

Veränderung von (Ruhe)Energieverbrauch, Stoffwechsel und Körperzusammensetzung durch intensives Training

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Medizin (Dr. med.)

an der

Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

vorgelegt von

Tony Hannes Richter

aus

Warstein

2025

Betreuer:in / Gutachter:in der Dissertation: Prof. Dr. Volker Harth

Gutachter:in der Dissertation: Prof. Dr. Götz H. Welsch

Vorsitz der Prüfungskommission: Prof. Dr. Götz H. Welsch

Mitglied der Prüfungskommission: Prof. Dr. Rüdiger Reer

Mitglied der Prüfungskommission: Prof. Dr. Sabine Windhorst

Datum der mündlichen Prüfung: 02.02.2026

Inhaltsverzeichnis

Darstellung der Publikation	4
Breiterer Kontext und Darstellung des aktuellen Forschungsstandes.....	4
Energieverbrauch des menschlichen Körpers	5
Energieversorgung von (taktischen) Athleten.....	6
Energieverbrauch von (taktischen) Athleten	6
Körperzusammensetzung, Hormon- und Stoffwechsellage	7
Ziel dieser Arbeit	9
Vertiefte Schilderung der Methodik über die Publikation hinaus.....	10
Weiterführende Ergebnisse über die Publikation hinaus.....	11
Unterscheidung „completers“ und „dropouts“	12
Weiterführende Fragestellungen	13
Publikation – Resting metabolic rate and energy efficiency in response to an intensive 84-day combat-swimmer training in the German Armed Forces	14
Zusammenfassung	28
Summary	28
Literaturverzeichnis.....	29
Abkürzungsverzeichnis.....	33
Abbildungsverzeichnis.....	34
Erklärung des Eigenanteils an der Publikation.....	35
Eigenanteil an der Publikation	35
Eidesstattliche Versicherung.....	36
Danksagung	37

Darstellung der Publikation

Breiterer Kontext und Darstellung des aktuellen Forschungsstandes

Der Beruf des Soldaten ist mit besonderen körperlichen und psychischen Belastungen assoziiert. Insbesondere bei den Elitesoldaten der Spezialeinheiten sind diese auf physischer Ebene denen von Leistungssportlern nicht unähnlich. Da diesem Umstand seit längerem Rechnung getragen wird, ist die Betrachtungsweise von Elitesoldaten als Leistungssportler nicht neu (Sell et al. 2010). Die sportmedizinische und ernährungsmedizinische Betreuung von Soldaten mit speziellen Belastungen sollte die logische Konsequenz sein. Bei der Betrachtung der Bundeswehr in diesem Kontext ist von Relevanz, dass das verfügbare Personal optimal ausgebildet wird, die Kompetenzen und Potentiale der Soldaten erkannt, im Sinne der sogenannten „Human Performance Optimization“ (Travis and Brown 2023) gefördert und optimal ausgeschöpft werden. Gemäß den Vorgaben der sogenannten „Inneren Führung“ obliegt es den Vorgesetzten in der Bundeswehr unter anderem, den militärisch-taktischen Erfordernissen zur verlässlichen Planung der Durchhaltefähigkeit und Regeneration der Streitkräfte Rechnung zu tragen. Gleichzeitig haben sie eine auf der Fürsorgepflicht fußende Verantwortung ihren Soldaten gegenüber zu übernehmen (BMVg 2008). In diesem Kontext muss verhindert werden, dass die Soldaten durch die Ausbildung, z.B. durch ungünstiges Training, Schaden nehmen und so Potenziale vermeidbar verloren gehen. Seit Langem ist bekannt, dass Soldaten als „taktische Athleten“ von einem gezielten Training profitieren, um Verletzungen zu vermeiden und die Leistungsfähigkeit zu optimieren (Sell et al. 2010). Von grundlegender Bedeutung dabei ist, die Leistungsfähigkeit und Fitness der Soldaten richtig einzuschätzen, zu fördern und zu erhalten. Ein relevantes Problemfeld, welches sich auch aufgrund des oben genannten Kontexts ergibt, ist die Ausbildung des Nachwuchses des Kommando Spezialkräfte der Marine (KSM). Diese Soldaten sind besonderen Belastungen ausgesetzt und zeigen in ihrer Ausbildung seit Jahren eine konstant hohe Abbrecher- beziehungsweise Ausfallquote trotz vorheriger erfolgreich absolvierter Auswahlverfahren. Die Ausbildung des KSM geht neben den militärischen auch mit medizinisch relevanten Besonderheiten einher. In der Ausbildung, ebenso wie in der weiteren medizinischen Versorgung, müssen Aspekte der Flugmedizin, Sportmedizin, Tauchmedizin, Ernährungsmedizin und Tropenmedizin sowie der adäquaten psychischen Vorbereitung und Betreuung parallel beachtet werden. Trotz regelmäßiger Anpassung der Ausbildung stagniert seit Jahrzehnten eine in etwa gleichbleibende, hohe Anzahl an Soldaten, die trotz erfolgreicher Vorauswahl die Ausbildung infolge unzureichender Leistungen oder anderer Gründe (wie Verletzungen und persönliche Gründe) verlassen wollen oder müssen. Daraus ergibt sich die Fragestellung, wie das Training der Soldaten psychologisch, sport- und ernährungsmedizinisch begleitet werden kann, respektive muss, um möglicherweise frühzeitig zu erkennen, welche Soldaten in der Ausbildung eine ungünstige oder gar schädliche Veränderung in Bezug auf die psychische und physische

Leistungsentwicklung, ihre Körperzusammensetzung, ihre Hormon- und Stoffwechselregulierung erfahren und wie einer möglicherweise schädlichen Entwicklung erfolgreich entgegengewirkt werden kann.

Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, wurde die Kampfschwimmerstudie (KSS) initiiert. Diese hatte zum Ziel, im Rahmen einer prospektiven Beobachtungsstudie Aufschluss darüber zu geben, wie sich die Soldaten physisch und psychisch im Rahmen der Ausbildung anpassen und verändern. Dabei sollten weiterhin Unterschiede zwischen denjenigen Soldaten herausgearbeitet werden, die die Ausbildung bestehen und denjenigen, die sie nicht bestehen. Das übergeordnete Ziel dabei war, die Kampfschwimmerausbildung zukünftig optimal psychologisch, sport- und ernährungsmedizinisch beraten und begleiten zu können.

Im Rahmen der KSS ist der Schwerpunkt dieser Arbeit, die Veränderung des Energieverbrauchs („Energy Expenditure“, EE), die Veränderung der Körperzusammensetzung, die Veränderung auf für den Energiehaushalt relevanter hormoneller und Stoffwechsel-Ebene, sowie deren Bezug auf ein Bestehen und Nichtbestehen der Soldaten zu untersuchen. Die oben genannten Problemfelder sind für die Bundeswehr im Besonderen, aber auch für die Forschung auf dem Gebiet des menschlichen Energieverbrauches im Allgemeinen aus den im Folgenden ausgeführten Gründen relevant:

Energieverbrauch des menschlichen Körpers

Bei der Untersuchung des menschlichen Energieverbrauches müssen die einzelnen Komponenten des Energieverbrauches betrachtet werden. Der Gesamtenergieverbrauch („Total Energy Expenditure“, TEE) setzt sich aus dem Ruheenergieumsatz („Resting Metabolic Rate“, RMR bzw. „Basic Energy Expenditure“, BEE), dem Aktivitätsenergieverbrauch („Activity Energy Expenditure“, AEE) und dem thermischen Effekt der Nahrung („Diet induced Energy Expenditure“, DEE oder „Thermic Effect of Food“, TEF) zusammen (Westerterp 2013). In dieser Arbeit wird im Folgenden für den Ruheenergieumsatz die Abkürzung RMR verwendet. Bei der Betrachtung des TEE müssen nach aktuellen Erkenntnissen zwei Theorien des Energieverbrauches berücksichtigt werden: Die „ältere“ Theorie ist das sogenannte „additive model“, bei dem der RMR bei zunehmender körperlicher Aktivität gleichbleibt und der AEE und somit auch der TEE ansteigt. Die zweite Theorie ist das „costrained model“ oder „compensation model“, bei dem der TEE unter zunehmender körperlicher Aktivität zunächst ansteigt und dann stagniert, wobei der RMR zugunsten des AEE bis zu einem bestimmten Grad abnimmt. Für die Theorie der „constrained TEE“ (cTEE) spricht, dass sich Menschen aus sozioökonomisch weniger entwickelten Bevölkerungsgruppen, wie etwa Ur-Völker oder „Jäger und Sammler“, in ihrem TEE nicht von höher entwickelten Bevölkerungsgruppen, wie etwa in Industrieländern, unterscheiden. Daraus ergibt sich die Annahme, dass der TEE speziesspezifisch ist und homöostatisch an eine variierende körperliche

Aktivität angepasst wird. Dies erfolgt durch Adaptationsprozesse, bei denen der Energieverbrauch anderer physiologischer Vorgänge, wie beispielsweise Reproduktion und somatische Aufrechterhaltung, reduziert und der Anteil der AEE hingegen erhöht wird. Dabei wird angenommen, dass die bisher noch ungeklärten Prozesse, die zu o.g. Anpassung führen, evolutionär gewachsen und genetisch determiniert sind (Pontzer et al. 2016). Die Thesen des „cTEE model“ wurden in aktuelleren Untersuchungen zwar bestätigt (Urlacher et al. 2019, Careau et al. 2021, Flanagan et al. 2024, McGrosky et al. 2024), jedoch wurde die Theorie des „cTEE model“ bisher nicht unter kontrollierten Bedingungen nachgewiesen. Beweise für das „cTEE model“ fanden sich bislang überwiegend in Beobachtungsstudien, die einerseits unterschiedlich stark körperlich belastete Probanden untersuchten, die andererseits eine mögliche negative Energiebilanz nicht berücksichtigten und überdies methodische sowie statistische Limitationen zeigten (Gonzalez et al. 2023). Es existieren auch Hinweise auf die Koexistenz beider Thesen. In einer Arbeit von Willis et al. wurde eine Veränderung des TEE entsprechend des „cTEE model“ nur bei negativer Energiebilanz gesehen, wohingegen bei ausgeglichener und positiver Energiebilanz ein TEE entsprechend des „additive TEE model“ gezeigt wurde (Willis et al. 2022). Die Frage nach der tatsächlichen Veränderung des TEE unter kontinuierlicher körperlicher Belastung ist also nicht abschließend geklärt.

Energieversorgung von (taktischen) Athleten

Wie bereits bei Leistungssportlern beobachtet (Loucks 2004), gelingt es auch militärischen Spezialkräften nicht, die Nährstoff- und Energieversorgung in dem Maße sicherzustellen, welche sie benötigen (Tharion et al. 2004, Tharion et al. 2005). Obwohl dieser Umstand seit langer Zeit bekannt ist, hat sich im Laufe der Jahre an der Versorgungslage der (taktischen) Sportler nichts geändert. Von amerikanischen Soldaten im Ausbildungsprogramm für maritime Spezialkräfte ist bekannt, dass sie einen Energiebedarf haben, der die vorgesehene Versorgung der täglich aufzunehmenden Energie um bis zu 140 % übersteigt (Margolis et al. 2014). Auch bei anderen, nichtmilitärischen Ausdauersportlern konnte gezeigt werden, dass der TEE während der Trainingsphase und in der Wettkampfphase die Energieaufnahme der Sportler regelhaft überstieg (Heydenreich et al. 2017).

Eine adäquate Versorgung mit Energie und Nährstoffen muss jedoch gewährleistet sein. Diese stellt die Voraussetzung für ein optimales Training einerseits (Thomas et al. 2016) und eine optimale körperliche Leistungsfähigkeit andererseits (Rodriguez et al. 2009) dar. Relevant ist bei der Beurteilung der Energieversorgung folgerichtig auch die Betrachtung des gesamten Energieverbrauches.

Energieverbrauch von (taktischen) Athleten

Die Energieversorgung von (taktischen) Athleten deckt sich regelhaft nicht mit deren TEE, was negative Auswirkungen auf das Training und die Leistungsfähigkeit der (taktischen) Athleten hat (s.o.). Das warf

die Frage auf, ob sich bei den Kampfschwimmerschülern dieselbe Problematik zeigt. Um diese Frage zu klären, musste optimalerweise der TEE, mindestens jedoch der RMR und der AEE sowie die Stoffwechsellage der Soldaten (anabol oder katabol) erfasst werden. Es stellten sich die Fragen, ob sich eine Veränderung des RMR und des AEE nachweisen lässt, welches Energieverbrauchskonzept demnach der Realität am nächsten kommt und, wenn sich eine Veränderung des Energieverbrauchs zeigt, in welchem Kompartiment des TEE diese auftritt. Weiterhin war von Interesse, welche Ausprägung dieses Phänomens bei den bestehenden und nicht bestehenden Kampfschwimmerschülern zu beobachten ist und ob sich diese anhand der Ausprägung differenzieren lassen.

Körperzusammensetzung, Hormon- und Stoffwechsellage

Eine unzureichende Energiezufuhr führt zu einer katabolen Veränderung der Körperzusammensetzung, insbesondere einer Abnahme der fettfreien Masse (FFM) sowie der Fettmasse (FM) der Soldaten und hat überdies negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Soldaten (Nindl et al. 2007). Der Gewichtsverlust infolge des Kaloriendefizits ist mit einer Abnahme des Ruheenergieumsatzes und Veränderungen der Kompartimente FM und FFM assoziiert (Müller et al. 2015). Der Energieverbrauch passt sich den Veränderungen in den metabolisch aktiven Körperkompartimenten, der FFM, an (Müller et al. 2016b). FFM und FM sind daher relevante Parameter bei der Betrachtung des Energiehaushaltes sowie der Stoffwechsellage der Kampfschwimmerschüler.

Zusätzlich zur Veränderung der FFM und der FM sollten Stoffwechselfparameter über die Stoffwechsellage der Soldaten Aufschluss geben. Der Umfang der entsprechenden Laborparameter, die bei der KSS erfasst wurden, ergab sich aus folgenden Überlegungen: Aus einer ungenügenden Energiezufuhr resultiert eine katabole Stoffwechsellage, die sich laborchemisch anhand der Harnstoffkonzentration sowie deren Veränderung nachweisen lässt. Über die Messung des Harnstoffs im Blut kann einerseits festgestellt werden, ob der Organismus sich in einer katabolen Stoffwechsellage befindet (Stähle et al. 2013), also in der Summe Proteine abgebaut werden. Außerdem wurde davon ausgegangen, dass die Verlaufsbeurteilung der Harnstoffkonzentration Hinweise auf ein Übertrainingssyndrom liefern kann (Badtke and Dickhuth 2010, S. 44). Neben der metabolischen Überforderung ist überdies in Anbetracht des Trainings der Kampfschwimmer mit nur sehr kurzen Regenerationszeiten der Zustand der Muskulatur von Bedeutung. Wird diese überstrapaziert und geschädigt, kann dies durch einen Anstieg der Creatinin-Kinase (CK) im Blut festgestellt und im Verlauf beurteilt werden (Meeusen et al. 2013). Bei intensiv trainierten Sportlern und Soldaten muss auch ein funktioneller Überlastungszustand bedacht werden. Dieser kann, richtig erkannt und beachtet, durchaus positive Auswirkungen auf ein Training haben, wohingegen der nichtfunktionelle Überlastungszustand die Gefahr birgt, in ein Übertrainingssyndrom („Overtraining Syndrome“, OTS)

überzugehen (Carfagno and Hendrix 2014). Bei der intensiven Belastung der Kampfschwimmerschüler während ihres Trainings muss die Möglichkeit des Eintretens eines Übertrainings berücksichtigt und möglichst verhindert werden. Die Herausforderung bei der Erfassung eines OTS ist, dass es für das OTS nach aktuellem Stand (2025) keine einheitliche Definition oder objektive Befundkonstellationen gibt, die eine sichere „ex-ante“ Diagnosestellung erlauben. Daher ist bisher nur eine retrospektive „ex-post“ Diagnosestellung möglich (Weakley et al. 2022). Als relevante Parameter für die Detektion eines OTS können u.a. Testosteron, Cortisol, CK und Harnstoff betrachtet werden (Lee et al. 2017, Cadegiani and Kater 2019) wobei für eine Überwachung eines möglichen Übertrainings weder die Serumharnstoff- noch die CK-Konzentration noch deren Verhältnis zueinander einen relevanten Informationsgewinn liefern können (Carfagno and Hendrix 2014). Nach aktuelleren Erkenntnissen ist davon auszugehen, dass die isolierte Betrachtung einzelner Systeme (Hormonelle Veränderungen, autonomes Nervensystem, Stoffwechselparameter etc.) zur Erfassung eines Übertrainingssyndroms unzureichend ist und das OTS als komplexes, mehrere Organsysteme parallel betreffendes Syndrom, umfassender zu betrachten und zu untersuchen ist (Carrard et al. 2022). Sehr viel häufiger als ein OTS liegt eine relative Energie-Unterversorgung vor („Relative Energy Deficiency in Sport“, Stellingwerff et al. 2021), die sich infolge einer katabolen Stoffwechsellage neben der Veränderung der Körperzusammensetzung und des TEE (s.o.) auch auf stoffwechselrelevante Hormone auswirkt.

Ergänzend zum Energiehaushalt wurde in dieser Arbeit daher die hormonelle Veränderung, insbesondere von Cortisol und Testosteron als relevanteste Hormone des katabolen und anabolen Stoffwechsels (bei ausschließlich männlichen Probanden), im Verlauf des Trainings untersucht. Im Rahmen einer starken körperlichen Belastung kann eine relevante Beeinflussung der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenachse mit dem Zielhormon Cortisol sowie der Hypothalamus-Hypophysen-Gonadenachse mit dem Zielhormon Testosteron resultieren (Kreher and Schwartz 2012). Bekanntermaßen fördert Cortisol, als unter anderem katabol wirkendes Hormon, den Proteinmetabolismus, hemmt die Proteinbiosynthese und wirkt außerdem antiinflammatorisch (Virus and Virus 2004). Weiterhin kann es die Muskelregeneration beeinträchtigen (Badtke and Dickhuth 2010, S. 33-39). Testosteron hingegen spielt als anaboles Hormon unter anderem für die Proteinbiosynthese, also auch den Muskel- und Kraftaufbau eine wichtige Rolle (Crewther et al. 2006). Unter Energiemangelzuständen bei gleichzeitig erhöhtem Energieverbrauch kann es zu einer schädlichen Veränderung der Körperzusammensetzung (v. a. der FFM), zu einem signifikanten Abfall des Testosterons – das bei extremen Belastungen unter Energiemangelzuständen bis auf Kastrationsniveau sinken kann (Friedl et al. 2000) – und zu einem signifikanten Anstieg des Cortisols kommen (Nindl et al. 2007). Über das Verhältnis dieser Hormone zueinander können Rückschlüsse auf die Regeneration nach körperlicher Belastung gezogen werden (Meeusen et al. 2004). Bekannt ist

überdies die Beeinflussung der Hypothalamus-Hypophysen-Schilddrüsenachse durch körperliche Aktivität und unzureichende Nahrungsaufnahme und somit insuffizienter Energieversorgung. Bei der Analyse der Stoffwechselhormone in diesem Kontext muss auch die Schilddrüsenstoffwechsellaage berücksichtigt werden. Der Proteinmetabolismus der Skelettmuskulatur wird infolge energiemangelbedingter verminderter Trijodthyroninsekretion reduziert (Gardner et al. 1979). Den relevantesten Einfluss hat eine verminderte Trijodthyroninsekretion auf die Leber und die Skelettmuskulatur (Nindl et al. 1997). Die Schilddrüsenhormonachse ist sensibel gegenüber Energiemangelzuständen (Friedl et al. 2000) und es besteht eine enge Assoziation zwischen dem Ruheenergieumsatz und der Trijodthyroninkonzentration im Blut (Onur et al. 2005). Bei schilddrüsengesunden Menschen treten im Rahmen unzureichender Energieversorgung Veränderungen der Schilddrüsenhormonkonzentrationen auf, die Veränderungen der RMR bewirken können (Müller and Bosy-Westphal 2013). Somit ist die Untersuchung des Trijodthyronins für die Beurteilung der Stoffwechsellaage und des RMR relevant.

Zusammenfassend sollte die Untersuchung der oben genannten Blutparameter und Hormone zusätzlich zur Veränderung von FFM und FM Rückschlüsse ermöglichen, ob die Probanden eine ausreichende oder unzureichende Energiezufuhr erhielten, weil davon ausgegangen wird, dass die Stoffwechsellaage die Veränderung des TEE beeinflusst. Bei verringerter Energieverfügbarkeit soll eher ein cTEE zu finden sein, wohingegen bei ausreichend mit Energie versorgten Probanden die Beziehung zwischen TEE und AEE als linear beschrieben wurde, was für das „additive TEE model“ sprechen würde (Willis et al. 2022).

Ziel dieser Arbeit

Zur Optimierung von Kraft, Ausdauer und Durchhaltevermögen werden die Kampfschwimmerschüler während der Ausbildung kontinuierlich psychophysisch belastet. Ungenügende Regeneration und Energieversorgung führen zu Veränderungen der Körperzusammensetzung (FM, FFM) und damit einhergehend zu Anpassungen des Energieverbrauchs, der metabolischen Effizienz sowie zu einer hormonellen Adaptation (Hypothalamus-Hypophysen-Nebennieren-, Schilddrüsen- und Gonadenachse). Im Kontext der KSS ergab sich die erstmalige Gelegenheit, im Rahmen einer prospektiven Beobachtungsstudie Komponenten des TEE zu untersuchen. Die Leistungsdiagnostik der Soldaten umfasste u.a. die Messung der RMR sowie des AEE. Dies sind relevante Komponenten des TEE, in denen sich entsprechend der cTEE-Theorie eine Reduktion der RMR zeigen müsste.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte untersucht werden, ob sich bei den Soldaten in der Kampfschwimmerausbildung der Ruheenergieverbrauch (RMR) und/oder der (Aktivitäts-) Energieverbrauch ((A)EE) verändern und ob sich die Theorie des cTEE auf diese Weise unter

kontrollierten Bedingungen bestätigen oder in Frage stellen lässt. Außerdem sollte geprüft werden, wie sich in Korrelation mit dem RMR und EE die FFM und FM verändern, die Schilddrüsenstoffwechsellaage sowie die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenachse sowie -Gonadenachse (zur Beurteilung der Regeneration der Soldaten) beeinflusst werden und ob es einen Zusammenhang dieser Veränderungen mit dem Bestehen oder Nichtbestehen der Ausbildung gibt.

Vertiefte Schilderung der Methodik über die Publikation hinaus

Die Hauptfragestellung dieser Arbeit befasste sich mit dem Energieverbrauch der Probanden und ob sich Anpassungen entsprechend eines additiven TEE oder cTEE zeigen. Bisherige, die cTEE-Theorie bestätigende, Veröffentlichungen unterlagen teils multiplen Limitationen. Relevante Publikationen zu dieser Theorie bezogen sich beispielsweise auf Querschnittsstudien, die keine Entwicklung des Energieverbrauchs im zeitlichen Verlauf erfasst haben und aufgrund der Darstellung einer Momentaufnahme eine relativ geringe Aussagekraft aufwiesen (Pontzer et al. 2016). Andere relevante Publikationen, die die cTEE-Theorie stützen, griffen auf Sekundäranalysen von Daten zurück, die nicht zum Zweck der Untersuchung von Veränderungen der TEE-Kompartimente erhoben wurden (Careau et al. 2021, Willis et al. 2022) und dabei die Veränderungen der Körperzusammensetzung außer Acht ließen sowie den TEE über subjektive Angaben und einen relativ kurzen Zeitraum erfassten (Willis et al. 2022). Weitere Limitationen waren inadäquate Methoden für die Verlaufsbeurteilung der Körperzusammensetzung unter Extrembedingungen, für die Messung des RMR sowie die Erfassung des Energieverbrauches unter nichtkontrollierten Bedingungen und unzureichender bis fehlender Berücksichtigung (teils erheblicher) stoffwechselrelevanter Unterschiede zwischen den verglichenen Probanden (Gonzalez et al. 2023). Bei der KSS konnten die meisten der o.g. Limitationen bei der Messung relevanter Parameter für die Energieverbrauchsfragestellung durch den Rahmen einer kontrollierten Beobachtungsstudie und die Anwendung valider Messmethoden vermieden werden.

Bei der Untersuchung der Kampfschwimmerschüler durch die KSS bot sich erstmalig eine Möglichkeit, Komponenten des TEE, unter Berücksichtigung der Körperzusammensetzung, stoffwechselrelevanter Hormone und deren Veränderung, prospektiv unter kontrollierten Bedingungen zu beobachten. Dazu wurden die Probanden vor Beginn der sechswöchigen Sportausbildung im Rahmen des Kampfschwimmertrainings – in der Publikation als „Exercise Preconditioning“ (EP) bezeichnet – und nach Abschluss des EP, vor Beginn der fünföchigen Ausbildungsphase, die in der Publikation als „Specific Skills and Stress“ (SSS) benannt wird – also während der gemeinsamen weiterführenden Ausbildung nach der Sportausbildung und in der Woche nach Abschluss des SSS – untersucht (Richter et al. 2024). Unter anderem wurde dabei die Körperzusammensetzung mit der quantitativen Magnet-Resonanz-Methode erfasst. Diese Methode erlaubt eine sehr präzise Messung der FM und der FFM (Richter et al. 2024) und erfasst bereits kleine Veränderungen der Körperzusammensetzung

(Napolitano et al. 2008, Bosy-Westphal and Müller 2015, Müller et al. 2016a). Die Messung der RMR gemäß Studienprotokoll erfolgte mittels indirekter Kalorimetrie adäquat (Borges et al. 2019). Der AEE wurde mittels Spiroergometrie gemäß dem aktuellen Stand der Technik gemessen, sodass im Rahmen der Grundumsatzmessung und Leistungsdiagnostik die zwei relevantesten Komponenten des Energieverbrauchs, RMR und AEE, unter kontrollierten Bedingungen mit verlässlichen Methoden erfasst wurden. Beide Parameter wurden mittels Regressionsanalyse an die Körperzusammensetzung angepasst, sodass intraindividuelle Veränderungen der Probanden im Laufe des Trainings berücksichtigt wurden (Richter et al. 2024).

Aufgrund der methodischen Limitationen der ausbildungsbegleitenden KSS konnten nicht alle Komponenten des TEE und auch der TEE selbst nicht untersucht werden (Richter et al. 2024). Die Soldaten durften selbstständig während des gesamten Trainings zusätzlich zu den regelmäßigen Verpflegungsangeboten essen und trinken. Eine ausbildungsbegleitende vollumfängliche Erfassung der Energieaufnahme der Probanden, z.B. mit Fragebögen, war aufgrund der sich auch während des Kampfschwimmertrainings selbstständig zusätzlich verpflegenden und unter regelmäßigem Stress stehenden Soldaten nicht verlässlich beziehungsweise lückenlos möglich.

Die Gründe für die Beendigung der Studienteilnahme wurden mittels Befragung der Probanden erfasst und in drei Kategorien eingeordnet. Die erste Kategorie umfasste „gesundheitliche Gründe“. Die zweite umfasste „dienstliche Gründe“, also unzureichende Leistung für die weitere Teilnahme an der Kampfschwimmerausbildung (sogenannte „Ablösung“: Aussteuerung der Soldaten aus der Kampfschwimmerausbildung und Rückführung in ihre vorherigen Einheiten). Die dritte Kategorie umfasste „persönliche Gründe“, also eine eigeninitiierte Beendigung der Kampfschwimmerausbildung und somit auch Beendigung der Studienteilnahme (Richter et al. 2024).

Weiterführende Ergebnisse über die Publikation hinaus

Eine unzureichende Energieversorgung ist mit einer beeinträchtigten Immunfunktion, reduzierter Leistungsfähigkeit und verlängerter Erholung von Verletzungen und Erkrankungen assoziiert und während Trainings- und Einsatzphasen von Soldaten regelmäßig zu beobachten (Tharion et al. 2005). Dieser Zusammenhang zeigt sich auch bei zivilen Athleten (Thomas et al. 2016). Überdies erhöht eine verringerte Energieverfügbarkeit bei Athleten das Risiko für muskuloskelettale Verletzungen (Melin et al. 2019). Die Probanden zeigten jedoch eine ausgezeichnete Leistungsfähigkeit, die sich im Verlauf noch steigerte (Richter et al. 2024). Die Rate an Studienabbrüchen infolge von Verletzungen und Erkrankungen war mit knapp 7 % der Probanden gering (Abb. 1). Eine Energiemangelversorgung ist kein Bestandteil der Ausbildung der Kampfschwimmerschüler in dem Ausbildungsabschnitt, den die KSS begleitete. Es ergab sich kein Hinweis auf eine in schädlichem Umfang unzureichende

Energieversorgung. Das unterscheidet den 84-tägigen, mit der KSS begleiteten, Abschnitt der Ausbildung der Kampfschwimmerschüler von der Ausbildung anderer maritimer Spezialeinheiten (Margolis et al. 2014) sowie den typischen Trainingskonditionen von Leistungssportlern (Heydenreich et al. 2017) in Bezug auf die Deckung des Energiebedarfs während des Trainings grundlegend. Der Gesamtenergiebedarf ist in Anbetracht der Veränderung der FM zwar nicht in vollem Umfang gedeckt worden. Eine schädliche, die FFM beeinträchtigende Unterversorgung lag jedoch nicht vor (Richter et al. 2024).

Unterscheidung „completers“ und „dropouts“

Eine signifikante Unterscheidung der bestehenden Studienteilnehmer („completers“) und denjenigen, die leistungsbedingt oder aus eigenem Wunsch heraus die Ausbildung und die Studie verließen („dropouts“), also „abgelöst“ wurden, konnte nicht gezeigt werden. Alle Probanden zeigten eine ausgezeichnete körperliche Leistungsfähigkeit, gemessen an der VO_{2max} (Richter et al. 2024). Da eine sichere Differenzierung der „completers“ und der „dropouts“ anhand leistungsdiagnostischer, metabolischer und hormoneller Parameter nicht gelang, muss die hohe Abbrecher- und Ablösungsquote eine andere Ursache haben. Neben den in der Publikation ausgeführten Limitationen als mögliche Gründe für die fehlenden signifikanten Unterschiede, darf der psychologische Aspekt nicht

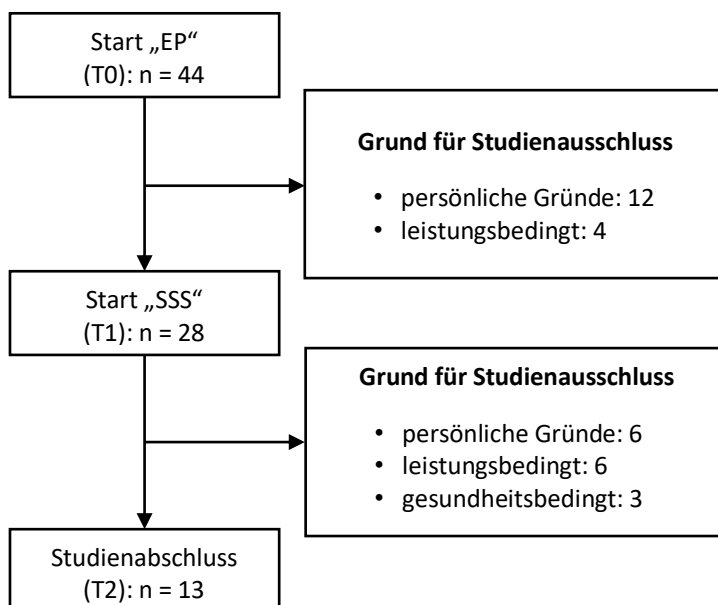


Abbildung 1: Aufschlüsselung der Studienausschlussgründe

außer Acht gelassen werden. Im Rahmen der KSS wurden neben den oben genannten Daten auch psychologische Daten in Form standardisierter Fragebögen erfasst, die nicht Teil dieser Arbeit sind. Teil dieser Arbeit war jedoch die Differenzierung der Abbruch- oder Ablösungsgründe, wobei eine Abbrecherquote von über 50 % mit der Angabe „persönlicher Gründe“ auffiel (Abb. 1).

Die Relevanz psychischer Belastungen für die sportliche Leistungsfähigkeit sowie umgekehrt der Einfluss hoher sportlicher Belastungen und Ansprüche auf die Psyche von Leistungssportlern, ist seit langem Gegenstand (sport-) psychologischer Forschung. Allerdings weisen die meisten der bisher zu dem Thema veröffentlichten Studien und Analysen aufgrund unzureichender Studien- und Datenqualität (teils erhebliche) Limitationen auf (Lochbaum et al. 2022). Dennoch ist das Problemfeld gerade im Leistungssport relevant und nach wie vor im Fokus aktueller Forschung. So hat beispielsweise

ein Expertengremium der „American Medical Society for Sports Medicine“ diesbezüglich eine Handlungsempfehlung zur adäquaten psychologischen Unterstützung von Athleten veröffentlicht (Chang et al. 2020). Schorb et al. sprechen sich sogar für eine präventive sportpsychiatrische Begleitung von Leistungssportlern in Form von Screenings im Rahmen sportmedizinischer Tauglichkeitsuntersuchungen und risikoadaptierter Prävention aus (Schorb et al. 2021).

Weiterführende Fragestellungen

Die Probanden der KSS zeigten keine schädlichen hormonellen oder metabolischen Veränderungen, wie sie in anderen, vergleichbaren Studien gefunden wurden. Die Energiebilanz der Probanden war insgesamt ausgeglichen (isokalorische Bedingungen), sodass der Energieverbrauch in der KSS nur unter ausreichender Energieversorgung der Probanden beobachtet wurde. Bisher haben sich ausschließlich männliche Soldaten für die Kampfschwimmerausbildung qualifiziert, sodass in der KSS nur männliche Probanden untersucht wurden. Auf Grundlage der vorliegenden Daten können daher weder allgemeingültige Aussagen zur Veränderung des RMR und des AEE unter negativer oder positiver Energiebilanz noch hinsichtlich beider Geschlechter getroffen werden.

Unter gleicher intensiver körperlicher Belastung im Rahmen militärischer Trainings waren bei Männern höhere Energiedefizite zu finden als bei Frauen (O'Leary et al. 2024). Weibliche Probanden nutzen bei körperlicher Belastung unter Energiemangelzuständen in höherem Maß die FM als Energiequelle als Männer und erhalten so im Vergleich länger ihre FFM (Hoyt and Friedl 2006), also das metabolisch relevante Kompartiment ihrer Körperzusammensetzung. Da die Probanden in der KSS keinen signifikanten Energiemangel aufwiesen, ist es daher zumindest nicht unwahrscheinlich, dass ähnliche Ergebnisse wie in der KSS auch bei Frauen zu finden sein werden. In weiteren Untersuchungen wird daher nicht nur zu klären sein, inwiefern sich der RMR und der AEE sowie andere Kompartimente des TEE im Rahmen längerer Belastungsphasen unter negativer, ausgeglichener und positiver Energiebilanz verändern, sondern auch, wie sich der weibliche Organismus im Vergleich zum männlichen in Bezug auf den Energieverbrauch anpasst.

Bezüglich der Fragestellung nach einer optimierten Begleitung der Kampfschwimmerausbildung lässt sich aus den dieser Arbeit zugrundeliegenden Daten kein sportmedizinisches Optimierungs- oder Interventionspotential des Trainings ableiten. Weitere Untersuchungen sind nötig, um die Gründe der hohen Abbrecher- und Ausfallquote unter den Kampfschwimmerschülern zu eruieren. Es ist anzunehmen, dass die psychische Belastung während des Trainings als potenziell wichtigster Faktor für die hohe Anzahl der Ausfälle der Kampfschwimmerschüler näher untersucht werden muss.



Resting metabolic rate and energy efficiency in response to an intensive 84-day combat-swimmer training in the German Armed Forces

Tony H. Richter¹ · Wiebke Braun² · Lorenz Scheit³ · Jan Schröder⁴ · Rüdiger Reer⁴ · Volker Harth⁵ · Katrin Bender⁶ · Andreas Koch⁶ · Anja Bosy-Westphal² · Manfred J. Müller²

Received: 10 August 2024 / Accepted: 4 November 2024
© The Author(s) 2024

Abstract

Purpose According to the ‘constrained model’, there are compensations in resting metabolic rate (RMR) at high levels of physical activity (PA). Here, we have used a standardized combat-swimmer training protocol (CST) to investigate whether changes in RMR (i) confirm the ‘constraint model’, and (ii) differ between successful participants and dropouts.

Methods Controlled 84d CST in 44 male soldiers with 13 finally successful. Fat mass (FM) and fat-free mass (FFM) were measured using Quantitative Magnetic Resonance. RMR was assessed by indirect calorimetry, $\text{VO}_{2\text{max}}$, and work efficiency by treadmill spiroergometry. Plasma levels of thyroid hormones, testosterone, and cortisol were analysed by standard laboratory methods.

Results CST increased $\text{VO}_{2\text{max}}$ (+6.9%) and exercise efficiency at low workloads of 10 and 12 km/h (+8.7 and +6.5%; both $p < 0.05$). As energy balance was moderately negative (-356 ± 383 kcal/d), FFM and FM decreased (-2 and -16% ; both $p < 0.05$). There was a considerable inter-individual variance but no change in the mean values of RMR and $\text{RMR}_{\text{adjFFM}}$. $\text{RMR}_{\text{adjFFM}}$ before CST had a negative association with its decrease with CST ($p < 0.005$). Concomitantly, plasma hormone levels were unchanged. When compared with dropouts, successful participants had a higher $\text{VO}_{2\text{max}}$ at baseline (5.2 ± 0.6 vs. 4.9 ± 0.4 l/min; $p < 0.05$) that increased with CST (+4.4 vs. -0.4% ; $p < 0.05$) at similar changes in body composition and energy balance.

Conclusion While CST increased $\text{VO}_{2\text{max}}$ and exercise efficiency as a compensation, there was an inter-individual variance in exercise-related compensation of RMR with no differences between ‘completers’ and ‘non-completers’.

Trial registration DRKS00018850, November 27, 2019.

Keywords Energy expenditure · Body composition · Combat training · Exercise · Physical activity · Energy constraint

Abbreviations

AEE Activity energy expenditure
CST Combat-swimmer training
EE Energy expenditure

EP Exercise preconditioning
FFM Fat-free mass
FM Fat mass
HR Heart rate
IC Indirect calorimetry

Communicated by Klaas R Westerterp.

✉ Manfred J. Müller
mmueller@nutrition.uni-kiel.de

¹ Bundeswehr Joint Medical Service, Regional Medical Support Command, Sanitätsunterstützungszentrum Munster, Sanitätsversorgungszentrum Faßberg, Faßberg, Germany

² Institute of Human Nutrition and Food Science, Kiel University, Kiel, Germany

³ Clinic I - Internal Medicine, Bundeswehr Hospital Hamburg, Hamburg, Germany

⁴ Faculty of Psychology and Human Movement Science, Department of Sports Medicine, Institute for Human Movement Science, University of Hamburg, Hamburg, Germany

⁵ Institute for Occupational and Maritime Medicine (ZfAM), University Medical Center Hamburg-Eppendorf (UKE), Hamburg, Germany

⁶ Section for Maritime Medicine, German Naval Medical Institute and Christian-Albrechts-University Kiel, Kiel, Germany

KSM	Kommando Spezialkräfte der Marine (German Navy's Special Forces Command)
PA	Physical activity
QMR	Quantitative magnetic resonance method
RMR	Resting metabolic rate
RER	Respiratory exchange ratio
MM	Muscle mass
SSS	Specific skills and stress
TEE	Total Energy Expenditure
VCO ₂	Carbon dioxide production
VO ₂	Oxygen consumption

Introduction

Total energy expenditure (TEE) is the energy (i) allocated to growth, reproduction, and body weight maintenance (i.e., resting metabolic rate, RMR, in a thermoneutral environment and a post-absorptive state), (ii) related to digestion and metabolism of food, as well as (iii) expended on spontaneous and planned physical activity (PA; i.e., activity energy expenditure, AEE). AEE is the most variable component of TEE across and within populations. Among adults, body size and composition, age, sex, and PA explain about 60–70% of the variance in TEE (Pontzer et al. 2021). In addition, inter- and intra-individual variations in energy expenditure (EE) reflect the plasticity and flexibility of EE and trade-offs of energy between different organs and tissues which are sensitive to temperature, food availability, PA, workload, and diseases. Metabolic adaptation to high PA includes decreases in RMR (i.e., in essential metabolic functions) and increases in exercise efficiency at increases in activity energy expenditure (AEE; Flanagan et al. 2024).

In humans, TEE may increase linearly with increases in PA (i.e., the ‘additive model’ of energy budgets suggesting an unchanged energy allocation to body maintenance and reproduction at high PA). By contrast, the ‘constrained model’ of energy budgets assumes an asymptotical increase in TEE with increasing PA resulting in adaptations of RMR reflecting a reduced allocation of energy to body maintenance, growth, and reproduction. The ‘constrained model’ implies that at high PA, TEE has reached an upper limit where RMR decreases (with a decrease in size- and tissue-specific metabolic rates of organs and tissues) giving the capacity for AEE to increase (Pontzer et al. 2016). Evidence of trade-offs between AEE and TEE on other domains has been found in observational studies on children (Urlacher et al. 2019) and adult populations (Careau et al. 2021). The ‘constraint model’ fundamentally questions current concepts in nutritional science, clinical nutrition, and sports medicine.

Exercise-related energy compensation may be similar to the previous finding that RMR decreases in response to caloric restriction which is associated with decreases in fat-free mass (FFM) and fat mass (FM) as well as in the plasma concentrations of fT3, leptin, and testosterone, while cortisol levels increased (Nindl et al. 2007; Müller and Bosy-Westphal 2013; Müller et al. 2015). The decrease in RMR is in part independent of the decrease in FFM reflecting a mass-independent decrease in cellular respiration which is described as ‘adaptive thermogenesis’ (Müller et al. 2015, 2016a, 2021, 2023a). In addition, with weight loss there is a 10–20% increase in the mitochondrial efficiency (i.e., the ratio of oxygen consumed per ATP produced) in skeletal muscles (Rosenbaum and Leibel 2010; Müller et al. 2015). These phenomena add to the variability of metabolic adaptation which includes adaptations in RMR and in the non-resting compartment of EE (Müller et al. 2023b). However, since a negative energy balance during an intensive training protocol will result in a decrease in FM and, possibly, FFM, this may impact trade-offs of energy between different organs and tissues and, thus, the ‘constraint model’.

Studies supporting the ‘constraint model’ (i) were mostly observational in free living subjects at different levels of PA, (ii) did not take into account the effects of a negative energy balance (due to excessive exercise with at the same time insufficient energy intake) and its effect on possible hormonal determinants of EE, and (iii) had some methodological and statistical limitations (Gonzalez et al. 2023). Recently, two publications have put the ‘constraint model’ into perspective. First, there was a ‘constrained energy expenditure’ under conditions of an energy deficit (due to an inadequate energy intake) only (Willis et al. 2022). A reduced energy intake and, thus, a catabolic state was observed within 2 weeks after the start of a military training protocol and had a negative impact on soldiers’ performance (Nindl et al. 2007). And second, there was no evidence for metabolic adaptations in sleep or resting energy expenditures in response to a controlled 24-week exercise intervention (Flanagan et al. 2024).

In summary, possible adaptations of RMR in response to a high PA resulting from an extensive training program remain unclear. We hypothesized that (i) extensive training results in a mass-independent decrease in RMR (which would suggest ‘exercise energy compensation’) and (ii) unsuccessful participants show an impaired metabolic and hormonal adaptation together with detrimental changes in body composition.

Methods

Study protocol

Soldiers have special physical demands and special physical stresses. As “tactical athletes”, soldiers benefit from systematic training to optimize their performance and to prevent injuries or illnesses (Sell et al. 2010). Thus, sports medical and nutritional care of soldiers with special stresses is obligatory. For the Bundeswehr in general and, in this context, for the German Navy’s Special Forces Command (Kommando Spezialkräfte der Marine, KSM) in particular, it is relevant that (i) the soldiers are optimally trained, (ii) skills and potential of the soldiers are recognised, promoted in the sense of ‘human performance optimisation’ (Travis and Brown 2023) and optimally utilised to meet the constantly growing and varying challenges the KSM is confronted with.

The metabolic effects of training of German Navy’s Special Forces Command combat-swimmers have not been investigated before. Our ‘Combat-swimmer training’ (CST) study was therefore launched as prospective observational study to investigate how combat-swimmer students are challenged mentally and physically during the first twelve weeks of the training program and how they adapt to it metabolically. The aim of the study was, among other things, to investigate if the participants who dropped out within the first twelve weeks of training program differed in their metabolic and endocrine adaptations from the successful participants. In addition, the study protocol intended to identify parameters that allow an early differentiation between successful and unsuccessful participants, to potentially reduce the number of unsuccessful participants by targeted intervention during the training program.

CST (registered with DRKS, No. DRKS00018850) is a prospective observational study with a pre/post design. Combat-swimmer trainees were monitored before (T0) and during an 11-week phase of training with 6-week exercise preconditioning (“EP”, i.e., phase T0 to T1) the subsequent 5-week indoor phase training phase with a focus on specific skills and stress responses (“SSS”, i.e., from T1 to T2) and one following week of examination phase. The study protocol complied with the statutes of the Declaration of Helsinki and was approved by the ethics committee of the Medical Faculty of the Christian-Albrechts-Universität, Kiel (D 423/19).

The study was conducted between November 2021 and June 2023. All participants had been investigated during the first and last week of “EP” and the week after “SSS”.

Research questions

We have addressed two research questions:

- Is there a decrease in RMR in response to CST?
- Do the metabolic and endocrine responses to CST allow a differentiation between successful and unsuccessful participants (i.e., ‘completers’ vs. ‘non-completers’)?

Participants

Study participants were recruited from soldiers who had started the CST and volunteered to take part. All subjects provided informed written consent before participation. Participation could be stopped at any time without giving reasons and without negative consequences. There was no financial benefit or any other form of remuneration or favour for participating in the study. As only male candidates have qualified for CST to date, the study is limited to male volunteers of legal age with a valid diving medical certificate in accordance with Bundeswehr regulation C1-258/03000 for TUKV TA3 (diver, submarine, combat-swimmer suitability). Failure to fulfil the above conditions was considered an exclusion criterion.

Participation in the study ended after T1 (i.e., at the end of EP, these subjects were called ‘exercise completers’) or T2 (i.e., after EP + SSS, these subjects were called ‘full completers’) were reached or in the case that the soldiers had to end the training due to illness or injury (health reasons, e.g., SARS-COV 2 and other viral or bacterial infections, barotrauma, and severe bruises) or did not fulfil the requirements of the training or if they wanted to end their participation for personal reasons.

The baseline data (at T0) on body composition, REE, fitness and hormones of all participants and stratified according to ‘non-eligible soldiers’, ‘exercise completers’, and ‘full completers’ are presented in Tables 1 and 2. Forty-four soldiers had been assessed for eligibility in the study, but only 28 soldiers met the inclusion criteria and were enrolled. 16 soldiers cancelled the program during the first six weeks of the CST, six left for personal reasons, three had to end participation for health reasons, and six had to drop out due to insufficient performance. Sixteen soldiers have completed “EP” (i.e., at T1; ‘exercise completers’, mean age 25.7 ± 4.1 years), while 13 soldiers completed the entire program until T2 (i.e., ‘full completers’, mean age 25.23 ± 2.83 years, Table 2).

Training protocol

CST started with “EP”. During EP, the soldiers were supervised by instructors and supported and challenged both collectively and individually. Each training week comprised

Table 1 Characterization of all participants before the start of the combat swimmer training (CST)

<i>N</i> = 44	Mean	SD	Range
Basal characteristics			
Age (y)	25.75	± 3.02	20–36
Height (cm)	182	± 7	170–197
Weight (kg)	82.62	± 8.41	69.50–110.20
BMI (kg/m ²)	24.87	± 1.68	20.60–28.40
FMI (kg/m ²)	3.02	± 0.98	0.61–5.40
FFMI (kg/m ²)	19.72	± 1.80	15.80–25.20
MM (kg)	31.24	± 3.28	25.37–40.41
Aerobic fitness			
VO _{2max} (ml/min)	5085 ^a	± 514 ^a	4198–6302 ^a
VO _{2max} (ml/min/kg)	62 ^a	± 5 ^a	48–70 ^a
Resting energy expenditure			
REE (kcal/d)	2139.07	± 277.54	1597–2626
REEadj (kcal/d)	1855.89	± 241.84	1368–2490
REEpred (kcal/d)	1939.99	± 141.29	1712–2324
REEm–REEp (kcal/d)	199	± 213.55	–291–765
Respiratory exchange ratio	0.78	± 0.08	0.70–1.10

BMI body mass index; FMI fat mass index; FFMI fat free mass index; MM muscle mass; VO_{2max} maximum volume of oxygen consumed; REE resting energy expenditure; REEadj REE adjusted for FFM using regression analysis; REEpred predicted REE acc. to Harris and Benedict; REEm–REEp measured REE minus predicted REE acc. to Harris and Benedict; ^a*n* = 35

5 days with regular physical exertion and 2 days at the soldiers' own disposal with no planned exercise sessions. EP included daily high-frequency aerobic training, workloads in the anaerobic range, and regenerative training content, and the daily structure did not include any longer breaks from workload apart from the lunch break. Types of exercise during this phase included endurance training in the form of swimming, diving, apnoea diving, running training indoors and outdoors, strength training, rescue, and recovery exercises, first aid, coordination, and psychological skills training.

Due to the adaptation of the workload during training to the collective but also the individual requirements of the combat swimming soldiers, it is not possible to make a uniform statement on the intensity of the workload during “EP” across the four training programs under consideration. The aim of the sports training phase was to prepare the study participants for the following challenges in the best feasible way within the scope of their potential.

The subsequent “SSS” module also included the burdens, which stressed the combat swimming soldiers in the aerobic, anaerobic, and regenerative stress ranges. In addition to the stresses of “EP”, the “SSS” module also included psychological stressors, such as sleep deprivation, unplanned exertion, night alarms, and changing exertion intensities. There

are standardized specifications “SSS”, within the framework of which all combat swimming soldiers were subjected to the same type and intensity of stress. Therefore, an average value of 18,894 MET min/week (range between 1740 and 2739 MET min/day) could be calculated for the SSS module.

Resting metabolic rate (RMR)

RMR was assessed by indirect calorimetry (IC) using the Vmax Spectra 29n, SensorMedics® (Viasys Healthcare, Bithoven, The Netherlands, software: Vmax, version 12-1a) and the Quark RMR (COSMED, Rome, Italy, software: Quark RMR, PFT CPET Suite, version 9.1b). Oxygen consumption (VO₂) and carbon dioxide production (VCO₂) were measured after prior calibration and regular calibrations during the measurement according to the manufacturer's specifications. Alcohol burning tests were performed as a post-calorimetric test, and any deviation in VO₂ and VCO₂ from the theoretical value was used for device-specific corrections (i.e., between –1 and 4%). The subjects' heads were placed under a transparent ventilated hood. VO₂ and VCO₂ were analysed continuously, measured values were averaged every 20 s (Viasys) or every 5 s (COSMED). Measurements were performed early in the morning after an overnight fast under steady state conditions. During the measurement, subjects were in a lying position, awake and, apart from normal breathing movements, did not move. Gas exchange measurements were performed for 40 min, and the data obtained during the first 10 min were discarded. The precision of the IC measurements was 4.4–6.5% (Bader et al. 2005). RMR was calculated using the Weir formula (Weir 1949)

$$\text{RMR [kcal/d]} = (3.9 \times \text{VO}_2 \text{ [l/min]} + 1.1 \times \text{VCO}_2 \text{ [l/min]}) \times 1440.$$

RMR was then adjusted for FFM and the change in FFM (Bosy-Westphal et al. 2013)

$$\text{RMR}_{\text{adjusted}} \text{ [kcal/d]} = \text{RMR}_{\text{measured}} \text{ [kcal/d]} + ((52.94 - \text{FFM} \text{ [kg]}) \times 22,762).$$

In addition, RMR was predicted (‘RMRpred’) according to Harris and Benedict's algorithm (Harris and Benedict 1918). The respiratory exchange ratio was calculated as VCO₂/VO₂.

Aerobic fitness and work efficiency

Tests were performed on a treadmill spiroergometry (QUARK RMR, COSMED, Rome, Italy; Software: Quark RMR, PFT CPET Suite, version 9.1b). The protocol to assess work efficiency started at 8 km/h with a 1° incline and was increased by 2 km/h every 3 min and monitored for 6 min after the end of the exercise. To reach recovery,

Table 2 Characterization of completers and dropouts before the start of the combat swimmer training (CST)

<i>N</i> = 44	Full completers (<i>n</i> = 13)	Exercise completers (<i>n</i> = 15)	Non eligible soldiers (<i>n</i> = 16)
Body weight and body composition			
Height (cm)	183 ± 6	182 ± 9	182 ± 6
Weight (kg)	83.04 ± 5.81	85.94 ± 10.50*	78.83 ± 6.56
BMI (kg/m ²)	24.79 ± 1.42	26.01 ± 1.43*	23.88 ± 1.49
FMI (kg/m ²)	2.58 ± 0.69	3.20 ± 1.30	3.22 ± 0.79
FFMI (kg/m ²)	19.96 ± 2.27	20.67 ± 1.13*	18.63 ± 1.42
MM (kg)	31.73 ± 2.45	29.33 ± 1.98*	32.84 ± 3.84
Aerobic fitness			
VO _{2max} (ml/min)	5151 ± 561 ^a	5244 ± 550 ^b	4860 ± 374 ^c
VO _{2max} (ml/min/kg)	62 ± 7 ^a	61 ± 4 ^b	63 ± 4 ^c
Resting energy expenditure			
REE (kcal/d)	2168 ± 288	2197 ± 305	2050 ± 224
REE _{adj} (kcal/d)	1858 ± 283	1854 ± 259	1858 ± 203
REE _{pred} (kcal/d)	1954 ± 110	1990 ± 177	1882 ± 111
REE _m - REE _p (kcal/d)	214 ± 234	220 ± 216	167 ± 187
Respiratory exchange ratio	0.79 ± 0.10	0.79 ± 0.08	0.76 ± 0.05
Work efficiency			
EE 10 km/h (kcal/min)	15.60 ± 2.72 ^a	15.24 ± 2.20 ^b	13.44 ± 1.06 ^{c#}
EE 10 km/h (kcal/min/kg)	0.19 ± 0.02 ^a	0.18 ± 0.02 ^b	0.17 ± 0.01 ^c
EE 10 km/h (kcal/min, adjFFM)	15.31 ± 2.14 ^a	14.73 ± 1.80 ^b	14.25 ± 0.98 ^c
EE 12 km/h (kcal/min)	19.03 ± 2.46 ^a	18.83 ± 2.26 ^b	17.09 ± 1.30 ^c
EE 12 km/h (kcal/min/kg)	0.23 ± 0.02 ^a	0.22 ± 0.01 ^b	0.22 ± 0.02 ^c
EE 12 km/h (kcal/min, adjFFM)	18.66 ± 2.09 ^a	18.19 ± 1.45 ^b	18.09 ± 1.18 ^c
EE 14 km/h (kcal/min)	22.25 ± 2.58 ^a	21.92 ± 2.75 ^b	20.02 ± 1.33 ^c
EE 14 km/h (kcal/min/kg)	0.27 ± 0.02 ^a	0.26 ± 0.01 ^b	0.26 ± 0.01 ^c
EE 14 km/h (kcal/min, adjFFM)	21.82 ± 2.21 ^a	21.16 ± 1.76 ^b	21.19 ± 1.00 ^c
EE 16 km/h (kcal/min)	24.19 ± 3.03 ^a	24.83 ± 2.98 ^b	22.70 ± 1.60 ^c
EE 16 km/h (kcal/min/kg)	0.29 ± 0.03 ^a	0.29 ± 0.02 ^b	0.29 ± 0.01 ^c
EE 16 km/h (kcal/min, adjFFM)	23.79 ± 3.17 ^a	24.14 ± 1.95 ^b	23.79 ± 1.24 ^c
Hormones			
fT3 (ng/dl)	0.37 ± 0.05	0.39 ± 0.05	0.38 ± 0.03
fT4 (ng/dl)	1.26 ± 0.15	1.40 ± 0.18	1.39 ± 0.17
TSH (mU/l)	1.87 ± 0.33	1.81 ± 0.74	1.74 ± 0.65
Testosterone (nmol/l)	20 ± 7	21 ± 8	19 ± 5 ^d
Cortisol (μmol/l)	0.18 ± 0.05	0.17 ± 0.05	0.20 ± 0.06
Testosterone/cortisol (nmol/l/μmol/l)	132.97 ± 95.59	142.14 ± 84.12	108.71 ± 58.61 ^d

Data are presented as mean ± standard deviation

BMI body mass index; *FMI* fat mass index; *FFMI* fat free mass index; *MM* muscle mass; *VO_{2max}* maximum Volume of Oxygen consumed; *REE* resting energy expenditure; *REE_{adj}* REE adjusted for FFM using regression analysis; *REE_{pred}* predicted REE acc. to Harris and Benedict; *REE_m - REE_p* measured REE minus predicted REE acc. to Harris and Benedict; *EE* energy expenditure; (kcal/min, adjFFM): energy expenditure adjusted for FFM using regression analysis; *fT3* triiodothyronine; *fT4* thyroxine; *TSH* thyroid stimulating hormone

*Sign. difference between Exercise completers vs. Non eligible soldiers, $p < 0.05$; #sign difference between Full completers vs. Non eligible soldiers, $p < 0.05$; ^a $n = 10$; ^b $n = 13$; ^c $n = 12$; ^d $n = 14$

the subsequent walking speed was 4 km/h. During spiroergometry, VO₂, VCO₂ and heart rate (HR) were measured continuously using a mask system, EE and VCO₂/VO₂

were calculated. As the EE adapts to changes in FFM, the data were adjusted to FFM using regression analysis ("EE × km/h (kcal/min, FFM_{adjusted})") (see above).

Weight status and body composition

Height and weight were measured with a stadiometer with an accuracy of 1 mm and a calibrated scale (with an accuracy of 10 g; seca 285, seca GmbH & co Hamburg, Germany). Subjects were weighed with an empty bladder, fasting, and in underwear.

Since combat-swimmers are heavy performers, body weight and BMI cannot characterize the functional component of the body, i.e., lean mass or FFM (Potter et al. 2022). Thus, the assessment of body composition was an essential part of physical characterization of the participants of CST. FM was measured in kg using the Quantitative Magnetic Resonance method (QMR) with the EchoMRI™-Adult Human NMR/MRI Body Composition Analyser from Echo Medical Systems, LLC, Houston, USA (for further details of the method, see Bosy-Westphal and Müller 2015). FFM was then calculated by subtracting FM from body weight. QMR assesses FM with high accuracy of 0.2 kg and precision of 0.7% (Napolitano et al. 2008; Bosy-Westphal and Müller 2015; Müller et al. 2016b). QMR was calibrated daily following the manufacturer's instructions, at a constant room temperature of between 22 and 23 °C. One measurement run consisted of three consecutive measurements, and the results were averaged. The measurement duration per subject was 6 min.

For inter-individual comparisons, FM and FFM were adjusted for height squared and presented as fat mass index (FMI) and fat-free mass index (FFMI).

Skeletal muscle mass (MM) was calculated from FFM and FM using a formula based on a database of 318 men aged between 18 and 86 years where muscle mass was precisely determined using whole-body MRI scans (Enderle et al. 2023)

$$\begin{aligned} \text{MM (kg)} = & -0.506 + (0.486 \times \text{FFM (kg)}) \\ & + (0.097 \times \text{FM (kg)}) \\ & + (-0.039 \times \text{age (years)}). \end{aligned}$$

Energy balance

Energy balance (EB) was calculated from changes in body composition (see Müller et al. 2023a)

$$\text{EB (kcal/d)} = [(\Delta \text{FM (kg)} \times x) + (\Delta \text{FFM (kg)} \times y)]/\text{d},$$

with $x = 13,100$ kcal/kg for an increase in FM and -9300 kcal/kg for a decrease in FM. In the case of an increase in FFM, $y = 2200$ kcal/kg and in the case of a decrease in FFM $y = -1100$ kcal/kg (taking into account that

the synthesis of FM and FFM is more energy-intensive than their actual energy density; Hall and Guo 2017).

Plasma hormone concentrations

Blood samples were taken in the morning after an overnight fast. Routine laboratory parameters, hormones, and substrates were analysed with the use of standard laboratory techniques (Bundeswehrkrankenhaus Hamburg, Department of Laboratory Medicine; University Medical Center Hamburg-Eppendorf, Institute of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine). Normal ranges, cortisone (133–537 nmol/l), testosterone (12.14–39.87 nmol/l), TSH (0.3–3.5 mU/l), fT3 (0.3–0.6 ng/dl) and fT4 (0.5–2.3 ng/dl) (Roche Cobas e411, ECLIA).

Statistics

Statistical analysis was conducted as inter- and intra-individual comparisons of data before and after intervention (i.e., ANOVA, ANOVA with repeated measures and post hoc Bonferroni as well as Greenhouse–Geisser correction, Mann–Whitney U test, and pairwise comparisons) using IBM SPSS Statistics (version 28) as statistical program.

In an ANOVA with post hoc Bonferroni correction, the parameters of all 44 subjects at time T0 (start of study) were compared, analysing whether there was an initial difference between successful soldiers who reached T2 and participants who were not eligible according to the baseline examination or dropped out after T1 (end of EP, start of SSS) or who reached T2 (end of SSS). This comparison revealed a difference between the number of subjects and the analysed parameters of metabolic and hormonal adaptation. In these nine cases, bicycle spiroergometry was performed instead of treadmill spiroergometry. As the performance data from these different measurement methods are not directly comparable (Price et al. 2022; Wiecha et al. 2022), these data were excluded from the analysis. Due to limited blood sample volume to determine all parameters, there were two missing values of the testosterone measurements.

A Mann–Whitney test and Welch test were performed to analyse the inter-individual adaption to compare the subjects who reached T2 with the subjects who dropped out at T1.

A repeated-measures ANOVA (with post hoc Bonferroni and Greenhouse–Geisser correction) was performed to analyse the adaption of basal characteristics, energy expenditure, and hormone parameters in both, the 15 ‘exercise completers’ and the 13 ‘full completers’.

Table 3 T2T0-Changes in body weight and body composition as well as metabolic and endocrine adaptations to combat swimmer training in the group of ‘Full completers’

N = 13	Baseline (T0)	End of training protocol (T2)	Δ T2 – T0
Body weight and body composition			
Weight (kg)	83.04 $\pm$ 5.81	81.86 $\pm$ 5.85	–1.18 $\pm$ 1.40*
BMI (kg/m ²)	24.79 $\pm$ 1.42	24.43 $\pm$ 1.40	–0.36 $\pm$ 0.44*
FMI (kg/m ²)	2.58 $\pm$ 0.69	2.16 $\pm$ 0.53	–0.42 $\pm$ 0.40**
FFMI (kg/m ²)	19.96 $\pm$ 2.27	19.59 $\pm$ 1.57	–0.37 $\pm$ 1.21
MM (kg)	31.74 $\pm$ 2.55	31.07 $\pm$ 2.36	–0.67 $\pm$ 1.93
EB (kcal/d)			–356 $\pm$ 383
Respiratory exchange ratio	0.79 $\pm$ 0.10	0.86 $\pm$ 0.10	0.06 $\pm$ 0.11
Hormones			
fT3 (ng/dl)	0.37 $\pm$ 0.05	0.36 $\pm$ 0.04 ^a	–0.01 $\pm$ 0.03 ^a
fT4 (ng/dl)	1.26 $\pm$ 0.15	1.29 $\pm$ 0.12 ^a	0.01 $\pm$ 0.11 ^a
TSH (mU/l)	1.87 $\pm$ 0.33	2.19 $\pm$ 0.70 ^a	0.29 $\pm$ 0.57 ^a
Testosterone (nmol/l)	20.41 $\pm$ 6.50	24.06 $\pm$ 8.34	3.64 $\pm$ 3.80*
Cortisol (μ mol/l)	0.18 $\pm$ 0.05	0.16 $\pm$ 0.03 ^a	–0.02 $\pm$ 0.03 ^a
Testosterone/cortisol (nmol/l/ μ mol/l)	132.97 $\pm$ 95.96	133.80 $\pm$ 29.76 ^a	23.30 $\pm$ 26.70 ^a

Data are presented as mean $\pm$ standard deviation

BMI body mass index; FMI fat mass index; FFMI fat free mass index; MM muscle mass; EB energy balance (according to body composition); fT3 triiodothyronine; fT4 thyroxine; TSH thyroid stimulating hormone

*Sign. difference between the measurement times $p < 0.05$, ** $p < 0.01$; ^a $n = 10$

Results

Is there a decrease in RMR in response to CST?

CST reduced body weight, FMI, and muscle mass

(Table 3). Energy balance was slightly but not significantly negative (Table 3). While CST increased physical fitness (Fig. 2A), there was no decrease in RMR and no mass-independent adaption of RMR (as indicated by the difference between measured and predicted RMR as well as changes in RMR adjusted for changes in FFM; Figs. 1,

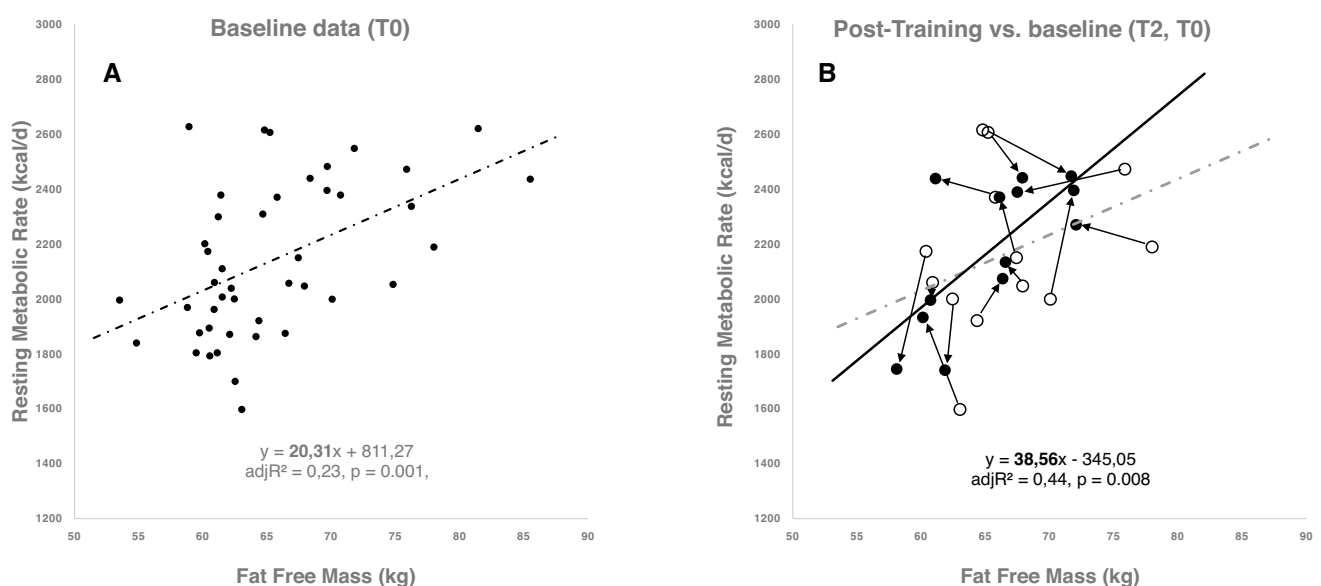


Fig. 1 Linear regression analysis of resting energy expenditure (RMR) on fat-free mass (FFM). **A** for the total study population at baseline (T0; $n = 44$). **B** linear regression analysis RMR on FFM in

the group of ‘full completers’ (T2; post training T2, $n = 13$) and the change of RMR from T0 to T2. Circles: participants at T0. Black dots: participants at T2

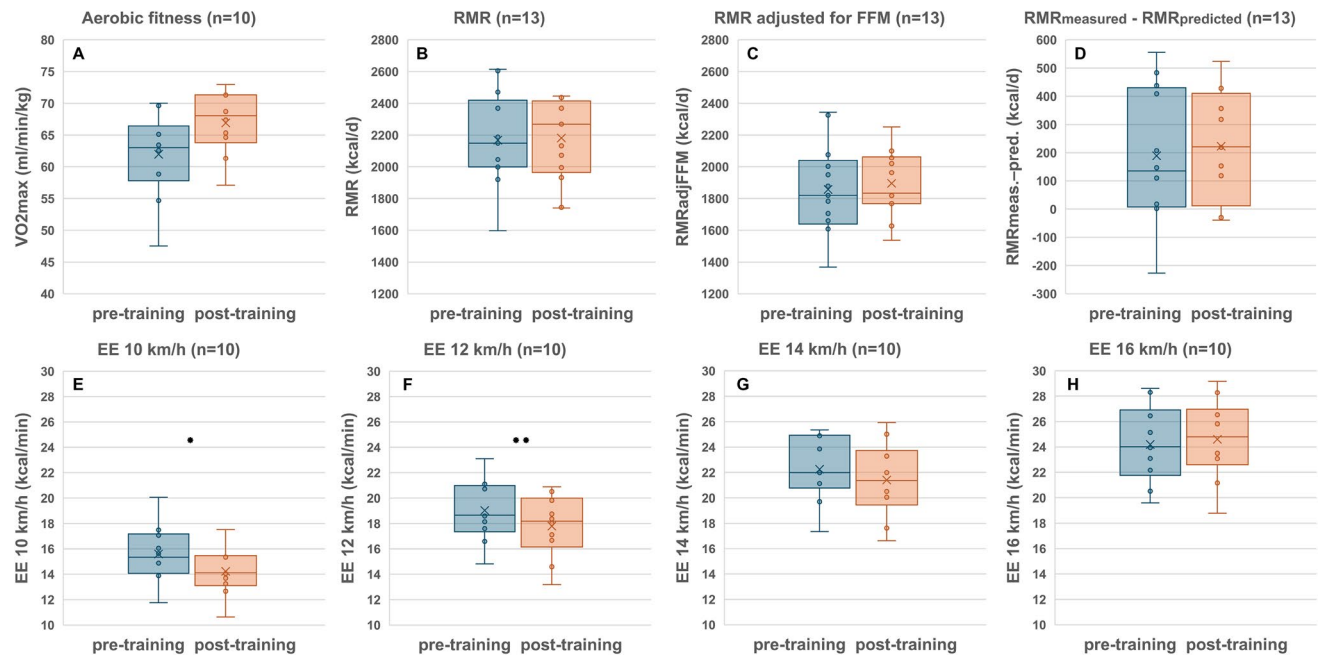


Fig. 2 Metabolic and energetic adaptation in the group of ‘full completers’ ($n=13$). Data are shown as initial state at T0 and at the end of the training protocol (T2). **A** aerobic fitness (VO_{2max}), **B** resting metabolic rate; **C** RMR adjusted for FFM; **D** difference

between measured and predicted RMR (with prediction according to the Harris–Benedict algorithm); **E–H** work efficiency at different workloads (as indicated). Significant differences as indicated as * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

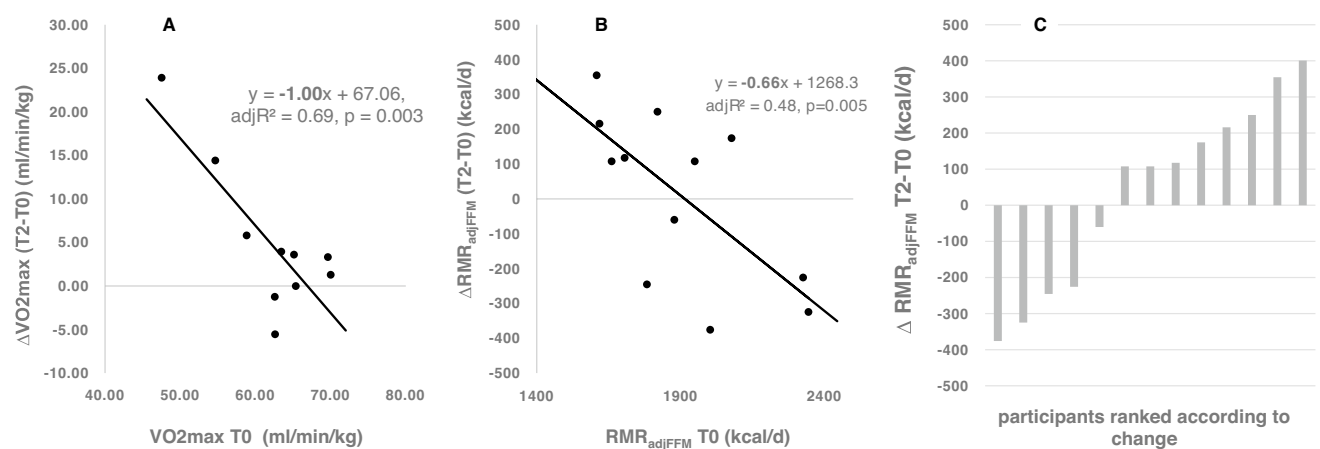


Fig. 3 Regression analyses $\Delta T2T0-VO_{2max}$ on baseline (=T0) VO_{2max} (**A**), $\Delta T2T0RMR_{adjFFM}$ on baseline (T0) RMR_{adjFFM} (**B**) and inter-individual variance in exercise-related energy compensation of

RMR in the group of ‘full completers’ (**C**; $n=13$). See Fig. 2 and Table 3 for original data

2B–D). CST increased muscle work efficiency at low workload (i.e., EE 10 km/h and EE 12 km/h; Fig. 2E, H). CST did not affect the plasma concentrations of hormones involved in metabolic adaptation: fT3, testosterone, and cortisol levels were unchanged with training as was the case for plasma testosterone concentrations (Table 3).

Physical fitness before CST was negatively correlated with its increase in response to CST (Fig. 3A). While

RMR_{adjFFM} before CST had a negative association with its decrease with CST (Fig. 3B), there was no significant association between CST-induced changes in VO_{2max} and CST-induced changes in RMR_{adjFFM} . However, there was a considerable inter-individual variance in metabolic adaptation to CST (Fig. 3C).

Is there a difference between successful and unsuccessful participants at the beginning of the training program?

Successful participants had a lower baseline (T0) body weight and higher energetic work efficiency at all levels of workload when compared with participants who dropped out at T1 (Table 2). Soldiers who were not found eligible for CST had a lower body weight, less physical fitness, and a lower energetic efficiency, while plasma levels of testosterone were slightly lower, and cortisol were slightly higher (Table 2).

Is there a difference between successful participants and those who were not successful at the time of termination?

At T1, successful participants had a slightly higher T0–T1-decrease in BMI and a higher gain in $\text{VO}_{2\text{max}}$ when compared with dropouts (Table 4). There were no differences in T1–T0-changes body composition, RMR or plasma hormone levels between the successful participants and those who dropped out. At T1, when compared to dropouts, work efficiency improved in completers compared to dropouts (Table 4). There were no between-group differences in the changes of plasma hormones (Table 4).

Discussion

Is there a decrease in RMR in response to CST?

Although the soldiers were already in a good-to-excellent training condition before the start of the study protocol (as characterized by their $\text{VO}_{2\text{max/kg}}$ compared to competitive athletes; see Marti et al. 1999, Knechtle 2002), as well as when compared to the average German population (i.e., $162\% \pm 18\%$ of the 50th percentile and at $129\% \pm 12\%$ of the 90th percentile above the physical fitness of the general German population; Finger et al. 2021), they showed a further improvement during CST with an average increase in $\text{VO}_{2\text{max}}$ of 7% (Tables 1, 2 and Figs. 2A, 3A).

Contrary to the ‘constraint model’ of EE (Pontzer et al. 2016; Pontzer 2018; Urlacher et al. 2019; Careau et al. 2021), we did not observe an exercise-related change in RMR in response to our prolonged high-intensity exercise training protocol (Fig. 2B–D). Both the mean difference between measured and predicted RMR as well as the mean change in RMR adjusted for the change in FFM remained unchanged (Fig. 2C, D). These data may indicate that at the group level, there was no exercise-related energy compensation within the RMR component of TEE. Concomitantly, CST did not affect plasma testosterone and T3-levels,

suggesting that there were no perturbations in two essential basal functions, i.e., the hypothalamic–pituitary–testicular axis and the hypothalamic–pituitary–thyroid axis (Table 3). By contrast, the increased work efficiency at low workloads shows that expending less activity-related energy is a metabolic compensation to CST in the non-resting energy expenditure component of TEE (Fig. 2E, F). This exercise-related compensation may reflect an improved mitochondrial function within skeletal muscle cells.

There was a considerable inter-individual variance in changes in RMR beyond the expected changes due to the decreases in FFM (Fig. 3C) which was associated with the mass-independent variation of RMR before CST: The higher basal $\text{RMR}_{\text{adjFFM}}$ the greater was its response to CST (Fig. 3B). Obviously, ‘exercise-RMR-compensation’ occurs in some but not in all soldiers in response to CST (Fig. 3c). However, the metabolic basis of ‘compensators’ or ‘non compensators’ remains obscure. Based on our data, one may speculate that faced with the variance in $\text{RMR}_{\text{adjFFM}}$ before CST soldiers who are at a lower range of their mass-independent metabolic rates are limited in the exercise-induced trade-off between resting and non-resting EE.

Data of a recent randomized controlled 24-week intervention study in formerly sedentary individuals who had a low cardiorespiratory fitness and were exposed to mild-to-moderate exercise volumes may add to our present findings (Flanagan et al. 2024). In that study, baseline TEE was negatively associated with exercise-related energy compensation which was explained by exercise efficiency rather than by basal metabolism. There was a considerable variance in the responses and approximately 50% of the study participants were considered as the so-called ‘compensators’. The authors speculated that individuals with a higher TEE may have a limited trade-off between the different components of TEE.

CST caused a variable and slightly negative energy balance resulting in a moderate loss in body weight and fat mass (Tables 3 and 4). With caloric restriction and weight loss, decreases in RMR are explained by a loss of FFM, changes in its anatomical composition and weight loss-associated hormonal adaptations, i.e., decreases in plasma levels of T3, leptin, insulin, as well as a reduced sympathetic nervous system activity, while plasma glucagon levels increased (Bosy-Westphal et al. 2013; Müller et al. 2015, 2021, 2023b). By contrast, in our CST-study, we did not find a similar hormonal pattern as observed at a slightly negative energy balance, which differed from the negative energy balance seen during semi-starvation (Müller et al. 2015, 2021) as well as during an extensive and prolonged US-transcontinental race (Thurber et al. 2019). Concomitantly, during CST, there was a minor loss in muscle mass only (Table 3).

When compared to previous data on the effects of caloric restriction without exercise, the lack of metabolic adaptation

Table 4 T1T0-changes in body weight, body composition as well as metabolic and endocrine adaptations in ‘full completers’ compared to ‘exercise completers’

N = 28	ΔFull completers	ΔExercise completers
Body weight and body composition		
Weight (kg)	-0.82 ± 1.27	-0.65 ± 1.56
BMI (kg/m ²)	$-0.25 \pm 0.38^*$	-0.20 ± 0.47
FMI (kg/m ²)	-0.21 ± 0.26	-0.21 ± 0.24
FFMI (kg/m ²)	0.27 ± 1.14	0.30 ± 0.87
MM (kg)	0.42 ± 1.97	0.44 ± 1.43
EB (kcal/d)	-79 ± 308	-87 ± 253
Aerobic fitness		
VO _{2max} (ml/min)	230 ± 490^a	-21.80 ± 453.84^b
VO _{2max} (ml/min/kg)	$3 \pm 6^{a*}$	0 ± 6^b
Resting energy expenditure		
REE (kcal/d)	-58 ± 206	-13 ± 241
REEadj (kcal/d)	-81 ± 221	-37 ± 297
REEpred (kcal/d)	-11 ± 17	-9 ± 21
REEm-REEp (kcal/d)	-47 ± 194	-4 ± 260
Respiratory exchange ratio	0.04 ± 0.11	0.05 ± 0.07
Work efficiency		
EE 10 km/h (kcal/min)	-0.70 ± 0.96^a	-0.14 ± 1.90^b
EE 10 km/h (kcal/min/kg)	-0.01 ± 0.01^a	0.00 ± 0.03^b
EE 10 km/h (kcal/min, adjFFM)	-0.56 ± 1.09^a	0.18 ± 0.48^b
EE 12 km/h (kcal/min)	-0.66 ± 0.87^a	-0.37 ± 0.90^b
EE 12 km/h (kcal/min/kg)	-0.01 ± 0.01^a	0.00 ± 0.01^b
EE 12 km/h (kcal/min, adjFFM)	-0.51 ± 1.00^a	0.24 ± 0.65^b
EE 14 km/h (kcal/min)	-0.28 ± 1.39^a	-0.03 ± 0.86^b
EE 14 km/h (kcal/min/kg)	0 ± 0.01^a	0.00 ± 0.01^b
EE 14 km/h (kcal/min, adjFFM)	0.13 ± 0.91^a	0.26 ± 0.71^b
EE 16 km/h (kcal/min)	0.29 ± 2.13^a	0.00 ± 0.90^b
EE 16 km/h (kcal/min/kg)	0.01 ± 0.03^a	0.00 ± 0.01^b
EE 16 km/h (kcal/min, adjFFM)	0.91 ± 2.58^a	0.24 ± 0.65^b
Hormones		
fT3 (ng/dl)	-0.01 ± 0.03	-0.02 ± 0.04
fT4 (ng/dl)	0.01 ± 0.06	-0.07 ± 0.11
TSH (mU/l)	0.26 ± 0.52	0.05 ± 0.70
Testosterone (nmol/l)	1.58 ± 3.89	1.13 ± 4.05
Cortisol (μmol/l)	-0.03 ± 0.06	0.01 ± 0.05
Testosterone/cortisol (nmol/l/μmol/l)	16.36 ± 60.06	-3.02 ± 70.44

Data are presented as mean $\pm$ standard deviation

BMI body mass index; *FMI* fat mass index; *FFMI* fat free mass index; *MM* muscle mass; *EB* energy balance (according to body composition); *VO_{2max}* maximum volume of oxygen consumed; *REE* resting energy expenditure; *REEadj* REE adjusted for FFM using regression analysis; *REEpred* predicted REE acc. to Harris and Benedict; *REEm* – *REEp* measured REE minus predicted REE acc. to Harris and Benedict; *EE* energy expenditure; (kcal/min, adjFFM): energy expenditure adjusted for FFM using regression analysis; *fT3* triiodothyronine; *fT4* thyroxine; *TSH* thyroid stimulating hormone; *sign. difference Full completers vs. Exercise completers, $p < 0.05$; ^a $n = 10$; ^b $n = 12$

in RMR in response to CST may be explained by (i) the slightly negative energy balance only and/or (ii) a training effect which may counteract metabolic adaptation to a negative energy balance and/or (iii) some unmeasured behavioral adaptations to TEE (Broskey et al 2021). However, ‘energy constraint’ has been shown in weight stable subjects as well

as in subjects who were in a negative energy balance (Pontzer et al 2012; Urlacher et al. 2019; Flanagan et al. 2024; McGrosky et al. 2024) questioning the idea that a negative energy balance is a mandatory requirement of a mass-independent decrease in RMR in response to exercise training. Although a constrained energy model suggests that energy

expenditure, rather than energy balance, may influence essential physiological systems, training-associated changes in EE were also shown to be ‘additive’ (under conditions of positive energy balance) or ‘constrained’ (in response to a negative energy balance) (Willis et al. 2022), suggesting that the discussion is not yet over.

Placing our data in a broader context, the US Army had already conducted research on the effects of physical and psychological stress on soldiers of special forces following different protocols (Friedl et al. 2000; Hoyt and Friedl 2006; O’Leary et al. 2024). These studies differed from our training protocol due to the extremely high intensity, stress load, and long duration of the training protocols which had been considered as survival training in some protocols. Consequently, in the US-studies, body fat had fallen below a minimum of about 4–5% of body weight during combat and survival training (Friedl et al. 1994). In addition, in that studies, FFM decreased together with decreases in plasma testosterone levels (down to castration levels) and triiodothyronine (to hypothyroid levels). These data reflect a considerable decrease in the ‘anabolic drive’ in response to an exhausting training protocol. Concomitantly, cortisol levels increased at the end of the protocol reflecting a high stress ‘load’ of the protocol (Friedl et al. 2000), which obviously differed from normal plasma cortisol levels seen after CST (Table 3). In these studies, detrimental changes in body composition are in part explained (i) by insufficient energy supply of special forces soldiers as well as (ii) by alimentary limits on sustained maximal human energy expenditure (Thurber et al. 2019).

Chronic energy deficiency is associated with negative health consequences, while physical capacity may be maintained due to reduced energy trade-offs to other traits, e.g., the immune system, stress response, and reproduction (Pontzer 2018). There are several reasons for an insufficient energy intake of soldiers undergoing a high workload, e.g., inadequate catering regulations, mealtimes that collide with training schedules, rigid catering structures in the army, and soldiers’ lack of knowledge about adequate nutrition. It has been suggested that these nutrition- and metabolism-related issues result in a sustained negative energy balance and nutrition-related decreases in physical performance which is again associated with increased risks of illness and injuries (Tharion et al. 2004; O’Leary et al. 2024). The issue also applies to a relevant extent to mission conditions. On average, special forces have a 19% higher energy requirement than “normal” soldiers, which is generally not considered in the catering regulations (Tharion et al. 2005). It is known that a weight loss of > 10% and harmful levels of body energy stores (< 5% body fat) are associated with a negative impact on health and performance (Tharion et al. 2005). Even 10 years after the inadequate energy supply of special forces was discovered, an inadequate energy supply

of maritime special forces was still recommended (Margolis et al. 2014).

Do the metabolic and endocrine responses to CST allow a differentiation between successful and unsuccessful participants?

Studying soldiers before CST, there were minor differences in body composition and EE at higher workload between completers and dropouts (Table 2). However, when compared to participants of CST soldiers who were not found eligible showed a lower $\text{VO}_{2\text{max}}$, a higher work efficiency in low-intensity exercise, and a tendency towards lower plasma testosterone levels (Table 2). In addition, when compared with ‘full completers’ ‘exercise completers’ showed no improvements in $\text{VO}_{2\text{max}}$ and work efficiency at low intensity (Table 4) which is not a new finding.

Strength and limitations

The study has some major strength related to a highly standardized training protocol, an optimal supervision, and care for the study participants, detailed body composition analysis by a gold standard method and the state-of-the-art assessment of RMR.

In addition, our study has some limitations.

- As only male applicants were eligible for training as combat-swimmers, the results refer to males only. When compared to men, women may experience greater physiological stress, they may be prone to metabolic disturbances associated with energy deficit and, thus, also to stress fractures during military training. Sex differences in endocrine and metabolic adaptation during a 44 wk arduous military training have been addressed only recently (O’Leary et al. 2024). In this study, men experienced greater energy deficits than women due to higher energy expenditure, which was not compensated for by increased energy intake. However, these energy deficits did not impact fat or lean mass or metabolic and endocrine function.
- We could not directly assess TEE as well as PA which was partly due to the conditions of the combat-swimmer training protocol. However, the assessment of RMR, RER, and energetic efficiency in response to different workloads have allowed the characterization of specific aspects of ‘exercise-related energy compensation’.
- At T2, the required number of 15 successful participants indicated by the initial power analysis was missed with 13 successful participants (Table 3), while at T1, 28 soldiers could be studied (Table 4). In our study, the number of participants also limits the usefulness of a detailed evaluation of ‘compensators’ and ‘non com-

pensators' to identify factors that predispose someone to 'constraint'. It is worthwhile to mention that in the 2024 study of Flanagan et al., sample size calculations based on the 8 wks exercise revealed as few as 11 participants per group only.

- The duration of CST may be considered as too short to expect changes in metabolic adaptation which may take longer time periods, i.e., more than 12–24 weeks (Pontzer 2018). However, as far as the effect of caloric restriction is concerned, metabolic adaptations in RMR can be seen within 3d of semi-starvation (Müller et al. 2015). It is our present working hypothesis that mass-independent decreases in RMR in response to a negative energy balance result from a mismatch between cellular energy supply (equivalent to reduced energy intake plus the increase in endogenous lipid mobilization) and TEE. Following that idea, we would not expect any decrease in RMR in response to an extensive training protocol as long as cellular energy supply matches TEE. Since however starvation and exercise differ with respect to the 'ranking' of organ/tissue systems involved (i.e., 1. brain—2. liver—3. adipose tissue/skeletal muscle in the case of caloric restriction vs. 1. skeletal muscle—2. liver—3. adipose tissue during exercise; see Müller et al. 2019), they differ in metabolic responses which limits an analogy between the two metabolic situations.

Conclusion

In contrast to the 'constraint model' of TEE, we did not observe an exercise-related energy compensation of RMR in response to a highly standardized and extensive exercise training protocol in elite soldiers. We did, however, find an improvement in energy efficiency under low-intensity work loads that suggests an energy compensation within the AEE-component of TEE. Further research is needed to compare the effect of an extensive training protocol on TEE, RMR, and AEE at different energy balances, i.e., under isocaloric vs. hypocaloric vs. hypercaloric conditions. Data cannot be made available to any data repository because of limitations of the German Data Protection Law.

Acknowledgements The authors wish to thank Dr. Farzaneh Zahedi from the Department of Laboratory Medicine at the Bundeswehrkrankenhaus Hamburg and Prof. Dr. Dr. Thomas Renné from the University Medical Center Hamburg-Eppendorf, Institute of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine for Analyses of Metabolites and Hormones.

Author contributions MJM and ABW had the idea and formulated a first concept of the study; LS, KB, AK, MJM, and ABW developed and wrote the study protocol; THR, KB, AK, and WB organized the study and conducted the investigations; WB, THR, and JS were responsible for data analyses and calculations; all authors had contributed to the

discussion of the results; MJM, ABW, and THR wrote the final manuscript, which has been seen and finally approved by all authors.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL. This study was funded by budgetary resources of Bundesministerium der Verteidigung, Referat FüSK III 5 (35K2-S-65 1922), and the Christian-Albrechts-Universität Kiel, Germany.

Declarations

Conflict of interest All authors declare no conflict of interest.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Bader N, Bosy-Westphal A, Dilba B, Müller MJ (2005) Intra- and inter-individual variability of resting energy expenditure in healthy male subjects—biological and methodological variability of resting energy expenditure. *Br J Nutr* 94(5):843–849. <https://doi.org/10.1079/BJN20051551>
- Bosy-Westphal A, Müller MJ (2015) Assessment of fat and lean mass by quantitative magnetic resonance: a future technology of body composition research? *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 18(5):446–451. <https://doi.org/10.1097/mco.0000000000000201>
- Bosy-Westphal A, Braun W, Schautz B, Müller MJ (2013) Issues in characterizing resting energy expenditure in obesity and after weight loss. *Front Physiol* 4:47. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00047>
- Broskey NT, Martin CK, Burtin JH, Church TS, Ravussin E, Redman LM (2021) Effect of aerobic exercise-induced weightloss on the components of daily energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc.* 53:2164–2172. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002689>
- Careau V, Halsey LG, Pontzer H, Ainslie PN, Andersen LF, Anderson LJ et al (2021) Energy compensation and adiposity in humans. *Curr Biol CB* 31(20):4659–4666.e2. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.08.016>
- Enderle J, Reljic D, Jensen B, Peine S, Zopf Y, Bosy-Westphal A (2023) Normal values for body composition in adults are better represented by continuous reference ranges dependent on age and BMI. *Clin Nutr (Edinb, Scotland)* 42(5):644–652. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2023.03.006>
- Finger JD, Banzer W, Baumeister SE, Brandes M, Bös K, Gabrys L et al (2021) Referenzwerte für die kardiorespiratorische Fitness der allgemeinen Bevölkerung: Die Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1) 2008–2011 (Reference values for cardiorespiratory fitness of the general population: the German National Health Interview and Examination Survey for Adults (DEGS1) 2008–2011). *Gesundheitswesen (Bundesverband der Ärzte des Öffentlichen Gesundheitsdienstes (Germany))* 83(2):114–121. <https://doi.org/10.1055/a-1026-6220>

- Flanagan EW, Sanchez-Delgado G, Martin CK, Ravussin E, Pontzer H, Redman LM (2024) No evidence for metabolic adaptation during exercise-related energy compensation. *iScience* 27:109842. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109842>
- Friedl KE, Moore RJ, Martinez-Lopez LE, Vogel JA, Askew EW, Marchitelli LJ, Hoyt RW, Gordon CC (1994) Lower limit of body fat in healthy active men. *J Appl Physiol* (Bethesda, MD, 1985) 77(2):933–940. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.77.2.933>
- Friedl KE, Moore RJ, Hoyt RW, Marchitelli LJ, Martinez-Lopez LE, Askew EW (2000) Endocrine markers of semi-starvation in healthy lean men in a multistressor environment. *J Appl Physiol* (Bethesda, MD, 1985) 88(5):1820–1830. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.5.1820>
- Gonzalez JT, Batterham AM, Atkinson G, Thompson D (2023) Perspective: is the response of human energy expenditure to increased physical activity additive or constrained? *Adv Nutr* (Bethesda, MD) 14(3):406–419. <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2023.02.003>
- Hall KD, Guo J (2017) Obesity energetics: body weight regulation and the effects of diet composition. *Gastroenterology* 152(7):1718–1727.e3. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2017.01.052>
- Harris JA, Benedict FG (1918) A biometric study of human basal metabolism. *Proc Natl Acad Sci USA* 4(12):370–373. <https://doi.org/10.1073/pnas.4.12.370>
- Hoyt RW, Friedl KE (2006) Field studies of exercise and food deprivation. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 9(6):685–690. <https://doi.org/10.1097/01.mco.0000247472.72155.7c>
- Knechtle B (2002) 2. Arbeit, Energie und Leistung. In: *Aktuelle Sportphysiologie. Leistung und Ernährung im Sport*. Karger, Basel, pp 18–27. <https://doi.org/10.1159/isbn.978-3-318-00876-0>
- Margolis LM, Crombie AP, McClung HL, McGraw SM, Rood JC, Montain SJ, Young AJ (2014) Energy requirements of US Army Special Operation Forces during military training. *Nutrients* 6(5):1945–1955. <https://doi.org/10.3390/nu6051945>
- Marti B, Laukkanen R, Held T (1999) Beurteilung der Ausdauer aufgrund der VO₂max: standards des BASPO. *Schweizerische Zeitschr Sportmed Sporttraumatol* 47(4):173–174
- McGrosky A, Swanson ZS, Rimbach R, Bethancourt H, Ndiema E, Nzunza R, Braun D, Rosinger AY, Pontzer H (2024) Total daily energy expenditure and elevated water turnover in a small-scale nomadic pastoral society from Northern Kenya. *Ann Hum Biol* 511:2310724. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040503>
- Müller MJ, Bosy-Westphal A (2013) Adaptive thermogenesis with weight loss in humans. *Obesity* (Silver Spring, MD) 21(2):218–228. <https://doi.org/10.1002/oby.20027>
- Müller MJ, Enderle J, Pourhassan M, Braun W, Eggeling B, Lagerpusch M, Glüer C-C, Kehayias JJ, Kiosz D, Bosy-Westphal A (2015) Metabolic adaptation to caloric restriction and subsequent refeeding: the Minnesota Starvation Experiment revisited. *Am J Clin Nutr* 102(4):807–819. <https://doi.org/10.3945/ajcn.115.109173>
- Müller MJ, Enderle J, Bosy-Westphal A (2016a) Changes in energy expenditure with weight gain and weight loss in humans. *Curr Obes Rep* 5(4):413–423. <https://doi.org/10.1007/s13679-016-0237-4>
- Müller MJ, Braun W, Pourhassan M, Geisler C, Bosy-Westphal A (2016b) Application of standards and models in body composition analysis. *Proc Nutr Soc* 75:181–187. <https://doi.org/10.1017/S0029665115004206>
- Müller MJ, Geisler C, Hübers M, Pourhassan M, Bosy-Westphal A (2019) Body composition-related functions: a problem-oriented approach of phenotyping. *Eur J Clin Nutr* 73:179–186. <https://doi.org/10.1038/s41430-018-0340-6>
- Müller MJ, Heymsfield SB, Bosy-Westphal A (2021) Are metabolic adaptations to weight changes an artefact? *Am J Clin Nutr* 114(4):1386–1395. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab184>
- Müller MJ, Braun W, Enderle J, Bosy-Westphal A (2023a) Issues related to the assessment of energy balance during short-term over-, under- and refeeding in normal weight men. *Eur J Clin Nutr* 77(5):538–545. <https://doi.org/10.1038/s41430-022-01208-0>
- Müller MJ, Heymsfield SB, Bosy-Westphal A (2023b) Changes in body composition and homeostatic control of resting energy expenditure during dietary weight loss. *Obesity* (Silver Spring, MD) 31(4):892–895. <https://doi.org/10.1002/oby.23703>
- Napolitano A, Miller SR, Murgatroyd PR, Coward WA, Wright A, Finer N, de Bruin TW, Bullmore ET, Nunez DJ (2008) Validation of a quantitative magnetic resonance method for measuring human body composition. *Obesity* (Silver Spring, MD) 16(1):191–198. <https://doi.org/10.1038/oby.2007.29>
- Nindl BC, Barnes BR, Alemany JA, Frykman PN, Shippee RL, Friedl KE (2007) Physiological consequences of U.S. Army Ranger training. *Med Sci Sports Exer* 39(8):1380–1387. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318067e2f7>
- O’Leary TJ, Gifford RM, Knight RM, Wright J, Handford S, Venables MC et al (2024) Sex differences in energy balance, body composition, and metabolic and endocrine markers during prolonged arduous military training. *J Appl Physiol* 136:938–948. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00864.2023>
- Pontzer H (2018) Energy constraint as a novel mechanism linking exercise and health. *Physiology* 33:384–393. <https://doi.org/10.1152/physiol.00027.2018>
- Pontzer H, Raichlen DA, Wood BM, Mabulla AZP, Racette SB, Marlowe FW (2012) Hunter gatherer energetics and human obesity. *Plos ONE* 7:e40503. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040503>
- Pontzer H, Durazo-Arvizu R, Dugas LR, Plange-Rhule J, Bovet P, Forrester TE, Lambert EV, Cooper RS, Schoeller DA, Luke A (2016) Constrained total energy expenditure and metabolic adaptation to physical activity in adult humans. *Curr Biol CB* 26(3):410–417. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.12.046>
- Pontzer H, Yamada Y, Sagayama H, Ainslie PN, Andersen LF, Anderson LJ et al (2021) Daily energy expenditure through the human life course. *Science* (New York, NY) 373(6556):808–812. <https://doi.org/10.1126/science.abe5017>
- Potter AW, Soto LD, Friedl KE (2022) Body composition of extreme performers in the US Marine Corps. *BMJ Mil Health*. <https://doi.org/10.1136/military-2022-002189>
- Price S, Wiecha S, Cieřliński I, Śliż D, Kasiak PS, Lach J, Gruba G, Kowalski T, Mamcarz A (2022) Differences between treadmill and cycle ergometer cardiopulmonary exercise testing results in triathletes and their association with body composition and body mass index. *Int J Environ Res Public Health* 19:3557. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063557>
- Rosenbaum M, Leibel RL (2010) Adaptive thermogenesis in humans. *Int J Obes* 34(Suppl 1):S47–S55. <https://doi.org/10.1038/ijo.2010.184>
- Sell TC, Abt JP, Crawford K, Lovalekar M, Nagai T, Deluzio J et al (2010) Warrior model for human performance and injury prevention: eagle tactical athlete program (ETAP) part I. *J Spec Oper Med* 10(4):2–21. <https://doi.org/10.55460/556O-K7N2>
- Tharion WJ, Baker-Fulco CJ, Bovill ME, Montain SM, DeLany JP, Champagne CM, Hoyt RW, Lieberman HR (2004) Adequacy of Garrison feeding for special forces soldiers during training. *Mil Med* 169(6):483–490. <https://doi.org/10.7205/milmed.169.6.483>
- Tharion WJ, Lieberman HR, Montain SJ, Young AJ, Baker-Fulco CJ, DeLany JP, Hoyt RW (2005) Energy requirements of military personnel. *Appetite* 44(1):47–65. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2003.11.010>

- Thurber C, Dugas LR, Ocobock C, Carlson B, Speakman JR, Pontzer H (2019) Extreme events reveal an alimentary limit on sustained maximal human energy expenditure. *Sci Adv* 5(6):eaaw0341. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw0341>
- Travis TW, Brown DL (2023) Human performance optimization: a framework for the military health system. *Mil Med* 188(Suppl 1):44–48. <https://doi.org/10.1093/milmed/usac411>
- Urlacher SS, Snodgrass JJ, Dugas LR, Sugiyama LS, Liebert MA, Joyce CJ, Pontzer H (2019) Constraint and trade-offs regulate energy expenditure during childhood. *Sci Adv* 5(12):eaax1065. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1065>
- Weir JBDB (1949) New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109(1–2):1–9. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1949.sp004363>
- Wiecha S, Price S, Cieśliński I, Kasiak PS, Tota Ł, Ambroży T, Śliż D (2022) Transferability of cardiopulmonary parameters between treadmill and cycle ergometer testing in male triathletes-prediction formulae. *Int J Environ Res Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031830>
- Willis EA, Creasy SA, Saint-Maurice PF, Keadle SK, Pontzer H, Schoeller D et al (2022) Physical activity and total daily energy expenditure in older US adults: constrained versus additive models. *Med Sci Sports Exerc* 54(1):98–105. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002759>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Zusammenfassung

Im Rahmen der KSS wurden erstmalig Komponenten des TEE (RMR und AEE) unter kontrollierten Bedingungen prospektiv mit Goldstandardmethoden untersucht. Eine Veränderung der RMR, wie in der cTEE-Theorie beschrieben, zeigte sich nicht. Die Ergebnisse wurden unter ausgeglichener Energiebilanz erfasst, sodass die cTEE-Theorie unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Willis et al. weder widerlegt noch bestätigt werden kann. Eine signifikante Verminderung des AEE ließ sich im niedrigintensiven Belastungsbereich nachweisen, sodass sich eine Veränderung eines Kompartiments des TEE zeigte, die nicht dem cTEE-Modell entspricht. Weitere Forschung mit Vergleichsgruppen mit gleicher Belastung unter hypo-, iso- und hyperkalorischen Bedingungen ist notwendig, um Klarheit bezüglich des korrekten TEE-Modells zu erlangen. Die Probanden zeigten keine schädlichen hormonellen oder metabolischen Veränderungen, wie sie in vergleichbaren Studien gefunden wurden. Es ergab sich kein Hinweis auf unzureichende Energieversorgung oder Regenerationsphasen. Ein sportmedizinisches Optimierungs- oder Interventionspotential des Trainings lässt sich aus den vorliegenden Daten nicht ableiten. Weitere Untersuchungen sind nötig, um die Gründe der hohen Abbrecher- und Ausfallquote unter den Kampfschwimmerschülern zu eruieren. Es ist anzunehmen, dass die psychische Belastung während des Trainings als potenziell wichtigster Faktor für die Ausfälle näher untersucht werden muss.

Summary

The combat swimmer study was the first to prospectively investigate components of TEE (RMR and AEE) under controlled conditions using gold-standard methods. There was no change in RMR, as described in the cTEE theory. The results were recorded under an equalized energy balance, indicating that the cTEE theory can neither be refuted nor confirmed when considering the results of Willis et al. A significant reduction in AEE was observed in the low-intensity exercise range, revealing a change in a compartment of TEE that does not correspond to the cTEE model. Further research, including comparison groups subjected to the same load under hypo-, iso-, and hypercaloric conditions, is necessary to clarify the correct TEE model. The participants did not exhibit any harmful hormonal or metabolic changes, as observed in comparable studies. There was no indication of insufficient energy supply or inadequate regeneration phases. No potential for sports-medical optimization or intervention of the training can be derived from the available data. Further investigations are necessary to determine the reasons for the high dropout and failure rates among combat-swimmer students. It can be assumed that psychological stress during training, potentially the most important factor for the dropouts, needs to be investigated in more detail.

Literaturverzeichnis

- Badtke G, Dickhuth H-H (2010) Sportmedizin für Ärzte. Lehrbuch auf der Grundlage des Weiterbildungssystems der Deutschen Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention (DGSP), 2., überarb. Aufl. Dt. Ärzte-Verl., Köln
- BMVg (2008) A-2600/1. Innere Führung Selbstverständnis und Führungskultur. <https://www.bmvg.de/resource/blob/14258/a0e22992bc053f873e402c8aaf2efa88/b-01-02-02-download-data.pdf>. Accessed 07 Jun 2023
- Borges JH, Guerra-Júnior G, Gonçalves EM (2019) Methods for data analysis of resting energy expenditure measured using indirect calorimetry. *Nutrition* (Burbank, Los Angeles County, Calif.) 59:44–49. doi: 10.1016/j.nut.2018.07.015
- Bosy-Westphal A, Müller MJ (2015) Assessment of fat and lean mass by quantitative magnetic resonance: a future technology of body composition research? *Current opinion in clinical nutrition and metabolic care* 18(5):446–451. doi: 10.1097/MCO.0000000000000201
- Cadegiani FA, Kater CE (2019) Basal Hormones and Biochemical Markers as Predictors of Overtraining Syndrome in Male Athletes: The EROS-BASAL Study. *Journal of athletic training* 54(8):906–914. doi: 10.4085/1062-6050-148-18
- Careau V, Halsey LG, Pontzer H, Ainslie PN, Andersen LF, Anderson LJ, Arab L, Baddou I, Bedu-Addo K, Blaa EE, Blanc S, Bonomi AG, Bouten CVC, Buchowski MS, Butte NF, Camps SGJA, Close GL, Cooper JA, Das SK, Cooper R, Dugas LR, Eaton SD, Ekelund U, Entringer S, Forrester T, Fudge BW, Goris AH, Gurven M, Hambly C, El Hamdouchi A, Hoos MB, Hu S, Joonas N, Joosen AM, Katzmarzyk P, Kempen KP, Kimura M, Kraus WE, Kushner RF, Lambert EV, Leonard WR, Lessan N, Martin CK, Medin AC, Meijer EP, Morehen JC, Morton JP, Neuhouser ML, Nicklas TA, Ojiambo RM, Pietiläinen KH, Pitsiladis YP, Plange-Rhule J, Plasqui G, Prentice RL, Rabinovich RA, Racette SB, Raichlen DA, Ravussin E, Reilly JJ, Reynolds RM, Roberts SB, Schuit AJ, Sjödin AM, Stice E, Urlacher SS, Valenti G, van Etten LM, van Mil EA, Wells JCK, Wilson G, Wood BM, Yanovski J, Yoshida T, Zhang X, Murphy-Alford AJ, Loechl CU, Luke AH, Rood J, Sagayama H, Schoeller DA, Wong WW, Yamada Y, Speakman JR (2021) Energy compensation and adiposity in humans. *Current biology* : CB 31(20):4659–4666.e2. doi: 10.1016/j.cub.2021.08.016
- Carfagno DG, Hendrix JC (2014) Overtraining syndrome in the athlete: current clinical practice. *Current sports medicine reports* 13(1):45–51. doi: 10.1249/JSR.0000000000000027
- Carrard J, Rigort A-C, Appenzeller-Herzog C, Colledge F, Königstein K, Hinrichs T, Schmidt-Trucksäss A (2022) Diagnosing Overtraining Syndrome: A Scoping Review. *Sports health* 14(5):665–673. doi: 10.1177/19417381211044739
- Chang C, Putukian M, Aerni G, Diamond A, Hong G, Ingram Y, Reardon CL, Wolanin A (2020) Mental health issues and psychological factors in athletes: detection, management, effect on performance and prevention: American Medical Society for Sports Medicine Position Statement- Executive Summary. *British journal of sports medicine* 54(4):216–220. doi: 10.1136/bjsports-2019-101583
- Crewther B, Keogh J, Cronin J, Cook C (2006) Possible stimuli for strength and power adaptation: acute hormonal responses. *Sports medicine* (Auckland, N.Z.) 36(3):215–238. doi: 10.2165/00007256-200636030-00004
- Flanagan EW, Sanchez-Delgado G, Martin CK, Ravussin E, Pontzer H, Redman LM (2024) No evidence for metabolic adaptation during exercise-related energy compensation. *iScience* 27(6):109842. doi: 10.1016/j.isci.2024.109842
- Friedl KE, Moore RJ, Hoyt RW, Marchitelli LJ, Martinez-Lopez LE, Askew EW (2000) Endocrine markers of semistarvation in healthy lean men in a multistressor environment. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 88(5):1820–1830. doi: 10.1152/jappl.2000.88.5.1820

- Gardner DF, Kaplan MM, Stanley CA, Utiger RD (1979) Effect of tri-iodothyronine replacement on the metabolic and pituitary responses to starvation. *The New England journal of medicine* 300(11):579–584. doi: 10.1056/NEJM197903153001102
- Gonzalez JT, Batterham AM, Atkinson G, Thompson D (2023) Perspective: Is the Response of Human Energy Expenditure to Increased Physical Activity Additive or Constrained? *Advances in nutrition* (Bethesda, Md.) 14(3):406–419. doi: 10.1016/j.advnut.2023.02.003
- Heydenreich J, Kayser B, Schutz Y, Melzer K (2017) Total Energy Expenditure, Energy Intake, and Body Composition in Endurance Athletes Across the Training Season: A Systematic Review. *Sports medicine - open* 3(1):8. doi: 10.1186/s40798-017-0076-1
- Hoyt RW, Friedl KE (2006) Field studies of exercise and food deprivation. *Current opinion in clinical nutrition and metabolic care* 9(6):685–690. doi: 10.1097/01.mco.0000247472.72155.7c
- Kreher JB, Schwartz JB (2012) Overtraining syndrome: a practical guide. *Sports health* 4(2):128–138. doi: 10.1177/1941738111434406
- Lee EC, Fragala MS, Kavouras SA, Queen RM, Pryor JL, Casa DJ (2017) Biomarkers in Sports and Exercise: Tracking Health, Performance, and Recovery in Athletes. *Journal of strength and conditioning research* 31(10):2920–2937. doi: 10.1519/JSC.0000000000002122
- Lochbaum M, Stoner E, Hefner T, Cooper S, Lane AM, Terry PC (2022) Sport psychology and performance meta-analyses: A systematic review of the literature. *PloS one* 17(2):e0263408. doi: 10.1371/journal.pone.0263408
- Loucks AB (2004) Energy balance and body composition in sports and exercise. *Journal of sports sciences* 22(1):1–14. doi: 10.1080/0264041031000140518
- Margolis LM, Crombie AP, McClung HL, McGraw SM, Rood JC, Montain SJ, Young AJ (2014) Energy requirements of US Army Special Operation Forces during military training. *Nutrients* 6(5):1945–1955. doi: 10.3390/nu6051945
- McGrosky A, Swanson ZS, Rimbach R, Bethancourt H, Ndiema E, Nzunza R, Braun DR, Rosinger AY, Pontzer H (2024) Total daily energy expenditure and elevated water turnover in a small-scale semi-nomadic pastoralist society from Northern Kenya. *Annals of human biology* 51(1):2310724. doi: 10.1080/03014460.2024.2310724
- Meeusen R, Duclos M, Foster C, Fry A, Gleeson M, Nieman D, Raglin J, Rietjens G, Steinacker J, Urhausen A (2013) Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine and science in sports and exercise* 45(1):186–205. doi: 10.1249/MSS.0b013e318279a10a
- Meeusen R, Piacentini MF, Busschaert B, Buyse L, Schutter G de, Stray-Gundersen J (2004) Hormonal responses in athletes: the use of a two bout exercise protocol to detect subtle differences in (over)training status. *European journal of applied physiology* 91(2-3):140–146. doi: 10.1007/s00421-003-0940-1
- Melin AK, Heikura IA, Tenforde A, Mountjoy M (2019) Energy Availability in Athletics: Health, Performance, and Physique. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism* 29(2):152–164. doi: 10.1123/ijsnem.2018-0201
- Müller MJ, Bosy-Westphal A (2013) Adaptive thermogenesis with weight loss in humans. *Obesity* (Silver Spring, Md.) 21(2):218–228. doi: 10.1002/oby.20027
- Müller MJ, Braun W, Pourhassan M, Geisler C, Bosy-Westphal A (2016a) Application of standards and models in body composition analysis. *The Proceedings of the Nutrition Society* 75(2):181–187. doi: 10.1017/S0029665115004206
- Müller MJ, Enderle J, Bosy-Westphal A (2016b) Changes in Energy Expenditure with Weight Gain and Weight Loss in Humans. *Current obesity reports* 5(4):413–423. doi: 10.1007/s13679-016-0237-4

- Müller MJ, Enderle J, Pourhassan M, Braun W, Eggeling B, Lagerpusch M, Glüer C-C, Kehayias JJ, Kiosz D, Bosy-Westphal A (2015) Metabolic adaptation to caloric restriction and subsequent refeeding: the Minnesota Starvation Experiment revisited. *The American journal of clinical nutrition* 102(4):807–819. doi: 10.3945/ajcn.115.109173
- Napolitano A, Miller SR, Murgatroyd PR, Coward WA, Wright A, Finer N, Bruin TW de, Bullmore ET, Nunez DJ (2008) Validation of a quantitative magnetic resonance method for measuring human body composition. *Obesity (Silver Spring, Md.)* 16(1):191–198. doi: 10.1038/oby.2007.29
- Nindl BC, Barnes BR, Alemany JA, Frykman PN, Shippee RL, Friedl KE (2007) Physiological consequences of U.S. Army Ranger training. *Medicine and science in sports and exercise* 39(8):1380–1387. doi: 10.1249/MSS.0b013e318067e2f7
- Nindl BC, Friedl KE, Frykman PN, Marchitelli LJ, Shippee RL, Patton JF (1997) Physical performance and metabolic recovery among lean, healthy men following a prolonged energy deficit. *International journal of sports medicine* 18(5):317–324. doi: 10.1055/s-2007-972640
- O'Leary TJ, Gifford RM, Knight RL, Wright J, Handford S, Venables MC, Reynolds RM, Woods D, Wardle SL, Greeves JP (2024) Sex differences in energy balance, body composition, and metabolic and endocrine markers during prolonged arduous military training. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)* 136(4):938–948. doi: 10.1152/jappphysiol.00864.2023
- Onur S, Haas V, Bosy-Westphal A, Hauer M, Paul T, Nutzinger D, Klein H, Müller MJ (2005) L-tri-iodothyronine is a major determinant of resting energy expenditure in underweight patients with anorexia nervosa and during weight gain. *European journal of endocrinology* 152(2):179–184. doi: 10.1530/eje.1.01850
- Pontzer H, Durazo-Arvizu R, Dugas LR, Plange-Rhule J, Bovet P, Forrester TE, Lambert EV, Cooper RS, Schoeller DA, Luke A (2016) Constrained Total Energy Expenditure and Metabolic Adaptation to Physical Activity in Adult Humans. *Current biology : CB* 26(3):410–417. doi: 10.1016/j.cub.2015.12.046
- Richter TH, Braun W, Scheit L, Schröder J, Reer R, Harth V, Bender K, Koch A, Bosy-Westphal A, Müller MJ (2024) Resting metabolic rate and energy efficiency in response to an intensive 84-day combat-swimmer training in the German Armed Forces. *European journal of applied physiology*. doi: 10.1007/s00421-024-05659-0
- Rodriguez NR, Di Marco NM, Langley S (2009) American College of Sports Medicine position stand. Nutrition and athletic performance. *Medicine and science in sports and exercise* 41(3):709–731. doi: 10.1249/MSS.0b013e31890eb86
- Schorb A, Niebauer J, Aichhorn W, Schiepek G, Scherr J, Claussen MC (2021) Overtraining from a sports psychiatry perspective. *Dtsch Z Sportmed* 72(6):271–279. doi: 10.5960/dzsm.2021.496
- Sell TC, Abt JP, Crawford K, Lovalekar M, Nagai T, Deluzio J, Smalley BW, McGrail MA, Rowe RS, Cardin S, Lephart SM (2010) Warrior Model for Human Performance and Injury Prevention: Eagle Tactical Athlete Program (ETAP) Part I. *Journal of special operations medicine : a peer reviewed journal for SOF medical professionals* 10(4):2–21. doi: 10.55460/5560-K7N2
- Stähle L, Granström E, Ljungdahl Stähle E, Isaksson S, Samuelsson A, Rudling M, Sepp H (2013) Effects of food or sleep deprivation during civilian survival training on clinical chemistry variables. *Wilderness & environmental medicine* 24(2):146–152. doi: 10.1016/j.wem.2012.11.008
- Stellingwerff T, Heikura IA, Meeusen R, Bermon S, Seiler S, Mountjoy ML, Burke LM (2021) Overtraining Syndrome (OTS) and Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S): Shared Pathways, Symptoms and Complexities. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)* 51(11):2251–2280. doi: 10.1007/s40279-021-01491-0
- Tharion WJ, Baker-Fulco CJ, Bovill ME, Montain SM, DeLany JP, Champagne CM, Hoyt RW, Lieberman HR (2004) Adequacy of Garrison feeding for Special Forces soldiers during training. *Military medicine* 169(6):483–490. doi: 10.7205/milmed.169.6.483

- Tharion WJ, Lieberman HR, Montain SJ, Young AJ, Baker-Fulco CJ, DeLany JP, Hoyt RW (2005) Energy requirements of military personnel. *Appetite* 44(1):47–65. doi: 10.1016/j.appet.2003.11.010
- Thomas DT, Erdman KA, Burke LM (2016) American College of Sports Medicine Joint Position Statement. Nutrition and Athletic Performance. *Medicine and science in sports and exercise* 48(3):543–568. doi: 10.1249/MSS.0000000000000852
- Travis TW, Brown DL (2023) Human Performance Optimization: A Framework for the Military Health System. *Military medicine* 188(Suppl 1):44–48. doi: 10.1093/milmed/usac411
- Urlacher SS, Snodgrass JJ, Dugas LR, Sugiyama LS, Liebert MA, Joyce CJ, Pontzer H (2019) Constraint and trade-offs regulate energy expenditure during childhood. *Science advances* 5(12):eaax1065. doi: 10.1126/sciadv.aax1065
- Viru A, Viru M (2004) Cortisol--essential adaptation hormone in exercise. *International journal of sports medicine* 25(6):461–464. doi: 10.1055/s-2004-821068
- Weakley J, Halson SL, Mujika I (2022) Overtraining Syndrome Symptoms and Diagnosis in Athletes: Where Is the Research? A Systematic Review. *International journal of sports physiology and performance* 17(5):675–681. doi: 10.1123/ijsspp.2021-0448
- Westerterp KR (2013) Physical activity and physical activity induced energy expenditure in humans: measurement, determinants, and effects. *Frontiers in physiology* 4:90. doi: 10.3389/fphys.2013.00090
- Willis EA, Creasy SA, Saint-Maurice PF, Keadle SK, Pontzer H, Schoeller D, Troiano RP, Matthews CE (2022) Physical Activity and Total Daily Energy Expenditure in Older US Adults: Constrained versus Additive Models. *Medicine and science in sports and exercise* 54(1):98–105. doi: 10.1249/MSS.0000000000002759

Abkürzungsverzeichnis

AEE	Activity Energy Expenditure (Aktivitätsenergieverbrauch)
CK	Creatinin-Kinase
cTEE	constrained TEE (eingeschränkter Gesamtenergieverbrauch)
EE	Energy Expenditure (Energieverbrauch)
EP	Exercise Preconditioning (Sportausbildung)
FFM	Fettfreie Masse
FM	Fettmasse
KSM	Kommando Spezialkräfte der Marine
KSS	Kampfschwimmerstudie
OTS	Overtraining Syndrome (Übertrainingssyndrom)
RMR	Resting Metabolic Rate (Ruheenergieumsatz)
SSS	Specific Skills and Stress (Hallenausbildung)
TEE	Total Energy Expenditure (Gesamtenergieverbrauch)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufschlüsselung der Studienausschlussgründe.....	12
---	----

Erklärung des Eigenanteils an der Publikation

Die KSS war ein Sonderforschungsprojekt (SFP) unter Federführung des Instituts für Experimentelle Medizin, Sektion Maritime Medizin des UKSH, c/o Schifffahrtsmedizinisches Institut der Marine, Kronshagen und dem Institut für Humanernährung und Lebensmittelkunde, Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät, Institut für Humanernährung und Lebensmittelkunde der Christian Albrechts Universität zu Kiel. Weiterhin beteiligt waren das Institut für Bewegungswissenschaften, Arbeitsbereich Sport- und Bewegungsmedizin, Universität Hamburg, das Zentrum für Psychosoziale Medizin, Universitätsprofessur für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin des Universitätsklinikums Eppendorf und die Klinik I Innere Medizin des Bundeswehrkrankenhauses Hamburg. Die Datenerhebung begann 2019 und wurde, infolge der COVID-19 Pandemie bedingten Verzögerungen, zwei Jahre später als geplant 2024 beendet. Diese Promotion im Rahmen der KSS ist Teil jenes mehrjährigen SFP. Die Konzeptionierung der KSS und die Verfassung des Studienprotokolls erfolgte 2015 bis 2018 durch Prof. Dr. Manfred J. Müller, Flottenarzt (FLA) Prof. Dr. Andreas und Flottillenarzt (FTLA) Dr. Katrin Bender. Die Organisation der Studie sowie die Koordination der Untersuchungen der Probanden sowie die statistische Aufarbeitung erfolgte durch Prof. Dr. Dr. Anja Bosy-Westphal, Dr. Wiebke Braun und ihre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte durch FTLA Dr. Katrin Bender, FLA Prof. Dr. Andreas Koch, Oberstabsarzt (OSA) Tony H. Richter sowie anderer, an dieser Arbeit/Publikation nicht beteiligte Personen. Verantwortlich für die Datenanalyse und Berechnungen waren OSA Tony H. Richter und Dr. Wiebke Braun, Dr. Jan Schröder unterstützte beratend. Alle Autoren des Artikels wirkten an der Auswertung und Diskussion der Studienergebnisse mit. Die inhaltliche Analyse der Daten, die Formulierung einer konkreten Fragestellung und die Abfassung des finalen Manuskriptes erfolgte durch OSA Tony H. Richter sowie Frau Prof. Dr. Dr. Bosy-Westphal und Prof. Dr. Manfred J. Müller.

Eigenanteil an der Publikation

Meine Beteiligung begann im August 2019. Mein Eigenanteil umfasste die Konkretisierung der Energieumsatzfragestellung inklusive der entsprechenden Einflüsse der Körperzusammensetzung und des Hormonhaushalts sowie der wissenschaftlichen Recherchen. Über mehrere Monate war ich für die Mit-Planung und Durchführung der Untersuchungen der Probanden, die Stratifizierung der Messwerte und auch der Blutproben für die Vorbereitung der Analysen und die Zusammenstellung aller Ergebnisse in Form einer großen Datenbank verantwortlich sowie deren statistischen Bearbeitung unter Mithilfe von Frau Dr. Braun. Weiterhin war ich verantwortlich für die wissenschaftliche Bewertung der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Fachliteratur sowie für die Erstellung von Grafiken und Tabellen für die Veröffentlichung. Als Erstautor verfasste ich den Manuskript-Erstentwurf und war federführend für die Erstellung der inzwischen veröffentlichten Endversion des Manuskripts verantwortlich.

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe, insbesondere ohne entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- und Beratungsdiensten, verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe. Das gilt insbesondere auch für alle Informationen aus Internetquellen.

Soweit beim Verfassen der Dissertation KI-basierte Tools („Chatbots“) verwendet wurden, versichere ich ausdrücklich, den daraus generierten Anteil deutlich kenntlich gemacht zu haben. Die „Stellungnahme des Präsidiums der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zum Einfluss generativer Modelle für die Text- und Bilderstellung auf die Wissenschaften und das Förderhandeln der DFG“ aus September 2023 wurde dabei beachtet.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Für die Betreuung bei dieser Promotion möchte ich Herrn Prof. Dr. Volker Harth als meinen Doktorvater danken. Ebenso danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Rüdiger Reer, als Ko-Betreuer. Herr Prof. Dr. Harth und Rüdiger waren verlässliche Ansprechpartner und haben mich bei der Verfassung des Gesamtwerkes dieser Promotion in Form regelmäßiger kritischer und konstruktiver Feedbacks unterstützt.

Durch Herrn Dr. Lorenz Scheit bin ich in diese großartige Forschungsgruppe gekommen. Außerdem konnte ich stets auf seine Hilfe zählen. Seine Forschungserfahrung und damit einhergehenden Kontakte im Bundeswehrkrankenhaus Hamburg haben mich so manche Hürde einfacher nehmen lassen. Dafür möchte ich ihm großen Dank aussprechen. Auch auf Herrn Dr. Jan Schröder konnte ich zählen. In Fragen bezüglich Datenerfassung und -analyse war er ebenso stets erreichbar wie für die kritische Prüfung meiner Vorhaben. Vielen Dank dafür! Frau Dr. Katrin Bender möchte ich für die Herstellung des Kontaktes mit dem Kommando Spezialkräfte der Marine sowie für die großartige Unterstützung bei der Betreuung der Probanden danken. Auch dem Kommando Spezialkräfte der Marine und den Kampfschwimmerschülern möchte ich für die Bereitschaft, an der Kampfschwimmerstudie teilzunehmen, danken. Das war in Anbetracht der sehr herausfordernden Ausbildung alles andere als selbstverständlich.

Frau Prof. Dr. Dr. Anja Bosy-Westphal und Herrn Prof. Dr. Manfred James Müller möchte ich herzlich für die tatkräftige Unterstützung bei der Konzeptionierung dieser Arbeit danken. Durch Sie beide bin ich auf das Thema dieser Arbeit gekommen. Sie haben mich stets konstruktiv begleitet und die personellen und zeitlichen Ressourcen ihres Instituts zur Verfügung gestellt. Frau Prof. Dr. Dr. Anja Bosy-Westphal möchte ich ganz herzlich dafür danken, dass sie stets darauf achtete, dass ich die relevanten Aspekte im Fokus behielt und nicht „davon galoppierte“. Deine freundliche und hilfsbereite Art hat die Arbeit mit Dir sehr bereichert, ich werde unsere Zusammenarbeit in bester Erinnerung behalten. Bei Prof. Dr. Manfred James Müller möchte ich mich ganz herzlich für die geduldige und konstruktive Unterstützung bei der Verfassung des Artikels bedanken. Auf Sie konnte ich mich immer verlassen. Sie haben mich mit Ihren Erfahrungen stets in die richtige Richtung lenken können. Wenn ich nicht weiterwusste, haben Sie mich zur kritischen Selbstreflektion angehalten und waren jederzeit für Fragen erreichbar. Die Arbeit mit Ihnen hat mich nachhaltig geprägt und ich werde mich gerne an die gemeinsame Arbeitszeit zurückerinnern. Frau Dr. Wiebke Braun hat mich umfangreich und geduldig in allen Fragen der Statistik unterstützt. Sie haben für mich mit Ihrer Unterstützung häufig große Probleme klein werden lassen, dafür möchte ich Ihnen danken. Dem Institut für Humanernährung und Lebensmittelkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel möchte ich herzlich für die tolle Unterstützung bei der Datenerhebung danken.