondern es kommt zusätzlich zu einer Kompression der Rekrutierungsordnung (Rome, 1990). Das heißt, die Reihenfolge, in der unter Normaltemperaturbedingungen rekrutiert würde, wird zwar eingehalten, allerdings kommt es früher zu einer Aktivierung ansonsten erst später rekrutierter Einheiten. Hierbei handelt es sich vor allem um glykolytische FT-Fasern (Wilmore et al., 2004: S. 35ff).

Möglicherweise kommt es darüber hinaus aber doch auch zu einer Veränderung der Rekrutierungsreihenfolge, so dass bereits FT-Fasern mit einer höheren Aktivierungsschwelle rekrutiert werden, bevor jene mit niedrigerer Schwelle vollzählig aktiviert wurden (Yona, 1997).

Zwischenfazit

Wenn unter Kühlbedingungen, bei gleicher Belastung, mehr motorische Einheiten rekrutiert werden, es zu einer Kompression der Rekrutierungsreihenfolge sowie einer Veränderung der Reihenfolge zu Gunsten einer früheren Aktivierung von FT-Fasern kommt und die intra- wie intermuskuläre Koordination negativ beeinflusst wird, würde sich der Energieumsatz insgesamt erhöhen, der Anteil der Glykolyse an der Energiebereitstellung nähme zu und die Laktatproduktion stiege an (Drinkwater, 2008). Somit ließe sich erklären, weshalb die maximalen Laktatwerte im Rampentest, unter Kältebedingungen, in beiden Probandengruppen höher liegen als im Kontrolltest. Diese Hypothese steht jedoch unter dem Vorbehalt geringer und nicht direkt in der Muskulatur gemessener Temperaturunterschiede.

IV.5 Effekte der Hautkühlung auf das Belastungsempfinden

Vor dem Hintergrund der Annahme einer lokalen, kälteinduzierten Beeinträchtigung der Muskelfunktion, die sich vor allem im Rampentest in erhöhten Laktatwerten zeigt, ist es überraschend, dass die Probanden beider Sportlergruppen im Kälte- wie im Kontrolltest, sowohl im Labor als auch im Feld, in etwa die gleiche Leistung erbringen konnten.

Das in beiden Probandengruppen unter Labor- und Feldbedingungen nach Kälteapplikation um bis zu einem Skalenpunkt verringerte Belastungsempfinden könnte eine mögliche Erklärung bieten. Borg (1982) geht im Rahmen seiner auch hier verwendeten Methode des Rating of Perceived Exertion (RPE) davon aus, dass das Gehirn die afferenten, beanspruchungsrelevanten Signale verschiedener Organsysteme während der Belastung empfängt, integriert und über die Erzeugung unterschiedlich starker Belastungsempfindungen eine Überlastung des Gesamtorganismus verhindert.

Die afferenten Signale des kardiovaskulären Systems (hier insbesondere die Herzfrequenz), sowie des respiratorischen und muskulären Systems, scheinen in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung zu sein (Crewe et al., 2008). Demzufolge wäre, nach den bisherigen Überlegungen zu den im Kälte-Test erhöhten Laktatwerten, ein ebenfalls höheres Belastungsempfinden zu erwarten. In beiden Versuchsgruppen, sowohl im Labor- als auch im Feldtest, wurden unter Kältebedingungen jedoch geringere Werte auf der Borgskala gemessen (bis zu 1,0 Skalenpunkten). Offenbar spielen aber auch thermische Signale eine Rolle bei der zentralnervösen Integration der eintreffenden Beanspruchungsafferenzen zum Gesamtkonstrukt des Belastungsempfindens (Tucker et al., 2006). Einflüsse sowohl der Körperkerntemperatur (Marino et al., 2004; Nielsen et al., 2001; Tattersson et al., 2000) als auch der Hauttemperatur (Tucker et al., 2004; Tucker et al., 2006) wurden in verschiedenen Untersuchungen festgestellt. Die Autoren fanden positive Korrelationen zwischen den Haut- und Körperkerntemperaturen und dem Belastungsempfinden, gemessen an Hand der Borg-Skala. Das heißt, eine Abnahme der Temperatur führte zu einer Verringerung des Belastungsempfindens.

Ein Befund, der in Übereinstimmung zu den Ergebnissen des durchgeführten Laktatsenkentests steht. Auch hier wurden in der Kontrollbedingung bei den Maritimen Fünfkämpfern signifikante Korrelationen zwischen der Hauttemperatur auf der Stirn und dem Belastungsempfinden gefunden (siehe Kapitel VI.6). In der Kältebedingung traten diese Korrelationen nicht auf. Der Zusammenhang zwischen Hauttemperatur auf der Stirn und dem Belastungsempfinden scheint nach Kälteapplikation aufgelöst.

Wie verschiedene Autoren annehmen, steht die Abnahme des Belastungsempfindens bei leicht verringerten Körpertemperaturen in engem Zusammenhang mit dem Erreichen kritischer Körperkerntemperaturen (Walters et al., 2000; Gonzalez-Alonso et al., 1999b; Nielsen et al., 1993). Auf Grund der starken Temperaturabhängigkeit der Enzyme und der besonderen Temperatursensitivität des zentralen Nervensystems (Nybo, 2010a; Roelands und Meeusen, 2010; Cheung, 2008) kann der Organismus einen Anstieg der Körperkerntemperatur nur bis zu einer bestimmten Schwelle zulassen. Nähert sich die Temperatur im Kern diesem kritischen Wert an, so scheint sich die neuronale Aktivierungsrate der Arbeitsmuskulatur zu reduzieren, die Leistung nimmt ab und die metabolische Wärmeproduktion verringert sich (Nybo, 2010b). Als kritisch werden in der Literatur Körperkerntemperaturen jenseits der 41°C angesehen (Nybo, 2008; Walters et al., 2000). Die Maximalwerte im Laktatsenkentest liegen jedoch selbst im Kontrolltest klar unter der 38°C-Marke. Keiner der Probanden gelangte demnach auch nur in die Nähe kritischer Körperkerntemperaturbereiche. Darüber hinaus wurden die höchsten Kerntemperaturwerte am Ende des Stufentests gemessen. Die größten Unterschiede zwischen den Testbedingungen hingegen, bezogen auf das Belastungsempfinden, fanden sich zu Beginn des Stufentests. Es ist daher nicht anzunehmen, dass das höhere Belastungsempfinden im Kontrolltest die Folge einer reduzierten neuronalen Muskelaktivierung ist, welche auftritt, um das Erreichen kritischer Kerntemperaturen hinauszuzögern.

Wenn nun im Stufentest die größten Unterschiede im Belastungsempfinden zwischen den Testbedingungen in einer Phase auftreten, in der die

Körpertemperaturen des Kältetests zwar unter denen der Kontrollbedingung liegen, aber auch ohne Kühlung keine annähernd kritischen Werte erreicht werden, liegt die Vermutung nahe, dass es sich bei der Wahrnehmung des Belastungsempfindens um einen antizipativen Vorgang handelt. Ein Mechanismus, den Ulmer (1996) als *Teleoantizipation* bezeichnet. Die Ermüdung wird in diesem Modell nicht als rein physisches Ereignis bei Erreichen kritischer Temperaturen verstanden, sondern als eine bewusste Wahrnehmung, die aus der Verarbeitung unbewusster Regulationsprozesse entsteht (Crewe et al., 2008; Noakes et al., 2005; St Clair Gibson et al., 2003). Diese Annahme wird durch die Erkenntnisse weiterer Autoren gestützt, nach denen das Belastungsempfinden bei gleichbleibender Belastung bis zur Erschöpfung (Noakes, 2004; Garcin et al., 1999) oder bei Belastungen, deren Höhe vom Probanden selbst gesteuert werden konnte (Joseph et al., 2008; Albertus et al., 2005), linear ansteigt. Eston und Mitarbeiter (2007) sowie Frank Marino (2009; 2004) nehmen daher an, dass Veränderungen im Belastungsempfinden, die zu Beginn der sportlichen Belastung gemessen werden, ein aussagekräftiges Vorhersageinstrument für die folgende Gesamtleistung des Sportlers sein können.

Zur Erklärung des überraschenden Befundes, dass die Sportler in beiden Testbedingungen die gleiche Leistung erbringen können, obwohl die unter Kälte erhöhten Laktatwerte eher eine Verringerung der Leistungsfähigkeit nahelegen würden, könnte folgender Mechanismus dienen: Die signifikanten Korrelationen zwischen den Körpertemperaturen und dem Belastungsempfinden im Stufentest (siehe Kapitel VI.6), sowie die oben beschriebenen Ergebnisse anderer Autoren, deuten auf einen starken Zusammenhang zwischen diesen Parametern hin. Demzufolge würde eine Absenkung der verschiedenen Körpertemperaturen zu Beginn des Belastungsprotokolls zu einer Verringerung des Belastungsempfindens führen. Wenn das Zentralnervensystem, wie im Modell der Teleoantizipation beschrieben, bereits zu Beginn der Belastung die maximal tolerierbare Beanspruchung für die antizipierte Gesamtbelastung kalkuliert, könnte es den Sportlern gelingen, trotz eher leistungsreduzierender Kälteeffekte auf die Physis, die gleiche sportliche Leistung wie unter Kontrollbedingungen zu erbringen. Da es sich aber bei der Teleoantizipation bisher lediglich um ein

Modell handelt, welchem einzelne Autoren grundsätzlich oder in Teilaspekten widersprechen (Jay und Kenny, 2009; Marcora, 2008), wären in diesem Bereich noch zahlreiche, weitere Studien wünschenswert. Die Einbeziehung der EEG-Messung als weiterem Parameter der zerebralen Beanspruchungsanalyse, wie sie zum Beispiel Nybo und Nielsen (2001) vorgenommen haben, stellt hier einen vielversprechenden Ansatz dar.

Über den Aspekt einer möglichen Teleoantizipation hinaus ist das Auftreten eines Placeboeffektes nicht auszuschließen, da den Testpersonen, auf Grund ihrer Erfahrungen im Leistungssport und ihres Wissens über aktuelle Trainings- und Wettkampfvorbereitungsmethoden, bewusst gewesen sein dürfte, dass die Kälteapplikation mit dem Ziel einer Leistungsverbesserung durchgeführt wurde. Ein Problem, welches durch die Unmöglichkeit des Blindversuches auch in anderen Untersuchungen zu den Auswirkungen von Kühlung auf die sportliche Leistungsfähigkeit auftrat (Mujika et al., 2010; Hornery et al., 2005; Quod et al., 2004).

Darüber hinaus beeinflusst ein Belastungstest im Stufenformat möglicherweise die Ergebnisse in sofern, als dass die Probanden eine „Verpflichtung“ empfinden könnten, die Stufe des ersten Testdurchganges zu erreichen und die jeweils angefangene Stufe auch zu beenden (Barker und Armstrong, 2011). Dieser Aspekt muss daher bei der Betrachtung der Leistungskomponente, zumindest im Labortest, Berücksichtigung finden.

Zwischenfazit

Das Belastungsempfinden repräsentiert die zentralnervöse Integration beanspruchungsrelevanter Signale. Hierzu gehören offenbar, neben den Afferenzen des kardiovaskulären, respiratorischen und muskulären Systems, auch thermische Signale. Das Modell der *Teleoantizipation* geht davon aus, dass die Veränderungen der Körpertemperaturen bereits zu Beginn der Belastung Einfluss auf das spätere Belastungsempfinden nehmen. Ziel ist es offenbar hierbei, durch eine Erhöhung des Belastungsempfindens die tatsächlich erbrachte Leistung gegebenenfalls so zu reduzieren, dass es nicht zu einem späteren Anstieg der Körperkerntemperatur in kritische Bereiche

kommt. Die Verringerung von Haut- und Körperkerntemperatur im Rahmen der Kälteapplikation könnte demnach für das geringere Belastungsempfinden ursächlich sein. Darüber hinaus könnten hier aber auch Placebo- oder „Verpflichtungseffekte“ Einfluss auf die Wahrnehmung der Belastung genommen haben.

IV.6 Abschlussfazit

Die Betrachtung des aktuellen Forschungsstandes zu den Auswirkungen externer Kälteapplikation auf die Ausdauerleistungsfähigkeit (siehe Kapitel I) zeigte einen Untersuchungsbedarf in Bezug auf drei Hauptaspekte:

- 1.) Die Untersuchung von Hochleistungssportlern,
- 2.) die Untersuchung der Kühleffekte bei Belastung unter Normaltemperaturbedingungen sowie
- 3.) die gezielte Untersuchung der Kühleffekte auf den Laktatstoffwechsel.

Vor diesem Hintergrund wurde eine eigens entwickelte Variation des Laktatsenkentests nach Braumann (1991) in Kombination mit einem jeweils wettkampfspezifischen Feldtestprotokoll durchgeführt.

Nach der Diskussion der hier gefundenen Ergebnisse können die erkenntnisleitenden Fragen der Problemstellung wie folgt beantwortet werden:

Die durchgeführte Kälteapplikation führte zu einer generellen, wenn auch mitunter nur leichten Verringerung der gemessenen Körpertemperaturen im Vergleich zur Kontrollbedingung. Diese blieb über den Verlauf des gesamten Testprotokolls weitgehend erhalten.

Das zentrale Ergebnis der durchgeführten Untersuchung sind die in der Kältebedingung erhöhten maximalen Laktatwerte im Rampen- und im Stufentest. Ein Befund, der im Widerspruch zu zahlreichen Untersuchungen anderer Autoren steht, in denen es nach Kälteapplikation bei sportlichen Belastungen zu einer Verringerung der gemessenen Laktatazidose kam (siehe Kapitel I.5).

Als Ursache wird hier vielfach eine kälteinduzierte Verbesserung der muskulären Sauerstoffversorgung auf Grund einer Blutvolumenverschiebung aus der gekühlten Peripherie in zentralere Bereiche des Blutkreislaufes angeführt. Die Annahme einer Blutvolumenverschiebung wird in der vorliegenden Untersuchung bestätigt. Ob dies auch tatsächlich zu einer Zunahme der Muskeldurchblutung und damit einer Verbesserung der Sauerstoffversorgung führt, ist bisher nicht abschließend belegt. Es finden sich jedoch keine Hinweise darauf, dass eine derartige Blutvolumenverschiebung zu einer Verschlechterung der muskulären Sauerstoffversorgung führen könnte. Eine hämodynamische Ursache für die erhöhten Laktatwerte im Test wird daher nicht angenommen.

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl die Herabsetzung der Körperkerntemperatur als auch bereits die der Hauttemperatur zu einer Verschiebung der Substratnutzung zu Gunsten des Kohlehydratstoffwechsels führt. Die nach Kälteapplikation erhöhten Werte des maximalen respiratorischen Quotienten bestätigen dies. Da jedoch die Maritimen Fünfkämpfer auch im Kontrolltest Werte ≥ 1 erreichen und dennoch im Kälte-test höhere Laktatwerte aufweisen, kann zwar ein gewisser Einfluss der veränderten Substratnutzung nicht völlig ausgeschlossen werden, jedoch ist ein solcher nicht wahrscheinlich.

Demgegenüber finden sich in der Literatur zahlreiche Belege dafür, dass bereits eine geringe Abnahme der Muskeltemperatur zu einer Verringerung der Kontraktionsgeschwindigkeit führen kann. Zur Aufrechterhaltung der Leistung würde in diesem Falle eine größere Zahl an motorischen Einheiten aktiviert und es käme zu einer Kompression sowie möglicherweise einer Veränderung der Rekrutierungsordnung. Dies bedeutete eine frühere Aktivierung glykolytischer FT-Fasern, als es unter Normaltemperaturbedingungen der Fall wäre.

Eine zusätzliche Verlängerung der Relaxationszeit hätte, auf Grund des insgesamt höheren Muskeltonus, einen negativen Einfluss auf die intra- und intermuskuläre Koordination.

Beide Effekte zusammen würden eine Erhöhung des Gesamtenergieumsatzes im Allgemeinen und eine Erhöhung des Kohlehydratanteils im Speziellen nach sich ziehen. Die unter Kältebedingungen beobachtete Zunahme der Laktatazidose wäre über diesen lokalmuskulären Wirkzusammenhang erklärbar.

Nimmt man eine kälteinduziert verschlechterte, lokale Muskelfunktion an, so überrascht, dass die Probanden unter diesen Bedingungen dennoch die gleiche und im Feldtest sogar eine leicht bessere Leistung erbringen.

Eine mögliche Erklärung bietet das Modell der *Teleoantizipation*, demzufolge das zentrale Nervensystem bereits zu Beginn einer Belastung die maximal zuzulassende Gesamtbeanspruchung kalkuliert, welche der Organismus tolerieren kann, ohne einen bedrohlichen Verlust der Homöostase in den beteiligten Organsystemen zu riskieren. Da in diesem Zusammenhang die Homöothermie und das Erreichen kritischer Körperkerntemperaturen von besonderer Bedeutung zu sein scheint, könnte die Herabsetzung der Körpertemperaturen zu einem Manipulationsinstrument der Beanspruchungskalkulation des Zentralnervensystems werden. So könnte es zu einer Erhöhung der Beanspruchungstolerierungsschwelle kommen, was den Sportlern eine Aufrechterhaltung der Leistung trotz verschlechterter Muskelfunktion ermöglichen würde.

Darüber hinaus kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Vorliegen eines Placebo- oder testprotokollimmanenten „Verpflichtungseffektes“ für die Aufrechterhaltung der Leistung unter Kältebedingungen verantwortlich ist.

Insgesamt führte die Kälteapplikation vor und während einer Belastung unter Normaltemperaturbedingungen zwar nicht zu einer Verschlechterung der Leistung, allerdings deuten die Ergebnisse dennoch auf eine Verschlechterung der Muskelfunktion und des muskulären Energiestoffwechsels hin. Offenbar wurde durch die vorgenommene Kühlmaßnahme keine Erhöhung der Leistungsfähigkeit erreicht, vielmehr scheinen die Sportler ihre Leistung trotz der Kälteapplikation erbracht zu haben.

Vor dem Hintergrund einer bereits recht umfangreichen Basis an Studien zu den Aspekten der peripheren Hämodynamik und der Temperatureinflüsse auf das Herzkreislaufsystem wären weitere Untersuchungen im Bereich der kälteinduzierten Vorgänge in der Muskulatur und dem Zentralnervensystem wünschenswert. Die Einbeziehung der Elektromyographie sowie der Elektroenzephalographie stellen hier einen vielversprechenden Ansatz dar.

Bis zur weiteren Klärung der vorliegenden Wirkzusammenhänge kann die Kälteapplikation als vorbereitende oder begleitende Maßnahme von sportlichen Belastungen unter Normaltemperaturbedingungen nicht empfohlen werden.

V. Literatur

- Albertus, Y.,** R. Tucker, A. St Clair Gibson, E.V. Lambert, D.B. Hampson und T.D. Noakes. (2005). Effect of distance feedback on pacing strategy and perceived exertion during cycling. *Med Sci Sports Exerc* 37 (3): 461-8.
- Amann, M.,** M.W. Eldridge, A.T. Lovering, M.K. Stickland, D.F. Pegelow und J.A. Dempsey. (2006). Arterial oxygenation influences central motor output and exercise performance via effects on peripheral locomotor muscle fatigue in humans. *J Physiol* 15 (575 [Pt 3]): 937-52.
- Armstrong, L.E.** (2000). *Performing in Extreme Environments*. Champaign.
- Arngrímsson, S.A.,** D.S. Petitt, M.G. Stueck, D.K. Jorgensen und K.J. Cureton. (2004). Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat. *J Appl Physiol* 96 (5): 1867-74.
- Asmussen, G.,** G. Beckers-Bleukx und G. Maréchal. (1994). The force-velocity relation of the rabbit inferior oblique muscle; influence of temperature. *Pflugers Arch* 426 (6): 542-7.
- Astrand, P.O.** und I. Ryhming. (1954). A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. *J Appl Physiol* 7 (2): 218-21.
- Banfi, G.,** G. Lombardi, A. Colombini und G. Melegati. (2010). Whole-body cryotherapy in athletes. *Sports Med* 40 (6): 509-17.
- Barker, A.R.** und N. Armstrong. (2011). Exercise testing elite young athletes. *Med Sport Sci* 56: 106-25.
- Bennett, B.L.,** R.D. Hagan, K.A. Huey, C. Minson und D. Cain. 1995. Comparison of two cool vests on heat-strain reduction while wearing a firefighting ensemble. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 70 (4): 322-8.
- Bennett, L.A.,** J.M. Johnson, D.P. Stephens, A.R. Saad und D.L. Kellogg Jr. (2003). Evidence for a role for vasoactive intestinal peptide in active vasodilatation in the cutaneous vasculature of humans. In: *J Physiol* 1 (552 [Pt 1]): 223-32.

- Bergh, U.** und B. Ekblom. (1979). Influence of muscle temperature on maximal muscle strength and power output in human skeletal muscles. *Acta Physiol Scand* 107 (1): 33-7.
- Bergh, U.** und B. Ekblom. (1979). Physical performance and peak aerobic power at different body temperatures. *J Appl Physiol* 46 (5): 885-9.
- Bernard, C.** (1878). Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux. Neudruck der ersten Auflage, Paris.
- Bisswanger, H.** (2008). Enzyme Kinetics – Principles and Methods. Weinheim.
- Blomstrand, E.,** U. Bergh, B. Essén-Gustavsson und B. Ekblom. (1984). Influence of low muscle temperature on muscle metabolism during intense dynamic exercise. *Acta Physiol Scand* 120 (2): 229-36.
- Bogerd, N.,** C. Perret, C.P. Bogerd, R.M. Rossi und H.A. Daanen. (2010). The effect of pre-cooling intensity on cooling efficiency and exercise performance. *J Sports Sci* 28 (7): 771-9.
- Bolster, D.R.,** S.W. Trappe, K.R. Short, M. Scheffield-Moore, A.C. Parcell, K.M. Schulze und D.L. Costill. (1999). Effects of precooling on thermoregulation during subsequent exercise. *Med Sci Sports Exerc* 31 (2): 251-7.
- Booth, J.,** B.R. Wilsmore, A.D. Macdonald, A. Zeyl, S. Mcghee, D. Calvert, F.E. Marino, L.H. Storlien und N.A. Taylor NA. (2001). Whole-body pre-cooling does not alter human muscle metabolism during sub-maximal exercise in the heat. *Eur J Appl Physiol* 84 (6): 587-90.
- Booth, J.,** F. Marino und J.J. Ward. (1997). Improved running performance in hot humid conditions following whole body precooling. *Med Sci Sports Exerc* 29 (7): 943-9.
- Borg, G.A.** (1998). Borg's Perceived Exertion and Pain Scales. Human Kinetics, Champaign.
- Borg, G.A.** (1982). Psychophysical basis of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 14: 377-81.

- Bourdon, P.** Blood Lactate Transition Thresholds: Concepts and Controversies. In: C.J. Gore. (2000). *Physiological Tests for Elite Athletes*. Human Kinetics, Champaign: S. 60.
- Boushel, R.** (2003). Metabolic control of muscle blood flow during exercise in humans. *Can J Appl Physiol* 28 (5): 754-773.
- Braumann, K.-M.** (1991). Die „Laktatsenke“ – Eine Methode zur Ermittlung der individuellen Dauerleistungsgrenze. In: *Dtsch Z Sportmed* 42 (6): 240-46.
- Brengelmann, G.L.** (1993). Specialized brain cooling in humans? In: *FASEB J* 7 (12): 1148-53.
- Bristow, G.K.** und G.G. Giesbrecht. (1988). Contribution of exercise and shivering to recovery from induced hypothermia (31.2 degrees C) in one subject. *Aviat Space Environ Med* 59 (6): 549-52.
- Brooks, G.A.** und J. Mercier. (1994). Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the "crossover" concept. *J Appl Physiol* 76 (6): 2253-61.
- Bühl, A.** und P. Zöfel. (2002). SPSS 11. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. Pearson Studium, München.
- Cannon, W.B.** (1929). Organization for physiological homeostasis. In: *Physiol Rev* 9 (3): 399-431.
- Carter, S.L., C. Rennie** und M.A. Tarnopolsky. (2001). Substrate utilization during endurance exercise in men and women after endurance training. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 280 (6): E898-907.
- Chance, B., J. Im, S. Nioka** und M. Kushmerick. (2006). Skeletal muscle energetics with PNMR: personal views and historic perspectives. *NMR Biomed* 19 (7): 904-26.
- Cheung, S.S.** (2008). Neuromuscular response to exercise heat stress. *Med Sport Sci* 53: 39-60.
- Cheuvront, S.N., R. Carter** und M.N. Sawka. 2003. Fluid balance and endurance exercise performance. *Curr Sports Med Rep* 2 (4): 202-8.

- Christie, J.L.,** L.M. Sheldahl, F.E. Tristani, L.S. Wann, K.B. Sagar, S.G. Levandoski, M.J. Ptacin, K.A. Sobocinski und R.D. Morris. (1990). Cardiovascular regulation during head-out water immersion exercise. *J Appl Physiol* 69 (2): 657-64.
- Chrousos, G.P.** (2009). Stress and disorders of the stress system. *Nat Rev Endocrinol* 5 (7): 374-81.
- Clarke, N.D.,** D.P. Maclaren, T. Reilly und B. Drust. (2010). Carbohydrate ingestion and pre-cooling improves exercise capacity following soccer-specific intermittent exercise performed in the heat. *Eur J Appl Physiol* Dez. 16 (Epub ahead of print).
- Cooke, W.H.,** K.L. Ryan und V.A. Convertino. (2004). Lower body negative pressure as a model to study progression to acute hemorrhagic shock in humans. *J Appl Physiol* 96: 1249-1261.
- Cornwall, M.W.** (1994). Effect of temperature on muscle force and rate of muscle force production in men and women. *J Orthop Sports Phys Ther* 20 (2): 74-80.
- Cotter, J.D.** und N.A.S. Taylor. (2005). The distribution of cutaneous sudomotor and alliesthesial thermosensitivity in mildly heat-stressed humans: an open-loop approach. *J Physiol* 565 (1): 335-45.
- Cotter, J.D.,** G.G. Sleivert, W.S. Roberts und M.A. Febbraio. (2001). Effect of pre-cooling, with and without thigh cooling, on strain and endurance exercise performance in the heat. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 128 (4): 667-77.
- Coyle, E.F.** 2004. Fluid and fuel intake during exercise. *J Sports Sci* 22 (1): 39-55.
- Coyle, E.F.** und J. González-Alonso. (2001). Cardiovascular drift during prolonged exercise: new perspectives. *Exerc Sport Sci Rev* 29 (2): 88-92.
- Crandall, C.G.** (2008). Heat stress and baroreflex regulation of blood pressure. *Med Sci Sports Exerc* 40 (12): 2063-70.
- Crandall, C.G.** und J. González-Alonso. (2010). Cardiovascular function in the heat-stressed human. *Acta Physiol (Oxf)* 199 (4): 407-23.

- Crewe, H.**, R. Tucker und T.D. Noakes. (2008). The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions. *Eur J Appl Physiol* 103 (5): 569-77.
- Cui, J.**, S. Durand und C.G. Crandall. (2007). Baroreflex control of muscle sympathetic nerve activity during skin surface cooling. *J Appl Physiol* 103 (4): 1284-9.
- Cui, J.**, S. Durand, B.D. Levine und C.G. Crandall. (2005). Effect of skin surface cooling on central venous pressure during orthostatic challenge. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 289: H2429-H2433.
- Daanen, H.A.**, E.M. van Es und J.L. de Graaf. (2006). Heat strain and gross efficiency during endurance exercise after lower, upper, or whole body precooling in the heat. *Int J Sports Med* 27 (5): 379-88.
- De Ruiter, C.J.** und A. De Haan. (2000). Temperature effect on the force/velocity relationship of the fresh and fatigued human adductor pollicis muscle. *Pflugers Arch* 440 (1): 163-70.
- De Ruiter, C.J.**, D.A. Jones, A.J. Sargeant und A. De Haan. (1999). The measurement of force/velocity relationships of fresh and fatigued human adductor pollicis muscle. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 80 (4): 386-93.
- Deetjen, P.**, E.-J. Speckmann und J. Hescheler. (2005). Physiologie. Urban und Fischer, München.
- Dempsey, J.A.**, M. Amann, L.M. Romer und J.D. Miller. (2008). Respiratory system determinants of peripheral fatigue and endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 40 (3): 457-61.
- Deussen, A.** (2007). Hyperthermie und Hypothermie. Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System. *Anaesthesist* 56: 907-911.
- Drinkwater, E.** (2008). Effects of peripheral cooling on characteristics of local muscle. In: F.E. Marino (Hrsg.). Thermoregulation and human performance. Physiological and Biological Aspects. *Med Sport Sci*, Basel, Karger, Vol. 53: S. 74-88

- Drust, B.,** N.T. Cable und T. Reilly. (2000). Investigation of the effects of the pre-cooling on the physiological responses to soccer-specific intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol* 81 (1-2): 11-7.
- Duffield, R.,** R. Green, P. Castle und N. Maxwell. (2010). Precooling can prevent the reduction of self-paced exercise intensity in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 42 (3): 577-84.
- Durand, S.,** J. Cui, K.D. Williams und C.G. Crandall. (2004). Skin surface cooling improves orthostatic tolerance in normothermic individuals. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 286 (1): R199-205.
- Ebert, T.J.,** D.F. Stowe, J.A. Barney, J.H. Kalbfleisch und J.J. Smith. (1982). Summated circulatory responses of thermal and baroreflexes in humans. *J Appl Physiol* 52 (1): 184-9.
- Enoka, R.M.** und D.G. Stuart. (1992). Neurobiology of muscle fatigue. *J Appl Physiol* 72 (5): 1631-48.
- Eston, R.,** J. Faulkner, A. St Clair Gibson, T.D. Noakes und G. Parfitt. (2007). The effect of antecedent fatiguing activity on the relationship between perceived exertion and physiological activity during a constant load exercise task. *Psychophysiology* 44 (5): 779-86.
- Farquhar, W.B.** und W.L. Kenney. (1999). Age and renal prostaglandin inhibition during exercise and heat stress. *J Appl Physiol* 86 (6): 1936-43.
- Faulkner, J.A.,** E. Zerba und S.V. Brooks. (1990). Muscle temperature of mammals: cooling impairs most functional properties. *Am J Physiol* 259 (2 Pt 2): R259-65.
- Febbraio, M.A.,** D.L. Lambert, R.L. Starkie, J. Proietto und M. Hargreaves. (1998). Effect of epinephrine on muscle glycogenolysis during exercise in trained men. *J Appl Physiol* 84 (2): 465-70.
- Febbraio, M.A.,** M.F. Carey, R.J.Snow, C.G. Stathis und M. Hargreaves. (1996a). Influence of elevated muscle temperature on metabolism during intense, dynamic exercise. *Am J Physiol* 271 (5 Pt 2): R1251-5.

- Febbraio, M.A., R.J. Snow, C.G. Stathis, M. Hargreaves und M.F. Carey.** (1996b). Blunting the rise in body temperature reduces muscle glycogenolysis during exercise in humans. *Exp Physiol* 81 (4): 685-93.
- Frank, S.M., C.G. Cattaneo, M.B. Wieneke-Brady, H. El-Rahmany, N. Gupta, J.A. Lima und D.S. Goldstein.** (2002). Threshold for adrenomedullary activation and increased cardiac work during mild core hypothermia. *Clin Sci (Lond)* 102 (1): 119-25.
- Gabrielsen, A., L.B. Johansen und P. Norsk.** (1993). Central cardiovascular pressures during graded water immersion in humans. *J Appl Physiol* 75 (2): 581-5.
- Galloway, S.D. und R.J. Maughan.** (1997). Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc* 29 (9): 1240-9.
- Garcin, M., H. Vandewalle und H. Monod.** (1999). A new rating scale of perceived exertion based on subjective estimation of exhaustion time: a preliminary study. *Int J Sports Med* 20 (1): 40-3.
- Gavhed, D.C., R. Nielsen und I. Holmér.** (1991). Thermoregulatory and subjective responses of clothed men in the cold during continuous and intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 63 (1): 29-35.
- Giesbrecht, G.G. und G.K. Bristow.** (1992). A second postcooling afterdrop: more evidence for a convective mechanism. *J Appl Physiol* 73 (4): 1253-8.
- Giesbrecht, G.G., M.S. Goheen, C.E. Johnston, G.P. Kenny, G.K. Bristow und J.S. Hayward.** (1997). Inhibition of shivering increases core temperature afterdrop and attenuates rewarming in hypothermic humans. *J Appl Physiol* 83 (5): 1630-4.
- Gladden, L.B.** (2004). Lactate metabolism: a new paradigm for the third millennium. *J Physiol* 558 (Pt 1): 5-30.
- González-Alonso, J. und J.A. Calbet.** (2003). Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. *Circulation* 107 (6): 824-30.

- González-Alonso, J.,** C. Teller, S.L. Andersen, F.B. Jensen, T. Hyldig und B. Nielsen. (1999b). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* 86 (3): 1032-9.
- González-Alonso, J.,** C.G. Crandall und J.M. Johnson. (2008). The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *J Physiol* 586 (1): 45-53.
- González-Alonso, J.,** J.A. Calbet und B. Nielsen. (1999a). Metabolic and thermodynamic responses to dehydration-induced reductions in muscle blood flow in exercising humans. *J Physiol* 520 (Pt 2): 577-89.
- González-Alonso, J.,** J.A. Calbet und B. Nielsen. (1999a). Metabolic and thermodynamic responses to dehydration-induced reductions in muscle blood flow in exercising humans. *J Physiol* 520 (Pt 2): 577-89.
- González-Alonso, J.,** J.A. Calbet und B. Nielsen. 1998. Muscle blood flow is reduced with dehydration during prolonged exercise in humans. *J Physiol* 513 (Pt 3): 895-905.
- González-Alonso, J.,** R. Mora-Rodríguez und E.F. Coyle. (2000). Stroke volume during exercise: interaction of environment and hydration. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 278 (2): H321-30.
- Goosey-Tolfrey, V.,** M. Swainson, C. Boyd, G. Atkinson und K. Tolfrey. (2008). The effectiveness of hand cooling at reducing exercise-induced hyperthermia and improving distance-race performance in wheelchair and able-bodied athletes. *J Appl Physiol* 105 (1): 37-43.
- Haeufle, D.F.,** S. Grimmer und A. Seyfarth. (2010). The role of intrinsic muscle properties for stable hopping--stability is achieved by the force-velocity relation. *Bioinspir Biomim* 5 (1): 16004.
- Haman, F.,** F. Péronnet, G.P. Kenny, D. Massicotte, C. Lavoie, C. Scott und J.M. Weber. (2002). Effect of cold exposure on fuel utilization in humans: plasma glucose, muscle glycogen, and lipids. *J Appl Physiol* 93 (1): 77-84.

- Harms, M.P., J.J. van Lieshout, M. Jenstrup, F. Pott und N.H. Secher.** (2003). Postural effects on cardiac output and mixed venous oxygen saturation in humans. *Exp Physiol* 88 (5): 611-6.
- Hasegawa, H., T. Takatori, T. Komura und M. Yamasaki.** (2006). Combined effects of pre-cooling and water ingestion on thermoregulation and physical capacity during exercise in a hot environment. *J Sports Sci* 24 (1): 3-9.
- Heistad, D.D., F.M. Abboud, A.L. Mark und P.G. Schmid.** (1973). Interaction of thermal and baroreceptor reflexes in man. *J Appl Physiol* 35 (5): 581-6.
- Hessemer, V., D. Langusch, L.K. Brück, R.H. Bödeker und T. Breidenbach.** (1984). Effect of slightly lowered body temperatures on endurance performance in humans. *J Appl Physiol* 57 (6): 1731-7.
- Hew-Butler, T.** (2010). Arginine vasopressin, fluid balance and exercise: is exercise-associated hyponatraemia a disorder of arginine vasopressin secretion? *Sports Med* 40 (6): 459-79.
- Heylen, E., J. Mansourati, S. Thioub, B. Saïag und F. Guerrero.** (2008). Effect of exercise training on cutaneous microcirculation in rats. *J Sports Med Phys Fitness* 48 (2): 246-51.
- Hoedemaekers, C.W., M. Ezzahti, A. Gerritsen und J.G. van der Hoeven.** (2007). Comparison of cooling methods to induce and maintain normo- and hypothermia in intensive care unit patients: a prospective intervention study. *Crit Care* 11 (4): R91.
- Holzer, M.** (2008). Devices for rapid induction of hypothermia. *Eur J Anaesthesiol Suppl* 42: 31-8.
- Hornery, D.J., S. Papalia, I. Mujika und A. Hahn.** (2005). Physiological and performance benefits of halftime cooling. *J Sci Med Sport* 8 (1): 15-25.
- Hsu, J.J., G. Zaharchuk und G.H. Glover.** (2009). Rapid methods for concurrent measurement of the RF-pulse flip angle and the longitudinal relaxation time. *Magn Reson Med* 61 (6): 1319-25.

- Ifuku, H.**, K. Moriyama, K. Arai und Y. Shiraishi-Hichiwa. (2007). Regulation of cardiac function during a cold pressor test in athletes and untrained subjects. *Eur J Appl Physiol* 101 (1): 75-9.
- Ikeda, S.**, H. Kawamoto, K. Kasaoka, Y. Hitomi, T. Kizaki, Y. Sankai, H. Ohno, S. Haga und T. Takemasa. (2006). Muscle type-specific response of PGC-1 alpha and oxidative enzymes during voluntary wheel running in mouse skeletal muscle. *Acta Physiol (Oxf)* 188 (3-4): 217-23.
- IUPS Thermal Commission.** (2001). Glossary of terms for thermal physiology. In: *Jpn J Physiol* 51 (2): 245-80.
- Janský, L.**, P. Srámek, J. Savlíková, B. Ulicný, H. Janáková und K. Horký. (1996). Change in sympathetic activity, cardiovascular functions and plasma hormone concentrations due to cold water immersion in men. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 74 (1-2): 148-52.
- Jimenez, C.**, J. Regnard, C. Robinet, L. Mourot, D. Gomez-Merino, M. Chennaoui, Y. Jammes, G. Dumoulin, A.V. Desruelle und B. Melin. 2010. Whole body immersion and hydromineral homeostasis: effect of water temperature. *Eur J Appl Physiol* 108 (1): 49-58.
- Johnson, J.M.** und D.W. Proppe. (1996). Cardiovascular adjustments to heat stress. In: M. Fregly und C. Blatteis (Hrsg.). *Handbook of Physiology. Environmental Physiology*. New York. S. 215-43.
- Johnson, J.M.** und L.B. Rowell. (1975). Forearm skin and muscle vascular responses to prolonged leg exercise in man. *J Appl Physiol* 39 (6): 920-4.
- Johnson, J.M.** und M.K. Park. (1981). Effect of upright exercise on threshold for cutaneous vasodilation and sweating. *J Appl Physiol* 50: 814-18.
- Johnson, J.M.**, T.C. Yen, K. Zhao und W.A. Kosiba. (2004). Sympathetic, sensory, and nonneural contributions to the cutaneous vasoconstrictor response to local cooling. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 288: H1573-H1579.

- Jones, D.A.,** C.J. de Ruiter und A. de Haan. (2006). Change in contractile properties of human muscle in relationship to the loss of power and slowing of relaxation seen with fatigue. *J Physiol* 576 (Pt 3): 913-22.
- Joseph, T.,** B. Johnson, R.A. Battista, G. Wright, C. Dodge, J.P. Porcari, J.J. de Koning und C. Foster. (2008). Perception of fatigue during simulated competition. *Med Sci Sports Exerc* 40 (2): 381-6.
- Joyner, M.J.** und D.P. Casey. The catecholamines strike back. What NO does not do. *Circ J* 73 (10): 1783-92.
- Kay, D.,** D.R. Taaffe und F.E. Marino. (1999). Whole-body pre-cooling and heat storage during self-paced cycling performance in warm humid conditions. *J Sports Sci* 17 (12): 937-44.
- Kellogg, D.L.** Jr. (2006). In vivo mechanisms of cutaneous vasodilation and vasoconstriction in humans during thermoregulatory challenges. *J Appl Physiol* 100: 1709-18.
- Kellogg, D.L.** Jr., J.M. Johnson und W.A. Kosiba. (1990). Baroreflex control of the cutaneous active vasodilator system in humans. *Circ Res* 66 (5): 1420-6.
- Kelsey, R.M.,** S.M. Patterson, M. Barnard und B.S. Alpert. (2000). Consistency of hemodynamic responses to cold stress in adolescents. *Hypertension* 36: 1013–1017.
- Kenny, G.P.,** J.E. Murrin, W.S. Journeay und F.D. Reardon. (2006). Differences in the postexercise threshold for cutaneous active vasodilation between men and women. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290: R172-R179.
- Kent-Braun, J.A.** (1999). Central and peripheral contributions to muscle fatigue in humans during sustained maximal effort. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 80 (1): 57-63.
- Kinsella, S.M.** und J.P. Tuckey. (2001). Perioperative bradycardia and asystole: relationship to vasovagal syncope and the Bezold-Jarisch reflex. *Br J Anaesth* 86 (6): 859-68.
- Kobayashi, S.** (1988). Temperature-sensitive neurons in the hypothalamus; a new hypothesis that they act as thermostats, not as transducers. *Prog Neurobiol*, 32: 103-35.

- Kondo, N.**, H. Tominaga, M. Shibasaki, K. Aoki, S. Okada und T. Nishiyasu. (2000). Effects of exercise intensity on the sweating response to a sustained static exercise. *J Appl Physiol* 88 (5): 1590-6.
- Kondo, N.**, T. Nishiyasu, Y. Inoue und S. Koga. (2010). Non-thermal modification of heat-loss responses during exercise in humans. *Eur J Appl Physiol* 110 (3): 447-58.
- Kraeuchi, K.** und A. Wirz-Justice. (1994). Circadian rhythm of heat production, heart rate, and skin and core temperature under unmasking conditions in men. *Am J Physiol*, 267: R819-R829.
- Kregel, K.C.**, D.R. Seals und R. Callister. 1992. Sympathetic nervous system activity during skin cooling in humans: relationship to stimulus intensity and pain sensation. *J Physiol* 454: 359-71.
- Kruk, B.**, H. Pekkarinen, M. Harri, K. Manninen und O. Hanninen. (1990). Thermoregulatory responses to exercise at low ambient temperature performed after precooling or preheating procedures. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 59 (6): 416-20.
- Layden, J.D.**, M.J. Patterson und M.A. Nimmo. (2002). Effects of reduced ambient temperature on fat utilization during submaximal exercise. *Med Sci Sports Exerc* 34 (5): 774-9.
- Lee, D.T.** und E.M. Haymes. (1995). Exercise duration and thermoregulatory responses after whole body precooling. *J Appl Physiol* 79 (6): 1971-6.
- Leweke, F.**, K. Brück und H. Olschewski. (1995). Temperature effects on ventilatory rate, heart rate, and preferred pedal rate during cycle ergometry. *J Appl Physiol* 79 (3): 781-5.
- Marcora, S.M.** (2008). Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance? *Eur J Appl Physiol* 104 (5): 929-31; author reply 933-5.
- Marino, F.E.** (2002). Methods, advantages, and limitations of body cooling for exercise performance. *Br J Sports Med* 36: 89-94.
- Marino, F.E.** (2004). Anticipatory regulation and avoidance of catastrophe during exercise-induced hyperthermia. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol* 139 (4): 561-9.

- Marino, F.E.** (2009). Self-paced endurance performance in the heat is explained by anticipatory regulation. *J Appl Physiol* 107 (2): 632.
- Marino, F.E.,** M.I. Lambert und T.D. Noakes. (2004). Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *J Appl Physiol* 96 (1): 124-30.
- Markworth, P.** Sportmedizin – Physiologische Grundlagen. (2001). Reinbek.
- Marsh, D.** und G. Sleivert. (1999). Effect of precooling on high intensity cycling performance. *Br J Sports Med* 33 (6): 393-7.
- Martin, D.,** K. Carl und K. Lehnertz. (2001). Handbuch Trainingslehre. Verlag Hofmann, Schorndorf.
- Martin, P.G.,** F.E. Marino, J. Rattey, D. Kay und J. Cannon. (2005). Reduced voluntary activation of human skeletal muscle during shortening and lengthening contractions in whole body hyperthermia. *Exp Physiol* 90 (2): 225-36.
- Matzen, S.,** G. Perko, S. Groth, D.B. Friedman und N.H. Secher. (1991). Blood volume distribution during head-up tilt induced central hypovolaemia in man. *Clin Physiol* 11 (5): 411-22.
- Maughan, R.J.** und S. Shirreffs. 2004. Exercise in the heat: challenges and opportunities. *J Sports Sci* 22 (10): 917-27.
- Maughan, R.J.,** M. Shirreffs und P. Watson. (2007). Exercise, heat, hydration and the brain. *J Am Coll Nutr* 26 (5 Suppl): 604S-612S.
- McArdle, W.D.,** F.I. Katch und V.L. Katch. (2009). Sports and Exercise Nutrition. Lippincott Williams und Wilkins, Baltimore.
- Melkani, G.C.,** A. Cammarato und S.I. Bernstein. (2006). alphaB-crystallin maintains skeletal muscle myosin enzymatic activity and prevents its aggregation under heat-shock stress. *J Mol Biol* 358 (3): 635-45.
- Mitchell, J.B.,** B.K. McFarlin und J.P. Dugas. (2003). The effect of pre-exercise cooling on high intensity running performance in the heat. *Int J Sports Med* 24 (2): 118-24.

- Momen, A.,** K. Thomas, C. Blaha, A. Gahremanpour, A. Mansoor, U.A. Leuenberger und L.I. Sinoway. Renal vasoconstrictor responses to static exercise during orthostatic stress in humans: effects of the muscle mechano- and the baroreflexes. *J Physiol* 15; 573(Pt 3): 819-25.
- Morimoto, T.** und T. Itoh. 1998. Thermoregulation and body fluid osmolality. *J Basic Clin Physiol Pharmacol* 9 (1): 51-72.
- Morrison, S.,** G.G. Sleivert und S.S. Cheung. (2004). Passive hyperthermia reduces voluntary activation and isometric force production. *Eur J Appl Physiol* 91 (5-6): 729-36.
- Morrison, S.,** J.D. Cotter, S.S. Cheung. (2006). Are the Benefits of Precooling Overestimated? *Med Sci Sports Exerc* 38 (5): S59.
- Mortensen, S.P.,** E.A. Dawson, C.C. Yoshiga, M.K. Dalsgaard, R. Damsgaard, N.H. Secher und J. González-Alonso. (2005). Limitations to systemic and locomotor limb muscle oxygen delivery and uptake during maximal exercise in humans. *J Physiol* 566 (Pt 1): 273-85.
- Mosteller, R.D.** (1987). Simplified Calculation of Body Surface Area. In: *N Engl J Med* 22; 317 (17): 1098.
- Mourot, L.,** M. Bouhaddi, E. Gandelin, S. Cappelle, G. Dumoulin, J.P. Wolf, J.D. Rouillon und J. Regnard. (2008). Cardiovascular autonomic control during short-term thermoneutral and cool head-out immersion. *Aviat Space Environ Med* 79 (1): 14-20.
- Mündel, T.,** S.J. Bunn, P.L. Hooper und D.A. Jones. (2007). The effects of face cooling during hyperthermic exercise in man: evidence for an integrated thermal, neuroendocrine and behavioural response. *Exp Physiol* 92 (1): 187-95.
- Murrant, C.L.** und I.H. Sarelius. (2000). Coupling of muscle metabolism and muscle blood flow in capillary units during contraction. *Acta Physiol Scand* 168 (4): 531-41.
- Nielsen, B.,** G. Savard, E.A. Richter, M. Hargreaves und B. Saltin. (1990). Muscle blood flow and muscle metabolism during exercise and heat stress. *J Appl Physiol* 69 (3): 1040-6.

- Nielsen, B.,** J.R. Hales, S. Strange, N.J. Christensen, J. Warberg und B. Saltin. (1993). Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J Physiol* 460: 467-85.
- Nielsen, B.,** T. Hyldig, F. Bidstrup, J. González-Alonso und G.R. Christoffersen. (2001). Brain activity and fatigue during prolonged exercise in the heat. *Pflugers Arch* 442 (1): 41-8.
- Noakes, T.D.** (2004). Linear relationship between the perception of effort and the duration of constant load exercise that remains. *J Appl Physiol* 96 (4): 1571-2.
- Noakes, T.D.** (2007). The central governor model of exercise regulation applied to the marathon. *Sports Med* 37 (4-5): 374-7.
- Noakes, T.D.** und A. St Clair Gibson. (2004). Logical limitations to the "catastrophe" models of fatigue during exercise in humans. *Br J Sports Med* 38 (5): 648-9.
- Noakes, T.D.,** A. St Clair Gibson und E.V. Lambert. (2005). From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans: summary and conclusions. *Br J Sports Med* 39 (2): 120-4.
- Noakes, T.D.,** J.E. Peltonen und H.K. Rusko. (2001). Evidence that a central governor regulates exercise performance during acute hypoxia and hyperoxia. *J Exp Biol* 204 (Pt 18): 3225-34.
- Nybo, L.** (2008). Hyperthermia and fatigue. *J Appl Physiol* 104 (3): 871-8.
- Nybo, L.** (2010a). Cycling in the heat: performance perspectives and cerebral challenges. *Scand J Med Sci Sports* 20 Suppl. 3: 71-9.
- Nybo, L.** (2010b). CNS fatigue provoked by prolonged exercise in the heat. *Front Biosci* 2: 779-92.
- Nybo, L.** und B. Nielsen. (2001). Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia. *J Appl Physiol* 91 (5): 2017-23.
- Nybo, L.** und B. Nielsen. (2001a). Middle cerebral artery blood velocity is reduced with hyperthermia during prolonged exercise in humans. *J Physiol* 534 (Pt 1): 279-86.

- Nybo, L.** und B. Nielsen. (2001b). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol* 91 (3): 1055-60.
- Nybo, L.**, T. Jensen, B. Nielsen und J. González-Alonso. (2001). Effects of marked hyperthermia with and without dehydration on VO₂ kinetics during intense exercise. *J Appl Physiol* 90 (3): 1057-64.
- O'Brien, C.**, W.J. Tharion, I.V. Sils und J.W. Castellani. (2007). Cognitive, psychomotor, and physical performance in cold air after cooling by exercise in cold water. *Aviat Space Environ Med* 78 (6): 568-73.
- Oksa, J.** (2002). Neuromuscular performance limitations in cold. *Int J Circumpolar Health* 61 (2): 154-62.
- Olschewski, H.** und K. Brück. (1988). Thermoregulatory, cardiovascular, and muscular factors related to exercise after precooling. *J Appl Physiol* 64 (2): 803-11.
- Park, K.S.**, J.K. Choi und Y.S. Park. (1999). Cardiovascular regulation during water immersion. *Appl Human Sci* 18: 233–241.
- Paterson, D.J.** (1996). Antiarrhythmic mechanisms during exercise. *J Appl Physiol* 80 (6): 1853-62.
- Pérgola, P.E.**, D.L. Kellogg Jr., J.M. Johnson, W.A. Kosiba und D.E. Solomon. (1993). Role of sympathetic nerves in the vascular effects of local temperature in human forearm skin. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 265: H785-H792.
- Philp, A.**, A.L. Macdonald und P.W. Watt. Lactate--a signal coordinating cell and systemic function. *J Exp Biol* 208 (Pt 24): 4561-75.
- Price, M.J.** und M.I. Mather. (2004). Comparison of lower- vs. upper-body cooling during arm exercise in hot conditions. *Aviat Space Environ Med* 75 (3): 220-6.
- Price, M.J.**, C. Boyd und V.L. Goosey-Tolfrey. (2009). The physiological effects of pre-event and midevent cooling during intermittent running in the heat in elite female soccer players. *Appl Physiol Nutr Metab* 34 (5): 942-9.

- Quod, M.**, D.T. Martin, P.B. Laursen, A.S. Gardner, T.R. Ebert, S.L. Halson, F.E. Marino, A.G. Hahn und C.J. Gore. (2005). Effects of a novel combination precooling strategy on cycling time-trial performance. *Med Sci Sports Exerc* 37 (5): S169.
- Quod, M.J.**, D.T. Martin und P.B. Laursen. (2006). Cooling athletes before competition in the heat: comparison of techniques and practical considerations. *Sports Med* 36 (8): 671-82.
- Quod, M.J.**, D.T. Martin, P.B. Laursen, A.S. Gardner, S.L. Halson, F.E. Marino, M.P. Tate, D.E. Mainwaring, C.J. Gore und A.G. Hahn. (2008). Practical precooling: Effect on cycling time trial performance in warm conditions. *J Sports Sci* 23: 1-11.
- Ranatunga, K.W.**, B. Sharpe und B. Turnbull. (1987). Contractions of a human skeletal muscle at different temperatures. *J Physiol* 390: 383-95.
- Refinetti, R.** (1997). Homeostasis and circadian rhythmicity in the control of body temperature. *Ann NY Acad Sci*, 813: 63-70.
- Reilly, T.**, B. Drust und W. Gregson. (2006). Thermoregulation in elite athletes. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 9 (6): 666-71.
- Roelands, B.** und R. Meeusen. (2010). Alterations in central fatigue by pharmacological manipulations of neurotransmitters in normal and high ambient temperature. *Sports Med* 40 (3): 229-46.
- Romanovsky, A.A.** (2007). Thermoregulation: some concepts have changed. Functional architecture of the thermoregulatory system. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 292 (1): R37-46.
- Rome, L.C.** (1990). Influence of temperature on muscle recruitment and muscle function in vivo. *Am J Physiol* 259 (2 Pt 2): R210-22.
- Rutkove, S.B.** (2001). Effects of temperature on neuromuscular electrophysiology. *Muscle Nerve* 24 (7): 867-82.
- Sahuquillo, J.**, J. Pérez-Bárcena, A. Biestro, E. Zavala, M.A. Merino, A. Vilalta, M.A. Poca, A. Garnacho, R. Adalia, J. Homar und J.A. Llompert-Pou. (2008). Intravascular cooling for rapid induction of moderate hypothermia in severely head-injured patients: results of a multicenter study (IntraCool). *Intensive Care Med* Nov 26.

- Sarelius, I.** und U. Pohl. (2010). Control of muscle blood flow during exercise: local factors and integrative mechanisms. *Acta Physiol (Oxf)* 199 (4): 349-65.
- Savard, G.K.**, B. Nielsen, J. Laszczynska, B.E. Larsen und B. Saltin. (1988). Muscle blood flow is not reduced in humans during moderate exercise and heat stress. *J Appl Physiol* 64 (2): 649-57.
- Sawka, M.N.** und A.J. Young. (2006). Physiological systems and their responses to conditions of heat and cold. In: C.M. Tipton (Hrsg.). *ACSM's Advanced Exercise Physiology*. Baltimore. S. 535-63.
- Schertel, E.R.** (1998). Assessment of left-ventricular function. *Thorac Cardiovasc Surg* 46 Suppl. 2: 248-54.
- Schmidt, V.** und K. Brück. (1981). Effect of a precooling maneuver on body temperature and exercise performance. *J Appl Physiol* 50 (4): 772-8.
- Scremin, G.** und W.L. Kenney. (2004). Aging and the skin blood flow response to the unloading of baroreceptors during heat and cold stress. *J Appl Physiol* 96 (3): 1019-25.
- Selye, H.** (1956). *The Stress of Life*. New York.
- Shephard, R.J.** (1993). Metabolic adaptations to exercise in the cold. An update. *Sports Med* 16 (4): 266-89.
- Sherrington, C.S.** (1941). *Man on His Nature*. Cambridge.
- Shibasaki, M.**, N. Kondo und C.G. Crandall. Non-thermoregulatory modulation of sweating in humans. *Exerc Sport Sci Rev* 31 (1): 34-9.
- Sleivert, G.G.**, J.D. Cotter, W.S. Roberts und M.A. Febbraio. (2001). The influence of whole-body vs. torso pre-cooling on physiological strain and performance of high-intensity exercise in the heat. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 128 (4): 657-66.
- Srámek, P.**, M. Simecková, L. Janský, J. Savlíková und S. Vybíral. 2000. Human physiological responses to immersion into water of different temperatures. *Eur J Appl Physiol* 81 (5): 436-42.

- St Clair Gibson, A.,** D.A. Baden, M.I. Lambert, E.V. Lambert, Y.X. Harley, D. Hampson, V.A. Russell und T.D. Noakes. (2003). The conscious perception of the sensation of fatigue. *Sports Med* 33 (3): 167-76.
- Stocks, J.M.,** N.A. Taylor, M.J. Tipton und J.E. Greenleaf. (2004). Human physiological responses to cold exposure. In: *Aviat Space Environ Med* 75 (5): 444-57.
- Tatterson, A.J.,** A.G. Hahn, D.T. Martin und M.A. Febbraio. (2000). Effects of heat stress on physiological responses and exercise performance in elite cyclists. *J Sci Med Sport* 3 (2): 186-93.
- Thomas, M.M.,** S.S. Cheung, G.C. Elder und G.G. Sleivert. (2006). Voluntary muscle activation is impaired by core temperature rather than local muscle temperature. *J Appl Physiol* 100 (4): 1361-9.
- Todd, G.,** J.E. Butler, J.L. Taylor und S.C. Gandevia. (2005). Hyperthermia: a failure of the motor cortex and the muscle. *J Physiol* 563 (Pt 2): 621-31.
- Tucker, R.** (2008). Thermoregulation, fatigue and exercise modality. *Med Sport Sci* 53: 26-38.
- Tucker, R.,** L. Rauch, Y.X. Harley und T.D. Noakes. (2004). Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflugers Arch* 448 (4): 422-30.
- Tucker, R.,** T. Marle, E.V. Lambert und T.D. Noakes. (2006). The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *J Physiol* 574 (Pt 3): 905-15.
- Tyler, C.J.** und C. Sunderland. (2011). Cooling the neck region during exercise in the heat. *J Athl Train* 46 (1): 61-8.
- Tyler, C.J.,** P. Wild und C. Sunderland. (2010). Practical neck cooling and time-trial running performance in a hot environment. *Eur J Appl Physiol* 110 (5): 1063-74.
- Ückert, S.** und W. Joch. (2007). Effects of warm-up and precooling on endurance performance in the heat. *Br J Sports Med* 41 (6): 380-4.

- Ulmer, H.V.** (1996). Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback. *Experientia* 52 (5): 416-20.
- Vallerand, A.L.** und I. Jacobs. (1989). Rates of energy substrates utilization during human cold exposure. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 58 (8): 873-8.
- Vallerand, A.L.** und I. Jacobs. (1992). Energy metabolism during cold exposure. *Int J Sports Med* 13: S191-S193.
- Vallerand, A.L., J. Lupien** und L.J. Bukowiecki. (1983). Interactions of cold exposure and starvation on glucose tolerance and insulin response. *Am J Physiol* 245 (6): E575-81.
- Veicsteinas, A., G. Ferretti** und D.W. Rennie. (1982). Superficial shell insulation in resting and exercising men in cold water. *J Appl Physiol* 2: 1557-64.
- Walters, T.J., K.L. Ryan, L.M. Tate** und P.A. Mason. (2000). Exercise in the heat is limited by a critical internal temperature. *J Appl Physiol* 89 (2): 799-806.
- Wang, Z., Y. Kontani, Y. Sato, T. Mizuno, N. Mori** und H. Yamashita. (2003). Muscle type difference in the regulation of UCP3 under cold conditions. *Biochem Biophys Res Commun* 305 (2): 244-9.
- Weir, J.P., T.W. Beck, J.T. Cramer** und T.J. Housh. (2006). Is fatigue all in your head? A critical review of the central governor model. *Br J Sports Med* 40 (7): 573-86
- Wendt, D., L.J. van Loon** und W.D. Lichtenbelt. (2007). Thermoregulation during exercise in the heat: strategies for maintaining health and performance. *Sports Med* 37 (8): 669-82.
- White, A.T., S.L. Davis, T.E. Wilson.** (2003). Metabolic, thermoregulatory, and perceptual responses during exercise after lower vs. whole body pre-cooling. *J Appl Physiol* 94: 1039-44.
- Wilmore, J.H.** und D.L. Costill. (2004). *Physiology of Sport and Exercise. Human Kinetics, Hong Kong.*
- Wilmore, J.H., D.L. Costill** und W.L. Kenney. (2008). *Physiology of Sport and Exercise. Champaign.*

- Wilson, T.E.,** C.L. Sauder, M.L. Kearney, N.T. Kuipers, U.A. Leuenberger, K.D. Monahan und C.A. Ray. (2007). Skin-surface cooling elicits peripheral and visceral vasoconstriction in humans. *J Appl Physiol* 103 (4): 1257-62.
- Wilson, T.E.,** J. Cui, R. Zhang, S. Witkowski und C.G. Crandall. (2002). Skin cooling maintains cerebral blood flow velocity and orthostatic tolerance during tilting in heated humans. *J Appl Physiol* 93 (1): 85-91.
- Wilson, T.E.,** S.C. Johnson, J.H. Petajan, S.L. Davis, E. Gappmaier, M.J. Luetkemeier und A.T. White. (2002). Thermal regulatory responses to submaximal cycling following lower-body cooling in humans. *Eur J Appl Physiol* 88 (1-2): 67-75.
- Winker, R.,** W. Prager, A. Haider, B. Salameh und H.W. Rüdiger. (2005). Schellong test in orthostatic dysregulation: a comparison with tilt-table testing. In: *Wien Klin Wochenschr* 117 (1-2): 36-41.
- Wittert, G.A.,** H.K. Or, J.H. Livesey, A.M. Richards, R.A. Donald und E.A. Espiner. 1992. Vasopressin, corticotrophin-releasing factor, and pituitary adrenal responses to acute cold stress in normal humans. *J Clin Endocrinol Metab* 75 (3): 750-5.
- Wolff, C.B.** (2007). Normal cardiac output, oxygen delivery and oxygen extraction. *Adv Exp Med Biol* 599: 169-82.
- Yamazaki, F.** und R. Sone. (2000). Modulation of arterial baroreflex control of heart rate by skin cooling and heating in humans. *J Appl Physiol* 88 (2): 393-400.
- Yanagimoto, S.,** T. Kuwahara, Y. Zhang, S. Koga, Y. Inoue und N. Kondo. (2003). Effects of exercise intensity on sweating and skin blood flow responses at the onset of dynamic exercise in mildly heated human. *Am J Physiol Regul Integr Com Physiol* 285: R200-R207.
- Yona, M.** (1997). Effects of cold stimulation of human skin on motor unit activity. *Jpn J Physiol* 47 (4): 341-8.
- Young, A.J.,** M.N. Sawka und L. Levine. (1995). Metabolic and thermal adaptations from endurance training in hot or cold water. *J Appl Physiol* 8: 793-801.

VI. Anhang

VI.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Vereinfachte, schematische Übersicht des Untersuchungsgangs.....	30
Abbildung 2	Schematische Darstellung der Laboruntersuchung	32
Abbildung 3	Schematische Darstellung der ermittelten Messparameter und die zugehörigen Messzeitpunkte im Laktatsenkentest .	33
Abbildung 4	Schematische Darstellung der ermittelten Messparameter und die zugehörigen Messzeitpunkte in den Schellongtests	34
Abbildung 5	Schematische Darstellung der Felduntersuchung der Maritimen Fünfkämpfer mit den ermittelten Messparametern und den zugehörigen Messzeitpunkten.....	36
Abbildung 6	Schematische Darstellung der Felduntersuchung der Militärischen Fünfkämpfer mit den ermittelten Messparametern und den zugehörigen Messzeitpunkten	37
Abbildung 7	Borg RPE Scale	47
Abbildung 8	Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests I (Maritime Fünfkämpfer)	48
Abbildung 9	Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests I (Militärische Fünfkämpfer)	49
Abbildung 10	Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests I (Maritime Fünfkämpfer)	50
Abbildung 11	Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests I (Militärische Fünfkämpfer).....	51
Abbildung 12	Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests II (Maritime Fünfkämpfer).....	52
Abbildung 13	Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests II (Militärische Fünfkämpfer)	53
Abbildung 14	Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests II (Maritime Fünfkämpfer).....	54
Abbildung 15	Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests II (Militärische Fünfkämpfer).....	55
Abbildung 16	Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests III (Maritime Fünfkämpfer).....	56
Abbildung 17	Herzfrequenzverlauf während des Schellongtests III (Militärische Fünfkämpfer)	57
Abbildung 18	Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests III (Maritime Fünfkämpfer).....	58
Abbildung 19	Systolischer und Diastolischer Blutdruck während des Schellongtests III (Militärische Fünfkämpfer)	59
Abbildung 20	Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem Sternum) während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer) ...	60
Abbildung 21	Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem Sternum) während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer)	61
Abbildung 22	Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf der Stirn) während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer) ...	62
Abbildung 23	Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf der Stirn) während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer)	63

Abbildung 24	Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem M.gastrocnemius) während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer).....	64
Abbildung 25	Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem M.gastrocnemius) während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer)	64
Abbildung 26	Körperkerntemperaturverlauf (tympanal gemessen) während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer).....	65
Abbildung 27	Körperkerntemperaturverlauf (tympanal gemessen) während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer).....	66
Abbildung 28	Herzfrequenzverlauf während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer).....	67
Abbildung 29	Herzfrequenzverlauf während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer)	68
Abbildung 30	Blutlaktatkurve während des Laktatsenkentests (Maritime Fünfkämpfer).....	69
Abbildung 31	Blutlaktatkurve während des Laktatsenkentests (Militärische Fünfkämpfer).....	70
Abbildung 32	Maximale Sauerstoffaufnahme im Rampentest und im Stufentest (Maritime Fünfkämpfer).....	71
Abbildung 33	Maximale Sauerstoffaufnahme im Rampentest und im Stufentest (Militärische Fünfkämpfer)	72
Abbildung 34	Maximaler Respiratorischer Quotient im Rampentest und im Stufentest (Maritime Fünfkämpfer).....	72
Abbildung 35	Maximaler Respiratorischer Quotient im Rampentest und im Stufentest (Militärische Fünfkämpfer)	73
Abbildung 36	Belastungsempfinden nach Borg im Stufentest (Maritime Fünfkämpfer).....	74
Abbildung 37	Belastungsempfinden nach Borg im Stufentest (Militärische Fünfkämpfer).....	75
Abbildung 38	Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf dem Sternum) während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)	76
Abbildung 39	Hauttemperaturverlauf (gemessen mittig auf der Stirn) während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)	77
Abbildung 40	Hauttemperaturverlauf auf dem M.gastrocnemius (gemessen mittig auf dem M. gastrocnemius) während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer).....	78
Abbildung 41	Körperkerntemperaturverlauf während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer).....	79
Abbildung 42	Herzfrequenzverlauf während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer).....	80
Abbildung 43	Laktatkurve während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer)	81
Abbildung 44	Belastungsempfinden nach Borg während des Feldtests (Maritime Fünfkämpfer).....	81
Abbildung 45	Herzfrequenzverlauf während des Feldtests (Militärische Fünfkämpfer).....	82
Abbildung 46	Blutlaktatkurve während des Feldtests (Militärische Fünfkämpfer).....	83
Abbildung 47	Körperkerntemperaturverlauf während des Feldtests (Militärische Fünfkämpfer)	84

Abbildung 48	Belastungsempfinden nach Borg während des Feldtests (Militärische Fünfkämpfer)	85
---------------------	---	----

VI.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Synoptische Übersicht des Forschungsstandes.....	26
Tabelle 2	Minima, Maxima, Mittelwerte und Standardabweichungen der biometrischen Basisdaten der Maritimen Fünfkämpfer.	27
Tabelle 3	Minima, Maxima, Mittelwerte und Standardabweichungen der biometrischen Basisdaten der Militärischen Fünfkämpfer.	28

VI.3 Abstract

Objective –

To examine the effects of skin cooling on endurance performance capacity of elite athletes in general and their lactate metabolism in particular under moderate environmental conditions.

Methods –

Eighteen male members of the German National Teams for Naval Pentathlon (NP) and Military Pentathlon (MP) (NP: mean age 27.75 [\pm 5.60] years; height 179.63 [\pm 6.05] cm; weight 75.90 [\pm 1.74] kg – MP: mean age 25.00 [\pm 2.79] years; height 182.70 [\pm 5.96] cm; weight 75.64 [\pm 5.15] kg) completed two tests – one in a laboratory and one in a field setting. The laboratory protocol consisted of an incremental, short-term endurance test (STET) followed by an incremental long-term endurance test (LTET) on a treadmill. The field protocol consisted of an intermittent running test on an outdoor running track (NP: 3 x 400m; MP: 3 x 4.000m). In both settings, the subjects performed each protocol, in random order, either with (COOL) or without cooling (CONTROL). Skin cooling was achieved by wearing a cooling vest (Arctic Heat). In the laboratory setting, the vest was worn for ten minutes prior to STET (precooling) and during this test (syncooling). In the field setting, the vest was worn either during the individual 20-minute warm-up procedure (NP) or during the first of the three running bouts (MP).

Results –

Laboratory Testing: After cooling, *skin temperature* (on the sternum) was reduced. Its values stayed lowered for the rest of the test and reached significance at various points of measurement ($p \leq 0.05$). Body core temperature was slightly lowered but not significantly. *Heart rate* was significantly reduced by up to 5 bpm ($p \leq 0.005$) during STET but did not differ during LTET. After STET, *blood lactate* values were significantly (NP: $p \leq 0.004$; MP: $p \leq 0.026$) higher after cooling than in CONTROL (NP: +1.4 mmol/l; MP: +1.72 mmol/l). In COOL, *maximum oxygen uptake* was slightly lowered in both tests but reached significance ($p \leq 0.021$) only during LTET in the MP group (+ 0.19 l). The *respiratory quotient* was significantly ($p \leq 0.024$) higher during STET in the MP group (+ 0.076) but did not differ significantly in the NP group. *Ratings of perceived exertion* were lower after cooling but the differences reached significance ($p \leq 0.018$) only in the NP group (- 1pt on the Borg Scale).

Field Testing (NP): After cooling, *skin temperature* (on the sternum) was reduced significantly ($p \leq 0.036$) by 1.18°C. *Heart rate* was lowered throughout the protocol but reached significance ($p \leq 0.005$) only after the last run (- 3.50 bpm). *Ratings of perceived exertion* were significantly ($p \leq 0.004$) lower in COOL (-0.9 pt on the Borg Scale) than in CONTROL. *Blood lactate* and *body core temperature* did not differ significantly although blood lactate values showed a trend of being elevated in COOL at the end of the protocol.



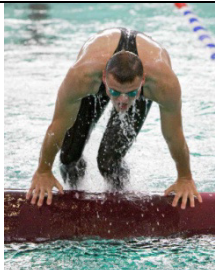


Field Testing (MP): After cooling, *body core temperature* was lowered till the end of the protocol. The difference reached significance ($p \leq 0.041$) only after the first run (- 0.5°C). *Heart rate* was also lowered throughout the test with a significant difference ($p \leq 0.030$) of

7.33 bpm after the third run. *Ratings of perceived exertion* were significantly lower ($p \leq 0.041$) only at the end of the first run (- 1pt on the Borg Scale). *Blood lactate* values did not differ significantly.

Conclusion –






Endurance performance capacity does not seem to be improved by skin cooling in moderate environmental conditions. The cooling procedure seems to negatively affect lactate metabolism and local muscle function. Although the perception of exertion was reduced, external skin cooling cannot be recommended as a means of performance enhancement under moderate environmental conditions.

VI.4 Der Maritime Fünfkampf (Naval Pentathlon)

<p>1. Hindernislauf</p> <p>Länge: 300m</p> <p>10 Hindernisse</p>	
<p>2. Lebensrettungsschwimmen</p> <p>Länge 75 Meter</p>	
<p>3. Hindernisschwimmen</p> <p>Länge: 125 Meter</p>	
<p>4. Seemannschaft</p> <p>Länge: 480 Meter</p> <p>Bootsmannstuhl, Ruderboot, Bojen, Kette</p>	
<p>5. Amphibischer Geländelauf</p> <p>Länge: 2500 Meter</p> <p>Plus 3 Stationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schießen • Paddeln • Handgranate 	

Quelle: <http://www.maritimer5kampf.de> (Stand: 17.04.2011 – 16:35 Uhr)

VI.5 Der Militärische Fünfkampf (Military Pentathlon)

1. Schießen	
2. Hindernisschwimmen	
3. Hindernislauf	
4. Wurfkörper Ziel- und Weitwurf	
5. Geländelauf (8 km)	

Quelle: <http://www.military-pentathlon.de> (Stand: 17.04.2011 – 16:35 Uhr)

VI.6 Ausgewählte Ergebnisse der Korrelationsanalyse

	KKT bei Start Stufentest	KKT bei 10 km/h	KKT bei 12 km/h	KKT bei 14 km/h	KKT bei 16 km/h
Hauttemperatur beim Abbruch des Rampentests	,868* $p \leq 0,025$,924** $p \leq 0,009$,871* $p \leq 0,024$,896* $p \leq 0,016$,897* $p \leq 0,015$

Hauttemperatur (Sternum) bei Abbruch Rampentest und Körperkerntemperatur während des späteren Stufentests in der Kontrollbedingung (**Maritime Fünfkämpfer**) [KKT – Körperkerntemperatur]

	KKT bei Start Stufentest	KKT bei 10 km/h	KKT bei 12 km/h	KKT bei 14 km/h	KKT bei 16 km/h	KKT bei 18 km/h	KKT bei 3' nach der Belastung
Hauttemperatur auf der ersten Stufe des Stufentests (10 km/h)	,878* $p \leq 0,022$,894* $p \leq 0,016$,876* $p \leq 0,022$,822* $p \leq 0,044$,880* $p \leq 0,021$,838* $p \leq 0,037$,841* $p \leq 0,036$

Hauttemperatur (Sternum) zu Beginn des Stufentests (erste Stufe - 10 km/h) und Körperkerntemperatur während der weiteren Stufen dieses Tests in der Kältebedingung (**Maritime Fünfkämpfer**) [KKT – Körperkerntemperatur]

	KKT bei Start Stufentest	KKT bei 10 km/h	KKT bei 12 km/h	KKT bei 14 km/h	KKT bei 16 km/h
Hauttemperatur beim Abbruch des Rampentests	,218 $p \leq 0,604$	-,123 $p \leq 0,772$	-,570 $p \leq 0,140$	-,145 $p \leq 0,731$	-,153 $p \leq 0,718$

Hauttemperatur (Sternum) bei Abbruch Rampentest und Körperkerntemperatur während des späteren Stufentests in der Kontrollbedingung (**Militärische Fünfkämpfer**) [KKT – Körperkerntemperatur]

	KKT bei Start Stufentest	KKT bei 10 km/h	KKT bei 12 km/h	KKT bei 14 km/h	KKT bei 16 km/h	KKT bei 18 km/h	KKT bei 3' nach der Belastung
Hauttemperatur auf der ersten Stufe des Stufentests (10 km/h)	,417 $p \leq 0,305$,251 $p \leq 0,549$,680 $p \leq 0,064$,650 $p \leq 0,081$,594 $p \leq 0,121$,213 $p \leq 0,647$,588 $p \leq 0,125$

Hauttemperatur (Sternum) zu Beginn des Stufentests (erste Stufe - 10 km/h) und Körperkerntemperatur während der weiteren Stufen dieses Tests in der Kältebedingung (**Militärische Fünfkämpfer**) [KKT – Körperkerntemperatur]

	RPE bei 10 km/h	RPE bei 12 km/h	RPE bei 14 km/h	RPE bei 16 km/h	RPE bei 18 km/h
Hauttemperatur beim Start des Rampentests	,952** $p \leq 0,003$,861* $p \leq 0,028$,323 $p \leq 0,533$	-,143 $p \leq 0,787$	-,180 $p \leq 0,732$

Hauttemperatur (Stirn) beim Start des Rampentests und Belastungsempfinden auf den ersten beiden Stufen des Stufentests in der Kontrollbedingung (**Maritime Fünfkämpfer**) [RPE – rating of perceived exertion]

	RPE bei 10 km/h	RPE bei 12 km/h	RPE bei 14 km/h	RPE bei 16 km/h	RPE bei 18 km/h
Hauttemperatur beim Start des Rampentests	-,527 $p \leq 0,283$	-,142 $p \leq 0,789$,040 $p \leq 0,940$,048 $p \leq 0,928$,365 $p \leq 0,476$

Hauttemperatur (Stirn) beim Start des Rampentests und Belastungsempfinden auf den ersten beiden Stufen des Stufentests in der Kältebedingung (**Maritime Fünfkämpfer**) [RPE – rating of perceived exertion]

Lebenslauf

Lebenslauf aus Gründen des Datenschutzes in der Onlinepublikation entfernt
(Seite 144).

Lebenslauf aus Gründen des Datenschutzes in der Onlinepublikation entfernt
(Seite 145).