

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis:	4
1. Einleitung	5
1.1. Thematik und Fragestellung.....	5
1.2. Physiologie des Flüssigkeitshaushaltes	9
1.2.1. Die Flüssigkeitskompartimente	9
1.2.1.1. Unterschiede von Intra- und Extrazellulärraum	10
1.2.1.2. Der interstitielle Raum.....	10
2. Methodik	11
2.1. Probanden.....	11
2.2. Studienablauf	12
2.2.1. Messzeitpunkte	12
2.2.2. Messparameter	13
2.3. Testprinzipien.....	13
2.3.1. Bestimmung der Körpermasse (BM).....	13
2.3.2. Bestimmung der Körperzusammensetzung durch Bioimpedanzanalyse	14
2.3.2.1. Physiologische Grundlagen zur Körperzusammensetzung	14
2.3.2.2. Physikalische Grundlagen.....	16
2.3.2.3. Durchführung der Bioimpedanzanalyse	17
2.3.3. Schichtdickenmessung	19
2.3.3.1. Die Haut als Wasserspeicher.....	19
2.3.4. Durchführung der Schichtdickenmessung.....	20
2.3.5. Messung der Temperatur	23
2.3.5.1. Bestimmung der Körperkerntemperatur	23
2.3.5.2. Bestimmung der Hautoberflächentemperatur.....	23
2.3.6. Physiologie des transepidermalen Wasserverlustes (TEWL).....	25
2.3.6.1. Physikalische Grundlagen.....	26
2.3.6.2. Durchführung der TEWL-Messung.....	27
2.4. Statistische Auswertung.....	28

2.4.1.	Zentrale Tendenz der Messwerte.....	28
2.4.2.	Spezielle Ordnungsstatistiken	28
2.4.3.	Graphische Darstellung.....	29
2.4.4.	Berechnung der Signifikanzen	29
2.4.4.1.	Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben	29
2.4.4.2.	Mann-Withney-U-Test für unverbundene Stichproben	30
2.4.5.	Fehlende Werte.....	30
3.	Ergebnisse.....	32
3.1.	Unterschiede der beiden Gruppen und Problematik der Darstellung	32
3.1.1.	Körpermasse.....	32
3.2.	Anthropometrische Daten.....	38
3.2.1.	Body-Mass-Index (BMI).....	38
3.3.	Daten der Bioelektrischen Impedanz-Analyse (BIA)	40
3.3.1.	Gesamtkörperwasseranteil am Körpergewicht.....	40
3.3.2.	Extrazellulärwasseranteil am Gesamtkörperwasser.....	42
3.4.	Schichtdicken	44
3.4.1.	Schichtdicke an Punkt A	44
3.4.2.	Schichtdicke an Punkt B	46
3.4.3.	Schichtdicke an Punkt C	48
3.4.4.	Schichtdicke an der Stirn.....	50
3.5.	Körpertemperatur	52
3.5.1.	Körperkerntemperatur	52
3.5.2.	Temperatur der Körperschale	54
3.5.3.	Differenz zwischen Kern- und Schalentemperatur	56
3.6.	Transepidermaler Wasserverlust (TEWL)	58
3.6.1.	TEWL der gesamten Körperschale	58
3.6.2.	TEWL der Handflächen und Fußsohlen	60
3.6.3.	TEWL der restlichen Körperbereiche	62

4.	Diskussion	64
4.1.	Körpergewicht und Körperzusammensetzung.....	64
4.2.	Schichtdicke	66
4.3.	Körpertemperatur	67
4.4.	Transepidermaler Wasserverlust	69
5.	Zusammenfassung	72
6.	Literaturverzeichnis	74
7.	Abbildungsverzeichnis	84

Abkürzungsverzeichnis:

BCM	Body Cell Mass
BF	Body Fat
BIA	Bioimpedanzanalyse
BM	Body Mass
BMI	Body Mass Index
ECM	Extracellular Mass
ECW	Extracellular Water
FFM	Fat-Free Mass
ICW	Intracellular Water
LBM	Lean Body Mass
Rz	Resistanz
TBW	Total Body Water
TEWL	Transepidermal Water Loss
TT	Tissue Thickness
Xc	Reaktanz
Z	Impedanz/Gesamtkörperwiderstand

1. Einleitung

1.1. Thematik und Fragestellung

Während der Schwerelosigkeit sind Astronauten einer Vielzahl von physiologischen Veränderungen ausgesetzt, die gerade bei langen Raumflügen, wie einer Reise zum Mars mit einer potentiellen Dauer von 8 Monaten oder längeren Aufenthalten auf bemannten Raumstationen wie der ISS (International Space Station), medizinische Konsequenzen während des Fluges und bei der Rückkehr zur Erde haben könnten. Beeinträchtigend sind vor allem die Flüssigkeitsumverteilung von der unteren in die obere Körperhälfte, die Hypovolämie und der Wegfall der Gravitationskraft auf Muskeln und Knochen, was alles zusammengenommen zu bedeutenden Veränderungen im kardiovaskulären und muskuloskeletalen Bereich führen kann. Aus diesen Veränderungen resultieren eine erhöhte Häufigkeit an orthostatischer Intoleranz [1-4], ein vermindertes Herzzeitvolumen und eine verminderte Belastbarkeit. Weil gerade die gute körperliche Belastbarkeit der Astronauten bei länger andauernden Raumaufenthalten wichtig ist, ist es notwendig, medizinische Probleme, die während des Raumfluges und bei der Rückkehr zur Erde auftreten können, möglichst schon vorher zu erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Unterschiedliche Methoden zur Gegensteuerung, wie zum Beispiel die künstlich erzeugte Schwerkraft durch Centrifugation [5-9], die kompensatorische Flüssigkeitsaufnahme [10, 11], die Verwendung von Druckmanschetten [12, 13], LBNP (lower body negative pressure)-Systeme [14-18] oder das Muskeltraining [17-19] sind Bestandteil klinischer Studien.

Um die Effekte der Schwerelosigkeit auch auf der Erde untersuchen zu können, wurden unterschiedliche Simulationsmodelle entwickelt. Dazu gehören der Parabelflug [20-23], die trockene und feuchte Immersion [9, 24-26] und die Bettruhe in horizontaler Lage [27] sowie in Kopftieflage [1, 17, 28]. Alle diese Modelle können jedoch nur teilweise die realen Bedingungen des Raumfluges nachstellen, es können also nur Einzelbereiche der jeweiligen Anpassungsbereiche studiert werden [29]. Vorteil des Bettruhemodells, bei dem sich durch den minimalen Gebrauch von Muskeln und Knochen die Körperfunktionen ähnlich wie bei Schwerelosigkeit im All verhalten, ist die Durchführbarkeit über lange Zeiträume. Somit können auch

Langzeitauswirkungen der Schwerelosigkeit auf die Physiologie des menschlichen Körpers erfasst werden.

Im Vordergrund der bisherigen Untersuchungen standen vor allem kurzfristige Veränderungen des kardiovaskulären Systems und schnellauftretende Flüssigkeitsverschiebungen, aber nur wenige Studien beschäftigten sich bisher mit den Auswirkungen, die eine langzeitige Abwesenheit von Schwerkraft verursacht. Auch beschränkten sich die Untersuchungen bezüglich der Gegenmaßnahmen bisher weitestgehend auf das skeletomuskuläre System, Daten zu Veränderungen des autonomen Nervensystems, der Thermoregulation und des Flüssigkeitshaushaltes durch Muskeltraining sind jedoch rar.

Während des Raumflugs [30-39] und während der Isolation auf der Erde [40-46] kommt es zu Veränderungen des Körpergewichts, meist zu einer Abnahme der Gesamtkörpermasse (BM). Es wird diskutiert, ob dafür Veränderungen im Wasserhaushalt verantwortlich sind oder vielmehr ein Verlust von Gewebe zur Abnahme des Körpergewichts führt [32, 33, 46-51]. Um diese Effekte genau beobachten und unterscheiden zu können, wurde in der vorliegenden Studie nicht nur das Körpergewicht, sondern auch die Körperzusammensetzung und die Flüssigkeitsverteilung entlang der Körperachse gemessen.

Innerhalb weniger Stunden in Schwerelosigkeit verlieren Astronauten bis zu 12% ihres Plasmavolumens [51]. Dieser Verlust an Plasmavolumen lässt sich durch eine Umverteilung von Flüssigkeit in den interstitiellen Raum und damit der Entstehung interstitieller Ödeme vor allem im Bereich des Kopfes [33, 51], eine verminderte Flüssigkeitsaufnahme [35] und das Wegfallen des Gravitationsgradienten des Blutdrucks erklären [51]. Astronauten berichten von Gesichtsoedemen, angeschwollenen Jugularvenen und anderen Zeichen der Flüssigkeitsfüllung im Kopf. Studien zeigten diese Volumenumverteilung auch bei mittels Bettruhe simulierter Schwerelosigkeit [52, 53].

Es hat sich gezeigt, dass die Schlangewebe als physiologisch wichtiger Wasserspeicher dienen [54-56] und dass Schwankungen im Wasserhaushalt sich

dort durch Einlagerung oder Flüssigkeitsabgabe bemerkbar machen, was sich mittels Hochfrequenzultraschall quantifizieren lässt [55, 57-61].

Während des Raumfluges kommt es aufgrund des Wegfalls des hydrostatischen Drucks zu Flüssigkeitsverschiebungen von der unteren Körperhälfte kopfwärts [51, 56, 62]. Diese Flüssigkeitsverschiebungen führen zu den oben beschriebenen Ödemen im Gesichtsbereich. Die Dauer dieses Phänomens variiert zwischen wenigen Stunden und einigen Wochen, ist aber meist während der ersten Tage zu finden. Diese Flüssigkeitsverschiebungen werden von den Astronauten als unangenehm empfunden und scheinen zusätzlich für die bei der Rückkehr zur Erde auftretenden orthostatischen Fehlregulationen mitverantwortlich zu sein.

In der vorliegenden Studie wurden die Auswirkungen eines Vibrationsmuskeltrainings auf den Flüssigkeitshaushalt mittels Hochfrequenzultraschallmessung der Schallengewebe und der Messung der Körperzusammensetzung mit Bioimpedanzanalyse dargestellt.

Dass es während des Raumfluges zu Veränderungen der Thermoregulation kommt, zeigen schon die subjektiv von Astronauten geäußerten Beschwerden über kalte Hände und Füße im All [63, 64]. Studien zur Thermoregulation während des Raumfluges und nach der Wiederkehr zur Erde existieren bisher nur wenige [65, 66], so dass bisherige Erkenntnisse bezüglich der Auswirkung von Schwerelosigkeit auf Thermoregulationsprozesse größtenteils auf mittels Bettruhe-Simulationsstudien gewonnenen Daten [67-81] basieren. Bisher erhobene Daten zeigen ein Ansteigen der Körperkerntemperatur bereits nach kürzerer Kopftieflage-Bettruhe-Phase (24h-14 Tage) [67, 68, 73, 76, 79, 81] und dass die Astronauten/Probanden nach einem Raumflug/Bettruhe nicht mehr in der gleichen Weise in der Lage sind, während körperlichen Trainings erzeugte Wärme abzuführen, was sich in einer höheren Körperkerntemperatur während des Trainings zeigt [67, 73, 76, 79, 80].

Trainierte und untrainierte Personen unterscheiden sich bezüglich ihrer Thermoregulation; so zeigen Ausdauertrainierte eine größere Thermoregulationskapazität als Untrainierte. Dies zeigt sich während submaximaler Anstrengung in einer Abschwächung des Körperkerntemperaturanstiegs und der früheren Aktivierung der Schweißdrüsen bei Trainierten [82, 83]. Die Schwelle für

eine erhöhte Hautdurchblutung und Schwitzen ist in Richtung einer niedrigeren Kerntemperatur verschoben [84, 85]. Dieser durch Training induzierte Effekt kann auf ein erhöhtes Plasmavolumen [86], eine gesteigerte Hautdurchblutung [84] und eine größere Sensitivität der Schweißdrüsen auf cholinerge Erregung [87] zurückgeführt werden.

Es ist also davon auszugehen, dass das in dieser Studie durchgeführte tägliche Vibrationsmuskeltraining Auswirkungen auf die Thermoregulation und die Schweißabgabe hat und sich Nicht-Trainingsgruppe und Trainingsgruppe diesbezüglich unterscheiden.

Da das Schwitzen bei der thermoregulatorischen Wärmeabgabe eine wichtige Rolle spielt, ist es wichtig, die Beeinflussung der Schweißabgabe durch Schwerelosigkeit darzustellen. So war der Effekt des Raumfluges [66] und seiner Simulation [68, 73, 76, 80, 81] auf das thermoregulatorische Schwitzen bisher Bestandteil einiger Studien. Diese konnten zeigen, dass Bettruhe die Temperaturschwelle sowohl für die Vasodilatation der Hautgefäße [68, 73, 76, 79, 81] als auch für das Schwitzen [68, 73, 76, 80] bei nach der Bettruhe durchgeführten körperlichen Belastungsuntersuchungen zu höheren Werten hin verschiebt. Bisherige Untersuchungen beschränken sich jedoch auf die Untersuchung der Schweißabgabe bei nach der Bettruhe durchgeführter körperlicher Belastung und Daten zur Schweißabgabe während andauernder Bettruhe fehlen.

Eine erhöhte körperliche Fitness, induziert durch körperliches Training, ist mit einer Erhöhung der Sensitivität für Schwitzen und die Dilatation der Hautgefäße verbunden [88, 89]. Da Bettruhe dafür bekannt ist, die körperliche Fitness herabzusetzen, könnte sie einen gegensätzlichen Effekt auf die Sensitivität haben. Es ist also interessant zu sehen, wie sich die Kombination von Bettruhe mit dem in dieser Studie durchgeführten Vibrationsmuskeltraining auf die thermoregulatorische Wärmeabgabe und das damit verbundenen Schwitzen auswirkt und inwieweit sich diesbezüglich die Trainingsgruppe von der Nicht-Trainingsgruppe unterscheidet.

Bei der Berliner BedRest-Studie sollten die Effekte eines bei langen Raumflügen durchführbaren Vibrationsmuskeltrainings („Galileo“) auf das kardiovaskuläre und

das muskuloskeletale System sowie auf den Flüssigkeitshaushalt beobachtet werden.

Ziel der Arbeit ist es, die Auswirkungen der Schwerelosigkeit auf den Flüssigkeitshaushalt und die Flüssigkeitsverteilung entlang der Körperachse mittels sonographischer Schichtdickenuntersuchung, bioelektrischer Impedanzmessung sowie der Bestimmung des transepidermalen Wasserverlusts zu untersuchen und Veränderungen durch das Vibrationsmuskeltraining darzustellen.

1.2. Physiologie des Flüssigkeitshaushaltes

1.2.1. Die Flüssigkeitskompartimente

Je nach Alter, Geschlecht und Trainingszustand besteht der menschliche Körper zu etwa 60 Prozent aus Wasser. Bei Frauen und älteren Menschen liegt dieser Prozentsatz wegen des höheren Fettanteils an der Körpermasse etwas niedriger, während bei Kindern und gut trainierten Sportlern und Sportlerinnen der Wassergehalt des Körpers höher liegt. Bei einem durchschnittlich trainierten, 70 kg schweren erwachsenen Mann entspricht das etwa 42 Litern Gesamtkörperwasser. Das Gesamtkörperwasser ist auf zwei gegeneinander abgegrenzte Kompartimente aufgeteilt: das Intrazellularwasser und das Extrazellularwasser. Letzteres setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen: dem interstitiellen Volumen, dem Blutplasma und dem transzellulären Wasser (Liquor cerebrospinalis, Drüsensekrete, Flüssigkeiten in den Körperhöhlen, Kammerwasser des Auges, Synovialflüssigkeit in den Gelenken).

28 der 42 Liter des Gesamtkörperwassers befinden sich im Inneren der Körperzellen. Die Zusammensetzung des Intrazellularwassers ist bei unterschiedlichen Körperzellen sehr ähnlich, so dass es als ein großes Kompartiment angesehen werden kann.

Alle Flüssigkeiten außerhalb der Zellmembranen werden zusammengefasst als Extrazellularwasser bezeichnet. Zusammen machen sie etwa 14 Liter des Gesamtkörperwassers bei einem durchschnittlichen 70 kg schweren Mann aus. Den größten Anteil dabei haben das interstitielle Wasser, welches mit 11 Litern etwa drei Viertel einnimmt, und das Blutplasma, welches etwa 3 Liter umfasst.

1.2.1.1. Unterschiede von Intra- und Extrazellulärraum

Die Flüssigkeitsräume weisen unterschiedliche, für sie charakteristische Elektrolytkonzentrationen auf. Während im Intrazellulärraum vor allem Kalium sowie anionische Proteine und Phosphatverbindungen akkumulieren, dominiert im Extrazellulärraum Natriumchlorid. Diese ungleiche Kationenverteilung entlang der Zellmembranen ist die Voraussetzung für die Aufrechterhaltung des Zellmembranpotentials und somit für die Funktionsfähigkeit der Zellen.

Aber auch die beiden größten Komponenten des Extrazellulärraums, Interstitium und Plasma, unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung. Die sie voneinander trennende Endothelzellschicht ist in fast allen Geweben für Elektrolyte frei permeabel, nicht jedoch für die meisten Plasmaproteine. Der proteingebundene Anteil an Kalzium fehlt in der proteinarmen interstitiellen Flüssigkeit, dadurch ist die Kalziumkonzentration dort deutlich geringer. Ein geringfügiger Unterschied besteht auch für die anderen Ionen, da die Zurückhaltung der negativ geladenen Proteine ein Potential erzeugt, das Kationen im Plasma zurückhält und Anionen in das Interstitium treibt (Gibbs-Donnan-Potential).

Auch die Elektrolytzusammensetzung des transzellulären Wassers kann durch die unterschiedliche Transportfähigkeit der verschiedenen Epithelien stark von der des Interstitiums abweichen.

1.2.1.2. Der interstitielle Raum

Der interstitielle Raum repräsentiert etwa 15-20% der Körpermasse; ein Drittel davon gehört zur Haut, ein Drittel besteht aus Muskelgewebe und ein Drittel gehört zum Intestinaltrakt.

Das Interstitium setzt sich aus einem kollagenen Fasergerüst und einer aus Glykosaminoglykanen, Proteoglykanen und Hyaluronsäure bestehenden interstitiellen Grundsubstanz zusammen. Die auswärtsfiltrierten Bestandteile des Blutplasmas bilden mit der interstitiellen Grundsubstanz eine Matrix, die in wässriger Umgebung aufquillt, aber auch in der Lage ist, Wasser an die Umgebung abzugeben.

Die Haut kann als typisches Model für den interstitiellen Raum dienen [54, 90].

2. Methodik

2.1. Probanden

An der Studie nahmen 20 gesunde, männliche Probanden im Alter von 23 bis 43 Jahren auf freiwilliger Basis teil. Die Versuchspersonen wurden vorher ausführlich über die Durchführung und die Ziele der Studie informiert und erklärten sich in allen Punkten einverstanden. Ein Votum der Ethikkommission der Charité-Universitätsmedizin Berlin über die Gesamtstudie lag vor. Alle Versuchspersonen wurden einer ausführlichen medizinischen Untersuchung unterzogen und für die Studie tauglich erklärt. Die Probanden wurden nach einem randomisierten Verfahren in zwei gleichgroße Gruppen zu je 10 Personen geteilt: die sog. „Trainingsgruppe“ (N=10) führte im weiteren Versuchsablauf regelmäßig ein Vibrations-Muskeltraining durch (Galileo Space, Novotec, Pforzheim, Germany), während die „Nicht-Trainingsgruppe“ (N=10) während des gesamten Versuchszeitraums kein körperliches Training absolvierte.

Die Charakterisierung der Probanden ist in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1: Charakterisierung aller Versuchspersonen (N=20) bei Versuchsbeginn

	Einheit	Median	Minimum	Maximum
Alter	[J]	32	23	43
Größe	[m]	1,83	1,70	1,95
Körpermasse	[kg]	77,7	60,2	103,4
Body-mass-index	[kg•m ⁻²]	23,3	20,0	28,0

Tabelle 2: Charakterisierung der Versuchspersonen der Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und der Trainingsgruppe (N=10) bei Versuchsbeginn

	Einheit	Median	Minimum	Maximum	
Nicht-Trainingsgruppe	Alter	[J]	34	24	43
	Größe	[m]	1,83	1,75	1,94
	Gewicht	[kg]	77,2	64,7	94,8
	Body-mass-index	[kg•m ⁻²]	23,0	20,0	26,3
Trainingsgruppe	Alter	[J]	32	23	43
	Größe	[m]	1,83	1,70	1,95
	Gewicht	[kg]	78,4	60,2	103,4
	Body-mass-index	[kg•m ⁻²]	25,0	20,3	28,0

2.2. Studienablauf

2.2.1. Messzeitpunkte

Die Untersuchungen fanden zwischen Februar 2003 und Mai 2004 in fünf Zeiträumen über jeweils acht Wochen in den Räumen des Universitätsklinikums Benjamin Franklin statt. Jeweils zwei Probanden aus der Trainings- bzw. Nicht-Trainingsgruppe wurden in Doppelzimmern untergebracht. Während des Untersuchungszeitraums mussten die Versuchspersonen durchgehend liegen bleiben und durften das Kopfteil des Bettes auf höchstens 20° Steigung einstellen. Das strenge Einhalten dieser Position wurde mittels Bewegungssensoren im Bett und Videokameras überwacht.

Die jeweils erste Messung fand am ersten Tag der Liegeperiode statt (L1). Die zweite Messung wurde am fünften Liegetag (L5) durchgeführt, im weiteren Verlauf fanden die Untersuchungen wöchentlich statt (L12, L19, L26, L33, L40 und L47). Der letzte Liegendmesspunkt war am 53. Versuchstag (L53).

Nach Beendigung der insgesamt 56-tägigen Liegeperiode wurde am ersten Tag des Aufstehens (57. Versuchstag → A1) und am dritten Tag (59. Versuchstag → A3) eine Messung durchgeführt.

Das Studiendesign ist in Abbildung 1 dargestellt.

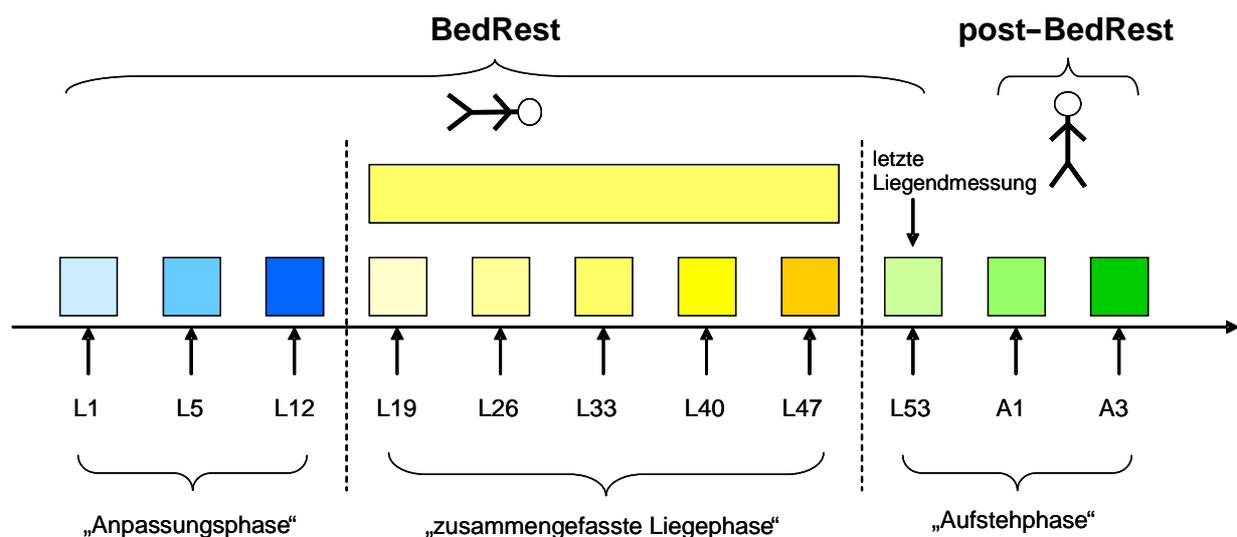


Abbildung 1: Studiendesign

2.2.2. Messparameter

Gemessen wurde pro Messtag bei jedem Probanden die Körpermasse, die Körperimpedanz bzw. -zusammensetzung, die Schichtdicke der oberflächlichen Gewebeschichten der Unterschenkel, die Evaporation sowie die Körperkern- und Hautoberflächentemperaturen an verschiedenen Punkten. Zusätzlich wurde bei acht Probanden die Schichtdicke der oberflächlichen Gewebeschicht der Stirn gemessen. Die Untersuchungen fanden, zur Reduzierung bzw. Vermeidung der Messergebnisse möglicherweise beeinflussender circadianer Effekte, im gleichen Tageszeitraum vor dem Training, d.h. zwischen 9:00 Uhr und 13:00 Uhr, statt.

Da im Rahmen der Gesamtstudie mehrere Arbeitsgruppen Untersuchungen an den Probanden durchführen sollten, wurde bereits bei der Ablaufplanung darauf geachtet, dass die einzelnen Messtage wiederkehrend gleichförmig strukturiert waren, um unerwünschte Interaktionen oder mögliche Störfaktoren zu vermeiden.

Die Ernährung erfolgte durch die Küche des Universitätsklinikums Benjamin Franklin unter der Kontrolle von Ernährungsexperten und reglementierter, täglicher Kalorienzufuhr nach Berechnung des Energiebedarfs mittels der Harris-Benedict-Formel mit einem Aktivitätsfaktor von 1,2. Die Flüssigkeitszufuhr wurde nicht begrenzt, aber mittels Ein- und Ausfuhrplänen protokolliert.

Die Probanden waren während des Studienzeitraums von ihrem persönlichen Umfeld weitgehend unbeeinflusst; sie durften beispielsweise keinen Besuch bekommen, hatten jedoch mittels Telefon und Internet die Möglichkeit, mit der Außenwelt zu kommunizieren.

2.3. Testprinzipien

2.3.1. Bestimmung der Körpermasse (BM)

An jedem Messtag wurden die Probanden direkt vor der biometrischen Bestimmung der Körperzusammensetzung gewogen.

Die Bestimmung der Körpermasse erfolgte mittels eines auf einer Waage stehenden Bettes, so dass die Probanden die horizontale Körperlage für den Zeitraum der Messung beibehalten konnten. Die Waage wurde vor Beginn einer jeden Messung geeicht.

Der Body-Mass-Index (BMI) wurde mittels Körpergewicht und Körpergröße nach der von L.A.J. Quételet (belgischer Mathematiker 1796 – 1874) entwickelten Formel errechnet:

$$\text{BMI} = \text{BW [kg]} / \text{Körpergröße [m}^2\text{]}$$

2.3.2. Bestimmung der Körperzusammensetzung durch Bioimpedanzanalyse

2.3.2.1. Physiologische Grundlagen zur Körperzusammensetzung

Die Zusammensetzung des menschlichen Körpers kann vereinfacht im Zweikompartimentmodell dargestellt werden, welches die Gesamtkörpermasse, also das mit einer Waage messbare Körpergewicht, in zwei Kompartimente unterteilt: In einem Kompartiment werden Muskeln, Knochen und übriges Gewebe unter dem Begriff fettfreie Körpermasse (Fat-Free Mass, FFM) zusammengefasst, das andere Kompartiment umfasst das Körperfett (Body Fat, BF). Die FFM, auch als Magermasse (Lean Body Mass, LBM) bezeichnet, errechnet sich aus dem Gesamtkörperwasser (Total Body Water, TBW). Dabei wird davon ausgegangen, dass sich der größte Teil des TBW in der FFM befindet, da Fett nur wenig Wasser speichern kann. Bei normaler Hydratation macht demnach das TBW einen Anteil von etwa 73% der FFM aus.

Die FFM kann weiter in einen Anteil Extrazellulärmasse (Extracellular Mass, ECM) und einen Anteil Körperzellmasse (Body Cell Mass, BCM) unterteilt werden. Das führt zu dem sogenannten Dreikompartimentmodell (Tabelle 3):

Tabelle 3: Dreikompartimentmodell

Gesamtkörpermasse		
Fettfreie Masse (FFM)		Fettmasse
Kompartiment 1	Kompartiment 2	Kompartiment 3
Extrazellulärmasse (ECM): Extrazellulärwasser (ECW), Knochen, Bindegewebe	Körperzellmasse (BCM)	
Ohmscher Widerstand (Resistanz, Rz)	Kapazitiver Widerstand (Reaktanz, Xc)	FM = BW - FFM
		

Die Körperzusammensetzung lebender Organismen kann nicht direkt gemessen werden. Bekannte Messverfahren, die nach dieser Einteilung Teilkomponenten der Körperzusammensetzung bestimmen können, sind z.B. Dilutionsmethoden mit radioaktiven bzw. stabilen Isotopen, densitometrische Messungen, Hautfaltendickemessungen, Kaliumbestimmungen und die in dieser Arbeit verwandte bioelektrische Impedanzanalyse.

Letztere hat in den zurückliegenden Jahren eine zunehmende Bedeutung erlangt. Es handelt sich dabei um ein nicht-invasives, unkompliziertes und kostengünstiges Verfahren, mit dem ausreichend zuverlässige Aussagen über die Körperzusammensetzung getroffen werden können und das aufgrund dieser Vorzüge auch während eines realen Raumfluges Verwendung finden könnte. Dieses Verfahren wurde von Hoffer et al. [91] entwickelt und basiert auf dem Prinzip, dass unterschiedliche Körpergewebe unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten aufweisen. Es konnte gezeigt werden, dass die bioelektrische Impedanzanalyse bei gesunden Freiwilligen [91-93] und Dialysepatienten [94, 95] das Gesamtkörperwasser mit hoher Genauigkeit angibt und die gewonnenen Daten bei

kritisch kranken Patienten gut mit dem klinisch ermittelten Hydratationsstatus übereinstimmen [96].

2.3.2.2. Physikalische Grundlagen

Die Bioimpedanzanalyse ist eine elektrische Widerstandsmessung im menschlichen Körper. Über zwei Hautelektroden an Hand und Fuß wird im Körper der Messperson ein homogenes, hochfrequentes elektrisches Feld mit konstanter Stromstärke erzeugt, wobei ein konstanter Messstrom von 800 μA bei einer Frequenz von 50 KHz heute als Standard gilt. Der applizierte Strom der bioelektrischen Impedanzmessung führt zu keinen Missempfindungen. Mittels zwei weiterer, etwas proximaler gelegener Elektroden wird der Spannungsverlauf abgetastet. Der Körper setzt dem Wechselstrom einen Widerstand entgegen, der als Impedanz Z (Gesamtwiderstand) bezeichnet wird. Das Ohmsche Gesetz beschreibt den Widerstand eines Organismus als proportional zum Spannungsabfall eines applizierten elektrischen Stroms.

Das fettfreie Gewebe, reich an Körperflüssigkeiten und Elektrolyten, verhält sich wie ein guter elektrischer Leiter und setzt einen niedrigen, rein ohmschen Widerstand (Resistanz, R_z) entgegen. R_z ist proportional zum Wassergehalt des Körpers, d.h. bei zunehmender Überwässerung nimmt die Resistanz ab, bei Dehydrierung zu. Adipöses Gewebe und Knochen mit geringem Flüssigkeitsgehalt setzen einen hohen elektrischen Widerstand entgegen. Das Volumen des fettfreien Gewebes und sein Hydratationszustand bestimmt damit die Größe des elektrischen Widerstandes. Bei normaler Hydratation beträgt der Wasseranteil des fettfreien Gewebes im Mittel circa 73%. Näherungsweise gilt dann:

$$\text{FFM} = \text{TBW} / 0,73$$

Beim Körperstromkreis wirken die Körperzellen bedingt durch die Zellmembranen wie Kugelkondensatoren, die dem Wechselstrom einen kapazitiven Widerstand entgegensetzen (Reaktanz, X_c). Die Zellmembranen (Phospholipidbilayer) nehmen hierbei die Funktion des schlecht leitenden Isolators zwischen zwei

Kondensatorplatten ein (Abbildung 2). Durch Messung der Reaktanz sind Rückschlüsse auf die Zellmasse und das zellulär gebundene Körperwasser möglich.

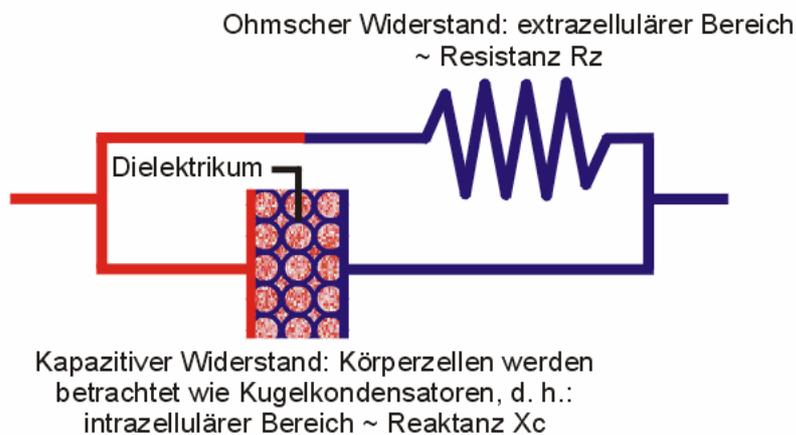


Abbildung 2: Körperstromkreis

Aus dem Verhältnis von ohmschen und kapazitiven Anteil der Körperimpedanz errechnet sich der Phasenwinkel. Diese Größe erlaubt Aussagen über den Ernährungs- und Trainingszustand der untersuchten Person. Der Wert des Phasenwinkels ist proportional zur Reaktanz und ein Maß für den Zustand der Körperzellmasse. Leistungssportler z.B. haben aufgrund erhöhter Muskelmasse einen hohen Phasenwinkel (ca. > 6,5°), fehl- und mangelernährte Messpersonen (mit Muskelkachexie) einen niedrigen Phasenwinkel. Der Phasenwinkel liegt bei Männern zwischen 7,9 und 2,5. Tägliche physiologische Schwankungen des Phasenwinkels spiegeln den wechselnden Hydratationszustand wider.

Der Messung und Berechnung wird ein Dreikompartimentmodell (Tabelle 3) zugrunde gelegt. Die Validität der Methode wurde vielfach dokumentiert [93, 97-103].

2.3.2.3. Durchführung der Bioimpedanzanalyse

Die Körperzusammensetzung wurde mit dem **Soft Tissue Analyzer** der Firma Akern-Bioresearch Srl-Florence (CE Medical Device Class II A) (Abbildung 3) gemessen. Das Gerät hat einen resistiven Widerstand (R_z) von 0-1000 Ohm und einen reaktiven (kapazitiven) Widerstand (X_c) von 0-200 Ohm bei einer Empfindlichkeit von 1 Ohm. Mit einem High-Input-Impedanz-Verstärker wird der Spannungsabfall zwischen den

inneren Elektroden gemessen. Die Genauigkeit der konstanten Stromquelle beträgt für die Spannbreite des Widerstands von 0-1000 Ohm bei $800 \mu\text{A} \pm 2\%$.



Abbildung 3: Bioimpedanzanalyzer

Zur Auswertung und Berechnungen wurde die geeignete Computersoftware BodyComp V 7.0 der Medical Healthcare GmbH verwendet.

Bei den Messungen wurden Einweg-Haftelektroden der Firma Medical Healthcare benutzt. Die Elektroden wurden nach Entfettung der Haut durch ein alkoholisches Desinfektionsmittel (Bode Sterillium® pure) wie in Abbildung 4 dargestellt auf der Dorsalseite der rechten Hand und auf dem rechten Fußrücken platziert.

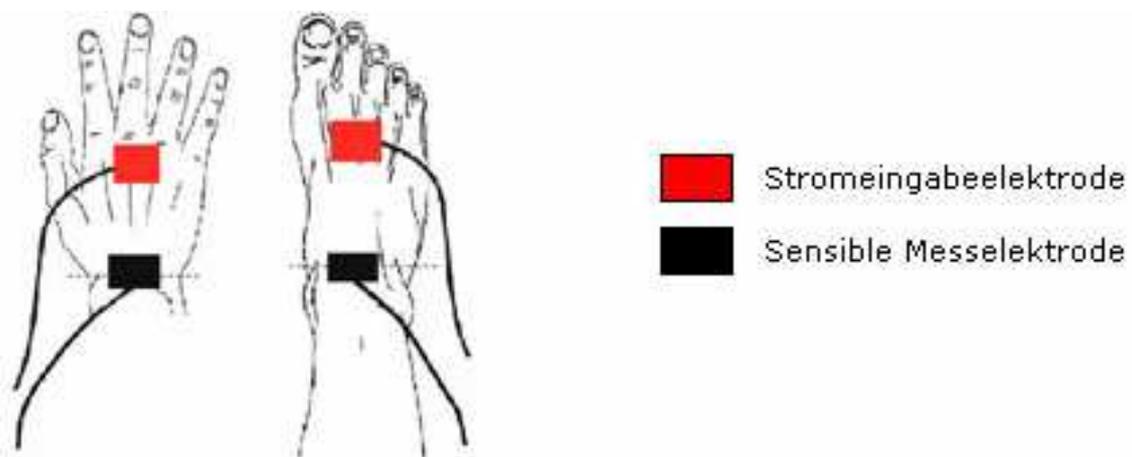


Abbildung 4: Platzierung der Elektroden

Nachdem der feste Sitz der Elektroden kontrolliert wurde, wurden die Messklemmen angebracht, wobei darauf geachtet wurde, dass das Messkabel keinen Zug auf die Haut ausübt.

Die Messung wurde nach einer Minute vollkommener körperlicher Ruhe gestartet, indem das BIA-Messgerät eingeschaltet wurde. Nach Stabilisierung der Messwerte (nach ca. 15-20 sec) konnten die Werte für Rz und Xc direkt vom Display des Gerätes abgelesen werden.

2.3.3. Schichtdickenmessung

2.3.3.1. Die Haut als Wasserspeicher

Die Haut ist, als typisches Model für den interstitiellen Raum, Teil des Gesamtwasserreservoirs des Körpers [104]. Sie hat eine Oberfläche von 1,5 – 2 m², abhängig von Körpergröße und -gewicht und macht etwa 12% des Gesamtkörpergewichts aus.

Die menschliche Haut besteht aus drei Schichten (Abbildung 5): der Epidermis, der Dermis und der Subcutis. Jede dieser Schichten übernimmt bestimmte Aufgaben, arbeitet jedoch mit der abgrenzenden Schicht eng zusammen und ist mit dieser fest verbunden.

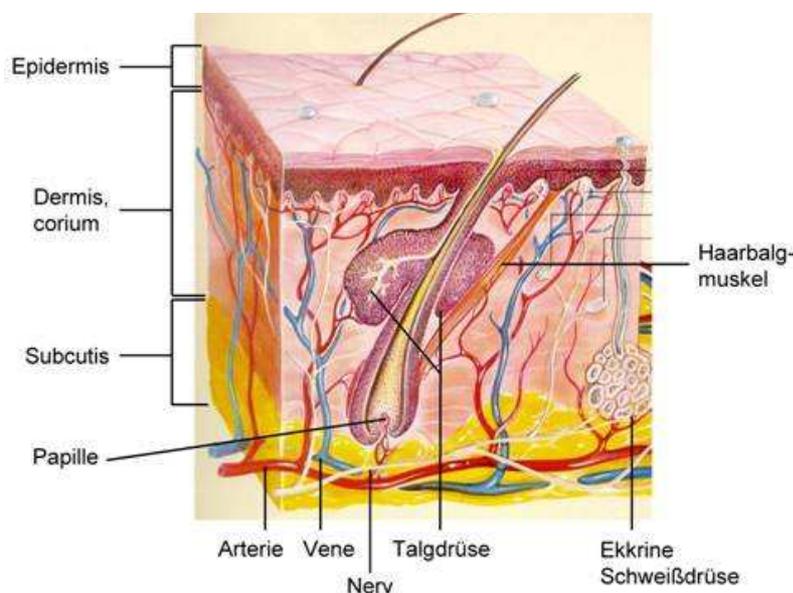


Abbildung 5: Der Aufbau der Haut

Die mittlere Schichtdicke der oberflächlichen Gewebsschicht, bestehend aus Haut und subkutanen Gewebe, beträgt etwa 4 mm, kann jedoch je nach Lokalisation, Konstitution, Alter und Geschlecht zwischen 2 mm und 8 mm variieren [58, 59]. Daraus lässt sich für einen durchschnittlichen Mann mit einer Körperoberfläche von

1,73 m² ein Gewebevolumen der Körperschale von 7 Litern errechnen. Ein Drittel dieser Gewebsschicht besteht aus Zellen, die restlichen zwei Drittel aus interstitieller Matrix. Diese wiederum besteht zu 50% aus austauschbarem Wasser. Von den 11 Litern interstitieller Flüssigkeit sind demnach etwa 2,5 Liter in den Schalengewebe eingelagert.

Hier können sie, im Gegensatz zu anderen Geweben wie Muskulatur, Lunge oder Intestinaltrakt, leicht mobilisiert werden, ohne die angrenzenden Zellen in ihrer Funktion zu beeinträchtigen, und dienen dem Körper somit als wichtiger Wasserspeicher [54, 56]. Diese Speicherfunktion zeigt sich vor allem auch bei Überwässerungszuständen. Gunga et al. 1994 [55] konnten zeigen, dass bei Dialysepatienten etwa 50% des im dialysefreien Intervall gespeicherten Wassers in den Schalengewebe gelagert und während der Dialyse von dort freigegeben werden.

Hochfrequenzultraschall ermöglicht eine nicht-invasive Messung der Schichtdicke (tissue thickness, TT) des Schalengewebe an Körperstellen, an denen der darunter liegende Knochen die Schallwellen reflektiert, wie dem Schienbein oder der Stirn. [55-61]. Auf diese Weise ließ sich zeigen, dass die TT und damit der Wassergehalt der Haut von äußeren Faktoren wie Körperposition und Wärmeexposition abhängen [57-59] und dass als Wasserspeicher vor allem die Dermis fungiert [57].

2.3.4. Durchführung der Schichtdickenmessung

Die Schichtdickenmessung der Haut wurde mit dem Ultraschallgerät Osteoson[®] DCIII - Minhorst GmbH & Co durchgeführt (Abbildung 6). Bei diesem Gerät liegt die Schallkopffrequenz bei einer Nennfrequenz von 20 MHz.



Abbildung 6: Osteoson®

Die Messungen erfolgten innenseitig über dem Schienbein des rechten und linken Beines. An diesen Stellen wird der Ultraschall von den darunter liegenden hyperechogenen Knochen reflektiert und erlaubt so die Messung von Dermis und Subcutis. Die erstellten Bilder zeigten die Haut bis zu einer Tiefe von 10 mm.

Vor Beginn der Messung mussten einige Vorbereitungen an dem zu messenden Hautbezirk sowie am Ultraschallmesskopf durchgeführt werden.

Vor jeder Messung wurde an den Unterschenkeln des Probanden, innenseitig über dem Schienbein, eine Markierung mit Edding vorgenommen, um sicherzustellen, dass an jedem Messtag an der gleichen Stelle gemessen wurde. Die Markierungen befanden sich von der Ferse ab (bei 90 Grad Stellung im Sprunggelenk) bei 20cm (Punkt A), 28cm (Punkt B) und 36cm (Punkt C). Die Messungen wurden immer vom gleichen Untersucher und unter gleichen äußeren Bedingungen durchgeführt.

Bei dem verwandten Ultraschallmesskopf wurde statt des üblichen Ultraschallgels destilliertes Wasser verwendet, das vor der Untersuchung in die Vorlaufstrecke des Messkopfes gefüllt werden musste. Da die Ausbreitung der Ultraschallwellen in Luft einer starken Absorption unterliegt, die die Messergebnisse verfälschen würde, musste auf eine komplette Luftblasenfreiheit in der Vorlaufstrecke geachtet werden.

Vor jeder Einzelmessung musste zusätzlich ein Tropfen des destillierten Wassers auf den Messkopf aufgetropft werden, um den luftfreien Kontakt zur Haut herzustellen und die ungestörte Leitung der Schallwellen zu ermöglichen. Der Schallkopf wurde strikt senkrecht auf die Haut aufgesetzt.

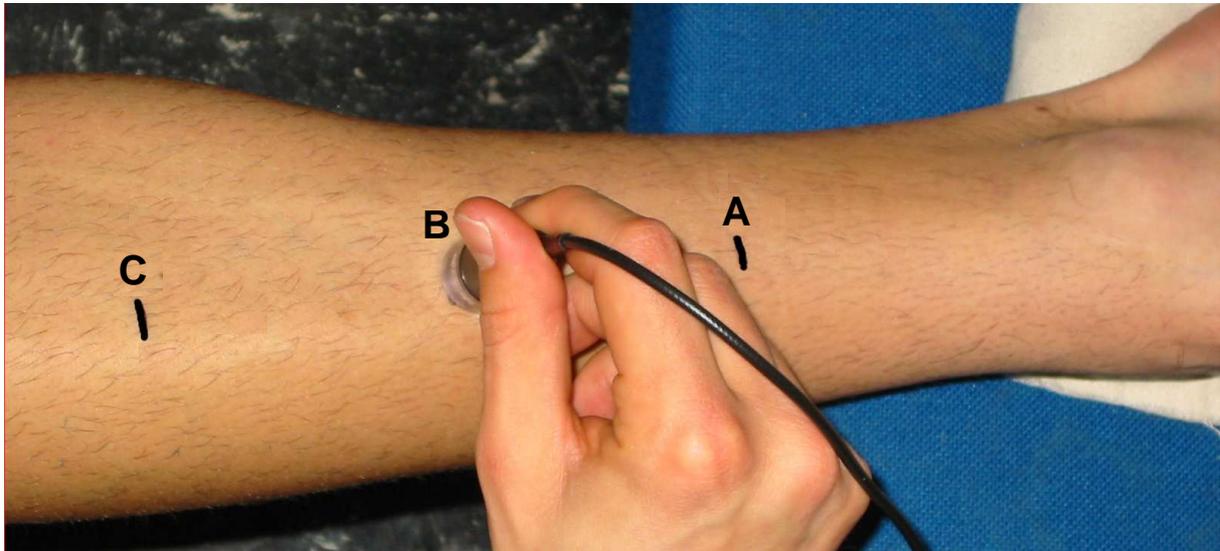


Abbildung 7: Markierung der Messpunkte (A,B,C) auf dem Unterschenkel des Probanden

Das Osteoson[®] DCIII wird durch die Betätigung einer Fußtaste gestartet. Das im Messgerät eingestellte Messintervall von 2 Sekunden stoppt den Messvorgang automatisch.

Zu Beginn jeder Einzelmessung wurde die Messsonde 2 cm vor dem markierten Punkt (A, B, C) aufgesetzt und unter gleichzeitiger Betätigung der Fußtaste gleichmäßig vorgeschoben. Die in der Abbildung 7 mit „A“ bezeichnete Markierung wurde innerhalb des Messintervalls erreicht, so dass eine zuverlässige Wiederholbarkeit der Messung an den verschiedenen Messtagen gewährleistet war.

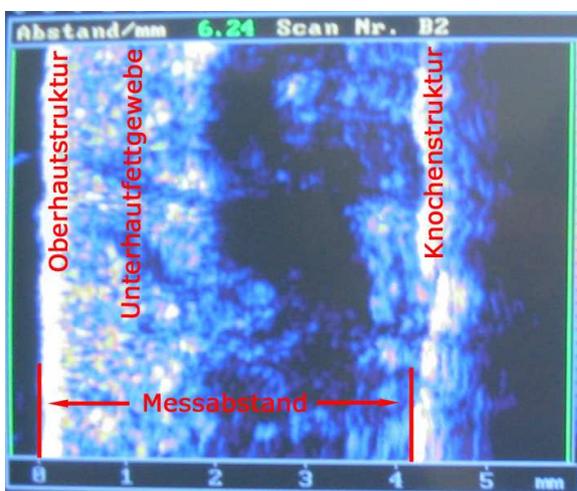


Abbildung 8: Mittels Osteoson erzeugtes B-mode Bild

Die so gewonnenen Bilder (Abbildung 8) wurden für die spätere Auswertung gespeichert. Dabei wurde für die statistische Auswertung aus den Messwerten der einzelnen Punkte (A, B und C) jeweils der Mittelwert der Messwerte für das linke und rechte Bein gebildet.

2.3.5. Messung der Temperatur

2.3.5.1. Bestimmung der Körperkerntemperatur

Als Parameter für die Körperkerntemperatur wurde die tympanale Temperatur gemessen, da frühere Studien zeigen konnten, dass die tympanale Temperatur mit ösophagealen und intrakraniellen Temperaturen vergleichbar ist [105, 106]. Dabei wurde bei jeder Messung die Temperatur an beiden Trommelfellen gemessen und die jeweils höhere Temperatur im weiteren Verlauf verwendet.

2.3.5.2. Bestimmung der Hautoberflächentemperatur

Die Hauttemperatur wurde mit dem Infrarot-Thermometer DermaTemp Model DT-1001-LN (EXERGEN Corporation, Newton, MA) (Abbildung 9) gemessen.



Abbildung 9: Infrarot-Thermometer DermaTemp Model DT-1001-LN

Der Messfühler wurde dabei nacheinander auf die folgenden Messpunkte aufgesetzt: Stirn (P1) → Brust (P2) → Bauch (P3) → Unterarm (P4) → Handfläche (P5) → Oberschenkel (P6) → Unterschenkel (P7) → Fußsohle (P8) (siehe Abbildung 10).

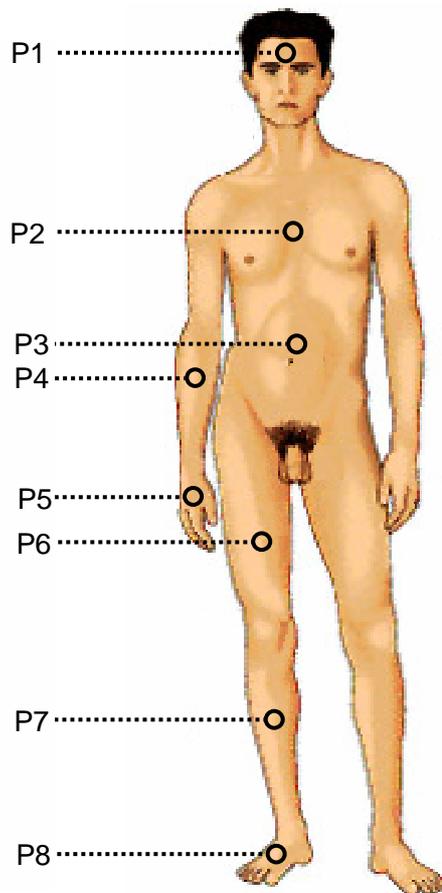


Abbildung 10: Messpunkte für die Bestimmung der Hautoberflächentemperatur und des TEWL

Um die mittlere Hauttemperatur, d.h. die Schalentemperatur, zu ermitteln, wurden die einzelnen Temperaturen mit folgenden Flächentemperaturen gewichtet (Tabelle 4):

Tabelle 4: Flächenfaktoren für die Berechnung der Schalentemperatur und des TEWL

Messpunkt	Flächenfaktor
P1 (Stirn)	0,070
P2 (Sternum)	0,175
P3 (Bauch)	0,175
P4 (Unterarm)	0,140
P5 (Handfläche)	0,050
P6 (Oberschenkel)	0,190
P7 (Unterschenkel)	0,130
P8 (Fußsohle)	0,070
Total:	1,000

2.3.6. Physiologie des transepidermalen Wasserverlustes (TEWL)

Der Verlust von Wasser durch die Haut und die Schleimhäute des Atmungstrakts an die Umgebung erfolgt zum einen passiv extraglandulär durch Diffusion (Perspiratio insensibilis), zum anderen aktiv glandulär über die Schweißsekretion der Schweißdrüsen (Perspiratio sensibilis). In Ruhe ist die Hautoberfläche mit etwa 65%, die wasserdampfgesättigte Atemluft mit etwa 35% an der Perspiratio insensibilis beteiligt.

Die durch vegetative Nervenimpulse gesteuerte Schweißdrüsenaktivität ist ein sehr guter Effektor der Temperaturregulation; die ekkrinen Schweißdrüsen sind unter komfortablen Umweltbedingungen inaktiv und werden erst durch thermische, körperliche oder emotionale Reize aktiviert.

Die Verdunstung von Wasser an der Hautoberfläche führt zum Wärmeentzug und damit zur Abkühlung des Körpers. Dieser Mechanismus wird als evaporative Wärmeabgabe bezeichnet. Voraussetzung ist ein Wasserdampfdruckgefälle von der Haut zur Umgebung. Die Verdunstungsenergie von Wasser beträgt etwa 2400 kJ/l.

Der transepidermale Wasserverlust (TEWL) dient aber nicht nur der Thermoregulation, sondern ist auch ein nicht zu vernachlässigender Faktor bei der Bilanzierung des Körperwassers.

Die treibende Kraft des transepidermalen Wassertransportes ist der Gradient zwischen dem durch Diffusion des Körperwassers erzeugten Wasserdampfdrucks der Haut und dem Wasserdampfdruck der Umgebung. Gemessen wird der Wert des TEWL in $\text{g/m}^2\cdot\text{h}$. Normale Ruhewerte liegen zwischen 15 und 20 Gramm pro Quadratmeter Körperoberfläche und Stunde. Steigende Umgebungstemperaturen führen zu einer Zunahme der TEWL. Eine Erhöhung der relativen Feuchte der Umgebungsluft führt zu einer Abnahme des TEWL, da sich der Druckgradient zwischen Haut und Umgebung verringert.

Als Folge des Biorhythmus und der damit verbundenen Schwankung der Körperkerntemperatur ist der TEWL vormittags meist höher als nachmittags. Auch das Lebensalter beeinflusst den TEWL, wobei die Wasserdurchlässigkeit der Haut und damit der TEWL mit dem Alter abnimmt.

An einzelnen Körperpartien werden unterschiedliche TEWL-Werte gemessen, wobei der TEWL an Hand- und Fußflächen, sowie der Stirn meist am größten ist.

Bei Bedeckung der Haut, z.B. mit Kleidung oder kosmetischen und pharmazeutischen Produkten, aber auch bei Hautschädigungen können diese Transportprozesse erheblich verändert werden. Wirkstoffe, die in die Haut eindringen, wie z.B. Salben, erzeugen einen zusätzlichen Druckverlust. Die Behinderung des TEWL, wie z.B. beim Tragen von Latexhandschuhen, führt zu einer Schwellung der Hornschicht.

2.3.6.1. Physikalische Grundlagen

Das Tewameter[®] TM 210 ist ein Gerät zur Messung der Wasserverdunstung einer Oberfläche. Physikalische Grundlage hierfür ist das 1855 von Adolf Fick entwickelte Diffusionsgesetz:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = -D \times A \times \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

m	=	transportiertes Wasser [g]
t	=	Zeit [s]
D	=	Diffusionskoeffizient
A	=	Oberfläche [m ²]
c	=	Wasserdampfdruck der Luft [Pa]
x	=	Distanz [m]

Dabei gibt der Diffusionsstrom $\Delta m/\Delta t$ an, wie viel Wasser je Zeiteinheit transportiert wird. Dieser Diffusionsstrom ist proportional zu der Fläche A und dem Dichtekoeffizienten dc/dx . D ist hierbei der Diffusionskoeffizient des Wasserdampfes in atmosphärischer Luft.

Dieses Gesetz hat nur innerhalb einer homogenen Diffusionszone Gültigkeit. Diese wird näherungsweise durch einen an beiden Seiten offenen Hohlzylinder (Abbildung 11) geschaffen, dessen kürzere Seite auf die Haut aufgesetzt wird.

Das von der Hautoberfläche verdunstende Wasser tritt durch den Zylinder an der gegenüberliegenden Seite aus. Der dabei auftretende Dichtegradient wird durch zwei im Zylinder befindliche Sensorpaare (Temperatur und relative Feuchte) indirekt gemessen und per Computersoftware ausgewertet.

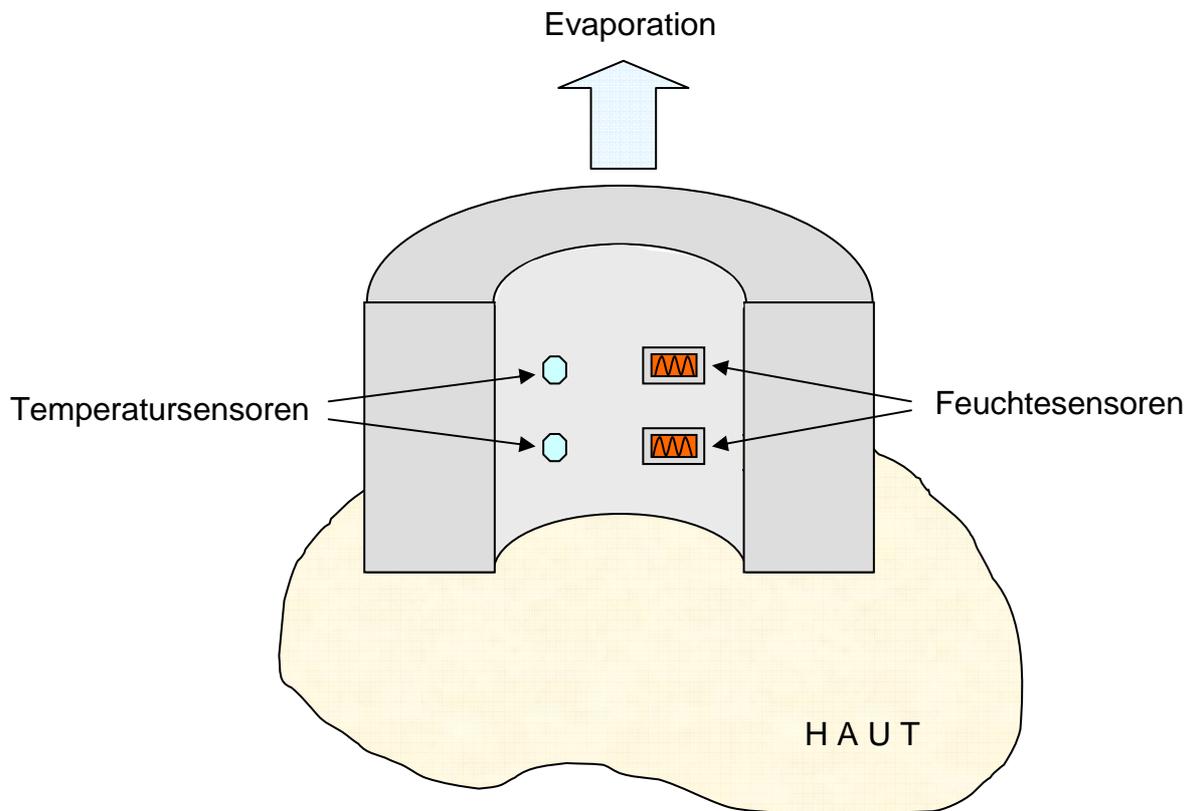


Abbildung 11: Aufbau der Tewametersonde

2.3.6.2. Durchführung der TEWL-Messung

Der transepidermale Wasserverlust (TEWL) wurde mit dem Tewameter® TM 210 (Courage + Khazaka electronic GmbH, Köln) ermittelt. Unter idealen Raumbedingungen von 22 – 24°C und 40 – 60% Luftfeuchtigkeit kann das Tewameter® TM 210 den TEWL mit einer Auflösung von 0,1 g/m²·h bestimmen.

Der Hersteller gibt eine Standardabweichung der TEWL-Werte von 10% bei einer relativen Feuchtigkeit von $\geq 30\%$ an. Zusätzlich kann bei besonders hohen TEWL-Werten über 70 g/m²·h ein sogenannter Verringerungseffekt beobachtet werden. Dieses Phänomen entsteht durch einen, bei steigender Verdunstung zunehmenden, Widerstand des Messzylinders (Information und Gebrauchsanweisung zum Tewameter® TM 210).

Die Messung wurde jeweils nach einer 10 minütigen Phase vollkommener Ruhe und unter immer gleichen Raumbedingungen (mit geschlossenen Türen und Fenstern) durchgeführt.

Die Messsonde wurde in festgelegter Reihenfolge (Stirn (P1) → Brust (P2) → Bauch (P3) → Unterarm (P4) → Handfläche (P5) → Oberschenkel (P6) → Unterschenkel (P7) → Fußsohle (P8)) sanft mit dem kurzen Ende des Sondenkopfes auf den Messpunkt aufgesetzt (Abbildung 10). Nach Erreichen einer Messwertstabilität (nach circa zwei Minuten) wurde der TEWL-Wert der Computersoftware entnommen und die Messung am nächsten Messpunkt fortgesetzt.

Der TEWL der gesamten Körperoberfläche wurde analog zur Berechnung der Körperschalentemperatur mittels Flächenfaktoren ermittelt (siehe Tabelle 4)

2.4. Statistische Auswertung

2.4.1. Zentrale Tendenz der Messwerte

Ordnet man die beobachteten Werte nach ihrer Größe, so teilt der Median die geordnete Reihe in zwei gleichgroße Teile; d.h. unterhalb und oberhalb des Medians liegen genau 50 % aller Werte. Bei einer ungeraden Anzahl von Werten wird genau der mittlere Wert angegeben, während bei gerader Werteanzahl der Mittelwert aus den beiden mittleren Werten gebildet wird. Im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert, der der Summe der Werte geteilt durch deren Anzahl entspricht, hat der Median den Vorteil, dass er von Ausreißer-Werten praktisch nicht beeinflusst wird, weshalb er sich besonders bei unsymmetrisch verteilten und kleinen Stichproben eignet.

Aufgrund der geringen Fallzahlen wurde in dieser Arbeit als zentrale Tendenz der Messwerte der Medianwert angegeben.

2.4.2. Spezielle Ordnungsstatistiken

Maßzahlen, die auf Ordnungsstatistiken (sortierten Daten) beruhen, sind als Positionsmerkmale zu verstehen, das heißt sie geben an wie viele Werte der geordneten Datenmenge unter- bzw. oberhalb der gewählten Position vorhanden sind. Hierbei entspricht der kleinste Wert der geordneten Beobachtungsreihe dem Minimum, während der größte Wert dem Maximum entspricht. Das x-te Perzentil (P_x) ist der Wert der geordneten Reihe unterhalb dessen gerade x% und oberhalb dessen 100-x% aller Werte liegen. Damit liegen $\frac{1}{4}$ aller Werte unterhalb des 25. Perzentils

sowie $\frac{3}{4}$ aller Werte darüber. Der Median entspricht in diesem Zusammenhang dem 50. Perzentil.

2.4.3. Graphische Darstellung

Die graphische Darstellung der statistischen Kennwerte erfolgte mit sogenannten Box-Whisker-Plots. Dabei stellt der Kasten (Box) den Bereich zwischen dem 25. und 75. Perzentil dar. Der Strich innerhalb des Kastens entspricht dem Medianwert. Die Anhänge an den Kästen (Whisker) markieren den Bereich zwischen dem 5. und 95. Perzentil. Kleine Kreise bezeichnen Ausreißer, wobei ein Wert als Ausreißer bezeichnet wird, wenn er zwischen 1,5 und 3 mal der Länge der Box (zentraler Perzentilbereich) entspricht.

Boxplots sind insbesondere dann hilfreich, wenn mehrere Gruppen von Probanden hinsichtlich der Verteilung ihrer Daten verglichen werden sollen, in diesem Fall die Daten der Trainingsgruppe und die der Nicht-Trainingsgruppe. Neben der zentralen Lage erhält man einen groben Überblick über die Symmetrie der Verteilungen.

2.4.4. Berechnung der Signifikanzen

Die Anwendung nichtparametrischer (parameterfreier) Tests erfolgt, wenn sich die Annahme der Normalverteilung nicht aufrechterhalten lässt und/oder nur kleine Stichprobenumfänge vorliegen. Nichtparametrische Tests verarbeiten nicht die Messwerte selbst, sondern deren Rangplätze. Da sowohl die Werte der Nichttrainingsgruppe (N=10) als die der Trainingsgruppe (N=10) oben genannte Charakteristika aufweisen, kommen die unten erläuterten Verfahren zur Anwendung. Signifikante Werte ($p \leq 0,05$) wurden mit * gekennzeichnet, hochsignifikante Werte ($p \leq 0,009$) mit **.

2.4.4.1. Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben

Der Wilcoxon-Test für Paardifferenzen prüft die Nullhypothese, die besagt, dass sich die Rangsummen positiver und negativer Messwertdifferenzen zweier verbundener Stichproben nicht unterscheiden. *Er ist damit das nonparametrische Pendant zum t-Test für verbundene Stichproben.* Die Prüfgröße (Zufallsvariable) bestimmt sich über

die Rangsummen. Ist die H_0 richtig, wird davon ausgegangen, dass positive und negative Rangplätze zufällig verteilt sind.

2.4.4.2. Mann-Whitney-U-Test für unverbundene Stichproben

Der Mann-Whitney-U-Test prüft die Nullhypothese, die besagt, dass sich der durchschnittliche Rang der Individuen zweier unverbundener Stichproben nicht unterscheidet. *Er ist damit das nonparametrische Pendant zum t-Test für unabhängige Stichproben.* Die Prüfgröße (Zufallsvariable) bestimmt sich über die Ranginversionen. Ist die H_0 richtig, wird davon ausgegangen, dass die Rangplätze zufällig aufeinander folgen.

2.4.5. Fehlende Werte

Idealerweise sollte für jeden Probanden bei allen »Variablen« zu jedem Messzeitpunkt jeweils ein Wert vorliegen. In einigen Fällen kam es bei dem langen Untersuchungszeitraum jedoch zu fehlenden Angaben, z.B. weil trotz straff organisierten Stundenplans der Probanden diese für die Untersuchung nicht bereitstanden oder weil es während der Untersuchung zu Funktionsstörung der Geräte kam. Ganz allgemein spricht man hier von fehlenden Werten (engl.: missing values), die von den anderen, sogenannten gültigen Werten (engl.: valid values) unterschieden werden müssen. Sie müssen durch geeignete Codes erkennbar gemacht werden, um sie entweder unter methodischen Gesichtspunkten auswerten zu können oder um bei inhaltlichen Auswertungen die Untersuchungseinheiten auszuschließen, die keine gültigen Werte aufweisen. Bei multivariaten Auswertungen werden dabei zwei Formen unterschieden:

Bei **listenweisem** Fallausschluss werden alle unvollständigen Fälle aus der Berechnung ausgeschlossen; es kommt zu einer starken Reduktion der Stichprobe.

Bei **fälleweisem** Fallausschluss werden alle Fälle der in die Berechnung eingehenden Variablen ausgewertet; die Statistik kann auf unterschiedlichen Stichproben von Beobachtungen basieren (unterschiedliche N).

Listenweiser und fälleweiser Ausschluss können bei multivariaten Analysen einen unterschiedlichen Stichprobenumfang ergeben.

Der Umgang mit den fehlenden Werten sowie die erfolgte Reduktion der Darstellung werden im Ergebnisteil anhand eines Beispiels erläutert.

3. Ergebnisse

3.1. Unterschiede der beiden Gruppen und Problematik der Darstellung

Exemplarisch und begründend für die anschließende Datenreduktion und Darstellung der Ergebnisse wird die Vorgehensweise anhand der Beschreibung der Körpermasse (BM, engl: „body mass“) dargestellt.

3.1.1. Körpermasse

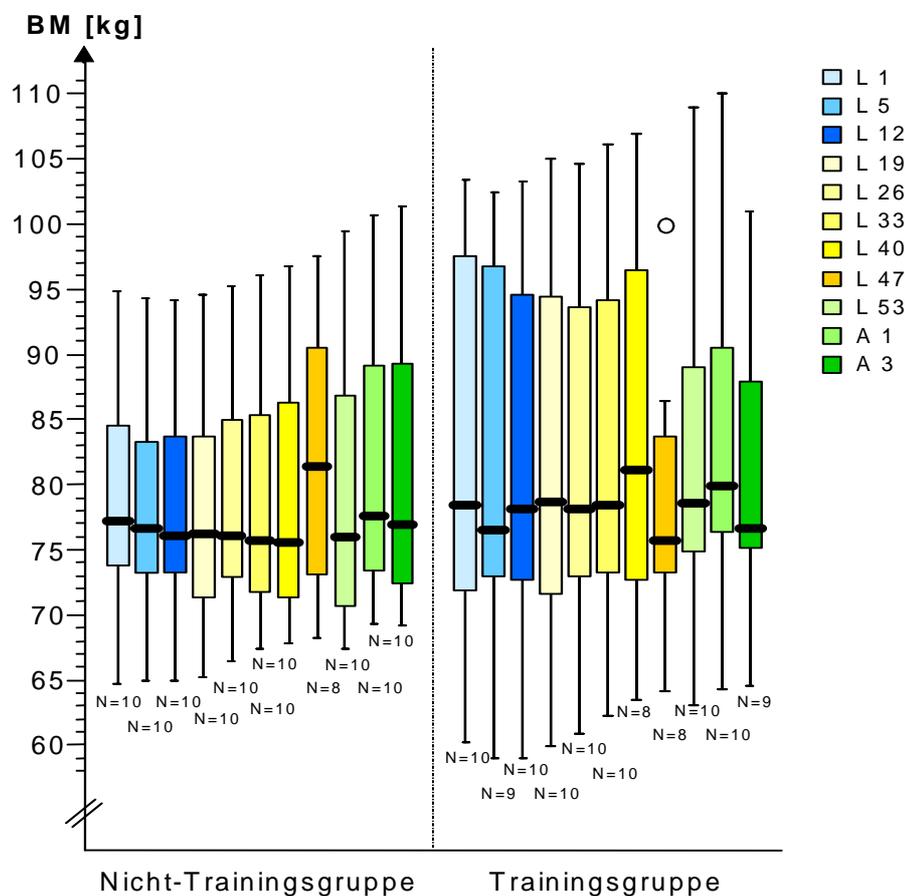


Abbildung 12: Darstellung aller vorhandenen Daten der verschiedenen Messpunkte für die Körpermasse (BM) (fälleweise ausgeschlossen).

Bei der Auswertung der Ergebnisse fiel auf, dass zu den einzelnen Messpunkten unterschiedliche Fallzahlen vorhanden sind, insbesondere am 47. Tag (L47) (Abbildung 12), bei dem in der Trainingsgruppe bei listenisweisem Fallausschluss nur

noch 4 Probanden in den statistischen Testverfahren berücksichtigt werden würden (Abbildung 13):

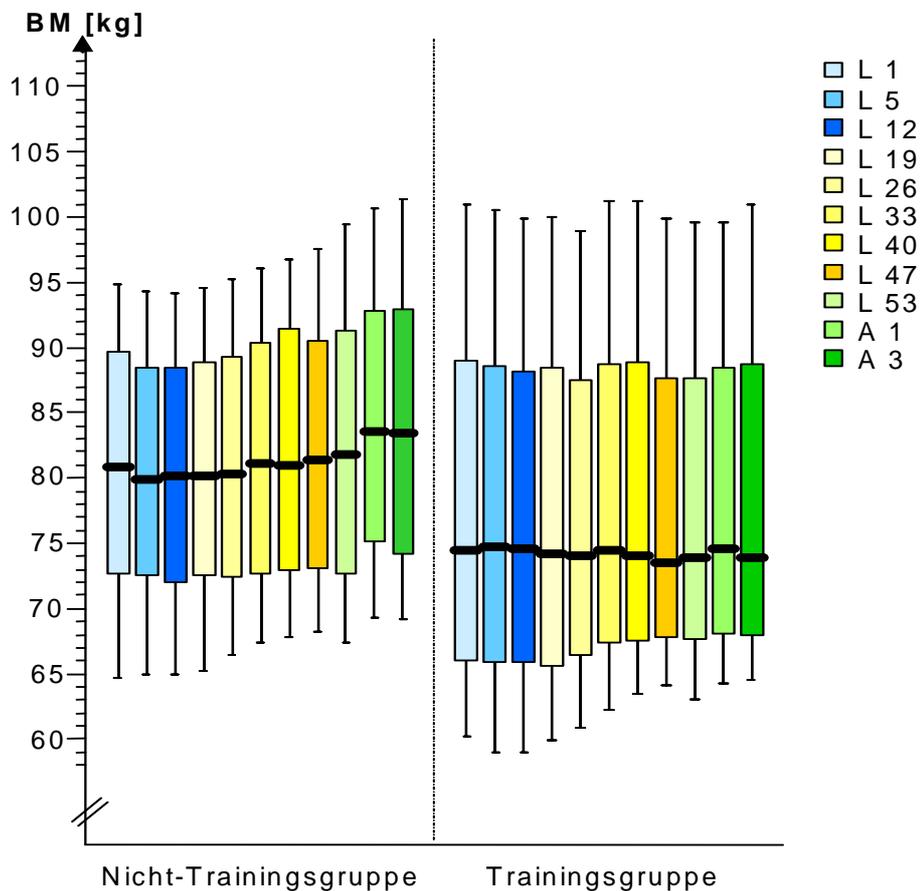


Abbildung 13: Darstellung der Daten für die Körpermasse (BM) bei listenweisem Fallausschluss für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=4).

Da sich nach den ersten beiden Wochen der langen Liegeperiode keine signifikanten Veränderungen der untersuchten Parameter mehr zeigten, wurden die Messtage L19 bis L47 zusammengefasst (Abbildung 14).

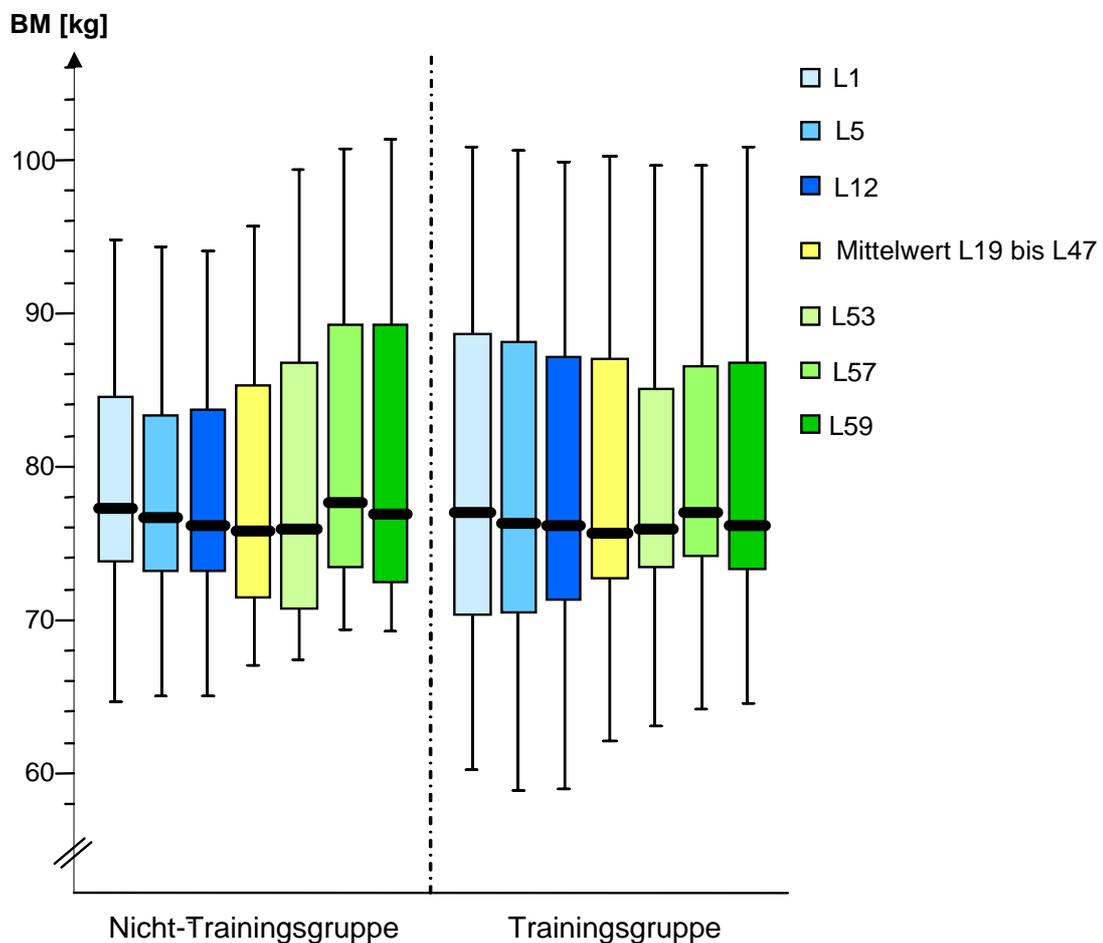


Abbildung 14: Darstellung der Körpermasse (BM) über den Studienverlauf bei Zusammenfassung des 19. bis 47. Versuchstages für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=8).

Es fiel auf, dass sich zeitlich-abgrenzbare Phasen mit deutlichen Veränderungen zeigten.

Für die folgenden Darstellungen wurden definiert:

I) „Anpassungsphase“: erster Tag im Liegen (L1), fünfter Tag im Liegen (L5) und 12. Tag im Liegen (L12).

II) „Liegephase“: für jeden Probanden arithmetisch gemittelte Werte aus L19 bis L47.

III) „Aufstehphase: letzter Tag im Liegen (L53), Tag des Aufstehens (A1) und dritter Tag nach dem Aufstehen (A3).

Zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Gruppen („Nicht-Trainingsgruppe“ und „Trainingsgruppe“) und zur Verdeutlichung der beiden Phasen der stärksten

Veränderungen („Anpassungsphase“ und „Aufstehphase“) wurden die Werte prozentual dargestellt.

Für die Illustration der „Anpassungsphase“ wurde der erste Tag im Liegen (L1) als Bezugswert (100 %) definiert und die prozentualen Veränderungen dazu an den Tagen 5 (L5) und 12 (L12) dargestellt (Abbildung 15).

Die Graphiken der „Aufstehphase“ zeigen den letzten Tag im Liegen (L53) als Bezugswert (100 %) und die Veränderungen an den Tagen 57 (A1) und 59 (A3) dazu prozentual (Abbildung 16).

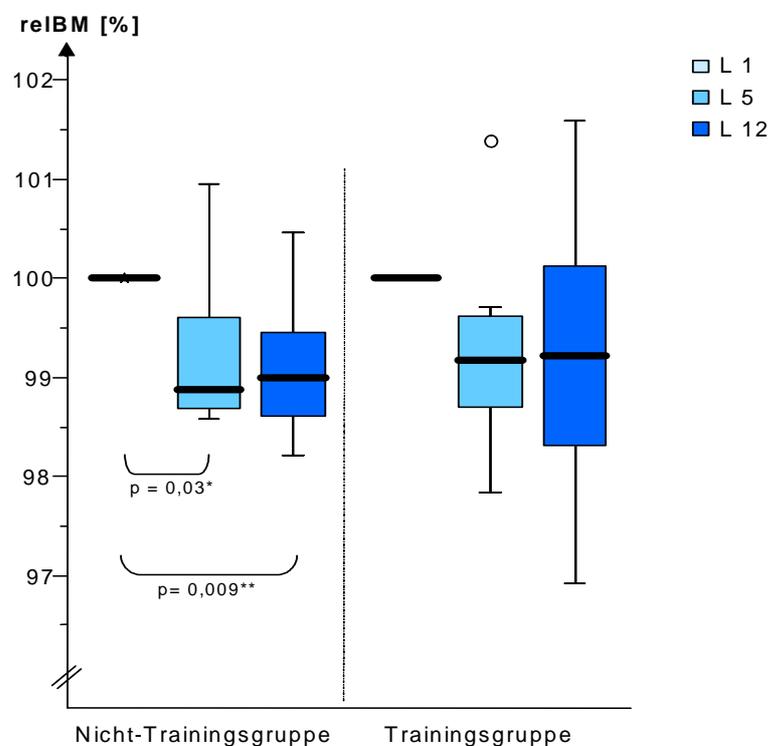


Abbildung 15: Prozentuale Darstellung der relativen Körpermasse (relBM) in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=8).

Demnach ergaben sich in der Anpassungsphase folgende prozentuale Veränderungen bezogen auf die Körpermasse am ersten Tag des Liegens (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 77,2 kg; Trainingsgruppe: Median = 77,1 kg)

Am 5. Tag (L5) war das Körpergewicht der Nicht-Trainingsgruppe signifikant erniedrigt (im Median um -1,1 %; $p = 0,03^*$); das der Trainingsgruppe war mit -0,8 % im Median prozentual nicht signifikant erniedrigt.

Am 12. Tag (L12) blieb das Körpergewicht der Nicht-Trainingsgruppe signifikant erniedrigt ($p = 0,009^{**}$), das der Trainingsgruppe war mit $-0,6\%$ im Median weiterhin nicht signifikant erniedrigt.

Es gab keinen signifikanten Unterschied in der Entwicklung der Körpermasse in der Anpassungsphase zwischen den beiden Gruppen.

In der Aufstehphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen bezogen auf die Körpermasse bei der letzten Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = $75,9\text{ kg}$; Trainingsgruppe: Median = $76,0\text{ kg}$):

Am Tag des Aufstehens (A1) gab es bei beiden Gruppen einen signifikanten Anstieg der Körpermasse (Nicht-Trainingsgruppe: Median: $+2,6\%$, $p = 0,005^{**}$; Trainingsgruppe: Median: $+1,7\%$, $p = 0,02^*$). Im Gruppenvergleich nahm die Körpermasse in der Nicht-Trainingsgruppe signifikant stärker zu als in der Trainingsgruppe ($p = 0,04^*$).

Am dritten Tag nach dem Aufstehen (A3) gab es bei beiden Gruppen eine tendenzielle Abnahme des Gewichtes gegenüber A1, es blieb bei der Nicht-Trainingsgruppe mit im Median $2,2\%$ Zunahme zur letzten Liegendmessung (L53) signifikant erhöht ($p = 0,005^{**}$); bei der Trainingsgruppe blieb es mit im Median $1,2\%$ Zunahme gegenüber L53 tendenziell erhöht ($p = 0,06$). Auch bei diesem Messpunkt lag die Körpergewichtszunahme der Nicht-Trainingsgruppe signifikant über der der Trainingsgruppe ($p = 0,04^*$).

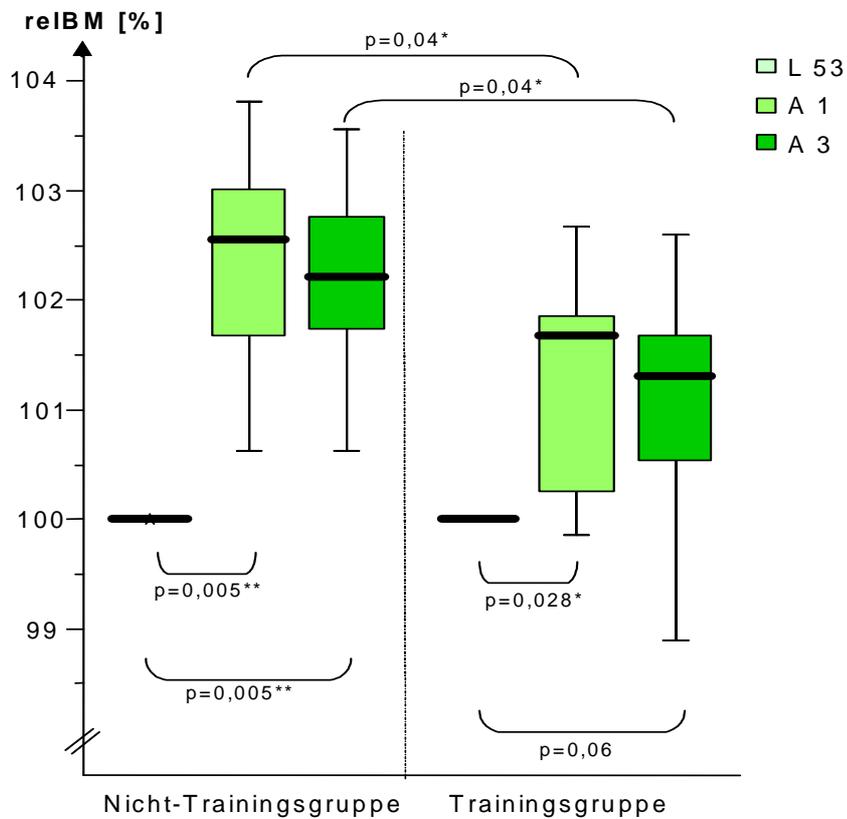


Abbildung 16: Prozentuale Darstellung der relativen Körpermasse (relBM) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=8).

3.2. Anthropometrische Daten

3.2.1. Body-Mass-Index (BMI)

In der Anpassungsphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen bezogen auf den BMI am ersten Tag des Liegens (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 23,1 kg•m⁻²; Trainingsgruppe: Median = 24,1 kg•m⁻²) (Abbildung 17):

Am 5. Tag (L5) gab es bei der Nicht-Trainingsgruppe einen signifikanten Abfall des BMI im Median um -0,9 % ($p = 0,05^*$); bei der Trainingsgruppe gab es einen tendenziellen Abfall des BMI im Median um -0,6 % ($p = 0,07$).

Der Median der Nicht-Trainingsgruppe war am 12. Tag (L12) unverändert um -0,9 % erniedrigt ($p = 0,01^*$), der Median der Trainingsgruppe war um -0,9 % nicht signifikant erniedrigt ($p = 0,2$).

Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

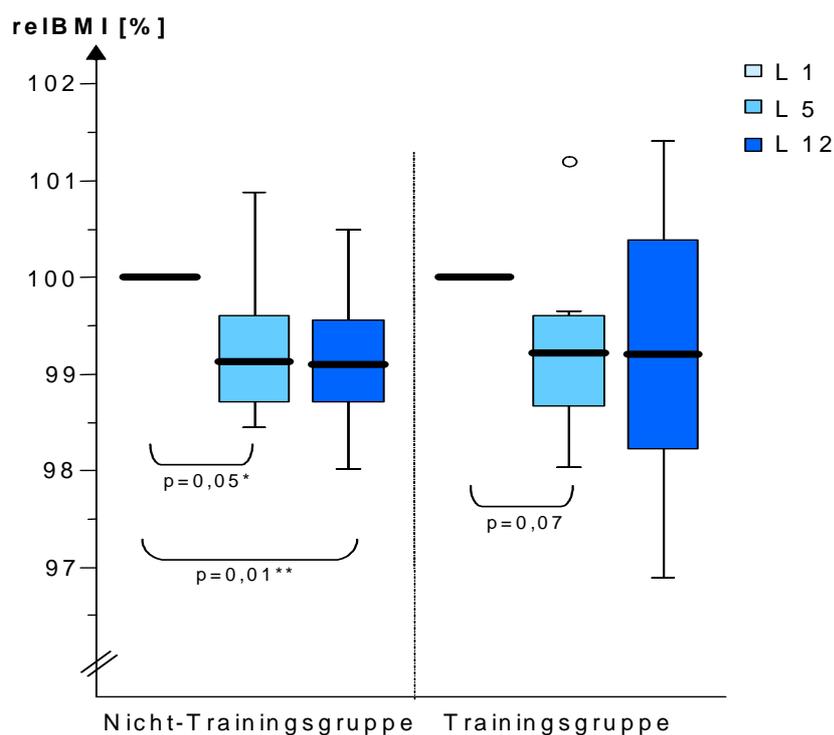


Abbildung 17: Prozentuale Darstellung des relativen Body-Mass-Index (relBMI) in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=8).

In der Aufstehphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen bezogen auf den BMI bei der letzten Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 23,1 kg•m⁻²; Trainingsgruppe: Median = 24,1 kg•m⁻²) (Abbildung 18):

Am Tag des Aufstehens (A1) gab es bei beiden Gruppen einen signifikanten Anstieg des BMI; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +2,6 % (p = 0,005**), bei der Trainingsgruppe im Median um +1,8 % (p = 0,03*).

Die Zunahme des BMI am Tag des Aufstehens war bei der Nicht-Trainingsgruppe signifikant größer als bei der Trainingsgruppe (p = 0,03*).

Am dritten Tag nach dem Aufstehen (A3) blieb der BMI der Nicht-Trainingsgruppe mit im Median +2 % (p = 0,005**) signifikant erhöht, der BMI der nicht Traininggruppe blieb tendenziell erhöht (Median: +1,3 %, p = 0,07).

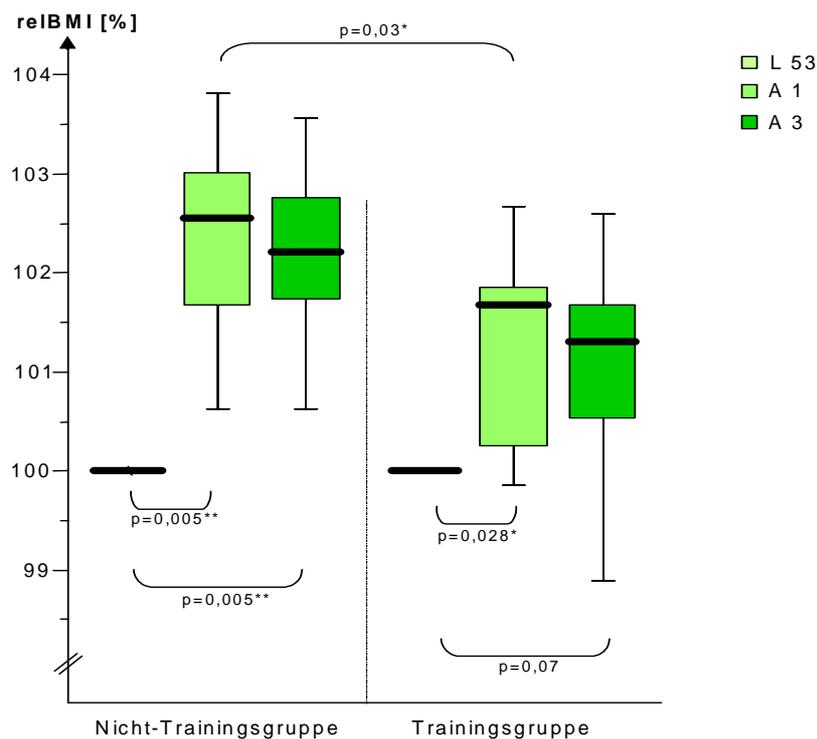


Abbildung 18: Prozentuale Darstellung des relativen Body-Mass-Index (reBMI) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen (L53) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=8).

3.3. Daten der Bioelektrischen Impedanz-Analyse (BIA)

3.3.1. Gesamtkörperwasseranteil am Körpergewicht

In der Anpassungsphase ergaben sich innerhalb beider Gruppen keine signifikanten Veränderungen des auf die absolute Körpermasse bezogenen Gesamtkörperwasseranteils (relTBW, engl.: „relative total body water“) bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 58,8 %; Trainingsgruppe: Median = 58,0 %) (Abbildung 19).

Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

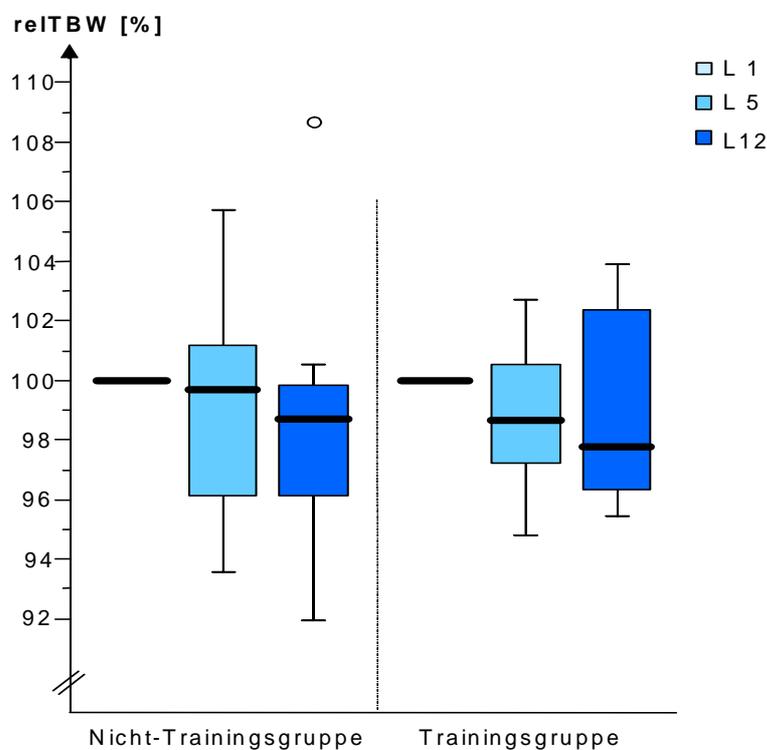


Abbildung 19: Prozentuale Darstellung des Gesamtkörperwasseranteils an der Körpermasse (relTBW) in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=7).

In der Aufstehphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen des reITBW bei der letzten Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 57,5 %; Trainingsgruppe: Median = 55,4 %) (Abbildung 20):

Am Tag des Aufstehens nahm das reITBW bei beiden Gruppen signifikant zu; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +5,7 % ($p = 0,03^*$), bei der Trainingsgruppe im Median um +4,1 % ($p = 0,03^*$).

Auch am dritten Tag des Aufstehens war das reITBW bei beiden Gruppen weiterhin erhöht (Nicht-Trainingsgruppe: Median: +6 %, $p = 0,04^*$; Trainingsgruppe: Median: +2,5 %, $p = 0,02^*$).

Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

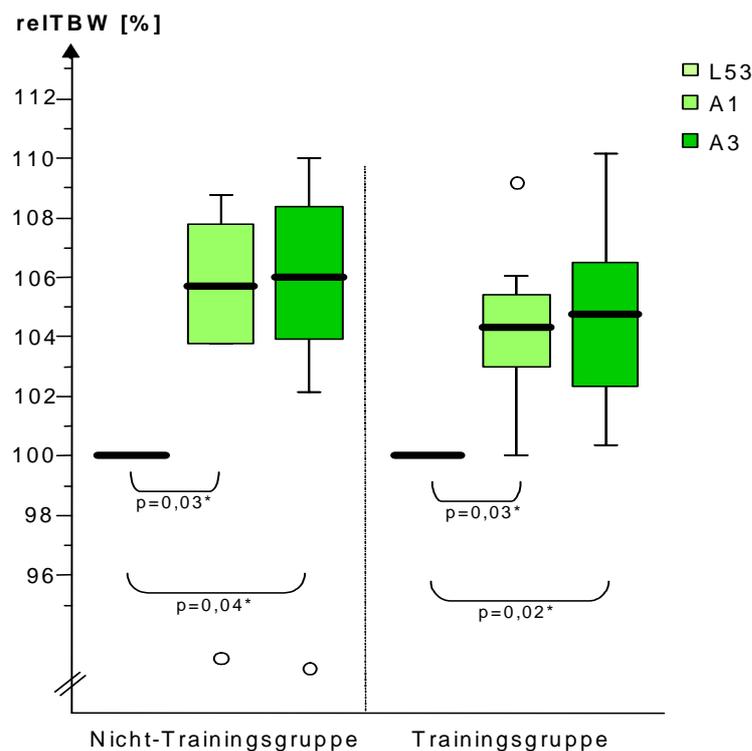


Abbildung 20: Prozentuale Darstellung des Gesamtkörperwasseranteils an der Körpermasse (reITBW) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen (L53) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=7).

3.3.2. Extrazellularwasseranteil am Gesamtkörperwasser

In der Anpassungsphase ergaben sich bei beiden Gruppen keine signifikanten Veränderungen des Extrazellularwasseranteils vom Gesamtkörperwasser (reIECW; engl.: relative extracellular water) bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 41,0 %; Trainingsgruppe: Median = 39,1 %) (Abbildung 21).

Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

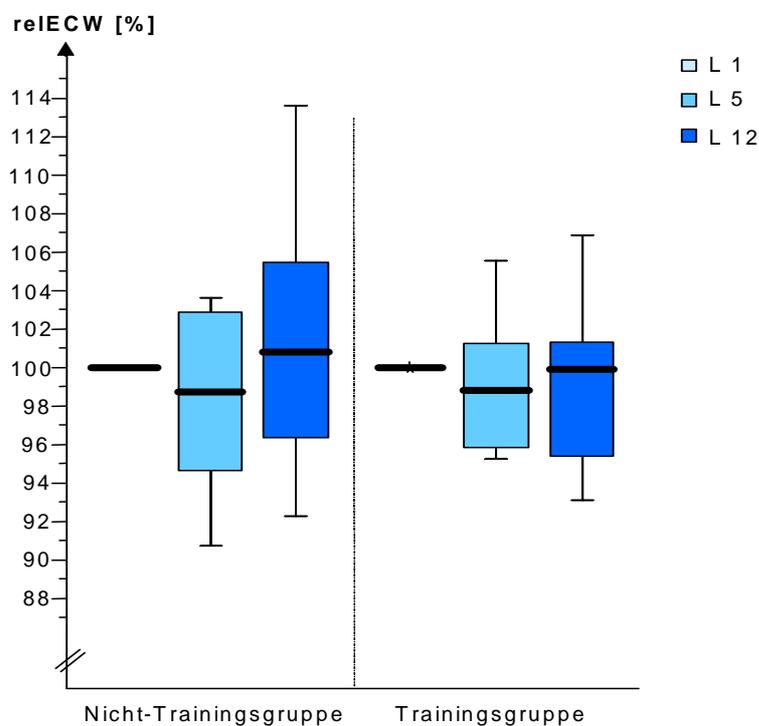


Abbildung 21: Prozentuale Darstellung des Extrazellularwasseranteils vom Gesamtkörperwasser in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=7).

In der Aufstehphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen bezogen auf das relECW bei der letzten Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 42,2 %; Trainingsgruppe: Median = 40,5 %) (Abbildung 22):

Am Tag des Aufstehens gab es bei beiden Gruppen einen signifikanten Anstieg des relECW; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +8 % ($p = 0,01^*$), bei der Trainingsgruppe im Median um +3,9 % ($p = 0,05^*$).

Am dritten Tag des Aufstehens nahm bei der Nicht-Trainingsgruppe das relECW im Vergleich zum Tag des Aufstehens signifikant ab ($p = 0,05^*$) und war gegenüber der letzten Messung im Liegen noch tendenziell erhöht ($p = 0,07$). Bei der Trainingsgruppe blieb das ECW auch am dritten Tag des Aufstehens noch signifikant erhöht ($p = 0,03^*$).

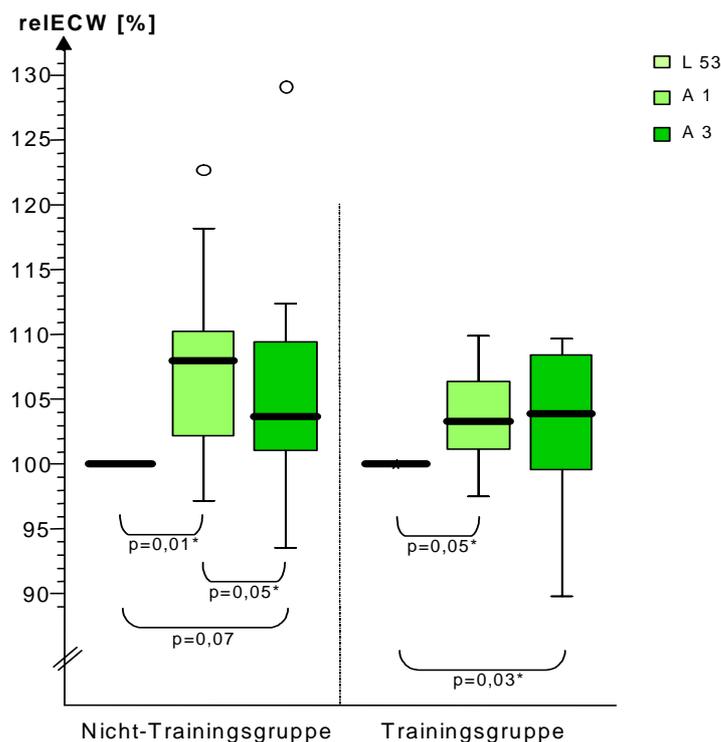


Abbildung 22: Prozentuale Darstellung des Extrazellulärwasseranteils am Gesamtkörperwasser in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=7).

3.4. Schichtdicken

3.4.1. Schichtdicke an Punkt A

In der Anpassungsphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen der Schichtdicke an Punkt A ($relTT_A$, engl.: „relative tissue thickness“) bezogen auf den ersten Tag des Liegens (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 4,25 mm; Trainingsgruppe: Median = 5,14 mm) (Abbildung 23):

Bei der Nicht-Trainingsgruppe war die $relTT_A$ am 5. Tag (L5) und am 12. Tag (L12) signifikant erniedrigt (L5: Median: -5,7 %, $p = 0,03$; L12: Median: -7,5 %, $p = 0,009^{**}$).

Bei der Trainingsgruppe gab es keine signifikanten Veränderungen der $relTT_A$.

Die Abnahme der $relTT_A$ bei der Nicht-Trainingsgruppe in der Anpassungsphase unterschied sich signifikant (L5: $p = 0,04$; L12: $p = 0,02^*$) vom tendenziellen Anstieg der $relTT_A$ bei der Trainingsgruppe.

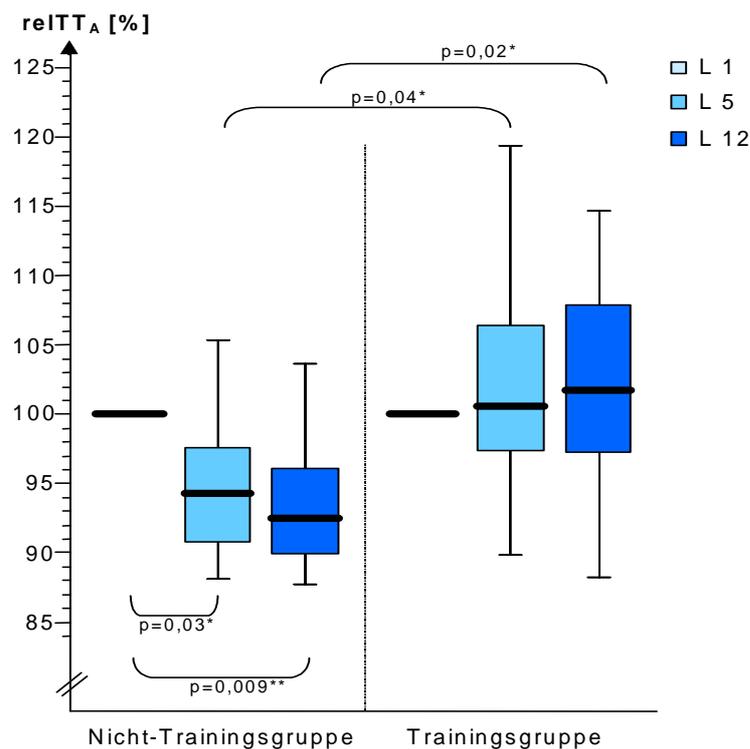


Abbildung 23: Prozentuale Darstellung der relativen Schichtdicke an Punkt A ($relTT_A$) in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10).

In der Aufstehphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen der $relTT_A$ bezogen auf die letzten Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 3,82 mm; Trainingsgruppe: Median = 5,25 mm) (Abbildung 24):

Am Tag des Aufstehens (A1) nahm die $relTT_A$ bei beiden Gruppen hoch signifikant zu; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +11,2 % ($p = 0,007^{**}$), bei der Trainingsgruppe im Median um +12,5 % ($p = 0,005^{**}$).

Auch am dritten Tag des Aufstehens (A3) war bei beiden Gruppen die $relTT_A$ noch signifikant erhöht; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +13 % ($p = 0,03^*$), bei der Trainingsgruppe um +15,9 % ($p = 0,007^{**}$).

Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

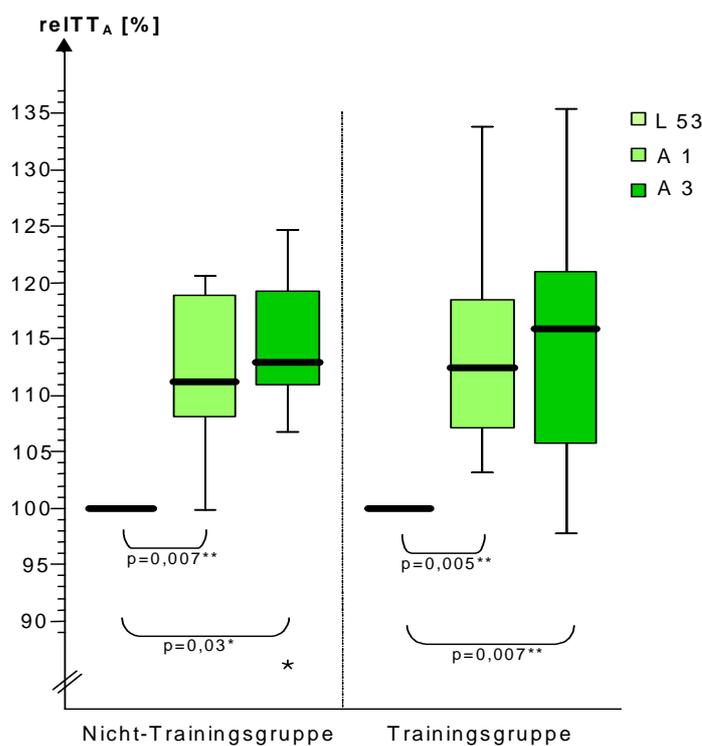


Abbildung 24: Prozentuale Darstellung der relativen Schichtdicke an Punkt A ($relTT_A$) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen (L53) für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10).

3.4.2. Schichtdicke an Punkt B

In der Anpassungsphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen der Schichtdicke an Punkt B ($relTT_B$) bezogen auf den ersten Tag des Liegens (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 3,34 mm; Trainingsgruppe: Median = 3,46 mm) (Abbildung 25):

Am 5. Tag des Liegens (L5) war innerhalb beider Gruppen die $relTT_B$ nicht signifikant verändert.

Am 12. Tag des Liegens (L12) war die $relTT_B$ bei der Nicht-Trainingsgruppe signifikant erniedrigt (im Median um -8 %, $p = 0,01^*$). Bei der Trainingsgruppe gab es am 12. Tag eine tendenzielle Zunahme der $relTT_B$.

Die Abnahme der $relTT_B$ bei der Nicht-Trainingsgruppe in der Anpassungsphase unterschied sich signifikant (L5: $p = 0,04^*$; L12: $p = 0,007^{**}$) vom tendenziellen Anstieg der $relTT_B$ bei der Trainingsgruppe.

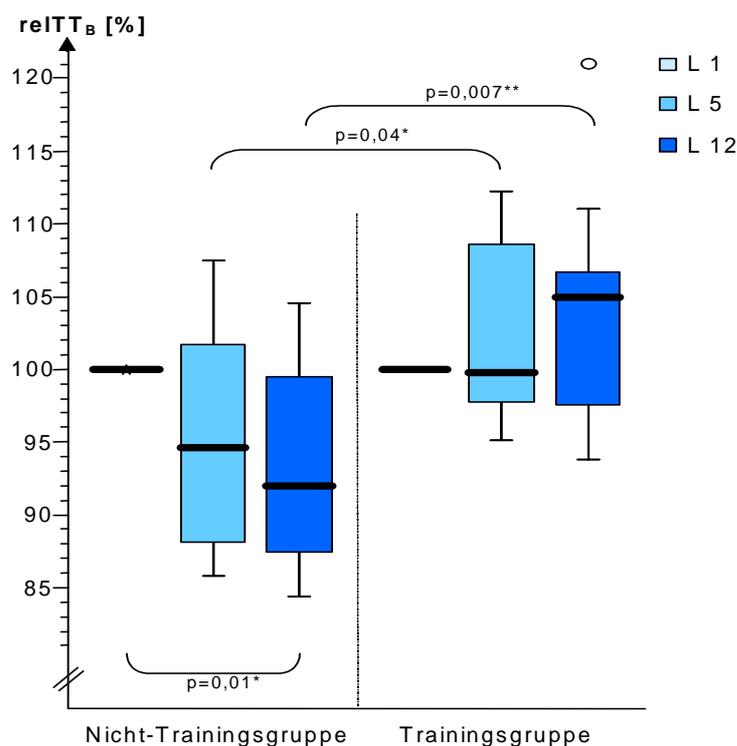


Abbildung 25: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an Punkt B in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10).

In der Aufstehphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen bezogen auf die $relTT_B$ bei der letzten Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 3,13 mm; Trainingsgruppe: Median = 3,35 mm) (Abbildung 26):

Am Tag des Aufstehens (A1) nahm die $relTT_B$ bei beiden Gruppen signifikant zu; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +13,7 % ($p = 0,007^{**}$), bei der Trainingsgruppe im Median um +14,9 % ($p = 0,01^*$).

Auch am dritten Tag des Aufstehens (A3) war bei beiden Gruppen die $relTT_B$ noch erhöht; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +15,6 % ($p = 0,007^{**}$), bei der Trainingsgruppe um +22,9 % ($p = 0,01^*$).

Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

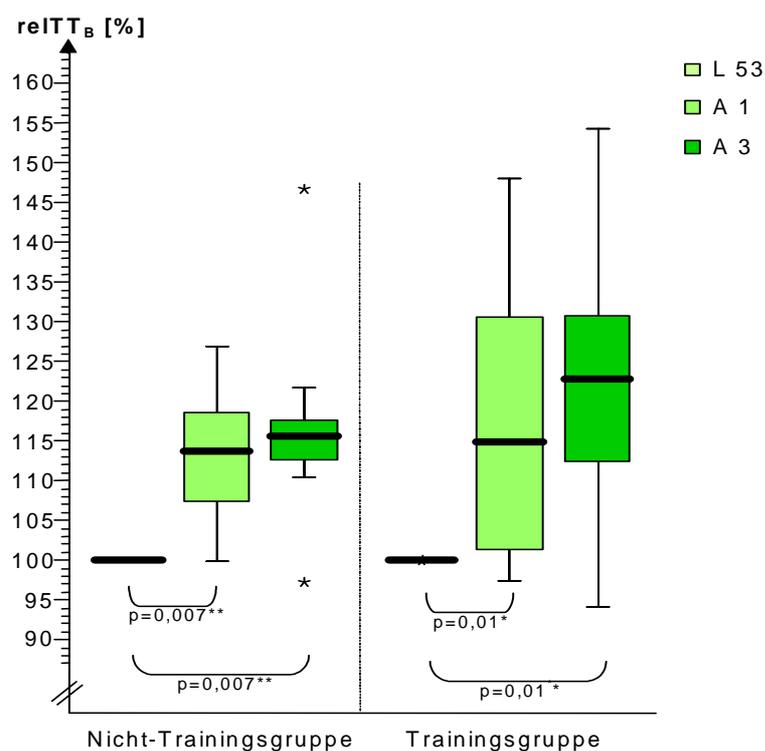


Abbildung 26: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an Punkt B in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10).

3.4.3. Schichtdicke an Punkt C

In der Anpassungsphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen bezogen auf die Schichtdicke an Punkt C ($relTT_C$) am ersten Tag des Liegens (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 3,22 mm; Trainingsgruppe: Median = 3,45 mm) (Abbildung 27):

Es gab bei beiden Gruppen weder am 5. Tag (L5) noch am 12. Tag (L12) signifikante Veränderungen der $relTT_C$.

Am 5. Tag (L5) gab es jedoch einen signifikanten Unterschied ($p = 0,043^*$) zwischen der Nicht-Trainingsgruppe, bei der es im Median eine Abnahme der Schichtdicke um -4,1 % gab und der Trainingsgruppe, bei der es im Median zu einer Zunahme der Schichtdicke um +4,2 % kam.

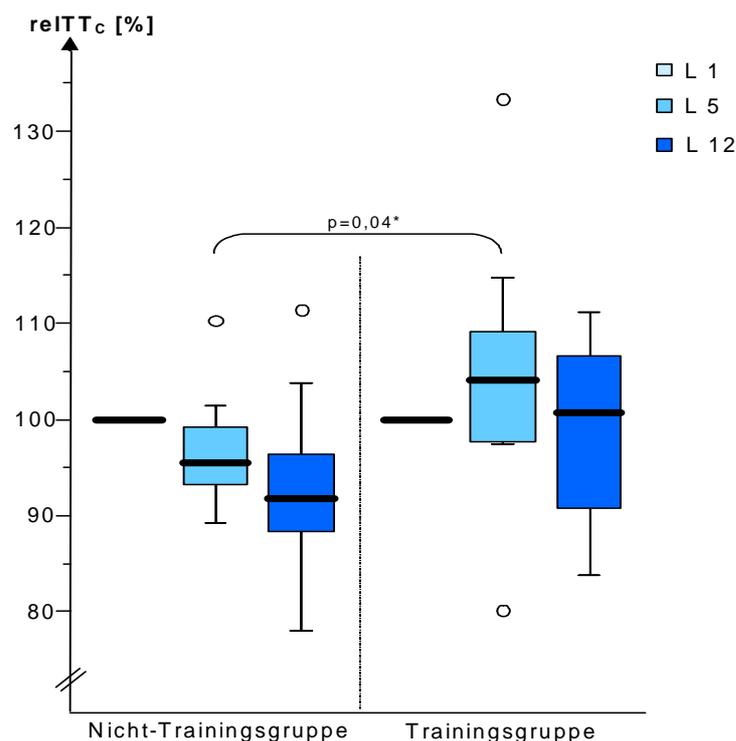


Abbildung 27: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an Punkt C in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10).

In der Aufstehphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen bezogen auf die $relTT_C$ bei der letzten Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 3,07 mm; Trainingsgruppe: Median = 3,38 mm) (Abbildung 28):

Am Tag des Aufstehens (A1) gab es innerhalb beider Gruppen eine signifikante Zunahme der $relTT_C$; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +15,5 % ($p = 0,005^{**}$), bei der Trainingsgruppe im Median um +9,2 % ($p = 0,005^{**}$).

Am dritten Tag nach dem Aufstehen (A3) war die $relTT_C$ der Nicht-Trainingsgruppe noch immer signifikant erhöht (im Median um +13,5 %, $p = 0,005^{**}$). Die $relTT_C$ der Trainingsgruppe war im Median mit 10,3 % Zunahme gegenüber L53 noch tendenziell erhöht ($p = 0,09$).

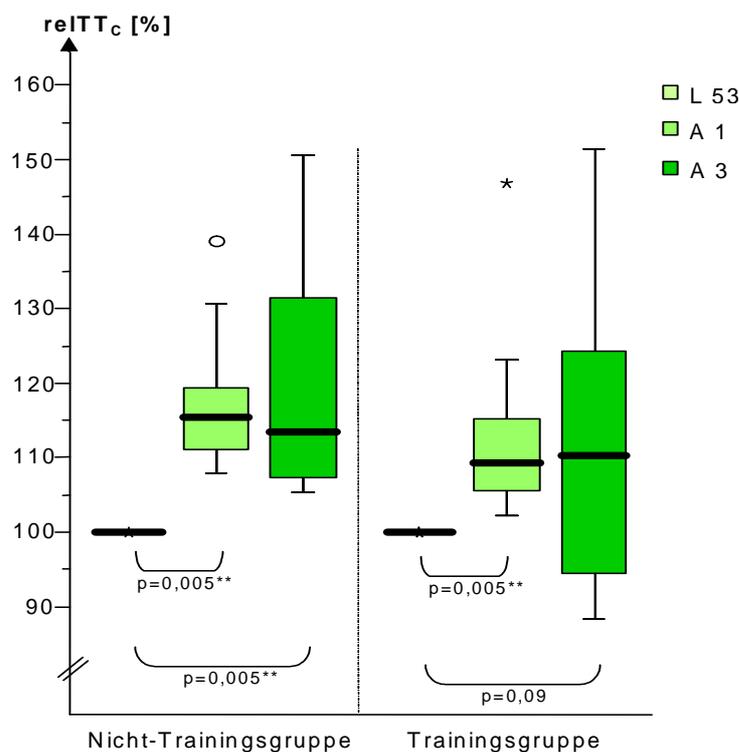


Abbildung 28: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an Punkt C in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10).

3.4.4. Schichtdicke an der Stirn

Wegen der geringen Fallzahlen (Nicht-Trainingsgruppe: N = 4; Trainingsgruppe: N = 4) erfolgt die Beschreibung rein deskriptiv.

In der Anpassungsphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen der Schichtdicke an der Stirn ($relTT_F$: „front“) bezogen auf den ersten Tag des Liegens (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 4,88 mm; Trainingsgruppe: Median = 4,52 mm) (Abbildung 29):

Am 5. Tag des Liegens (L5) kam es bei beiden Gruppen tendenziell zu einer Abnahme der $relTT_F$; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um -9,9 %, bei der Trainingsgruppe im Median um -8,1 %.

Am 12. Tag des Liegens (L12) nahm die Schichtdicke an der Stirn bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +3,6 % zum Ausgangswert zu (um +13,5 % zu L5), die der Trainingsgruppe nahm im Median um -5,0 % ab (+3,1 % Zunahme zu L5).

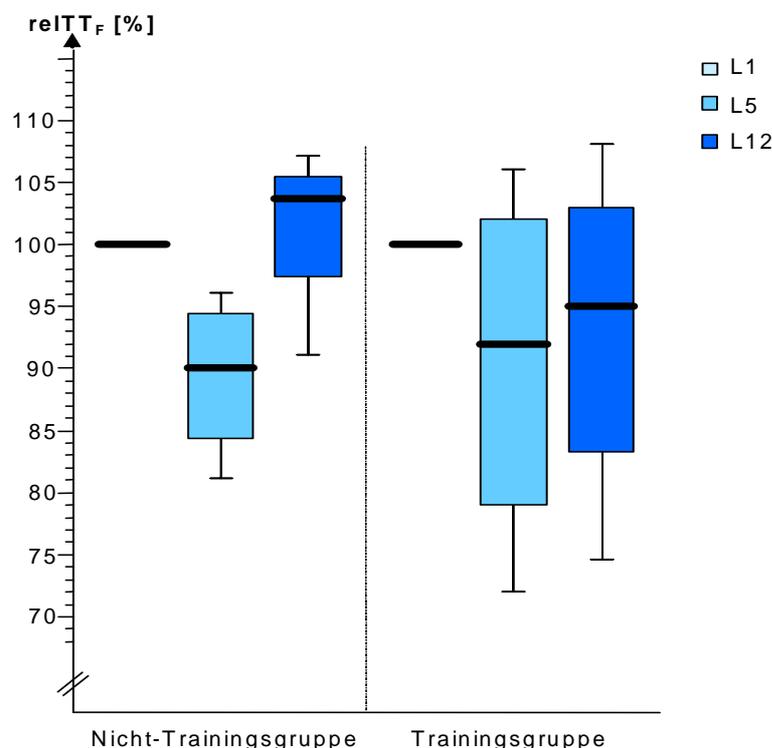


Abbildung 29: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an der Stirn in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=4) und die Trainingsgruppe (N=4).

In der Aufstehphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen der $relTT_F$ bezogen auf die letzte Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 4,69 mm; Trainingsgruppe: Median = 4,32 mm) (Abbildung 30):

Am Tag des Aufstehens (A1) kam es bei beiden Gruppen zu einer Abnahme der $relTT_F$; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um -4 %, bei der Trainingsgruppe um -8 %.

Am dritten Tag des Aufstehens (A3) nahm die Schichtdicke an der Stirn bei beiden Gruppen zum Ausgangswert (L53) tendenziell zu; bei der Nicht-Trainingsgruppe im Median um +4,6 % (+8,6 % Zunahme zu A1), bei der Trainingsgruppe im Median um +1,4 % (+9,4 % Zunahme zu A1).

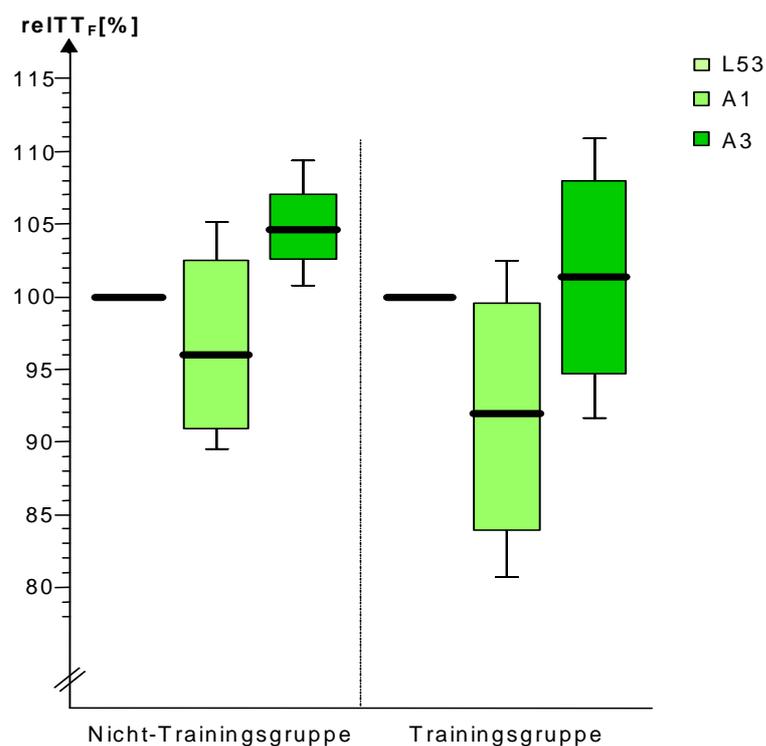


Abbildung 30: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an der Stirn ($relTT_F$) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=4) und die Trainingsgruppe (N=4).

3.5. Körpertemperatur

3.5.1. Körperkerntemperatur

In der Anpassungsphase ergaben sich bei beiden Gruppen keine signifikanten Veränderungen der Körperkerntemperatur bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 37,1°C; Trainingsgruppe: Median = 36,9 °C) (Abbildung 31).

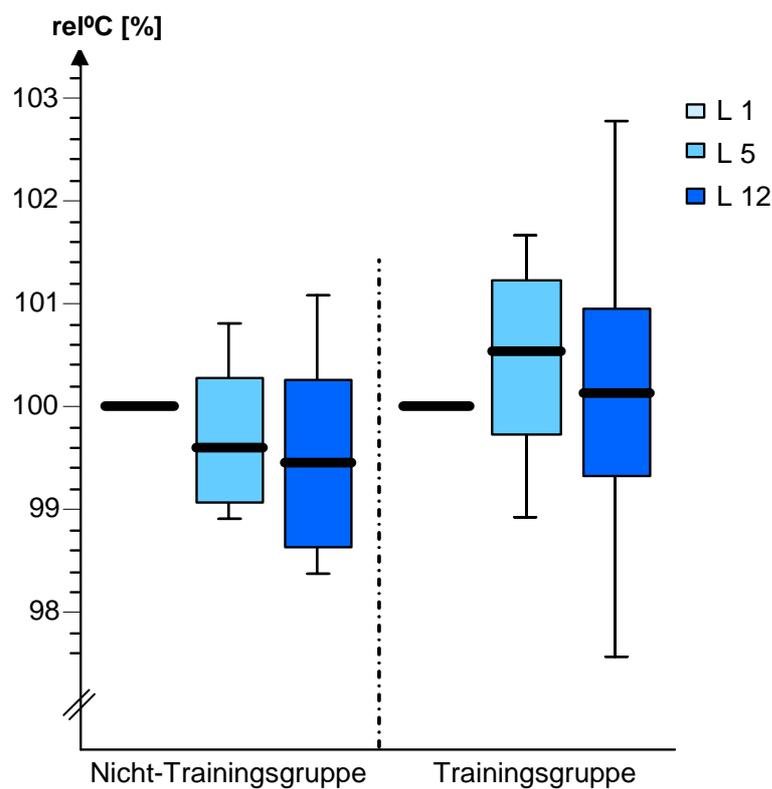


Abbildung 31: Prozentuale Darstellung der Körperkerntemperatur in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

In der Aufstehphase nahm die Körperkerntemperatur bei der Nicht-Trainingsgruppe in Bezug auf die letzte Messung im Liegen (Median = 37,1 °C) am Tag des Aufstehens signifikant zu (um im Median 1,2 %; $p = 0,01^*$) und war nach drei Tagen (A 3) wieder auf dem Niveau der letzten Liegendmessung (Median = 37,0 °C; $p = 0,04^*$) (Abbildung 32).

Bei der Trainingsgruppe gab es keine signifikanten Veränderungen der Körperkerntemperatur.

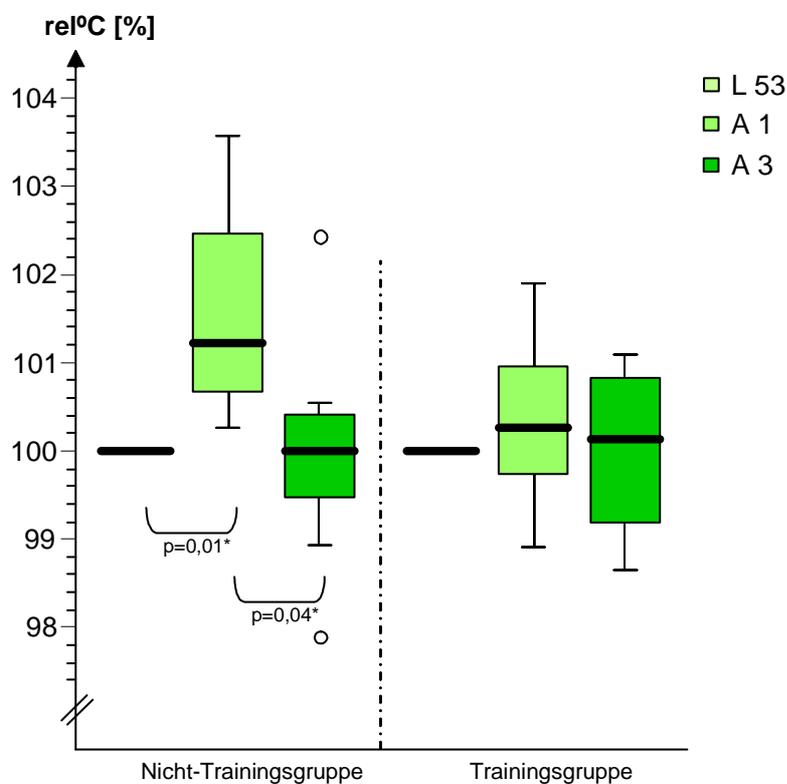


Abbildung 32: Prozentuale Darstellung der Körperkerntemperatur in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

3.5.2. Temperatur der Körperschale

Weder während der Anpassungsphase noch während der Aufstehphase kam es in einer der beiden Gruppen zu signifikanten Veränderungen der Körperschalentemperatur, die am ersten Tag des Liegens im Median 33,6 °C bei der Nicht-Trainingsgruppe und 32,7 °C bei der Trainingsgruppe betrug (Abbildung 33 und Abbildung 34).

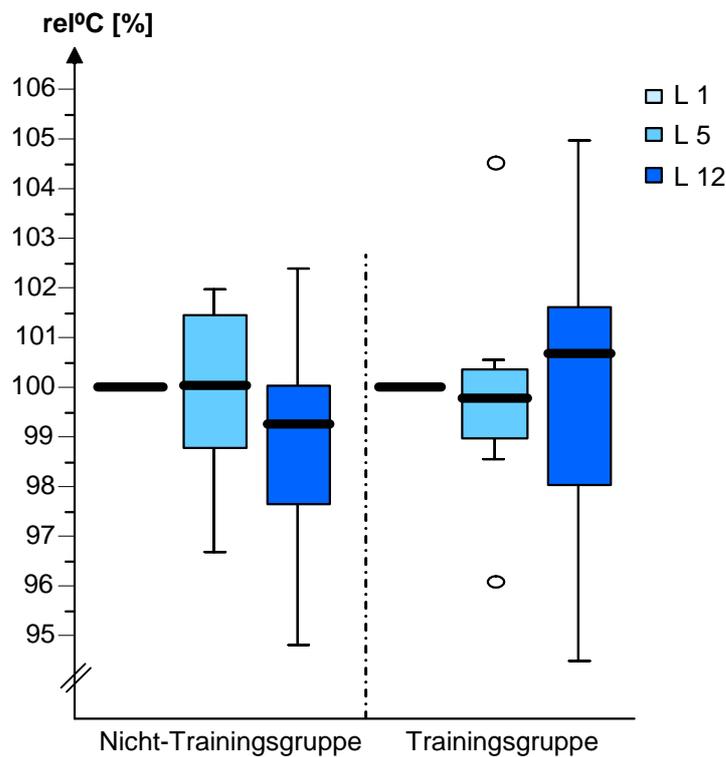


Abbildung 33: Prozentuale Darstellung der Körperschalentemperatur in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

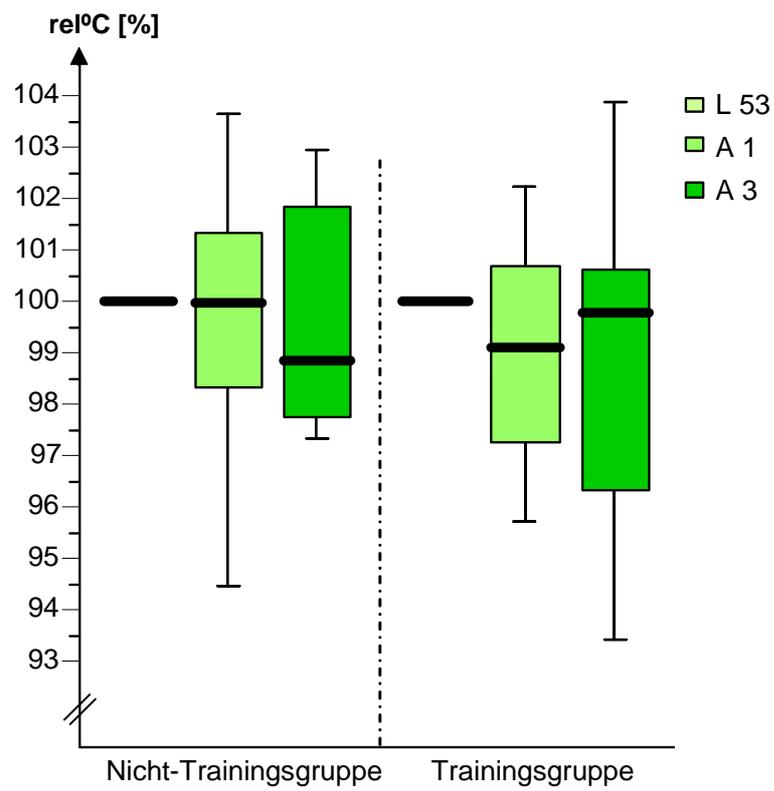


Abbildung 34: Prozentuale Darstellung der Körperschalentemperatur in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

3.5.3. Differenz zwischen Kern- und Schalentemperatur

Die Differenz zwischen Kern- und Schalentemperatur betrug am ersten Tag des Liegens im Median 3,5 °C bei der Nicht-Trainingsgruppe und 4 °C bei der Trainingsgruppe. Es kam zu keinen signifikanten Veränderungen während der Anpassungsphase (Abbildung 35).

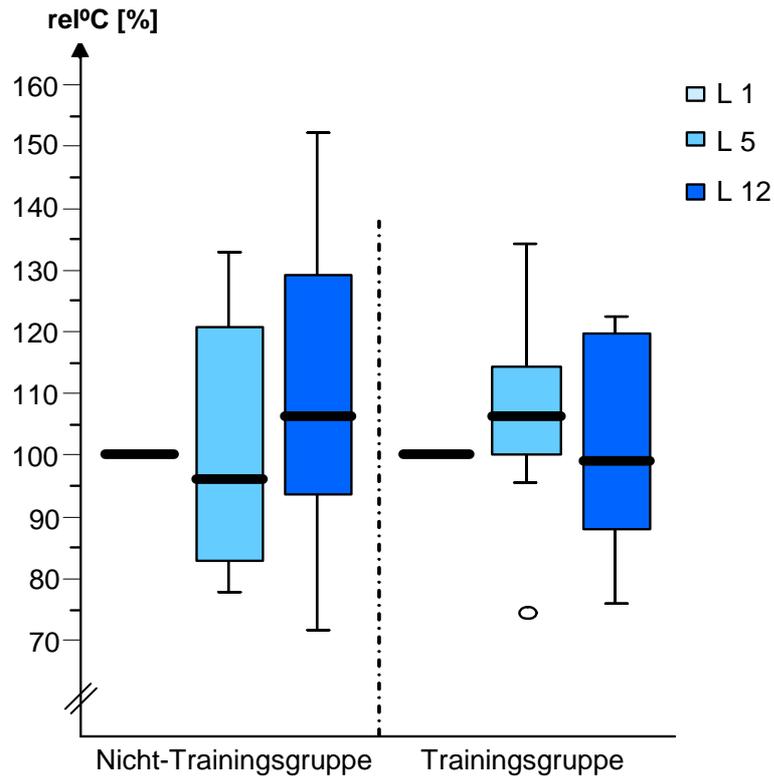


Abbildung 35: Prozentuale Darstellung der Differenz von Körperkern- und Körperschalentemperatur in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

In der Aufstehphase ergaben sich folgende prozentuale Veränderungen der Differenz zwischen Körperkern- und Körperschalentemperatur bezogen auf die letzte Messung im Liegen (L 53) (Abbildung 36):

Am Tag des Aufstehens (A1) nahm bei der Nicht-Trainingsgruppe die Differenz zwischen Körperkern- und Körperschalentemperatur signifikant zu (im Median um 13,6%; $p = 0,02^*$); auch bei der Trainingsgruppe nahm diese Differenz tendenziell zu.

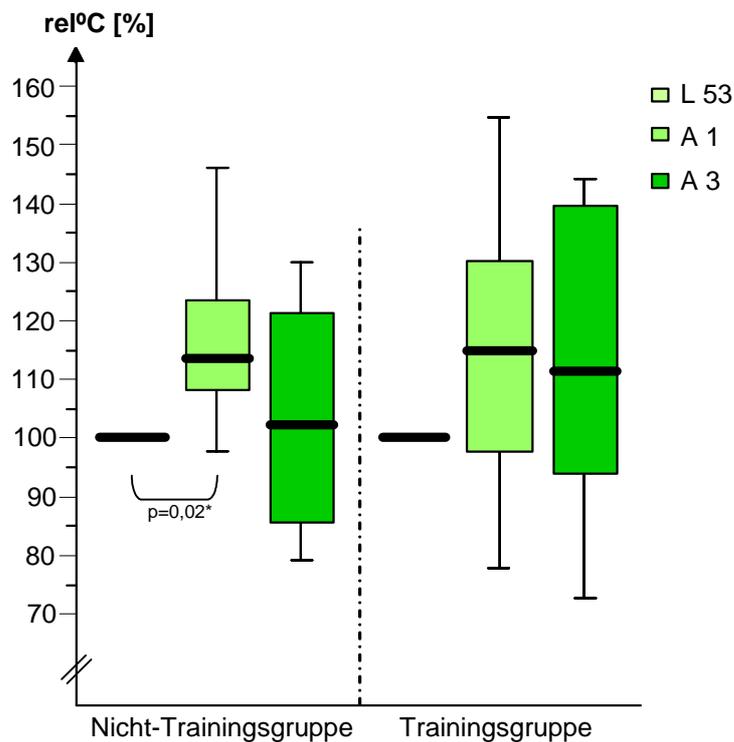


Abbildung 36: Prozentuale Darstellung der Differenz von Körperkern- und Körperschalentemperatur in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

3.6. Transepidermaler Wasserverlust (TEWL)

3.6.1. TEWL der gesamten Körperschale

In der Anpassungsphase ergaben sich folgende Veränderungen des TEWL in Bezug auf die erste Messung im Liegen (L1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 13,4 g/m²·h; Trainingsgruppe: Median 17,9 g/m²·h) (Abbildung 37):

Nach einer Liegedauer von 5 Tagen kam es bei der Nicht-Trainingsgruppe zu einem tendenziellen Anstieg des TEWL im Median um 15,6% ($p = 0,07$). Auch am 12. Liegetag war der TEWL bei dieser Gruppe gegenüber dem ersten Liegetag tendenziell erhöht (im Median um 30,3%; $p = 0,09$).

Bei der Trainingsgruppe war dieser Anstieg des TEWL nicht zu beobachten.

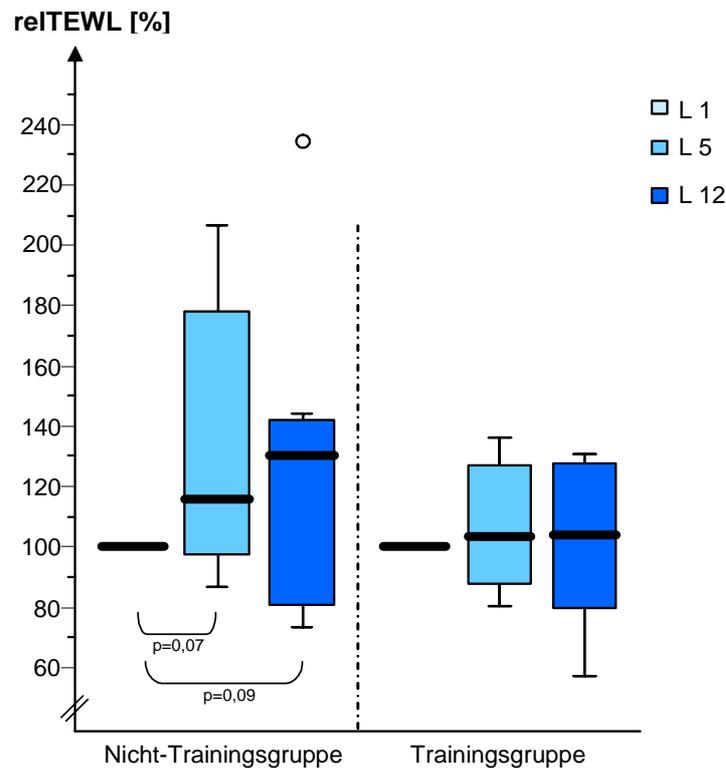


Abbildung 37: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der gesamten Körperschale in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

In der Aufstehphase kam es zu folgenden Veränderungen des TEWL bezogen auf die letzte Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe und Trainingsgruppe: Median 16,0 g/m²·h) (Abbildung 38):

In den beiden Gruppen gab es eine gegensätzliche Entwicklung. Während es bei der Nicht-Trainingsgruppe zu einer tendenziellen Abnahme des TEWL kam (A3: im Median um 11,5 %), nahm der TEWL bei der Trainingsgruppe tendenziell zu (A3: im Median um 20,3%), so dass sich die Gruppen am dritten Tag nach dem Aufstehen signifikant voneinander unterschieden ($p = 0,04^*$).

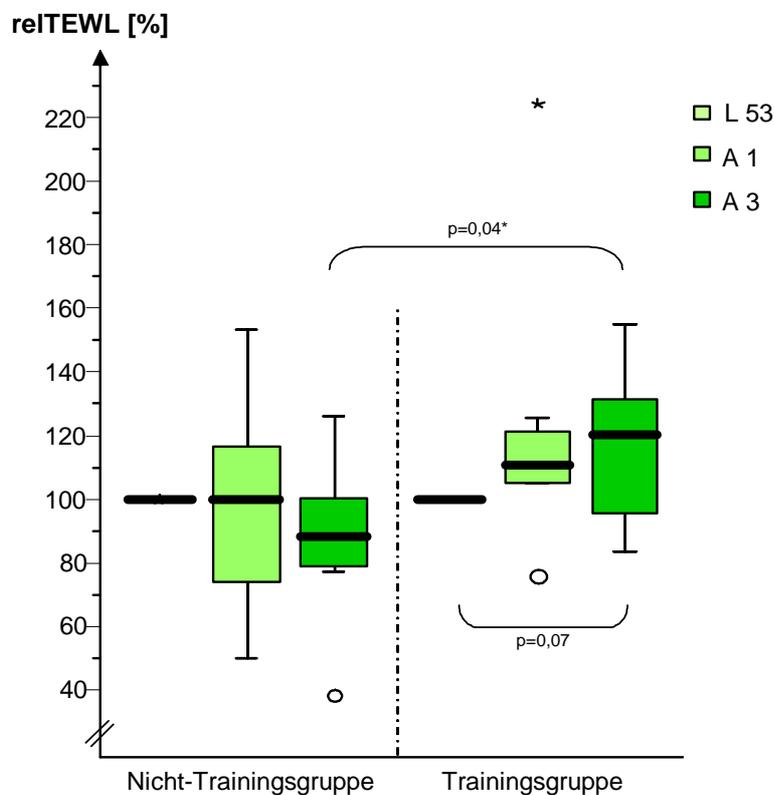


Abbildung 38: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der gesamten Körperschale in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

Da der TEWL auch eine starke emotionale Komponente aufweist, die vor allem zur Erhöhung des TEWL an den Handflächen und Fußsohlen führt (sogenannter „Angstschweiß“) wird im Folgenden zwischen dem TEWL dieser Stellen und dem Rest der Körperschale unterschieden.

3.6.2. TEWL der Handflächen und Fußsohlen

Weder in der Anpassungs- noch in der Aufstehphase kam es zu signifikanten Veränderungen des TEWL der Handflächen und Fußsohlen. Es sind hierbei bei beiden Gruppen vor allem die starken interindividuellen Schwankungen hervorzuheben: So streuen z.B. am dritten Tag nach dem Aufstehen die Absolutwerte der Nicht-Trainingsgruppe bei einem Median von $95,7 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ zwischen $54,3 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ und $124,9 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ und die prozentualen Veränderungen in Bezug auf die letzte Messung im Liegen zwischen einer Abnahme des TEWL um $49,3 \%$ und einer Zunahme von $93,6 \%$ (im Median $+1,5\%$!) (Abbildung 39 und Abbildung 40).

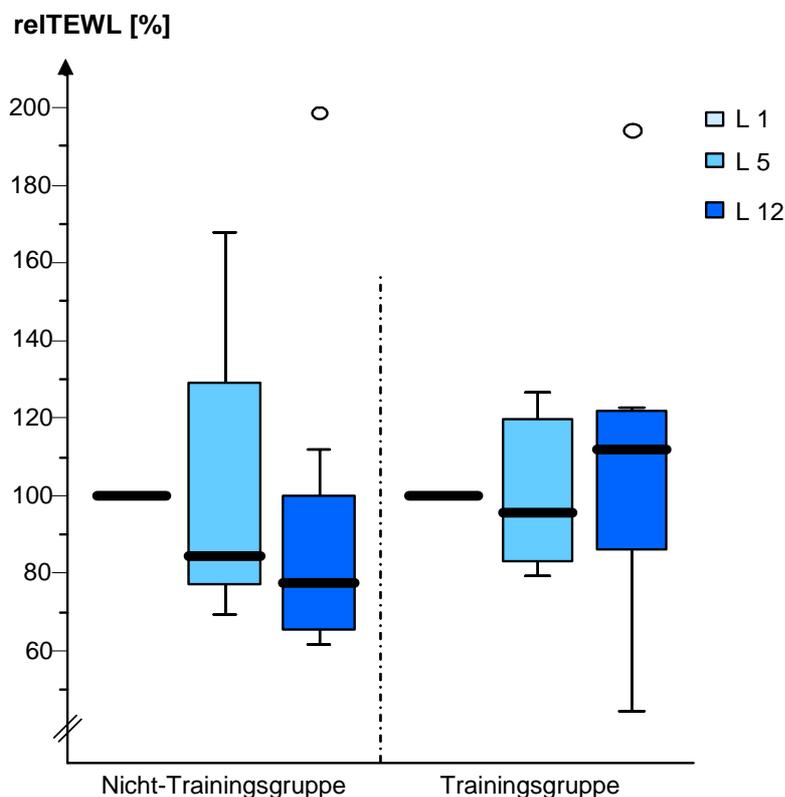


Abbildung 39: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der Handflächen und Fußsohlen in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

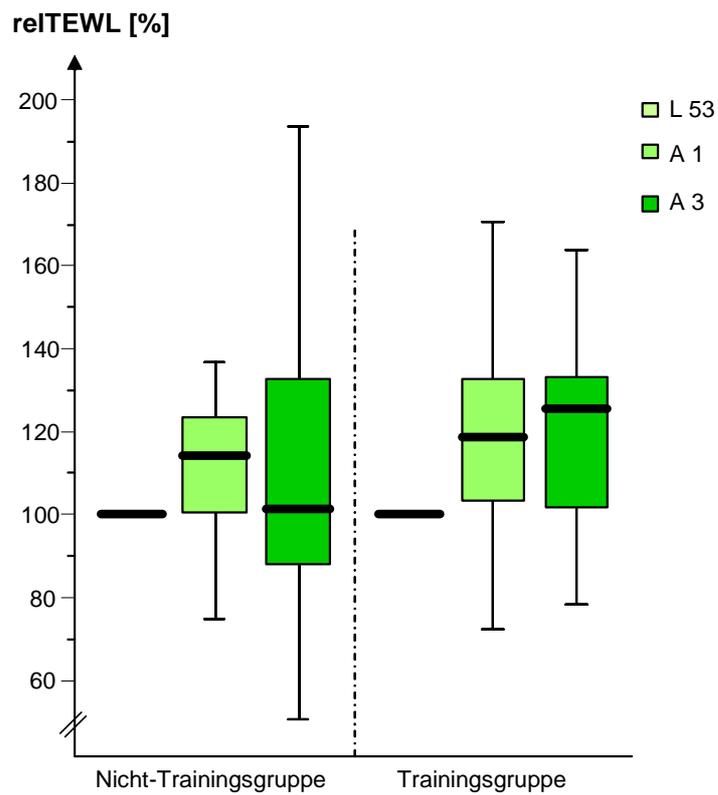


Abbildung 40: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der Handflächen und Fußsohlen in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

3.6.3. TEWL der restlichen Körperbereiche

Der TEWL der restlichen Körperbereiche zeigt die schon bei der Körperschale gewonnenen Ergebnisse etwas deutlicher, da der Effekt des emotionalen Schwitzens minimiert ist:

In der Anpassungsphase ergaben sich folgende Veränderungen bezüglich der ersten Liegendmessung (L 1) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 61,2 g/m²·h; Trainingsgruppe: Median = 80,3 g/m²·h) (Abbildung 41):

Im Gegensatz zur Trainingsgruppe, bei der es zu keinen signifikanten Veränderungen des TEWL kam, nahm der TEWL bei der Nicht-Trainingsgruppe signifikant ($p = 0,02^*$) im Median um 27,2 % zu (L5) und war auch am 12. Liegetag noch tendenziell erhöht (im Median um 42,7 %; $p = 0,09$).

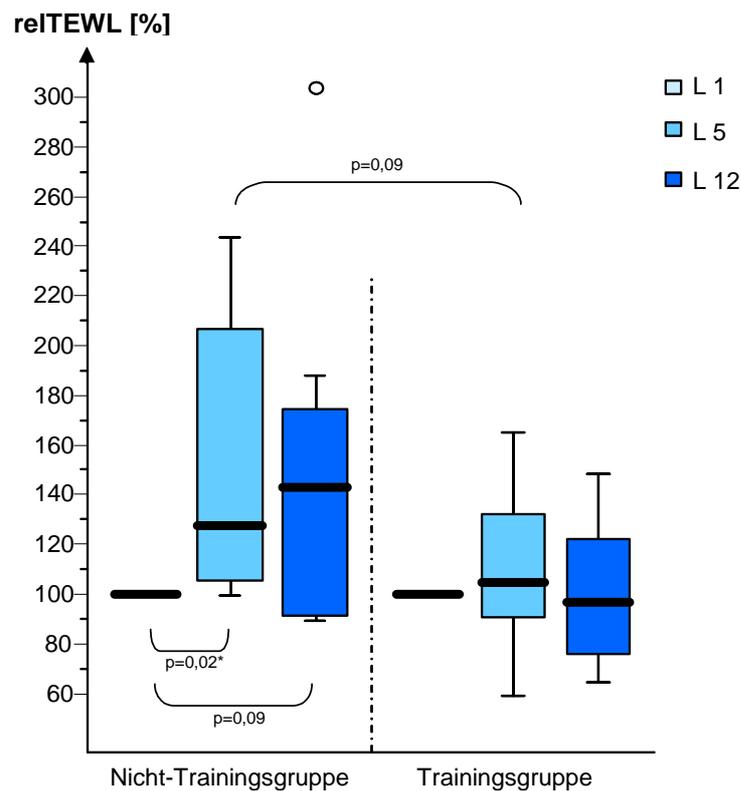


Abbildung 41: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der restlichen Körperbereiche in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

Auch in der Aufstehphase kam es zu der schon beim TEWL der Körperschale beobachteten gegensätzlichen Entwicklung in Bezug auf die letzte Messung im Liegen (L53) (Nicht-Trainingsgruppe: Median = 80,4 g/m²·h; Trainingsgruppe: Median = 70,2 g/m²·h) (Abbildung 42):

Während es bei der Nicht-Trainingsgruppe zu einer tendenziellen Abnahme des TEWL kam (A3: im Median um 16,7 %), nahm der TEWL bei der Trainingsgruppe tendenziell zu (A3: im Median um 12,8%), so dass sich die Gruppen am dritten Tag nach dem Aufstehen signifikant voneinander unterschieden ($p = 0,04^*$).

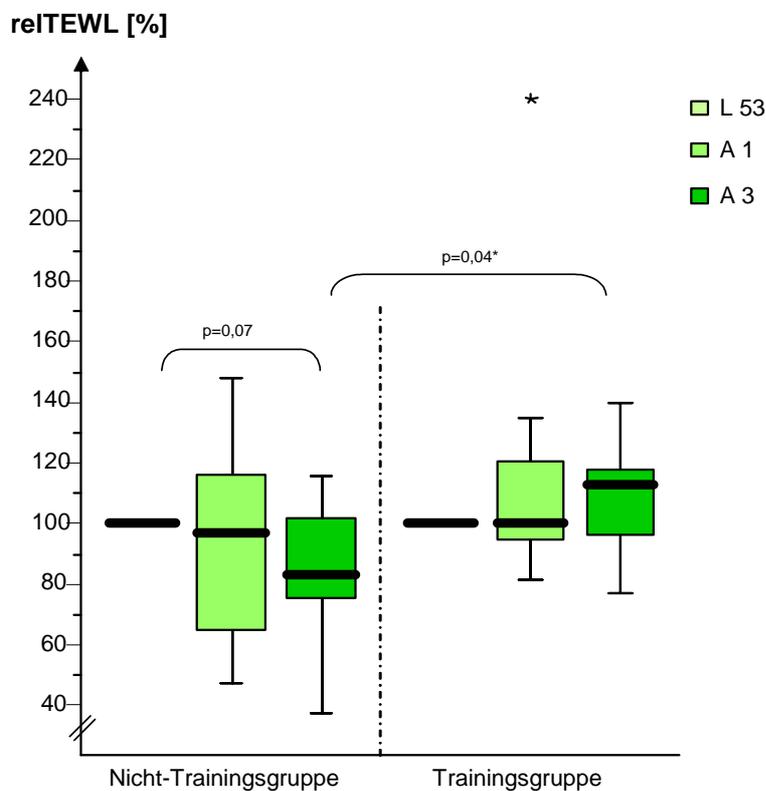


Abbildung 42: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der restlichen Körperbereiche in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8).

4. Diskussion

Im Zuge immer länger andauernder Weltraumaufenthalte rückt vor allem eine gleich bleibend hohe Leistungsfähigkeit der Astronauten, verbunden mit guter körperlicher Belastbarkeit und körperlichem Wohlbefinden im schwerelosen Raum, in den Vordergrund.

Es war Inhalt der vorliegenden Untersuchung, Veränderungen der Körperzusammensetzung, des Körperwasserhaushaltes und der Thermoregulation während lang andauernder simulierter Schwerelosigkeit zu beschreiben, die allesamt Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von Astronauten haben können.

Insgesamt zeigten sich nur geringe Veränderungen der einzelnen Parameter über die lange Liegeperiode. Die größten Veränderungen traten während der Anfangs- und der Aufstehphase auf, weshalb in der Betrachtung der Daten dort ein besonderes Augenmerk lag.

Deutliche Unterschiede gab es, vor allem die Thermoregulation betreffend, zwischen der Gruppe der trainierenden und der der nicht-trainierenden Probanden.

Im Folgenden nun die Diskussion der Ergebnisse im Einzelnen.

4.1. Körpergewicht und Körperzusammensetzung

Unter terrestrischen Bedingungen führt eine zentrale Hypervolämie, ob erzeugt durch Immersion [107, 108], Infusion [109] oder Änderung der Körperposition von stehend in liegend [110], dem Henry-Gauer-Reflex [111] folgend zu einer Natriuresis und Diuresis über die Nieren.

Der Verlust an Körpergewicht, der häufig bei der Rückkehr aus dem All auf die Erde [32, 34-39, 49] und in Simulationsstudien beobachtet wurde, ist von den meisten Autoren demnach als ein Indikator für einen absoluten Flüssigkeitsverlust während des Aufenthalts im Weltraum angesehen worden [49, 56, 112, 113]. Im Widerspruch dazu konnte bisher unter realen Mikro-g-Bedingungen noch nie eine erhöhte Natriuresis und Diuresis beobachtet werden [37, 47, 98, 114]. Im Gegensatz zu terrestrischen Hypervolämie-Modellen gab es keine Anzeichen für einen absoluten Verlust von Flüssigkeit zu Beginn des Raumfluges [115]. Diese Beobachtungen haben Drummer et al. [116] zu dem Schluss geführt, dass das Wasser während des

Raumfluges eher vom Intravaskularraum in andere Kompartimente verschoben wird, als dass es über die Nieren verloren geht und dass eine veränderte Energiebilanz verbunden mit einer hypokalorischen Nahrungsaufnahme einen größeren Einfluss auf die Veränderungen des Körpergewichts während des Raumfluges hat als die Schwerelosigkeit selbst.

Der in unserer Studie aufgetretene Körpergewichtsverlust innerhalb der ersten fünf Tage im Liegen bei der Nicht-Trainingsgruppe mit im Median -1,1% zeigte sich tendenziell auch bei der Trainingsgruppe. In dieser Phase kam es in beiden Gruppen zu keiner signifikanten Abnahme des Gesamtkörperwassers, so dass sich der beobachtete Körpergewichtsverlust nicht durch eine erhöhte Natriurese und Diurese erklären lässt. Es scheint sich hierbei eher um einen Verlust von Gewebe zu handeln. Diese Ergebnisse widersprechen den bisher in Simulationsstudien gewonnenen Ergebnissen, stehen aber im Einklang damit, dass unter realen Mikro-g-Bedingungen bisher kein Flüssigkeitsverlust zu Beginn des Raumfluges beobachtet wurde [115]. Ursächlich könnte eine negative Energiebilanz durch hypokalorische Nahrungszufuhr sein. Schon Fraser [40] konnte zeigen, dass Appetitmangel, Akzeptanz des Essens, tägliche Untersuchungen und die Einschränkung der Bewegung eine bedeutende Rolle beim beobachteten Körpergewichtsverlust während des Raumfluges spielen.

Auch ist von einem erhöhten Sympathikotonus, hervorgerufen durch den emotionalen Stress in den ersten Tagen der Bettruhephase, auszugehen. Bisher zeigte sich, dass länger andauernde Schwerelosigkeit unter realen Mikro-g-Bedingungen zu einer Zunahme des Sympathikotonus führt [117].

Dies zusammengenommen könnte zu einer negativen Energiebilanz geführt haben, da bei der Berechnung des Energiebedarfs mittels der Harris-Benedict-Formel für die tägliche Kalorienzufuhr mit einem Aktivitätsfaktor von 1,2 gerechnet wurde, was sehr leichter körperlicher Belastung entspricht, und dem durch den erhöhten Sympathikotonus gesteigerten Energiebedarf nicht gerecht wird.

Die starke und schnelle Zunahme des Körpergewichts am ersten Tag des Aufstehens, die bei der Nicht-Trainingsgruppe ausgeprägter war als bei der Trainingsgruppe, ging mit einer Erhöhung des Gesamtkörperwassers und hier vor

allem des Extrazellularwassers einher. Dies ist durch eine rasche Körperwasserumverteilung von zentral nach peripher und damit durch eine, durch die entstandene zentrale Hypovolämie erzeugte, vermehrte Wasserretention zu erklären. Passend dazu ließ sich bei der Messung der Schichtdicken der unteren Extremität, im gleichen Zeitraum eine signifikante Zunahme zeigen.

4.2. Schichtdicke

Die Messung von oberflächlichen Schichtdicken mittels Ultraschall zur Dokumentation und Quantifizierung von Volumenveränderungen des interstitiellen Raums gehen auf Studien von Kirsch et al. zurück [58, 59]. Diese konnten zeigen, dass die dort verwandte A-mode-Ultraschallmethode eine nicht-invasive Messung der Veränderungen der oberflächlichen Schichtdicken darstellt, die große Übereinstimmungen mit autoptisch gewonnenen Daten zeigt [59]. Die Aussagekraft der Methode konnte in zahlreichen Studien bestätigt werden [55, 60, 61].

Bei späteren Untersuchungen ließ sich zeigen, dass auch der in der vorliegenden Studie verwandte B-mode Ultraschall zur nicht-invasiven Messung der oberflächlichen Schichtdicken geeignet ist [57, 118] und durch die Unterscheidbarkeit von Korium und Subkutis zusätzliche Vorteile aufweist [118].

In unserer Studie lagen die Werte für die prätibiale Schichtdicke zwischen 1,92 und 9,00 mm und die der Stirn zwischen 2,86 und 5,83 mm. Dies steht in Einklang mit vorherigen Untersuchungen, in denen die Werte für die Schichtdicke des Integuments abhängig von Seite, Alter, Konstitution und Geschlecht zwischen 2 und 8 mm lagen [55, 56, 58-60, 119, 120].

Die oberflächlichen Schichten dienen als physiologisch relevanter Wasserspeicher mit der Möglichkeit zu schnellem Austausch mit anderen Kompartimenten [54-56]. Eichler et al. konnten zeigen, dass die Tibia für Veränderungen des Flüssigkeitsgehaltes und die daraus resultierenden Veränderungen des interstitiellen Raumes sensibler zu sein scheint als die Stirn [121], weshalb in unseren Messungen die Veränderungen der Schichtdicke an der Tibia im Vordergrund stehen.

Bei Wegfall der Schwerkraft im Weltraum hat sich gezeigt, dass es zu einer Zunahme der Schichtdicke an der oberen Körperhälfte und zu einem „Austrocknen“

der unteren Körperpartien kommt [56]. Diese Effekte zeigten sich auch in Simulationsstudien [58, 122].

Diese für Schwerelosigkeit typischen Veränderungen in der Flüssigkeitsverteilung der unteren Körperhälfte konnten bei unseren Probanden nur in der Nicht-Trainingsgruppe nachgewiesen werden und sind an Messpunkt A, d.h. in der Nähe des Knöchels, am ausgeprägtesten. Dass es sich hierbei nicht um einen Verlust von Gesamtkörperwasser sondern tatsächlich um eine Umverteilung handelt, zeigen die mittels Bioimpedanzmessung gewonnenen Daten, die ein gleich bleibendes Gesamtkörperwasser in der Anpassungsphase zeigen.

Bei der Trainingsgruppe war dieser „Austrocknungseffekt“ nicht nachweisbar; es zeigte sich bei ihnen im Gegenteil sogar eine tendenzielle Zunahme der Schichtdicken zu Beginn der Liegeperiode an Messpunkt B und C.

Das Vibrationsmuskeltraining scheint, zumindest während der Liegeperiode, eine veränderte Auswärtsfiltration bzw. Resorption zur Folge zu haben, die die „Austrocknung“ der unteren Extremität bei der Trainingsgruppe verhindert.

Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen von Ryan et al. [123], die nach einem zehnminütigen Vibrationsmuskeltraining eine Erhöhung des Wassergehalts der Haut der unteren Extremität zeigen konnten.

Während der Aufstehphase kam es zu einer raschen und starken Zunahme der Schichtdicken über der Tibia, wobei es dabei keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen gab, sich also keine positiven Effekte durch das Training zeigen ließen. Das durch die zentrale Hypovolämie bei der Lageänderung vermehrt retinierte Wasser wurde demnach in den oberflächlichen Schichten der unteren Extremität gespeichert.

4.3. Körpertemperatur

Bei langen Aufenthalten im Weltraum, wie einer Reise zum Mars oder monatelangen Aufenthalten auf bemannten Raumstationen, bei denen die Astronauten hochqualifizierte Arbeit leisten müssen, ist das Wohlbefinden der Astronauten wichtig, um die Leistungsfähigkeit auf hohem Niveau halten zu können. So rückt auch das thermische Wohlbefinden im Zuge immer länger andauernder

Raummissionen weiter in den Vordergrund. Äußerungen von Astronauten über kalte Extremitäten während des Raumfluges sind als Hinweis auf eine veränderte thermische Situation zu werten [63, 64].

In der vorliegenden Studie kam es über die Zeit der langen Bettruheperiode zu keiner Veränderung der Körperkerntemperatur, weder bei der Trainingsgruppe, bei der sie an L1 und L53 im Median bei 36,9°C lag, noch bei der Nicht-Trainingsgruppe, bei der sie an L1 und L53 im Median bei 37,1°C lag. Dies steht im Widerspruch zu den meisten vorliegenden Daten, die größtenteils eine Zunahme der Körperkerntemperatur während simulierter Schwerelosigkeit [67, 68, 73, 76, 79, 81] zeigen, wobei es sich bei diesen Studien ausschließlich um Kopftieflage-Bettruhe-Modelle mit kurzer bis mittlerer Liegedauer handelt (6 Stunden – 15 Tage). Aber auch in der Anpassungsphase der vorliegenden Studie, die genau diesen Zeitraum umfasst, zeigten sich keine Veränderungen der Körperkerntemperatur (Nicht-Trainingsgruppe L12: Median 37,2 °C; Trainingsgruppe L12: Median 36,8 °C). Möglicherweise zeigt sich darin ein Unterschied zwischen dem Kopftieflage- und dem horizontalen Bettruhe-Modell, da schon Greenleaf and Reese [80] bei einer in horizontaler Lage durchgeführten Bettruhestudie eine gleich bleibende Körperkerntemperatur bei nicht trainierenden Probanden demonstrieren konnten.

Nach realer [66] und simulierter Schwerelosigkeit [67, 73, 76, 79, 80] durchgeführte Belastungsuntersuchungen zeigen eine verminderte Thermoregulationskapazität, die sich in einer erhöhten Körperkerntemperatur während der Belastung bemerkbar macht. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch die Bettruhe die Temperaturschwelle für die thermoregulatorische Vasodilatation der Hautgefäße [70, 79, 81] und für das Schwitzen [67, 73] erhöht war.

In der vorliegenden Studie wurde kein Belastungstest nach der Bettruhe durchgeführt, es zeigte sich aber in der Aufstehphase, dass das Aufrichten in die senkrechte Körperposition und die damit verbundenen alltäglichen Bewegungen allein nach 56 Tage andauernder Liegephase schon Belastung genug waren, um Defizite im thermoregulatorischen System darzustellen. So kam es bei der Nicht-Trainingsgruppe am Tag nach dem Aufstehen zu einem signifikanten Anstieg der Körperkerntemperatur im Median um 0,7 °C bei gleich bleibender Schalentemperatur und damit gleichzeitig zu einer signifikanten Erhöhung der Differenz zwischen

Körperkern- und Hauttemperatur. Das weist zusammengenommen auf eine nicht adäquate und zu einer höheren Temperaturschwelle hin verschobenen Vasodilatation der Hautgefäße hin, die in der Literatur für die Belastung nach Bettruhe beschrieben ist [70, 79, 81] und eine deutliche Störung des thermoregulatorischen Wärmeabgabemechanismus bedeutet.

Dass diese Störung der thermoregulatorischen Wärmeabgabe nur bei der Nicht-Trainingsgruppe zu sehen ist, zeigt einen deutlichen Effekt des in der Studie durchgeführten Vibrationsmuskeltrainings auf das thermoregulatorische System.

Dies steht im Einklang mit Untersuchungen von Greenleaf und Reese [80], welche zeigen konnten, dass tägliches, einstündiges, im Liegen durchgeführtes Training während einer 14 Tage andauernden Bettruhe-Phase die Verschlechterung der thermoregulatorischen Funktion vermindert. Shibasaki et al. [69] berichten darüber hinaus, dass tägliches 90 minütiges Training während einer 13 tägigen Kopftieflage-Bettruhe-Periode der Hypovolämie, sowie dem Ansteigen der Körperkerntemperatur während eines nach dem Aufstehen durchgeführten Trainings vorbeugen. Diese positiven Effekte durch körperliches Training konnten jedoch bisher nur bei diesen Bettruhe-Studien mit kürzerer Liegedauer (13-14 Tage) gezeigt werden.

4.4. Transepidermaler Wasserverlust

Bei dem mit der Sonde gemessenen TEWL kann nicht zwischen Perspiratio sensibilis und Perspiratio insensibilis unterschieden werden, er umfasst somit immer die Kombination von beidem.

Bei der Perspiratio sensibilis handelt es sich um einen aktiven glandulären Wasserverlust, es besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen vegetativen Nervenimpulsen und der Schweißdrüsenaktivität [124, 125]. Die Schweißrate steigt bei körperlicher Aktivität auf der Körperoberfläche langsam an und korreliert mit der Herzfrequenz und der Körperkerntemperatur. Die thermoregulatorische transepidermale Wasserabgabe wird hauptsächlich durch das autonome Nervensystem kontrolliert.

Die palmare und die plantare Schweißrate korreliert nur mit der Herzfrequenz [126] und ist nur sehr geringfügig an der Thermoregulation beteiligt [127]. Es konnte außerdem beobachtet werden, dass die palmare Schweißrate bereits bei der Absicht

etwas zu tun, z.B. einen Gegenstand zu greifen, ansteigt. Die palmaren Schweißdrüsen sind also schon vor Beginn der körperlichen Arbeit aktiv. Die Schweißdrüsen z.B. des Unterarms werden dagegen erst einige Minuten nach Beginn der körperlichen Arbeit aktiv. Im Gegensatz zum zeitlich verzögerten thermoregulatorischen Schwitzen handelt es sich beim palmaren Schwitzen also um corticalemotionales Schwitzen.

Aus diesem Grund werden die Daten zum TEWL der Hand- und Fußflächen und die Daten zum TEWL der restlichen Körperbereiche im Folgenden getrennt voneinander betrachtet.

Betrachtet man den TEWL der Hand- und Fußflächen genauer, so lässt sich feststellen, dass in diesen Bereichen die größten interindividuellen Schwankungen auftraten. So lagen z. B. die Werte der Nicht-Trainingsgruppe in der Aufstehphase, bei einer Veränderung von im Median +1,5%, zwischen -49,3% und +93,6%. Diese Werte repräsentieren demnach vielmehr die unterschiedliche individuelle Verarbeitung der emotionalen Stresssituation als eine thermoregulatorische Anpassung des TEWL an die erhöhte Körperkerntemperatur.

Bisherige Studien konnten zeigen, dass Kopftieflage-Bettruhe zu einer Erhöhung der Temperaturschwelle für thermoregulatorisches Schwitzen bei nach der Bettruhe durchgeführten körperlichem Belastungstests führt [67, 68, 73, 76, 80]. Crandall et al. [70] konnten zusätzlich zeigen, dass mittels Kopftieflage-Bettruhe simulierte Schwerelosigkeit die durch exogene Acetylcholingabe angeregte Schweißdrüsenfunktion beeinträchtigt.

Körperliches Training hat Einfluss auf die Schweißdrüsenfunktion, dies zeigt sich in der früheren Aktivierung der Schweißdrüsen während submaximaler Anstrengung [82, 83, 88, 89]. Die Schwelle für eine erhöhte Hautdurchblutung und Schwitzen ist in Richtung einer niedrigeren Körperkerntemperatur verschoben [84, 85].

In der vorliegenden Studie kam es schon in der Anpassungsphase zu signifikant unterschiedlichen Veränderungen des TEWL zwischen den beiden Gruppen. So zeigte die Nicht-Trainingsgruppe in dieser Phase eine signifikante Zunahme (im Median um 27,2%), während der TEWL bei der Trainingsgruppe auf dem gleichen Niveau blieb. Ein deutlicher Trainingseffekt zeigt sich also schon in der ersten Phase der Bettruhe. Da sich bisherige Untersuchungen zum TEWL auf Messungen nach

einer Bettruheperiode beschränken und während der Bettruhe erhobene Daten fehlen, konnte dieser Effekt bisher noch nicht gezeigt werden.

Es ist aber bekannt, dass simulierte Schwerelosigkeit (>3 Tage) zu einem erhöhten Sympathikustonus führt [117]. Da der TEWL als indirekter Parameter für die Sympathikusaktivität betrachtet werden kann, scheint der bei der Nicht-Trainingsgruppe erhöhte TEWL Ausdruck der bekannten Sympathikusaktivierung zu sein. Interessant ist, dass der TEWL bei der Trainingsgruppe gleich bleibt, es also nicht zu der bekannten Aktivierung des sympathischen Nervensystems kommt. Möglicherweise führt das körperliche Training zum Stressabbau und damit zu einer geringeren Sympathikusaktivierung bei der Trainingsgruppe.

In der Aufstehphase kam es in der Nicht-Trainingsgruppe zu einem Abfall des TEWL, also zu einer Verminderung der Schweißabgabe bei gleichzeitig erhöhter Körperkerntemperatur. Im Gegensatz dazu zeigte die Trainingsgruppe bei gleich bleibender Körperkerntemperatur auch eine unveränderte Schweißabgabe. Die beiden Gruppen reagierten also signifikant unterschiedlich auf die körperliche Anstrengung des „Aufstehens“.

Einen solchen Unterschied in der Reaktion von Trainierten und Untrainierten konnten auch Crandall et al. [70] zeigen, die nach 14-tägiger Kopftieflage-Bettruhe eine lokale Erwärmung des Unterarms durchführten. Dabei zeigte die Gruppe von Probanden, die im Verlauf der Bettruhe kein Training absolviert hatte, eine reduzierte Schweißabgabe und eine verminderte kutane Vasodilatation im Gegensatz zu der Gruppe von Probanden, die während der Bettruhe täglich trainiert hatte.

Zusammengenommen weisen die Ergebnisse der vorliegenden Studie auf eine erhebliche Störung des thermoregulatorischen Systems durch simulierte Schwerelosigkeit hin. Bei den Probanden der Trainingsgruppe ließen sich diese Defizite in der Thermoregulation während und nach simulierter Schwerelosigkeit nicht zeigen. Die Durchführung eines täglichen Vibrationsmuskeltrainings scheint also ungünstigen Veränderungen im thermoregulatorischen System entgegenwirken zu können.

5. Zusammenfassung

Es war das Ziel der vorliegenden Untersuchung, die Auswirkungen länger andauernder, mittels Bettruhe simulierter Schwerelosigkeit auf den Wasserhaushalt und das thermoregulatorische System zu beschreiben und darzustellen, ob ein täglich durchgeführtes Vibrationsmuskeltraining den durch die Bettruhe hervorgerufenen Veränderungen entgegenwirkt.

Insgesamt zeigten sich über die lange Liegeperiode eher geringe Veränderungen der einzelnen gemessenen Parameter, wobei dennoch deutliche Effekte des Vibrationsmuskeltrainings erkennbar waren.

Die Auswirkungen des täglichen Vibrationsmuskeltrainings manifestierten sich bereits während der Liegeperiode. Zum einen blieb die für den Aufenthalt in Schwerelosigkeit typische Körperwasserumverteilung von peripher nach zentral bei der Trainingsgruppe aus, zum anderen lassen die Daten vermuten, dass das tägliche körperliche Training den bei Simulationsstudien typischen Anstieg des Sympathikotonus verhindert. Hinweise darauf sind der bei der Trainingsgruppe gleich bleibende transepidermale Wasserverlust sowie ein gegenüber der Nicht-Trainingsgruppe geringerer Körpergewichtsverlust.

Nach Beendigung der Liegeperiode offenbarte sich bei der Nicht-Trainingsgruppe im Gegensatz zur Trainingsgruppe eine massiv eingeschränkte Thermoregulationskapazität. Die nicht trainierten Probanden zeigten bei signifikant erhöhter Körperkerntemperatur eine gleich bleibenden Hauttemperatur sowie eine verminderte evaporative Wasserabgabe.

Offen bleibt die Frage, wie die insgesamt geringen Veränderungen der Körpertemperatur während der Liegeperiode mit dem von Astronauten geäußerten ‚thermischen Unwohlsein‘ in Einklang zu bringen sind. Hierfür wäre es hilfreich eine kontinuierliche Messung der Körperkerntemperatur bei länger andauernder realer oder simulierter Schwerelosigkeit durchzuführen. Diese würde eventuelle Veränderungen im circadianen Rhythmus aufzeigen, die für „thermisches Unwohlsein“ ursächlich sein könnten und die bei der in dieser Studie durchgeführten, immer zur gleichen Tageszeit erfolgten, Messung nicht darstellbar sind.

Des Weiteren ist es möglich, dass das Bettruhemodell in Horizontallage als Simulationsmodell die Thermoregulation in Schwerelosigkeit nicht ausreichend abbildet. Interessant wären zum Vergleich weitere, während Kopf-Tieflage-Bettruhe gewonnene, thermoregulatorische Daten. Ein weiteres Problem der Thermoregulation in Simulationsstudien liegt darin, dass die in realer Schwerelosigkeit fehlende Möglichkeit zur physikalischen Konvektion bei Simulationstudien nicht dargestellt werden kann. Weitere Untersuchungen der Thermoregulation unter realer Schwerelosigkeit sind aus diesem Grund zwingend notwendig.

6. Literaturverzeichnis

1. Grenon, S.M., et al., *Role of individual predisposition in orthostatic intolerance before and after simulated microgravity*. J Appl Physiol, 2004. **96**(5): p. 1714-22.
2. Xiao, X., et al., *Bed rest effects on human calf hemodynamics and orthostatic intolerance: a model-based analysis*. Aviat Space Environ Med, 2005. **76**(11): p. 1037-45.
3. Levine, B.D., et al., *Human muscle sympathetic neural and haemodynamic responses to tilt following spaceflight*. J Physiol, 2002. **538**(Pt 1): p. 331-40.
4. Buckey, J.C., Jr., et al., *Orthostatic intolerance after spaceflight*. J Appl Physiol, 1996. **81**(1): p. 7-18.
5. Vasques, M., et al., *Comparison of hyper- and microgravity on rat muscle, organ weights and selected plasma constituents*. Aviat Space Environ Med, 1998. **69**(6 Suppl): p. A2-8.
6. Burton, R.R., *The role of artificial gravity in the exploration of space*. Acta Astronaut, 1994. **33**: p. 217-20.
7. Clement, G. and A. Pavy-Le Traon, *Centrifugation as a countermeasure during actual and simulated microgravity: a review*. Eur J Appl Physiol, 2004. **92**(3): p. 235-48.
8. Vil-Viliams, I.F., et al., *Modern view on the short-arm centrifuge as a potential generator of artificial gravity in piloted missions*. J Gravit Physiol, 2001. **8**(1): p. P145-6.
9. Vil-Viliams, I.F., *Principle approaches to selection of the short-arm centrifuge regimens for extended space flight*. Acta Astronaut, 1994. **33**: p. 221-9.
10. Hawkey, A., *The physical price of a ticket into space*. J Br Interplanet Soc, 2003. **56**(5-6): p. 152-9.
11. Iwasaki, K.I., et al., *Usefulness of daily +2Gz load as a countermeasure against physiological problems during weightlessness*. Acta Astronaut, 2001. **49**(3-10): p. 227-35.
12. Arbeille, P., et al., *Effect of the thigh-cuffs on the carotid artery diameter jugular vein section and facial skin edema: HDT study*. J Gravit Physiol, 1999. **6**(1): p. P39-40.
13. Roumy, J., et al., *Effect of the thigh-cuffs on the carotid artery diameter jugular vein section and facial skin edema: HDT study*. Acta Astronaut, 2001. **49**(3-10): p. 153-9.

14. Arbeille, P., et al., *Results of a 4-week head-down tilt with and without LBNP countermeasure: II. Cardiac and peripheral hemodynamics--comparison with a 25-day spaceflight*. Aviat Space Environ Med, 1992. **63**(1): p. 9-13.
15. Baisch, F.J., *Body fluid distribution in man in space and effect of lower body negative pressure treatment*. Clin Investig, 1993. **71**(9): p. 690-9.
16. Baisch, F.J., *Orthostatic stress by lower body negative pressure and its body fluid distribution kinetics under microgravity*. Physiologist, 1993. **36**(1 Suppl): p. S135-8.
17. Cao, P., et al., *Exercise within lower body negative pressure partially counteracts lumbar spine deconditioning associated with 28-day bed rest*. J Appl Physiol, 2005. **99**(1): p. 39-44.
18. Watenpaugh, D.E., et al., *Supine lower body negative pressure exercise during bed rest maintains upright exercise capacity*. J Appl Physiol, 2000. **89**(1): p. 218-27.
19. Bleeker, M.W., et al., *Vascular adaptation to deconditioning and the effect of an exercise countermeasure: results of the Berlin Bed Rest study*. J Appl Physiol, 2005. **99**(4): p. 1293-300.
20. Karemaker, J.M., W.J. Stok, and R.D. Latham, *Body position and volume status as determinants of cardiovascular responses to transition into microgravity in parabolic flight*. Physiologist, 1993. **36**(1 Suppl): p. S56-7.
21. Mukai, C.N., et al., *Acute hemodynamic responses to weightlessness during parabolic flight*. J Clin Pharmacol, 1991. **31**(10): p. 993-1000.
22. Johns, J.P., et al., *Doppler evaluation of cardiac filling and ejection properties in humans during parabolic flight*. J Appl Physiol, 1994. **76**(6): p. 2621-6.
23. Beckers, F., et al., *Parasympathetic heart rate modulation during parabolic flights*. Eur J Appl Physiol, 2003. **90**(1-2): p. 83-91.
24. Litvinova, K.S., et al., *Effects of artificial support stimulation on fiber and molecular characteristics of soleus muscle in men exposed to 7-day dry immersion*. J Gravit Physiol, 2004. **11**(2): p. P131-2.
25. Natreba, A.I., et al., *Effect of dry immersion in combination with stimulation of foot support zones upon muscle force-velocity characteristics*. J Gravit Physiol, 2004. **11**(2): p. P129-30.
26. Vinogradova, O.L., et al., *Muscle transverse stiffness and venous compliance under conditions of simulated supportlessness*. J Gravit Physiol, 2002. **9**(1): p. P327-9.

27. LeBlanc, A., et al., *Calf muscle area and strength changes after five weeks of horizontal bed rest*. Am J Sports Med, 1988. **16**(6): p. 624-9.
28. Trappe, T., et al., *Cardiorespiratory responses to physical work during and following 17 days of bed rest and spaceflight*. J Appl Physiol, 2006. **100**(3): p. 951-7.
29. Regnard, J., et al., *Validity of microgravity simulation models on earth*. Am J Kidney Dis, 2001. **38**(3): p. 668-74.
30. Grigoriev, A.I. and A.D. Egorov, *General mechanisms of the effect of weightlessness on the human body*. Adv Space Biol Med, 1992. **2**: p. 1-42.
31. Kirsch, K., F. Haenel, and L. Rocker, *Venous pressure in microgravity*. Naturwissenschaften, 1986. **73**(7): p. 447-9.
32. Kirsch, K.A., et al., *Venous pressure in man during weightlessness*. Science, 1984. **225**(4658): p. 218-9.
33. Leach, C.S., *Fluid control mechanisms in weightlessness*. Aviat Space Environ Med, 1987. **58**(9 Pt 2): p. A74-9.
34. Egorov, A.D., et al., *[Changes in the body weight of cosmonauts during a 140-day space flight]*. Kosm Biol Aviakosm Med, 1981. **15**(1): p. 34-6.
35. Leach, C.S., S.I. Altchuler, and N.M. Cintron-Trevino, *The endocrine and metabolic responses to space flight*. Med Sci Sports Exerc, 1983. **15**(5): p. 432-40.
36. Rambaut, P.C., et al., *Caloric balance during simulated and actual space flight*. Aerosp Med, 1973. **44**(11): p. 1264-6.
37. Smith, S.M., J.M. Krauhs, and C.S. Leach, *Regulation of body fluid volume and electrolyte concentrations in spaceflight*. Adv Space Biol Med, 1997. **6**: p. 123-65.
38. Stein, T.P., et al., *Energy expenditure and balance during spaceflight on the space shuttle*. Am J Physiol, 1999. **276**(6 Pt 2): p. R1739-48.
39. Leonard, J.I., C.S. Leach, and P.C. Rambaut, *Quantitation of tissue loss during prolonged space flight*. Am J Clin Nutr, 1983. **38**(5): p. 667-79.
40. Fraser, T.M., *The effects of confinement as a factor in manned space flight. NASA CR-511*. NASA Contract Rep NASA CR, 1966: p. 1-176.
41. Gunga, H.C., et al., *European isolation and confinement study. Water and salt turnover*. Adv Space Biol Med, 1993. **3**: p. 185-200.

42. Lamb, L.E., R.L. Johnson, and P.M. Stevens, *Cardiovascular Deconditioning During Chair Rest*. *Aerosp Med*, 1964. **35**: p. 646-9.
43. Lamb, L.E., et al., *Cardiovascular Deconditioning from Space Cabin Simulator Confinement*. *Aerosp Med*, 1964. **35**: p. 420-8.
44. Maillet, A., et al., *Hormonal, water balance, and electrolyte changes during sixty-day confinement*. *Adv Space Biol Med*, 1996. **5**: p. 55-78.
45. Morgan, T.E., Jr., F. Ulvedal, and B.E. Welch, *Observations in the SAM two-man space cabin simulator. II. Biomedical aspects*. *Aeromed Acta*, 1961. **32**: p. 591-602.
46. Convertino, V.A., et al., *Changes in volume, muscle compartment, and compliance of the lower extremities in man following 30 days of exposure to simulated microgravity*. *Aviat Space Environ Med*, 1989. **60**(7): p. 653-8.
47. Drummer, C., et al., *Reduced natriuresis during weightlessness*. *Clin Investig*, 1993. **71**(9): p. 678-86.
48. Greenleaf, J.E., *Physiology of fluid and electrolyte responses during inactivity: water immersion and bed rest*. *Med Sci Sports Exerc*, 1984. **16**(1): p. 20-5.
49. Grigoriev, A.I., B.V. Morukov, and D.V. Vorobiev, *Water and electrolyte studies during long-term missions onboard the space stations SALYUT and MIR*. *Clin Investig*, 1994. **72**(3): p. 169-89.
50. Johnson, P.C., *Fluid volumes changes induced by spaceflight*. *Acta Astronaut*, 1979. **6**(10): p. 1335-41.
51. Moore, T.P. and W.E. Thornton, *Space shuttle inflight and postflight fluid shifts measured by leg volume changes*. *Aviat Space Environ Med*, 1987. **58**(9 Pt 2): p. A91-6.
52. Greenleaf, J.E., et al., *Fluid and electrolyte shifts during bed rest with isometric and isotonic exercise*. *J Appl Physiol*, 1977. **42**(1): p. 59-66.
53. Johnson, P.C., T.B. Driscoll, and W.R. Carpentier, *Vascular and extravascular fluid changes during six days of bedrest*. *Aerosp Med*, 1971. **42**(8): p. 875-8.
54. Aukland, K. and G. Nicolaysen, *Interstitial fluid volume: local regulatory mechanisms*. *Physiol Rev*, 1981. **61**(3): p. 556-643.
55. Gunga, H.C., et al., *Fluid recruitment from shell tissues of the body during haemodialysis*. *Nephrol Dial Transplant*, 1994. **9**(9): p. 1288-91.

56. Kirsch, K.A., et al., *Fluid shifts into and out of superficial tissues under microgravity and terrestrial conditions*. Clin Investig, 1993. **71**(9): p. 687-9.
57. Eisenbeiss, C., et al., *Influence of body water distribution on skin thickness: measurements using high-frequency ultrasound*. Br J Dermatol, 2001. **144**(5): p. 947-51.
58. Kirsch, K., J. Merke, and H. Hinghofer-Szalkay, *Fluid volume distribution within superficial shell tissues along body axis during changes of body posture in man: the application of a new miniature plethysmographic method*. Pflugers Arch, 1980. **383**(3): p. 195-201.
59. Kirsch, K.A., et al., *A new miniature plethysmograph to measure volume changes in small circumscribed tissue areas*. Pflugers Arch, 1980. **383**(3): p. 189-94.
60. Schumacher, J., et al., *Perioperative tissue thickness measurement by a new miniature ultrasound device*. J Clin Monit Comput, 1998. **14**(7-8): p. 471-6.
61. Schumacher, J., et al., *Measurement of peripheral tissue thickness by ultrasound during the perioperative period*. Br J Anaesth, 1999. **82**(4): p. 641-3.
62. Parazynski, S.E., et al., *Transcapillary fluid shifts in tissues of the head and neck during and after simulated microgravity*. J Appl Physiol, 1991. **71**(6): p. 2469-75.
63. Novak, L., A.M. Genin, and S. Kozlowski, *Skin temperature and thermal comfort in weightlessness*. Physiologist, 1980. **23**(Suppl 6): p. S139-40.
64. Novak, L., et al., *[Results of the "heat exchange 1" experiment performed aboard biosatellite "Cosmos-936"]*. Kosm Biol Aviakosm Med, 1980. **14**(6): p. 73-6.
65. Polyakov, V.V., N.G. Lacota, and A. Gundel, *Human thermohomeostasis onboard "Mir" and in simulated microgravity studies*. Acta Astronaut, 2001. **49**(3-10): p. 137-43.
66. Fortney, S.M., et al., *Body temperature and thermoregulation during submaximal exercise after 115-day spaceflight*. Aviat Space Environ Med, 1998. **69**(2): p. 137-41.
67. Smorawinski, J., et al., *Exercise training and 3-day head down bed rest deconditioning: exercise thermoregulation*. J Physiol Pharmacol, 2005. **56**(1): p. 101-10.

68. Michikami, D., et al., *Attenuated thermoregulatory sweating and cutaneous vasodilation after 14-day bed rest in humans*. J Appl Physiol, 2004. **96**(1): p. 107-14.
69. Shibasaki, M., et al., *Exercise throughout 6 degrees head-down tilt bed rest preserves thermoregulatory responses*. J Appl Physiol, 2003. **95**(5): p. 1817-23.
70. Crandall, C.G., et al., *Prolonged head-down tilt exposure reduces maximal cutaneous vasodilator and sweating capacity in humans*. J Appl Physiol, 2003. **94**(6): p. 2330-6.
71. Yu, X.J., et al., *[Body temperature changes during 7 d -6 degrees head-down bed rest]*. Space Med Med Eng (Beijing), 2002. **15**(3): p. 167-9.
72. Qiu, M., et al., *[Effects of head-down bedrest on surface temperature distribution and non-evaporative heat dissipation]*. Space Med Med Eng (Beijing), 2002. **15**(2): p. 93-7.
73. Lee, S.M., W.J. Williams, and S.M. Schneider, *Role of skin blood flow and sweating rate in exercise thermoregulation after bed rest*. J Appl Physiol, 2002. **92**(5): p. 2026-34.
74. Michikami, D., et al., *Effect of simulated microgravity exposure on thermoregulatory control of sweating*. Environ Med, 2001. **45**(2): p. 58-61.
75. Yu, X.J. and T.D. Yang, *[Ground-based studies on thermoregulation at simulated microgravity by head-down tilt bed rest]*. Space Med Med Eng (Beijing), 2000. **13**(5): p. 382-5.
76. Ertl, A.C., et al., *Exercise thermoregulation in men after 1 and 24-hours of 6 degrees head-down tilt*. Aviat Space Environ Med, 2000. **71**(2): p. 150-5.
77. Cui, J., et al., *Body temperature and skin blood flow during a 14-day bed-rest in a head-down tilt position in humans*. J Gravit Physiol, 2000. **7**(2): p. P133-4.
78. Greenleaf, J.E., *Exercise thermoregulation with bed rest, confinement, and immersion deconditioning*. Ann N Y Acad Sci, 1997. **813**: p. 741-50.
79. Greenleaf, J.E., et al., *Exercise thermoregulation after 6 h of chair rest, 6 degrees head-down bed-rest, and water immersion deconditioning in men*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1996. **72**(4): p. 303-9.
80. Greenleaf, J.E. and R.D. Reese, *Exercise thermoregulation after 14 days of bed rest*. J Appl Physiol, 1980. **48**(1): p. 72-8.

81. Crandall, C.G., et al., *Altered thermoregulatory responses after 15 days of head-down tilt*. J Appl Physiol, 1994. **77**(4): p. 1863-7.
82. Okazaki, K., et al., *Effects of exercise training on thermoregulatory responses and blood volume in older men*. J Appl Physiol, 2002. **93**(5): p. 1630-7.
83. Takeno, Y., Y.I. Kamijo, and H. Nose, *Thermoregulatory and aerobic changes after endurance training in a hypobaric hypoxic and warm environment*. J Appl Physiol, 2001. **91**(4): p. 1520-8.
84. Thomas, C.M., J.M. Pierzga, and W.L. Kenney, *Aerobic training and cutaneous vasodilation in young and older men*. J Appl Physiol, 1999. **86**(5): p. 1676-86.
85. Roberts, M.F., et al., *Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation*. J Appl Physiol, 1977. **43**(1): p. 133-7.
86. Yoshida, T., et al., *Relationship between aerobic power, blood volume, and thermoregulatory responses to exercise-heat stress*. Med Sci Sports Exerc, 1997. **29**(7): p. 867-73.
87. Buono, M.J., C.S. White, and K.P. Connolly, *Cholinergic sensitivity of the eccrine sweat gland in trained and untrained men*. J Dermatol Sci, 1992. **4**(1): p. 33-7.
88. Kurz, A., et al., *Thermoregulatory vasoconstriction and perianesthetic heat transfer*. Acta Anaesthesiol Scand Suppl, 1996. **109**: p. 30-3.
89. Yamazaki, F., et al., *Mechanisms of potentiation in sweating induced by long-term physical training*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1994. **69**(3): p. 228-32.
90. Gauer, O.H. and J.P. Henry, *Circulatory basis of fluid volume control*. Physiol Rev, 1963. **43**: p. 423-81.
91. Hoffer, E.C., C.K. Meador, and D.C. Simpson, *Correlation of whole-body impedance with total body water volume*. J Appl Physiol, 1969. **27**(4): p. 531-4.
92. Heitmann, B.L., *Prediction of body water and fat in adult Danes from measurement of electrical impedance. A validation study*. Int J Obes, 1990. **14**(9): p. 789-802.
93. Kushner, R.F. and D.A. Schoeller, *Estimation of total body water by bioelectrical impedance analysis*. Am J Clin Nutr, 1986. **44**(3): p. 417-24.

94. Bohm, D., et al., *Total body water: changes during dialysis estimated by bioimpedance analysis*. Infusionstherapie, 1990. **17 Suppl 3**: p. 75-8.
95. de Lorenzo, A., et al., *Body impedance measurements during dialysis*. Eur J Clin Nutr, 1991. **45**(6): p. 321-5.
96. Roos, A.N., et al., *Predictive value of tetrapolar body impedance measurements for hydration status in critically ill patients*. Intensive Care Med, 1995. **21**(2): p. 125-31.
97. Ellis, K.J., *Selected body composition methods can be used in field studies*. J Nutr, 2001. **131**(5): p. 1589S-95S.
98. Leach, C.S., et al., *Regulation of body fluid compartments during short-term spaceflight*. J Appl Physiol, 1996. **81**(1): p. 105-16.
99. Schroeder, D., P.M. Christie, and G.L. Hill, *Bioelectrical impedance analysis for body composition: clinical evaluation in general surgical patients*. JPEN J Parenter Enteral Nutr, 1990. **14**(2): p. 129-33.
100. Fredrix, E.W., et al., *Estimation of body composition by bioelectrical impedance in cancer patients*. Eur J Clin Nutr, 1990. **44**(10): p. 749-52.
101. Novak, I., P.S. Davies, and M.J. Elliott, *Noninvasive estimation of total body water in critically ill children after cardiac operations. Validation of a bioelectric impedance method*. J Thorac Cardiovasc Surg, 1992. **104**(3): p. 585-9.
102. Meguid, M.M., et al., *Rapid bedside method to assess changes in postoperative fluid status with bioelectrical impedance analysis*. Surgery, 1992. **112**(3): p. 502-8.
103. Kushner, R.F., *Bioelectrical impedance analysis: a review of principles and applications*. J Am Coll Nutr, 1992. **11**(2): p. 199-209.
104. Aukland, K. and R.K. Reed, *Interstitial-lymphatic mechanisms in the control of extracellular fluid volume*. Physiol Rev, 1993. **73**(1): p. 1-78.
105. Sato, K.T., et al., *Reexamination of tympanic membrane temperature as a core temperature*. J Appl Physiol, 1996. **80**(4): p. 1233-9.
106. Benzinger, T.H., *Heat regulation: homeostasis of central temperature in man*. Physiol Rev, 1969. **49**(4): p. 671-759.
107. Nakamitsu, S., et al., *Effect of water temperature on diuresis-natriuresis: AVP, ANP, and urodilatin during immersion in men*. J Appl Physiol, 1994. **77**(4): p. 1919-25.

108. Norsk, P., et al., *Effect of water immersion on renal natriuretic peptide (urodilatin) excretion in humans*. J Appl Physiol, 1993. **74**(6): p. 2881-5.
109. Drummer, C., et al., *Effects of an acute saline infusion on fluid and electrolyte metabolism in humans*. Am J Physiol, 1992. **262**(5 Pt 2): p. F744-54.
110. Drummer, C., et al., *Regulation and distribution of body fluid during a 6-day head-down tilt study in a randomized cross-over design*. J Gravit Physiol, 2000. **7**(2): p. P187-8.
111. Gauer, O.H. and J.P. Henry, *Neurohormonal control of plasma volume*. Int Rev Physiol, 1976. **9**: p. 145-90.
112. Leach, C.S., *Medical results from STS 1-4: analysis of body fluids*. Aviat Space Environ Med, 1983. **54**(12 Pt 2): p. S50-4.
113. Leach, C.S., P.C. Johnson, and P.C. Rambaut, *Metabolic and endocrine studies: the second manned Skylab mission*. Aviat Space Environ Med, 1976. **47**(4): p. 402-10.
114. Norsk, P. and M. Epstein, *Manned space flight and the kidney*. Am J Nephrol, 1991. **11**(2): p. 81-97.
115. Drummer, C., et al., *Body fluid regulation in micro-gravity differs from that on Earth: an overview*. Pflugers Arch, 2000. **441**(2-3 Suppl): p. R66-72.
116. Drummer, C., et al., *Water and sodium balances and their relation to body mass changes in microgravity*. Eur J Clin Invest, 2000. **30**(12): p. 1066-75.
117. Mano, T., *Autonomic neural functions in space*. Curr Pharm Biotechnol, 2005. **6**(4): p. 319-24.
118. Eichler, W., et al., *Changes of interstitial fluid volume in superficial tissues detected by a miniature ultrasound device*. J Appl Physiol, 2000. **89**(1): p. 359-63.
119. Gunga, H.C., et al., *Fluid distribution and tissue thickness changes in 29 men during 1 week at moderate altitude (2,315 m)*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1995. **70**(1): p. 1-5.
120. Klaus, S., et al., *Assessment of fluid balance by measurement of skin tissue thickness during clinical anaesthesia*. Clin Physiol Funct Imaging, 2002. **22**(3): p. 197-201.
121. Eichler, W., et al., *Hypergravity and dehydration-induced shifts of interstitial fluid in the skin monitored by ultrasound*. Aviat Space Environ Med, 2004. **75**(9): p. 760-3.

-
122. Diridollou, S., et al., *Characterisation of gravity-induced facial skin oedema using biophysical measurement techniques*. *Skin Res Technol*, 2000. **6**(3): p. 118-27.
 123. Ryan, T.J., M. Thoolen, and Y.H. Yang, *The effect of mechanical forces (vibration or external compression) on the dermal water content of the upper dermis and epidermis, assessed by high frequency ultrasound*. *J Tissue Viability*, 2001. **11**(3): p. 97-101.
 124. Kunimoto, M., et al., *Neuroeffector characteristics of sweat glands in the human hand activated by regular neural stimuli*. *J Physiol*, 1991. **442**: p. 391-411.
 125. Bini, G., et al., *Thermoregulatory and rhythm-generating mechanisms governing the sudomotor and vasoconstrictor outflow in human cutaneous nerves*. *J Physiol*, 1980. **306**: p. 537-52.
 126. Miyagawa, T., et al., *[Sweating response to abrupt changes in work load]*. *Nippon Seirigaku Zasshi*, 1985. **47**(1): p. 17-24.
 127. Kerassidis, S., *Is palmar and plantar sweating thermoregulatory?* *Acta Physiol Scand*, 1994. **152**(3): p. 259-63.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Studiendesign	12
Abbildung 2: Körperstromkreis	17
Abbildung 3: Bioimpedanzanalyzer	18
Abbildung 4: Platzierung der Elektroden	18
Abbildung 5: Der Aufbau der Haut.....	19
Abbildung 6: Osteoson®	21
Abbildung 7: Markierung der Messpunkte (A,B,C) auf dem Unterschenkel des Probanden.....	22
Abbildung 8: Mittels Osteoson erzeugtes B-mode Bild.....	22
Abbildung 9: Infrarot-Thermometer DermaTemp Model DT-1001-LN	23
Abbildung 10: Messpunkte für die Bestimmung der Hautoberflächentemperatur und des TEWL	24
Abbildung 11: Aufbau der Tewametersonde.....	27
Abbildung 12: Darstellung aller vorhandenen Daten der verschiedenen Messpunkte für die Körpermasse (BM) (fälleweise ausgeschlossen).	32
Abbildung 13: Darstellung der Daten für die Körpermasse (BM) bei listenweisem Fallausschluss für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=4).	33
Abbildung 14: Darstellung der Körpermasse (BM) über den Studienverlauf bei Zusammenfassung des 19. bis 47. Versuchstages für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=8).....	34
Abbildung 15: Prozentuale Darstellung der relativen Körpermasse (relBM) in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=8).	35
Abbildung 16: Prozentuale Darstellung der relativen Körpermasse (relBM) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=8).	37

-
- Abbildung 17: Prozentuale Darstellung des relativen Body-Mass-Index (relBMI) in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=8). 38
- Abbildung 18: Prozentuale Darstellung des relativen Body-Mass-Index (relBMI) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen (L53) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=8). 39
- Abbildung 19: Prozentuale Darstellung des Gesamtkörperwasseranteils an der Körpermasse (relTBW) in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=7). 40
- Abbildung 20: Prozentuale Darstellung des Gesamtkörperwasseranteils an der Körpermasse (relTBW) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen (L53) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=7). 41
- Abbildung 21: Prozentuale Darstellung des Extrazellularwasseranteils vom Gesamtkörperwasser in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=7). 42
- Abbildung 22: Prozentuale Darstellung des Extrazellularwasseranteils am Gesamtkörperwasser in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und Trainingsgruppe (N=7). 43
- Abbildung 23: Prozentuale Darstellung der relativen Schichtdicke an Punkt A (relTT_A) in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen (L1) für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10). 44
- Abbildung 24: Prozentuale Darstellung der relativen Schichtdicke an Punkt A (relTT_A) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen (L53) für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10). 45
- Abbildung 25: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an Punkt B in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10). 46
- Abbildung 26: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an Punkt B in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10). 47

- Abbildung 27: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an Punkt C in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10)..... 48
- Abbildung 28: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an Punkt C in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=10) und die Trainingsgruppe (N=10)..... 49
- Abbildung 29: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an der Stirn in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=4) und die Trainingsgruppe (N=4)..... 50
- Abbildung 30: Prozentuale Darstellung der Schichtdicke an der Stirn ($relTT_F$) in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=4) und die Trainingsgruppe (N=4)..... 51
- Abbildung 31: Prozentuale Darstellung der Körperkerntemperatur in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8)..... 52
- Abbildung 32: Prozentuale Darstellung der Körperkerntemperatur in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8)..... 53
- Abbildung 33: Prozentuale Darstellung der Körperschalentemperatur in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8)..... 54
- Abbildung 34: Prozentuale Darstellung der Körperschalentemperatur in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8)..... 55
- Abbildung 35: Prozentuale Darstellung der Differenz von Körperkern- und Körperschalentemperatur in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8)..... 56
- Abbildung 36: Prozentuale Darstellung der Differenz von Körperkern- und Körperschalentemperatur in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8)..... 57
- Abbildung 37: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der gesamten Körperschale in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8)..... 58

-
- Abbildung 38: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der gesamten Körperschale in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8). 59
- Abbildung 39: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der Handflächen und Fußsohlen in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8). 60
- Abbildung 40: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der Handflächen und Fußsohlen in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8). 61
- Abbildung 41: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der restlichen Körperbereiche in der Anpassungsphase bezogen auf den ersten Tag im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8). 62
- Abbildung 42: Prozentuale Darstellung des transepidermalen Wasserverlusts der restlichen Körperbereiche in der Aufstehphase bezogen auf die letzte Messung im Liegen für die Nicht-Trainingsgruppe (N=8) und die Trainingsgruppe (N=8). 63