

Der Einfluss von Bright Light auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

Sebastian Forstner

Technische Universität München

Zentrum für Prävention und Sportmedizin
an der Technischen Universität München
(Ärztlicher Direktor: Univ.-Prof. Dr. M. Halle)

Der Einfluss von Bright Light auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

Sebastian Forstner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. E. J. Rummeny

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. A. Schmidt-Trucksäss
2. Univ.-Prof. Dr. M. Halle

Die Dissertation wurde am 30.09.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 07.03.2012 angenommen.

Meinen Eltern gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Abkürzungen	VI
1. Einleitung	1
1.1 Licht	1
1.1.1 Licht im historischen Kontext	1
1.1.2 Licht aus dem Blickwinkel von Physik, Physiologie und Chronobiologie	2
1.1.3 Licht in Therapie und Wirtschaft	5
1.1.4 Begriffsbestimmungen und Definitionen	7
1.2 Literaturüberblick zum Thema Licht und Leistungsfähigkeit	8
2. Ziele der Arbeit	12
3. Material und Methoden	13
3.1 Studienplanung	13
3.1.1 Technische und physikalische Daten der Bright Light-Lichtquellen	13
3.1.2 Blue light hazard	14
3.1.3 Retinales Beleuchtungslevel	15
3.1.4 Fragebögen	15
3.1.5 Verhaltensregeln	15
3.1.6 Ethikkommission	16
3.2 Probandenkollektiv	16
3.3 Aufbau der Studie	16
3.3.1 Erster Studienabschnitt	16
3.3.2 Verwendete Fragebögen	18
3.3.3 Zweiter und dritter Studienabschnitt	21
3.4 Statistik	28
3.5 Fallzahlkalkulation	29
4. Ergebnisse	30
4.1 Probandenkollektiv	30
4.2 Fragebögen zur Kontrolle möglicher Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit nach Lichtexposition	30
4.2.1 Situational Motivation Scale (SIMS)	31
4.2.2 Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI)	31
4.2.3 Schlafqualität im Morgenprotokoll	32
4.2.4 Alkoholkonsum	33
4.2.5 Sonnenexposition	33
4.2.6 Training	34
4.3 Vor und nach Lichtexposition ermittelte Parameter	35
4.3.1 Körpertemperatur	35
4.3.2 Karoliska Sleepiness Scale (KSS)	36
4.3.3 Positive and Negative Affect Scale (PANAS)	36
4.4 Fragen zu Licht und Raumklima nach erfolgter Lichtexposition	36
4.5 Reihenfolgeeffekte in Bezug auf Motivation, Bedenken der Probanden und Lerneffekte durch das erste Zeitfahren	40

4.6	Primärer Endpunkt und belastungsbeschreibende Parameter im Zeitfahren	43
4.6.1	Geleistete Arbeit und Reihenfolgeeffekt der Lichtexposition	43
4.6.2	Laktat	46
4.6.3	Herzfrequenz	47
4.6.4	Anstrengungsskala nach Borg	48
4.6.5	Sauerstoffaufnahme (VO_2), Kohlendioxidabatemung (VCO_2) und respiratorischer Quotient (RQ)	49
4.6.6	Körpertemperatur	52
4.7	Fragen zur Ergometrie	53
4.8	Chronotypenverteilung im MCTQ, Schlafdauer und Aufstehzeitpunkt	56
4.9	Belastungszeitpunkt im Kontext des MCTQ	58
4.10	Erzielte Leistungswerte im Kontext des MCTQ	61
5.	Diskussion	64
5.1	Primärer Endpunkt und belastungsbeschreibende Parameter im Zeitfahren	64
5.2	Chronotypenverteilung im MCTQ	68
5.3	Belastungszeitpunkt und Leistung im Kontext des MCTQ	69
5.4	Reihenfolgeeffekte in Bezug auf Motivation, Bedenken der Probanden und Lerneffekte durch das erste Zeitfahren	71
5.5	Fragen zur Ergometrie	72
5.6	Probandenkollektiv	73
5.7	Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren	73
5.8	Vor und nach Lichtexposition ermittelte Parameter	76
5.9	Lichtwahrnehmung	78
5.10	Limitationen und Ausblick	79
6.	Zusammenfassung	82
7.	Anhang	84
7.1	Literaturverzeichnis	84
7.2	Abbildungsverzeichnis	93
7.3	Tabellenverzeichnis	95
7.4	Verwendete Fragebögen	96
7.4.1	Munich Chronotype Questionnaire (MCTQ)	96
7.4.2	Situational Motivation Scale (SIMS)	97
7.4.3	Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI)	98
7.4.4	Morgenprotokoll	102
7.4.5	Alkoholkonsum	103
7.4.6	Sonnenexposition	104
7.4.7	Trainingslogbuch	105
7.4.8	Karolinska Sleepiness Scale (KSS)	106
7.4.9	Positive and Negative Affect Scale (PANAS)	107
7.4.10	Licht und Raumklima	108
7.4.11	Fragebogen zum Pacing der Testfahrt	109

Danksagung	110
Lebenslauf	111

Verwendete Abkürzungen

A	Abb.	Abbildung
B	BL BMI bpm bzgl. bzw.	bright light body mass index beats per minute bezüglich beziehungsweise
C	C ca. cd CIE cm CO ₂	Celsius circa Candela Commission International de l'Éclairage Zentimeter Kohlenstoffdioxid
D	DAV Diag. DL DLMO	Deutscher Alpenverein Diagramm dim light dim light melatonin onset
E	EB EKG etc.	Entwicklungsbereich Elektrokardiogramm et cetera
F	FEV ₁ Fig.	Einsekundenkapazität Darstellung
G	GA I GA II	Grundlagenausdauer I Grundlagenausdauer II
H	h HF	Stunde oder ... Uhr Herzfrequenz
I	IANS	individuelle anaerobe Schwelle
J	J	Joule
K	K Kap kg KG kJ KSS	Kelvin Kapitel Kilogramm Körpergewicht Kilojoule Karolinska Sleepiness Scale
L	l LED LEM lm LMU lx	Liter light emitting diode Lode Ergometry Manager Lumen Ludwig-Maximilians-Universität (München) Lux
M	m m ² MCTQ Max	Meter Quadratmeter Munich ChronoType Questionnaire Maximum

Verwendete Abkürzungen

	Min	Minimum
	ml	Milliliter
	mmol	Millimol
	MSF	mid-sleep on free days
	MSFsc	mid-sleep on free days, sleep corrected
	MW	Mittelwert
N	NIF	non image forming
O	O ₂	Sauerstoff
P	P	power (physikalisches Symbol für Leistung)
	PEF	maximaler expiratorischer Atemstrom
	POMS-BI	Profile of Mood States - bipolar
	PSQI	Pittsburg Sleep Quality Index
Q		
R	RHT	Tractus retinohypothalamicus
	RQ	respiratorischer Quotient
S	s	Sekunde
	s.	siehe
	S.	Seite
	SAD	seasonal affective disorder
	SCN	Nucleus suprachiasmaticus
	SD	Standardabweichung
	SIMS	Situational Motivation Scale
	sog.	sogenannt
	sr	Steradian
T	T1	Termin 1
	T2	Termin 2
	T3	Termin 3
	Tab.	Tabelle
	TF	Trittfrequenz
	TU	Technische Universität (München)
U	usw.	und so weiter
	UV	ultraviolett
V	VAS	visuelle Analogskala
	VC	Vitalkapazität
	VO ₂ max	maximale Sauerstoffaufnahme
	vs.	versus
W	W	Watt
X		
Y		
Z	z. B.	zum Beispiel
	ZHS	Zentraler Hochschulsport
	z. T.	zum Teil

1. Einleitung

1.1 Licht

1.1.1 Licht im historischen Kontext

Die Bibel als das zentrale Schriftstück des christlichen Glaubens beginnt nicht ohne Grund mit dem Bericht über die Erschaffung des Lichts auf der Erde und der Trennung von Licht und Dunkelheit: „Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde. Und die Erde war wüst und leer, und es war finster auf der Tiefe; und der Geist Gottes schwebte auf dem Wasser. Und Gott sprach: Es werde Licht! Und es ward Licht. Und Gott sah, dass das Licht gut war. Da schied Gott das Licht von der Finsternis und nannte das Licht Tag und die Finsternis Nacht. Da ward aus Abend und Morgen der erste Tag.“¹ In dieser ersten, kurzen Passage wird die Wichtigkeit des Lichts für die Welt bereits klar. Es war das Erste, was Gott dem Schöpfungsbericht zufolge erschuf.

Schon lange vor der Niederschrift der Bibeltex te schrieben die Menschen der Sonne als Quelle des Lebens größte Bedeutung zu. Dies drückt sich letztlich auch darin aus, dass es in jeder großen Kultur mindestens eine Gottheit gab, die mit der Sonne assoziiert war. Im alten Ägypten wurden Aton und Re als Sonnengötter verehrt. Horus, als Himmelsgottheit, stand für das Licht selbst. Die Alten Griechen beteten zu Helios, dem Lenker des Sonnenwagens und zu Apollon, der u. a. als Lichtgott galt. Apollon aber war auch bei den Römern bekannt, die außerdem den Sonnengott Sol kannten. Auch außerhalb unseres Kulturkreises war die Verehrung von Sonnengöttern nichts Ungewöhnliches. So gab es bei den Inka den Gott Inti oder Huitzilopochtli bei den Azteken und so ließe sich die Aufzählung nahezu beliebig fortführen.

Seit den frühesten Tagen der Menschheit spielt auch künstliches Licht eine wichtige Rolle. Bis ins frühe 19. Jahrhundert hinein musste man hierfür ausschließlich auf Feuer im weitesten Sinne zurückgreifen. Erst mit der Erfindung der ersten funktionierenden Glühbirnenvorläufer um 1820 und ihrer Weiterentwicklung zu ersten patentierten Versionen um etwa 1880 war der entscheidende Schritt getan. Das moderne Leben, angefangen im Zeitalter der Industrialisierung bis in die heutigen Tage, ist in seiner Entwicklung und Existenz abhängig von der Erfindung elektrischen Lichts. Ohne künstliches Licht, das uns in gewisser Weise unabhängig vom natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus macht, ist das heutige Leben schier nicht mehr denkbar. Wie bereits dargestellt, beschäftigte sich aber die Menschheit schon lange vor Anbruch der modernen Zeiten mit

dem Thema Licht. Was also charakterisiert diesen wichtigen Baustein menschlichen Lebens und worin liegt seine Bedeutung für den Menschen selbst?

1.1.2 Licht aus dem Blickwinkel von Physik, Physiologie und Chronobiologie

Licht rein physikalisch betrachtet und definiert, ist nichts anderes als elektromagnetische Strahlung. Der für das menschliche Auge sichtbare Teil dieser Strahlung erstreckt sich über einen Wellenlängenbereich von ungefähr 380-780 nm. Kürzere Wellenlängen sind bekannt als ultraviolettes oder UV-Licht (380-280 nm) bis hin zur Röntgenstrahlung, während der sich anschließende längerwellige Bereich als Infrarotstrahlung (780 nm-1 μm) bis hin zu Radiowellen bezeichnet wird. Allgemein gilt: je kürzer die Wellenlänge, desto energiereicher das Licht. Zerlegt man das weiße Tageslicht mittels eines Primas in seine Bestandteile, werden die einzelnen Spektralfarben sichtbar: violett (380-420 nm), blau (420-490 nm), grün (490-575 nm), gelb (575-585 nm), orange (585-650 nm) bis hin zu rot (650-750 nm). Die angegebenen Zahlen stellen keine starren Absolutwerte dar, vielmehr besteht sowohl zwischen den Spektralfarben als auch an den Grenzen des sichtbaren Spektrums ein fließender Übergang.

Ein höchst interessantes Konzept zur Charakterisierung von Licht ist das des Welle-Teilchen-Dualismus. Es beschreibt die Tatsache, dass Licht sowohl Eigenschaften einer Welle als auch von klassischen Teilchen aufweist. 1802 führte Thomas Young sein berühmtes Doppelspaltexperiment durch. Lässt man monochromatisches, kohärentes Licht durch eine Doppelspaltblende fallen, ergibt sich auf dem Beobachtungsschirm ein Interferenzmuster, das man genauso bei der Versuchsdurchführung z. B. mit Elektronen und anderen Teilchen erhält. Die zweite Beobachtung zur Erklärung des Welle-Teilchen-Dualismus war der von Arthur Compton 1922 beobachtete Effekt, der bei Streuung von Photonen an geladenen Teilchen wie z. B. Elektronen auftritt: Die austretende Streustrahlung weist dabei eine größere Wellenlänge auf, ist also energetisch schwächer, als die einfallende Strahlung. Im Prinzip ähnliches geschieht beim photoelektrischen Effekt, beobachtet 1887 durch Hertz und Hallwachs. Dieser beschreibt die Absorption eines Photons durch ein Elektron und das Herauslösen dieses Elektrons aus seiner Bindung im Atom.

Licht vom biologischen Standpunkt aus gesehen, ist neben relativ wenigen chemischen Elementen eine *der* Grundzutaten für die Entstehung von Leben auf der Erde. Angefangen bei den Vorgängen der Photosynthese, bis hin zur Entstehung höher entwickelter

Lebewesen ist Licht an fast allen Lebensvorgängen auf der Welt in irgendeiner Form beteiligt. Für den Menschen hat Licht vor allem in zweierlei Hinsicht fundamentale Bedeutung:

Die offensichtlichere Funktion von Licht besteht in der Vermittlung visueller Information. Durch Einfall von Licht ins Auge wird in den Zapfen und Stäbchen der Retina ein erstes elektrisches Signal generiert, das von retinalen Ganglienzellen vorverarbeitet, dem visuellen Cortex zugeführt und dort entsprechend interpretiert und mit Bedeutung belegt wird.

Die viel weniger bekannten Einflüsse von Licht erstrecken sich auf so wichtige Funktionen des Körpers wie zum Beispiel Teilschritte der Synthese von Vitamin D in der Haut. Weit umfassender und tiefgreifender noch ist aber die Auswirkung von Licht auf die tägliche Synchronisation des Körpers mit der Umwelt durch den regelmäßigen Wechsel von Tag und Nacht. Seit dieser Aspekt vor gut zwei Jahrzehnten ins Interesse der wissenschaftlichen Forschung gerückt ist, gilt Licht als der maßgebliche Stimulus für letztlich alle zirkadianen Rhythmen des menschlichen Körpers, angefangen bei Schlaf-Wach-Rhythmen bis hin zu endokrinen Funktionen, wie dem in Abhängigkeit der Tageszeit schwankenden Cortisol- und Melatoninspiegel und der Tagestemperaturkurve. Alle durch Licht mediierten Effekte, die nicht mit der Vermittlung visueller Information verbunden sind, werden unter dem Begriff der nicht bildgebenden Effekte, der sog. non image-forming effects (NIF-Effekte) zusammengefasst.

Was aber ist das anatomische Korrelat der äußerst vielgestaltigen NIF-Effekte? Den Untersuchungen zu NIF-Effekten und deren physiologisch-anatomischen Korrelats am Menschen gingen Studien zu diesem Thema an Säugetieren voraus. Bereits 1984 konnte eine Gruppe um Takahashi die spektrale Empfindlichkeit eines photosensitiven Systems im Hamster, das für die Abstimmung von circadianen Rhythmen verantwortlich ist, auf Frequenzen um 500 nm näher eingrenzen.⁹⁵ Es folgten Arbeiten von Freedman et al. und Lucas et al., die im Mausmodell die Existenz eines photosensitiven Systems bewiesen, das als komplett unabhängig vom bisher bekannten Stäbchen- und Zapfensystem der Retina zu sehen ist.^{40, 70} Selbst Mausmutanten ohne funktionierendes Stäbchen- und Zapfensystem zeigten sich in Form von Verhaltensänderungen sensitiv gegenüber Lichtstimuli. 2000 und 2002 zeigten Provencio et al. bzw. Hattar et al. und Berson et al. die Existenz des Photopigments Melanopsin in der menschlichen Retina auf, das strukturell und funktionell deutliche Unterschiede zu den bisher bekannten Pigmenten in Stäbchen und Zapfen aufweist. Die intrinsisch photoaktiven retinalen Ganglienzellen

(ipRGC), die dieses Pigment enthalten, können funktionell unabhängig von synaptischem Input durch Stäbchen und Zapfen arbeiten und projizieren über den Tractus retinohypothalamicus (RHT) auf den Nucleus suprachiasmaticus (SCN), der als primärer zirkadianer Schrittmacher im Hypothalamus gilt, sowie über das Rückenmark und den sympathischen Grenzstrang zur Glandula pinealis.^{12, 43, 83, 101, 102} Perez-Leon et al. gelang allerdings auch der Nachweis von synaptischem Input von Stäbchen und Zapfen auf ipRGCs⁸¹ und Belenky et al. konnten synaptische Verbindungen zwischen ipRGCs und bipolaren sowie amakrinen Zellen nachweisen¹¹.

Unter experimentellen Bedingungen konnten Czeisler et al. zeigen, dass endogene, zirkadiane Rhythmen beim Menschen im Durchschnitt eine Periodik von 24,18 Stunden aufweisen.²⁶ Die Periodik zeigte sich sowohl in einem Freilaufprotokoll ohne jeglichen zeitlichen Anhaltspunkt für die Probanden, als auch in Desynchronisationsprotokollen von deutlich über bzw. unter 24 Stunden Länge pro Versuchs-„Tag“ mit festgelegten Schlaf- und Wachphasen. Maßgebliche Pionierarbeit auf diesem Sektor leisteten Aschoff^{6, 7} sowie Kleitman⁵⁸. Obige Erkenntnis impliziert, dass täglich über externe Stimuli, allen voran Licht, eine Synchronisation des Körpers mit der Umwelt erforderlich ist. Je nachdem zu welchem Zeitpunkt ein solcher externer Stimulus auf den Organismus einwirkt, hat er mehr oder weniger große Auswirkungen im Sinne eines nach vorne Stellens oder eines zurück Stellens der inneren Uhr. Dieses Verhalten ist in sog. Phase-Response-Characteristics darstellbar⁵⁵. So kann ein gegebener Lichtstimulus mit entsprechender Lichtintensität, Dauer und spektraler Zusammensetzung am frühen Morgen eine gewisse Phasenverschiebung nach vorne bewirken, derselbe Lichtstimulus am späten Abend jedoch eine Phasenverzögerung.

Die natürliche Phasenlage eines Individuums in einem 24h-Tag zeigt große interindividuelle Unterschiede, die in Form des sog. Chronotyps angegeben werden kann. Der Chronotyp ist maßgeblich abhängig von Faktoren wie Alter, Geschlecht und in geringem Maße weiteren, genetisch determinierten Variablen. Rönneberg et al. entwickelten mit dem Munich ChronoType Questionnaire (MCTQ) ein einfach anzuwendendes Instrument zur Bestimmung des Chronotyps.⁸⁷ Angegeben wird er als Zahlenwert, der die Mitte der persönlichen Nacht an freien Tagen (definiert als Tage frei von sozialen Zwängen und Wecker, die ein freies Aufwachen morgens einschränken würden), korrigiert für das während der Arbeitswoche angesammelte Schlafdefizit, angibt. Er trägt die Abkürzung MSF_{sc}, was für „mid sleep on free days, sleep corrected“ steht. Unter der weiblichen Bevölkerung finden sich v. a. zwischen Pubertät und Menopause deutlich

frühere Chronotypen als bei den Männern gleichen Alters. Zudem wurde eine rein vom Lebensalter abhängige Verschiebung des Chronotyps festgestellt. Bei Kindern finden sich besonders viele frühe Typen, die bis zum Alter von ca. 20 Jahren immer später werden um mit zunehmendem Alter wieder zu früheren Typen zurückzukehren.

Bei zahlreichen der oben dargestellten Phänomene und NIF-Effekte konnte während der letzten Jahre eine besonders hohe Empfindlichkeit biologischer Systeme gegenüber kurzweiligem Licht gezeigt und darunter größere Effekte erzielt werden.^{68, 86, 103, 104, 111}

1.1.3 Licht in Therapie und Wirtschaft

Mit den im letzten Abschnitt dargestellten Erkenntnissen im Hinterkopf wundert es nicht, dass bereits bald nach Entdeckung erster Hinweise auf Beeinflussbarkeit der menschlichen inneren Uhr durch Licht Überlegungen angestellt wurden, in wieweit Licht zu therapeutischen Zwecken eingesetzt werden könnte. Eines der wohl bekanntesten Beispiele hierfür stellt die sog. Winterdepression, auch Winterblues oder Seasonal Affective Disorder (SAD) genannt, dar. Eastman, Lewy und Terman, jeweils mit Kollegen, zeigten in 3 größeren klinischen Studien die Effektivität von Lichteinsatz (2500-10000 lx für 30-120 min) am frühen Morgen auf. Hierunter wurden jeweils bessere Symptomreduktion und höhere Remissionsraten erreicht als z. B. unter Exposition am Abend oder unter Mischprotokollen. Es bleibt festzuhalten, dass bei höheren Beleuchtungsstärken kürzere Expositionsdauern angewandt wurden und umgekehrt um ähnliche Effektgrößen zu erzielen.^{36, 66, 98} Bei differenzierter Betrachtung der verwendeten Lichtqualitäten kamen Glickman et al. sowie Oren et al. und Desan et al. vor gut zehn Jahren zu dem Ergebnis, dass sich vor allem mit Licht im grünen und blauen Bereich des sichtbaren Spektrums deutlich größere Effekte erzielen lassen als mit roten Lichtquellen.^{32, 41, 78} Diese Befunde konnten Strong et al. 2009 bestätigen. Zudem beschreiben sie höhere Responderraten unter der Behandlung mit blauem Licht als unter rotem.⁹⁴ Ein signifikanter Effekt von UV-Strahlung auf depressive Symptome konnte dagegen nicht nachgewiesen werden. Aus diesem Grund wird von der Verwendung potentiell gesundheitsschädlicher UV-Strahlung zur SAD-Behandlung abgeraten.^{59, 64} Erstaunlicherweise hat sich die Lichttherapie der SAD sogar als ebenso effektiv erwiesen wie die medikamentöse Therapie mit Fluoxetin. Ersterem Ansatz ist sogar noch ein schnelleres Ansprechen der Patienten und ein geringeres Nebenwirkungsspektrum zugute zu halten.^{60,}

Einen weiteren, im weitesten Sinne therapeutischen Ansatz stellt die Verwendung von Licht zur Symptomabschwächung oder gar Verhinderung von Jetlag nach Reisen über mehrere Zeitzonen dar. Stellte sich 1995 die Datenlage zu diesem Thema noch dünn und uneinheitlich dar¹⁵, konnten im darauf folgenden Jahrzehnt wesentliche Fortschritte auf diesem Gebiet erzielt werden.^{18, 35} In verschiedenen Protokollen, denen jeweils der tageszeitlich gezielte Einsatz von Lichtexposition gemeinsam ist, konnten deutliche Phasenverschiebungen des subjektiven und objektiven Tag-Nacht-Rhythmus erzielt werden. Gemessen wurden Lage und Ausmaß der Phasenverschiebung meist mittels des sog. „dim light melatonin onset“ (DLMO), dem bei Dunkelheit ansteigenden Melatoninspiegel (objektiv) und geeigneten Fragebögen (subjektiv). In einigen Studien wurde zusätzlich zeitlich abgestimmt exogen zugeführtes Melatonin eingesetzt, um den Effekt zu unterstützen.^{80, 91}

Ähnlich dem Jetlag ist die Belastung zu bewerten, der sich Nacht- und Wechselschichtarbeiter ausgesetzt sehen: über 24 Stunden verteilt, von Tag zu Tag wechselnde Arbeitszeiten bzw. die kontinuierlich konkurrierenden Anforderungen von Nachtarbeit und privatem Tagelben. Hiervon sind alle sozialen Schichten von der Reinigungskraft, dem U-Bahnfahrer oder Bäcker, bis hin zum Fluglotsen oder auch dem medizinischen Personal in Krankenhäusern betroffen. Wie auch beim Thema Jetlag warf die Literatur zum Zeitpunkt der Erarbeitung des Consensus Reports „Light treatment for sleep disorders“ (1995) im Bereich Schichtarbeit noch größere Fragen auf.³⁴ Während der folgenden Jahre experimentierten Horowitz und Kollegen mit konstanten Beleuchtungsstärken von 2500 lx vs. 150 lx während simulierter Nachtschichten und festgelegten vs. freien Schlafzeiten unter Tags. Vor allem die 2500 lx-Lichtintervention zeigte sich hierbei als effektiv. Der Schlafzeitraum zeigte nur untergeordneten Einfluss. Obwohl bedeutende Phasenverschiebungen erreicht werden konnten, erreichte keine der Interventionskombinationen eine komplette Verlagerung des DLMO in die Schlafphase am Tage.⁴⁷ Bei Crowley et al. kam ein ähnliches, jedoch insgesamt komplexeres Interventionsmuster zum Einsatz. Es wurden 4-5 Lichtpulse von 5000 lx pro Nachtschicht vs. 150 lx Dauerbeleuchtung gegeben. Zusätzlich wurden diese Bedingungen mit dem Einsatz von Sonnenbrillen für den Nachhauseweg und/oder Melatonin kombiniert. Besonders Arbeiter mit früher, natürlicher Phasenlage profitierten von der 5000 lx-Kondition, wobei sich durch Melatonin kein weiterer Benefit erzielen lies.²⁵ In neuesten Studien wurde schließlich versucht, die Interventionen so zu optimieren, dass eine möglichst gute Balance aus optimierter Arbeitsleistung und bestmöglichem Befinden an freien Tagen

erreich werden kann. Hierbei kristallisierte sich ein Schema aus intermittierenden Lichtpulsen hoher Beleuchtungsstärke während der Nacht (3500 lx), möglichst dunklen Sonnenbrillen für den Nachhauseweg, eine relativ baldige Schlafphase in Dunkelheit und nachmittägliche Lichtexposition im Freien als optimal wirksam heraus. Hiermit wird ein DLMO gegen drei Uhr nachts und damit eine Verlagerung der „müdesten Tagesphase“ auf ca. zehn Uhr vormittags erreicht.^{63, 92}

Licht spielt nicht nur im Kontext von Nacht- und Wechselschichtarbeit eine wichtige Rolle, sondern hat auch wesentliche Bedeutung bei Tagarbeit in Industrie- und Bürosettings. So konnte gezeigt werden, dass unter optimierten Lichtverhältnissen an Arbeitsplätzen z. B. in der Elektroindustrie eine signifikante Beschleunigung des Arbeitsprozesses bei unverändert niedriger Fehlerrate und eine insgesamt 4,5 % höhere Produktivität erreicht werden kann.^{51, 52} Dabei lassen die Autoren allerdings offen, ob die erhobene Verbesserung allein auf verbesserte visuelle Verhältnisse oder auch auf photobiologische Effekte zurückzuführen ist. Mills et al. und Viola et al. führten ihre Arbeiten in einer Büroumgebung durch. Auf zwei verschiedenen Etagen verglichen sie jeweils weiße Leuchtstofflampen mit hohem Blauanteil (17000 K) mit normalem Bürolicht bzw. im blauen Spektralbereich weniger stark angereicherten Leuchten (4000 K). Erstere Studie konnte ein verbessertes Konzentrationsvermögen, weniger Übermüdung bzw. verbesserte Aufmerksamkeit, weniger Tagesmüdigkeit und erhöhte Arbeitsleistung und eine bessere psychische Verfassung der Arbeiter zeigen,⁷¹ letztere verbesserte subjektive Leistung und Aufmerksamkeit, weniger Erschöpftheit am Abend, Reizbarkeit, Konzentrationsschwierigkeiten und Verschwommensehen.¹⁰⁵

1.1.4 Begriffsbestimmungen und Definitionen

Im folgenden Abschnitt sollen häufig gebrauchte Begriffe im Zusammenhang mit Licht und Beleuchtung erläutert und definiert werden, um eine ausreichende Basis an nötigen Fachbegriffen zu schaffen.

Die Lichtstärke ist die offizielle SI-Basisgröße für das Licht. Definiert ist sie als die in eine bestimmte Richtung ausgesendete monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz mit einer Strahlstärke von 1/683 W/sr. Anschaulicher ausgedrückt ist die Lichtstärke der Lichtstrom, der von einem Punkt aus pro Einheit Raumwinkel in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird. Sie trägt die Einheit Candela [cd] und kann auch als lm/sr geschrieben werden.

Der Lichtstrom trägt die Einheit Lumen [lm]. Eine punktförmige Lichtquelle der Lichtstärke 1 cd erzeugt in 1 m Abstand auf jedem Quadratmeter einer sie umgebenden Kugeloberfläche einen Lichtstrom von 1 lm. Die Einheit lm entspricht dabei $\text{cd} \cdot \text{sr}$.

Die Beleuchtungsstärke trägt die Einheit Lux [lx], welche zusammengesetzt geschrieben werden kann als lm/m^2 . Sie ist definiert als die gesamte Menge an Licht, welche aus der vorderen Hemisphäre auf einen Punkt auf einer (gedachten oder realen) Fläche fällt. Ein Punkt auf einer Oberfläche erhält 1 lx Beleuchtungsstärke, wenn eine punktförmige Lichtquelle in 1 m Entfernung eine Lichtstärke von 1 cd besitzt.

Ein im Zusammenhang mit Lichtquellen oft verwendeter und ebenso oft missverständlich erklärter Begriff ist der der Farbtemperatur. Ihre Maßeinheit ist das Kelvin. Um das Konzept der Farbtemperatur zu begreifen, muss man zuerst den sog. „Schwarzen Strahler“ verstehen. Der Schwarze Strahler ist ein idealisierter Körper, der elektromagnetische Strahlung, egal welcher Wellenlänge, vollständig absorbiert, also keinerlei Reflexion oder Streuung aufweist. Zugleich gilt er als idealisierte Strahlungsquelle. Per definitionem kann kein realer Körper bei gleicher Temperatur mehr Strahlung emittieren als ein Schwarzer Strahler. Das von ihm emittierte Spektrum ist dabei in seiner Zusammensetzung abhängig von seiner Temperatur. Nimmt die Temperatur des Strahlers zu, so verschiebt sich das Maximum des ausgesendeten Strahlungsspektrums hin zu kürzeren Wellenlängen. Für das sichtbare Spektrum bedeutet das eine Verschiebung von einem eher rötlich-gelben Seheindruck hin ins weiß-bläuliche. Für Lichtquellen lässt sich der erzeugte optische Farbton des abgegebenen Lichts als Temperatur eines entsprechend aufgeheizten Schwarzen Strahlers angeben. Anders ausgedrückt lässt sich sagen: Als Farbtemperatur bezeichnet man diejenige Temperatur, die ein Schwarzer Strahler haben müsste, damit dessen Licht denselben Farbeindruck erweckt wie die tatsächlich vorhandene Beleuchtung. Zu jeder Farbtemperatur gibt es ein fest definiertes Strahlungsspektrum, das ein Schwarzer Körper bei der jeweiligen Temperatur von sich gibt. Das Intensitätsmaximum der Strahlung eines 5500 K heißen Schwarzen Strahlers entspricht z. B. ungefähr dem Seheindruck von hellem Sonnenlicht am Mittag.

1.2 Literaturüberblick zum Thema Licht und Leistungsfähigkeit

Bislang sind in der Literatur nur sehr wenige Arbeiten zu finden, die sich überhaupt mit der Beeinflussung körperlicher Leistungsfähigkeit durch Licht befassen. Keine jedoch

untersuchte bisher den Einfluss von Licht auf die Ausdauerleistungsfähigkeit mit einem Expositionsprotokoll, das sowohl vor als auch während der ergometrischen Belastung eine entsprechende Lichtexposition vorsieht.

Zhang und Tokura untersuchten den Einfluss von Lichtexposition (5000 lx vs. 50 lx) für acht Stunden am Vortag auf die Anzahl von am folgenden Morgen geleisteten Handkontraktionen gegen einen Widerstand von 10 % der zuvor ermittelten maximalen Handkraft¹¹³. Nach der 5000 lx-Exposition am Vortag absolvierten die Probandinnen signifikant mehr Kontraktionen. Gleichzeitig wiesen sie sowohl tags als auch nachts niedrigere rektale Temperaturwerte auf, was von den Autoren auf eine Erniedrigung des Sollwerts für die Körperkerntemperatur durch die Lichtexposition zurückgeführt wurde. Die unter der 50 lx-Kondition ermittelten, um 0,2-0,25 °C höheren Temperaturwerte wurden in Anlehnung an andere Arbeiten (^{38, 46, 77}) als möglicher, die Leistung begrenzender Faktor diskutiert. Eine Limitation der Studie besteht in der fehlenden Exposition gegenüber der 5000 lx-Kondition während des Kontraktionstests selbst. Hier wurde in allen Fällen lediglich auf die als Kontrollbedingung verwendeten 50 lx zurückgegriffen. Weitere Einschränkungen bestehen in der geringen Probandenzahl von lediglich acht Teilnehmerinnen sowie der relativ geringen Muskelmasse, die bei den Tests involviert war.

Ohkuwa et al. verglichen den Effekt von Beleuchtung mit zwei Lichtintensitäten (5000 lx vs. 50 lx) auf supramaximale, fahrradergometrische Belastungen und dabei auftretende metabolische Veränderungen⁷⁵. Zehn Langstreckenläufer wurden 90 Minuten entweder mit 5000 lx oder 50 lx exponiert und absolvierten anschließend einen 45-sekündigen, supramaximalen Test auf dem Fahrradergometer unter 500 lx Beleuchtung. Bestimmt wurden die Durchschnittsleistung über 45 s sowie Laktat, Blutzucker, Ammoniak, Adrenalin und Noradrenalin direkt nach Lichtexposition und nach der Ergometrie. Es konnte kein Unterschied in der Gesamtleistung über 45 s detektiert werden. Die nach 90-minütiger Exposition mit 5000 lx ermittelten Adrenalinlevel lagen vor der Belastung signifikant niedriger als in der 50 lx-Kondition. In den ersten Minuten unmittelbar nach Belastung fanden sich ebenso signifikant geringere Glukosewerte im 5000 lx-Arm der Studie. Die Autoren diskutierten letzteren Befund im Sinne einer höheren Glukoseaufnahme der Zellen bzw. einer geringeren Glykogenspaltung infolge des Lichteinflusses. Ebenso machen sie die vor Ergometriebeginn niedrigeren Adrenalinlevel für die erniedrigte Blutglukose nach Belastung verantwortlich. Limitationen der Studie liegen unter anderem in der möglicherweise etwas zu kurzen Lichtexposition vor

Belastung und der komplett fehlenden Fortführung der Lichtexposition während der Ergometrie begründet. Zudem ist eine fahrradergometrische, supramaximale Kurzzeitbelastung von Langsteckenläufern nicht als das ideale Ergometrieprotokoll anzusehen, auch wenn diese einen sehr guten Trainingszustand aufwiesen (5000 m in $15,4 \pm 0,1$ min). Weiterhin bleibt fraglich, ob ultrakurze Belastungen einer Beeinflussung durch Lichtexposition grundsätzlich überhaupt zugänglich sind. Einen weiteren kritischen Punkt stellt die mit lediglich zehn Studienteilnehmern geringe Probandenzahl dar. O'Brien und O'Connor befassten sich mit den Auswirkungen verschiedener Beleuchtungsstärken (1411 lx, 2788 lx, 6434 lx retinale Exposition) auf die erbrachte Leistung, Herzfrequenz, Muskelschmerzen, lokale Erschöpfung, Sauerstoffaufnahme, Wachheitsgrad und Stimmung (POMS-BI) in mehreren 20-minütigen Zeitfahrsimulationen⁷⁴. Zwölf wettkämpferfahrene Radsportler absolvierten hierzu nach einer Gewöhnungsfahrt unter Raumlicht insgesamt drei weitere 20-minütige Zeitfahrsimulationen auf dem Fahrradergometer. Die Lichtexposition während der Ergometrie wurde in randomisierter Reihenfolge mittels unterschiedlicher Sonnenbrillen variiert (Glasfarbe und Filterfraktion). Die Teilnehmer waren verblindet bzgl. des wahren Studienziels, die Untersucher bzgl. des Filterverhaltens der Brillen. Im Vergleich der drei Testfahrten unter Lichtexposition konnten die Autoren insgesamt keine signifikant unterschiedlichen Leistungswerte nachweisen. Allerdings konnte für die Ergometrieleistung ein signifikanter Reihenfolgeeffekt zwischen der ersten und der dritten Lichtfahrt gezeigt werden, dessen Grund von den Autoren aber nicht näher benannt werden konnte. Die restlichen erhobenen Parameter blieben ohne statistisch signifikanten Unterschied. Trotz weitgehend gut kontrollierter Studienbedingungen weist auch diese Arbeit mehrere Limitationen auf: Eine Lichtexposition fand nur während der Ergometrien statt, die mit 20 Minuten Dauer zwar der gewöhnlichen Wettkampfbelastung der Probanden entsprachen, für eine Beeinflussung des Organismus durch Licht aber wahrscheinlich als zu kurz angesehen werden muss. Die Ergometrien fanden zwischen 8:00 h und 18:00 h statt, was unter chronobiologischen Gesichtspunkten ein extrem breites Zeitfenster darstellt. Eine weitere Limitation stellt die relativ kleine Probandenzahl von lediglich zwölf Studienteilnehmern dar. Die Aufwärmphase wurde nur insofern genormt, als die Probanden sich unterhalb der Grenze von 200 W Belastung bewegen mussten. Zudem lagen zwischen den Belastungen z. T. nur zwei Tage. Die Probanden hatten weiterhin während der Ergometrien Einblick in die Anzeigen von Trittfrequenz, momentaner Leistung, Herzfrequenz und der bereits verstrichenen Zeit. Diese Informationen können die Er-

gebnisse beträchtlich verzerren. So wurde ein letztlich unerklärter Reihenfolgeeffekt zwischen der jeweils ersten Lichtfahrt und den beiden folgenden festgestellt. Der Kritikpunkt, dass die Autoren relativ viele Testfahrten im Studienprotokoll vorsahen, wurde – zumindest mutmaßlich – mittels gut durchdachter Motivationsanreize kompensiert.

Insgesamt wird mit der obigen Darstellung deutlich, dass der derzeitige Stand der Literatur noch zahlreiche Fragen bezüglich der Möglichkeit der Beeinflussung menschlicher Ausdauerleistungsfähigkeit durch Licht unbeantwortet lässt. Vor dem Hintergrund der vorhandenen Erkenntnisse sollen nun einige dieser noch offenen Fragen mit einem bis dato völlig neuen Studienprotokoll untersucht und beantwortet werden.

2. Ziele der Arbeit

Die eingangs zitierten Forschungsergebnisse zur Beeinflussung verschiedener körperlicher Funktionen des menschlichen Organismus durch Licht lassen vermuten, dass spektral speziell gewichtetes, helles Licht relativ hoher Farbtemperatur (Bright Light, BL) auch einen Einfluss auf die körperliche Ausdauerleistungsfähigkeit haben könnte. Das primäre Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss einer Exposition mit Bright Light vor und während einer Ausdauerbelastung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zu quantifizieren. Hierzu sollen die direkte ergometrische Leistungsmessung, sowie die Bestimmung ausgewählter physiologischer Messgrößen herangezogen werden.

3. Material und Methoden

3.1 Studienplanung

3.1.1 Technische und physikalische Daten der Bright Light-Lichtquellen

Vor dem Hintergrund, dass sowohl die Beleuchtungsstärke, als auch die spektrale Zusammensetzung bzw. die Farbtemperatur einer Lichtquelle bei dem Maß der Beeinflussung des menschlichen Organismus eine Schlüsselrolle spielen (\rightarrow siehe Abschnitt 1), wurde bei der Auswahl einer geeigneten Lichtquelle für die Experimente speziell auf diese Punkte geachtet. Das EnergyLight® HF3309 von Philips stellte den besten Kompromiss aus Lichtausbeute, deren spektraler Zusammensetzung und einer möglichst einfachen Handhabung dar.

Im HF3309 werden pro Gerät zwei original PL-L 36 W Philips EnergyLight® Lampen eingesetzt. Vom Hersteller wird die Beleuchtungsstärke in 60 cm Entfernung mit 2500 lx für ein einzelnes Gerät angegeben. Die Lampen emittieren Licht mit einer Farbtemperatur von 5000 °K Licht über das gesamte sichtbare Spektrum. Die spektrale Verteilung ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

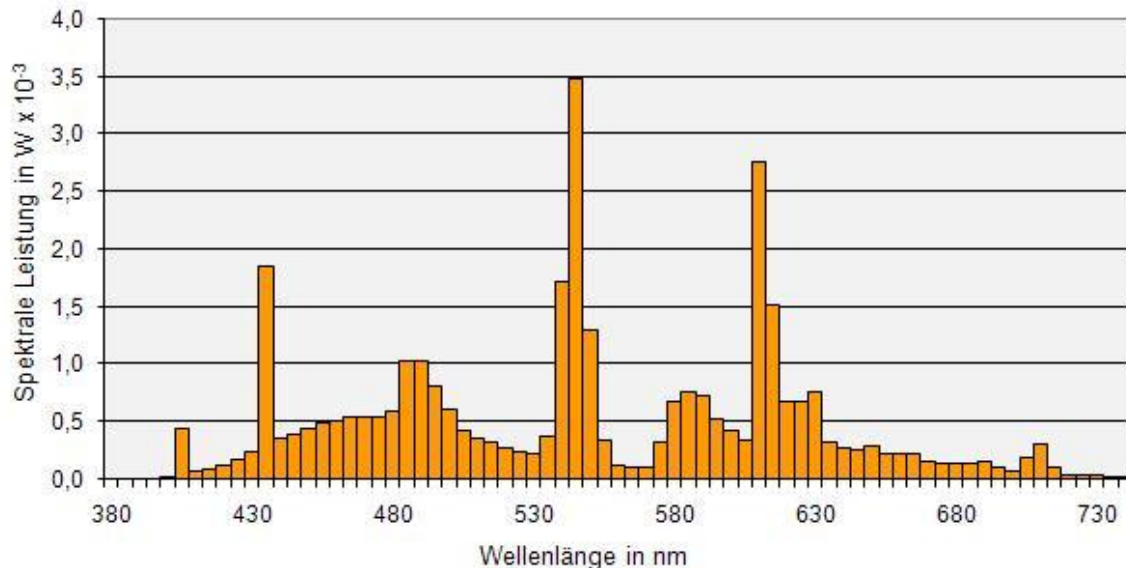


Abbildung 3.1: Spektrale Verteilung der PL-L 36W Philips EnergyLight® Lampen
In y-Richtung ist die im Licht pro 5nm-Interval enthaltene Energie pro Sekunde aufgetragen [W].

Das 33x57x18 cm messende Gerät besteht größtenteils aus einem Diffusorschirm, der mit einem UV-Filter ausgestattet ist und für eine gleichmäßige Streuung des Lichts sorgt. Um eine Beeinflussung der Probanden zu vermeiden, waren sämtliche Einstellknöpfe und Displays in einer kleinen, verschließbaren Metallbox am Lampenfuß verborgen. Zudem waren sowohl Firmenname als auch Modellbezeichnung und sämtliche anderen Aufschriften entfernt worden.

3.1.2 Blue light hazard

Das so genannte „blue light hazard“ bezeichnet die das Auge potentiell gefährdende Wirkung von kurzwelligem Licht zwischen 400 und 500 nm Wellenlänge. Grundlage der von uns durchgeführten Risikobewertung stellt der CIE-Standard S 009/E (2002)⁴ dar. Gemäß dieses Standards darf die nach blauem Licht gewichtete Strahldichte L_B für Lichtquellen mit einer Wellenlänge λ zwischen 300 und 700 nm $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ bei Expositionsdauern bis 10000 s (=166,67 min) nicht übersteigen. Mit den Spezifikationen der von uns verwendeten EnergyLights wird für L_B ein Wert von ca. $7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ erreicht, was das Risiko für das Auge durch die Lichteinwirkung Schaden zu nehmen als rein theoretisch erscheinen lässt.

Für die vorliegenden Experimente ist die Gesamtexpositionszeit allerdings nicht auf 10000 s limitiert, sondern übersteigt sie um ca. 540 s (120 min Vorexposition, 10 min Aufwärmphase, 40 min Zeitfahren, 5 min cool down; entsprechend 10540 s). Für solche Fälle legt der CIE-Standard fest, dass das Produkt aus Zeit (t) und nach blauem Licht gewichtete Strahldichte (L_B) den Wert von $10^6 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ nicht übersteigen darf. Im konkreten Beispiel also:

$$t \cdot L_B = 10540 \text{ s} \cdot 7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$$

$$t \cdot L_B = 73780 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$$

Damit liegt auch dieser Wert um ca. einen Faktor 13 unterhalb der im CIE-Standard festgelegten Schwelle für eine Gefährdung des menschlichen Auges durch Licht im kurzwelligen Spektralbereich des sichtbaren Lichts.

Der CIE-Standard unterscheidet weiterhin vier Risikogruppen, nämlich die exempt group, low-, medium- und high-risk group. Die verwendeten Lichtquellen in dieser Studie fallen in die exempt group, was impliziert, dass von diesen keinerlei photobiologische Gefährdung im Hinblick auf die im CIE-Standard S 009/E (2002) festgelegten Endpunkte ausgeht.

3.1.3 Retinales Beleuchtungslevel

Bei der Planung sowohl der Vorexposition als auch der Beleuchtung während der Ergometrie wurde darauf geachtet, außer den Testlichtquellen so wenig andere Beleuchtung wie möglich zu betreiben. Im Falle der zweistündigen Vorexposition konnte diese Maßgabe zur Gänze eingehalten werden. Auf Augenhöhe des Probanden wurden in der bright light-Kondition (BL) ca. 4420 lx erreicht; in der dim light-Kondition (DL) waren es lediglich 230 lx. Während der Ergometrie musste ein Teil der Deckenbeleuchtung im Testlabor eingeschaltet werden, um überall im Ergometrieraum genug Licht zum Arbeiten zu haben. Diese für sich alleine betrieben erbrachte auf Augenhöhe des Probanden ca. 125 lx. In der BL-Kondition wurde während der ergometrischen Belastung insgesamt ein retinales Beleuchtungsniveau von ca. 4045 lx erzielt, in der DL-Kondition ca. 265 lx.

3.1.4 Fragebögen

Um die diversen Einflussfaktoren auf die Prüfergebnisse möglichst gut kontrollieren zu können, wurden zahlreiche Fragebögen verwendet (nähere Ausführungen hierzu s. Kap. 3.3.2). Wo dies möglich war, wurden standardisierte und validierte Fragebögen verwendet (PSQI, KSS, MCTQ, PANAS, SIMS). An anderer Stelle kamen Fragebögen zum Einsatz, die nicht standardisiert sind, aber im klinischen Alltag weit verbreitet Anwendung finden (Morgenprotokoll, Abendprotokoll) und uns für unsere Zwecke z. B. von der Klink für Psychiatrie des Klinikum Rechts der Isar der TU München empfohlen wurden. Andere hingegen wurden eigens für die Testdurchführung entworfen (Alkoholkonsum, Sonnenexposition, Trainingstagebuch, Lichtperzeption und Raumklima, Fragen zur Ergometrie).

3.1.5 Verhaltensregeln

Die Hinweise zum gewünschten Verhalten der Teilnehmer während der Studienteilnahme wurden den Probanden schriftlich vorgelegt und gegen Unterschrift ausgehändigt. Die wichtigsten Verhaltensregeln werden im Abschnitt 3.3.3.1 im Einzelnen aufgeführt.

3.1.6 Ethikkommission

Zum Abschluss der Studienplanung wurde das gesamte Prüfprotokoll als 15-seitiges Dokument der Ethikkommission der medizinischen Fakultät der Technischen Universität München zur Prüfung vorgelegt. Diese billigte den Prüfplan am 15.05.2007.

3.2 Probandenkollektiv

Nach detaillierter Aufklärung über Ablauf, Ziele und Risiken der Studie erklärten sich 43 Probanden schriftlich mit der Teilnahme einverstanden.

Zum Einschluss in die Studie mussten die Teilnehmer zwischen 20 und 30 Jahre alt sein, männlich und in gutem generellem Gesundheitszustand. Es durften weder allgemeine Kontraindikationen für eine ergometrische Ausbelastung bestehen, noch durften Hautkrankheiten, Augenerkrankungen und psychische Alterationen vorliegen. Weitere Ausschlusskriterien beinhalteten die Einnahme photosensibilisierender Pharmaka, Arbeit in Schichtdienstplänen, den Besuch von Solarien sowie Reisen über verschiedene Zeitzonen binnen 4 Wochen vor Studienbeginn und während der Teilnahme.

Die Rekrutierung der Probanden erfolgte zwischen April 2007 und Juli 2007. Maßnahmen zur Rekrutierung beinhalteten Aushänge an der Anlage des Zentralen Hochschulsports (ZHS) in München, Bekanntmachungen bei Sektionen des Deutschen Alpenvereins (DAV), Bereitschaften der Bergwacht Bayern sowie Postwurfsendungen in ca. 4250 Wohneinheiten des Studentenwerks München.

3.3 Aufbau der Studie

Die Durchführung der Studie war in drei Hauptabschnitte gegliedert.

3.3.1 Erster Studienabschnitt

Der erste Abschnitt diente der Charakterisierung des Untersuchungskollektivs.

3.3.1.1 Anthropometrie und technische Voruntersuchungen

Folgende anthropometrischen Parameter wurden bestimmt: Alter, Größe, Gewicht, Body Mass Index (BMI), Körperfettanteil durch Hautfaltendickemessung, Verhältnis aus Hüft- zu Bauchumfang (hip-to-waist ratio) und Blutdruck an beiden oberen Extremitäten.

An technischen Untersuchungen wurden eine periphervenöse Blutentnahme aus einer Cubitalvene mit Bestimmung von Standardparametern der klinischen Chemie und des Blutbildes, ein semiquantitativer Urinstix sowie bei Bedarf ein Urinstatus durchgeführt. Weiterhin erfolgte eine bodyplethysmographische Lungenfunktionsuntersuchung, ein Ruhe-EKG sowie eine echokardiographische Untersuchung durch einen von zwei erfahrenen Untersuchern des Testzentrums.

Die anthropometrischen Ergebnisse, sowie die der Voruntersuchungen sind in Auszügen in der Tabelle 4.1 dargestellt.

3.3.1.2 Ergometrische Belastung im Stufentest

Nach Komplettierung aller soeben beschriebenen Voruntersuchungen unterzog sich jeder Proband einer ergometrischen Belastung auf einem elektronisch gebremsten Fahrradergometer (Firma: LODE, Modell: Excalibur Sport) in einem klimatisierten, künstlich beleuchteten Ergometrieraum. Die Lufttemperatur betrug 20 °C, die relative Luftfeuchtigkeit 50 %. Die Sitzposition wurde für jeden Probanden individuell mittels der vielfältigen Verstellmöglichkeiten so angepasst, dass das Ergometer möglichst der gewohnten Position auf dem privat genutzten Fahrrad entsprach. Die Daten wurden notiert und zur Einstellung des Ergometers bei den Folgeterminen herangezogen. Das Ergometrieprotokoll in Form eines Stufenschemas sah eine Anfangsbelastung von 50 W und eine Steigerung von 25 W alle drei Minuten bis zur Ausbelastung vor. Während der Belastung konnten die Probanden ihre Trittfrequenz frei wählen, solange sie diese über 70 Umdrehungen pro Minute hielten. Das Ergometer wurde so programmiert, dass auch eine Änderung der Trittfrequenz innerhalb einer Stufe keine Änderung der jeweiligen Last nach sich zog. Während der gesamten Ergometrie standen die Probanden unter kontinuierlichem EKG-Monitoring (Cardio Collect 12 von Del Mar Reynolds Medical). Zusätzlich wurden lückenlos die Atemgase O₂ und CO₂ mittels der ZAN 600 USB CPX-Spiroergometrieinheit registriert und abgeleitete Parameter wie zum Beispiel der respiratorische Quotient (RQ) errechnet. Am Ende jeder der dreiminütigen Stufen wurde manuell nach Riva-Rocci Blutdruck gemessen und die Körpertemperatur mit einem handelsüblichen Ohrthermometer ermittelt. Weiterhin wurde der Proband zur Einschätzung seines subjektiven Anstrengungsgrads gebeten zum Stufenende mit dem Finger auf die entsprechende Zahl der vor ihm liegenden Borgskala (6-20 Punkte) zu deuten. Zudem wurden von einem Ohrläppchen nach initialer Hyperämisierung mittels Finalgon®-Salbe jeweils 20 µl Kapillarblut gewonnen und anschließend direkt der Laktat-

spiegel in einem der stationären Laktatmessgeräte Biosen 5040 bzw. Biosen C-line der Firma EKF Diagnostic bestimmt. Die ergometrische Belastung wurde beendet bei peripherer Ermüdung und/oder respiratorischer Erschöpfung. Es war in keinem der Fälle nötig, die Belastung vorzeitig aufgrund objektiver Abbruchskriterien wie zum Beispiel exzessivem Blutdruckanstiegs oder Herzrhythmusstörungen zu beenden. Die Messungen von Laktat, Temperatur und Blutdruck wurden während der Nachbelastungsphase zur ersten, dritten und fünften Minute nach Testende fortgeführt, um eine regelrechte Rückbildung der Belastungsreaktion zu dokumentieren. Anhand der ermittelten Laktat- und Herzfrequenzwerte wurde im Anschluss mit Hilfe des Programms Ergonizer Software (Version 2.5.9) die individuelle anaerobe Schwelle (IANS) bestimmt.

3.3.2 Verwendete Fragebögen

Jeder Proband füllte während der Studienteilnahme eine Reihe verschiedener Fragebögen aus. Folgende kamen dabei zu Einsatz:

3.3.2.1 Munich ChronoType Questionnaire (MCTQ)

Der Munich Chronotype Questionnaire, entwickelt von der Gruppe um Prof. Dr. Till Rönneberg am Institut für Medizinische Psychologie der LMU München, erlaubt die Zuordnung des betreffenden Probanden zu einem bestimmten Chronotyp, ausgedrückt durch den so genannten „mid-sleep on free days“ (MSF). Dieser Wert bezeichnet den zeitlichen Mittelpunkt zwischen dem Einschlafzeitpunkt und dem Zeitpunkt des Erwachens an freien Tagen, also an Tagen, an denen das betreffende Individuum nicht einem bestimmten, von außen vorgegebenen Tageszeitplan folgen muss und somit Schlaf- und Wachzeiten frei wählen kann. Der MSF wird anschließend noch um das über die Arbeitswoche angehäufte Schlafdefizit korrigiert und schließlich als MFS_{sc} („sc“ steht für sleep corrected) ausgegeben^{87, 88}. (s. Fragebogen 7.4.1)

3.3.2.2 Situational Motivation Scale (SIMS)

Weiterhin war die von Guay et al. im Jahr 2000 vorgelegte Situational Motivation Scale auszufüllen, deren 16 Fragen in der von uns adaptierten Version die Einstellung des Probanden zu sportlicher Aktivität und seine situationsbezogene Motivation zu körperlicher Betätigung erfassen⁴². Auf einer von 0 bis 6 reichenden Skala sollten die einzelnen Fragen als „überhaupt nicht zutreffend“ (Punktwert 0) bis „exakt zutreffend“ (Punktwert 6) durch ankreuzen der zutreffenden Abstufung beantwortet werden. Die 16 Fragen werden zu vier Untergruppen (Clustern), in die jeweils vier Fragen eingehen

zusammengefasst. Im Einzelnen handelt es sich dabei um verschiedene Ausprägungen von Motivation bzw. Selbst- und Fremdbestimmtheit, namentlich um „intrinsic motivation“, „identified regulation“, „external regulation“ und „amotivation“. Das Konzept der Selbstbestimmungstheorie nach Deci und Ryan aus dem Jahr 1985³¹ sieht lediglich die ersten beiden Cluster als weitgehend bis völlig selbst bestimmt und autonom getroffene Entscheidungen an, während die letzten beiden ein zunehmendes Maß an Fremdbestimmtheit bis hin zum Fehlen jeglicher Identifikation mit und Motivation für eine Tätigkeit erkennen lassen. Je mehr Selbstbestimmtheit ein Individuum an den Tag legt, desto günstiger wirkt sich dies auf Ausmaß und Qualität der betriebenen körperlichen Aktivität aus¹⁰⁰. Lemyre et al. zeigten, dass eine Veränderung des SIMS-Scores über die Zeit sogar sämtliche Dimensionen eines Burnout-Syndroms bei Eliteschwimmern verlässlich vorhersagen kann⁶⁵. (s. Fragebogen 7.4.2)

3.3.2.3 Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI)

Der Pittsburgh Sleep Quality Index wurde 1989 von Buysse et al. vorgelegt²⁰. Es handelt sich um einen Fragebogen zur Erfassung der Schlafqualität der letzten ein bis vier Wochen vor Beantwortung des Fragebogens. Es werden retrospektiv die subjektive Schlafqualität, Schlaflatenz, Schlafdauer, Schlaffeffizienz, Schlafstörungen, Schlafmittelkonsum und Tagesmüdigkeit erfragt. Der Gesamtpunktwert ergibt sich aus den 18 Antworten, die den soeben genannten sieben Komponenten zugeordnet sind und kann einen Punktwert zwischen 0 und 21 Punkten annehmen. Ein höherer Punktwert entspricht dabei einem höheren Ausprägungsgrad einer Schlafstörung und somit einer geringeren Schlafqualität. 2002 wurde ein empirisch bestimmter cut-off-Wert etabliert, wonach ein PSQI-Gesamtscore > 5 mit einer Sensitivität von 98,7 % und einer Spezifität von 84,4 % einen Parameter für eine Schlafstörung darstellt und „gute“ und „schlechte Schläfer“ zuverlässig zu trennen vermag⁹. Als Referenzzeitraum der Erhebungen in der vorliegenden Arbeit diente jeweils der zeitliche Abstand zum nächsten Untersuchungstermin, der im Mittel immer sieben Tage betrug. (s. Fragebogen 7.4.3)

3.3.2.4 Morgenprotokoll

Um den Schlaf der Probanden noch genauer charakterisieren zu können, füllten sie ein so genanntes Morgenprotokoll aus, in dem sie jeweils morgens Fragen zum Schlaf der vergangenen Nacht beantworteten. Es werden darin nicht nur Schlafdauer und Einschlaflatenz abgefragt, sondern unter anderem auch nächtliches Erwachen, erinnerliche Traumaktivität und subjektive Erholbarkeit des Schlafs. Für die Erholbarkeit des

Schlafs wurde eine von 0 bis 5 reichende Skala verwendet, deren Extreme mit den verbalen Ankern „gar nicht erholsam“ (0) und „sehr erholsam“ (5) belegt waren. Für die übrigen Parameter erfolgten die Angaben in Minuten. Dieser Fragebogen wurde freundlicherweise von Prof. Dr. Wiegand (Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie am Klinikum rechts der Isar, Univ.-Prof. Dr. Hans Förstl) zur Verfügung gestellt. Er stellt keinen standardisierten Fragebogen dar, wird aber in zahlreichen psychiatrischen Abteilungen und Schlaflaboren in Deutschland verbreitet eingesetzt. (s. Fragebogen 7.4.4)

3.3.2.5 Alkoholkonsum

Ähnlich dem Morgenprotokoll beantworteten die Probanden täglich einen Fragebogen zum Alkoholkonsum des Vortags/-abends. Die Fragen bezogen sich dabei auf Menge und Art der konsumierten Getränke, sowie den Ingestionszeitpunkt. Weiter wurde nach dem Konsum andersartiger, im weitesten Sinne berauschender Substanzen gefragt. (s. Fragebogen 7.4.5)

3.3.2.6 Sonnenexposition

Die täglichen Expositionszeiten mit natürlichem Sonnenlicht bzw. Tageslicht im Freien wurden von den Probanden in entsprechenden Formularen festgehalten. Angegeben wurden die Expositionsauern, sowie zugehörige Uhrzeiten und die Wetterlage. (s. Fragebogen 7.4.6)

3.3.2.7 Trainingslogbuch

Die Probanden waren außerdem angehalten jegliche Form körperlicher Betätigung im Sinne von Training in einem Trainingstagebuch festzuhalten. Es wurden die jeweilige Sportart, die Dauer der trainierten Einheit und die dabei überwiegende Intensität dokumentiert. (s. Fragebogen 7.4.7)

3.3.2.8 Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Im Jahr 2006 wurde die KSS von Kaida et al. als ein im Vergleich mit EEG-Parametern und der Psychomotor Vigilance Task (PVT) als hochgradig valides Instrument zur Messung von Schläfrigkeit beschrieben⁵³. Die KSS stellt eine neun Punkte umfassende analoge Skala zwischen den verbalen Ankern „sehr wachsam/ aufmerksam/ munter“ (1) und „sehr schläfrig - große Anstrengung wach zu bleiben, ich kämpfe mit dem Schlaf“

(9) dar. Auf dieser soll der Proband den Zahlenwert kennzeichnen, der am besten seinem momentanen Wachheits- bzw. Schläfrigkeitsgrad entspricht. (s. Fragebogen 7.4.8)

3.3.2.9 Positive and Negative Affect Scale (PANAS)

Die PANAS besteht aus 20 Adjektiven, die positive und negative affektive Gemütszustände beschreiben. Jedes dieser Adjektive soll auf einer fünf Abstufungen enthaltenden Skala als mehr oder weniger auf die momentane Stimmungslage zutreffend markiert werden¹¹⁰. Von Crawford und Henry wird die PANAS als zuverlässiges und valides Instrument zur Erfassung positiven und negativen Affekts bestätigt²⁴. (s. Fragebogen 7.4.9)

3.3.2.10 Fragen zu Licht und Raumklima

Während der letzten Minuten der 120-minütigen Lichtexposition beantworteten die Probanden Fragen zur subjektiven Perzeption des Lichts und des Raumklimas. Hierbei kamen durchwegs visuelle Analogskalen (VAS) in Form einer 10cm langen Linie zum Einsatz, auf der der Proband die Stelle zwischen den Extrema kennzeichnen sollte, die am besten seine Antwort auf die Frage widerspiegelt. Der Punktwert der jeweiligen Antwort ergab sich durch einfaches Ausmessen des Abstands der gesetzten Markierung in cm vom Nullpunkt der VAS. (s. Fragebogen 7.4.10)

3.3.2.11 Fragen zum Pacing der zuletzt absolvierten Testfahrt

Direkt nach Abschluss einer jeden ergometrischen Belastung komplettierten die Teilnehmer einen weiteren Fragebogen mit Fragen, die sich mit der persönlichen Einschätzung des Pacings während der soeben beendeten Testfahrt befassten. Aufgebaut war dieser wie im vorhergehenden Abschnitt für die Fragen zu Licht und Raumklima beschrieben. (s. Fragebogen 7.4.11)

3.3.3 Zweiter und dritter Studienabschnitt

Der zweite und dritte Studienabschnitt hatten die eigentlichen Messungen der Studie zum Inhalt und waren im Ablauf genau gleich angelegt. Der zeitliche Abstand zwischen Stufentest und zweitem Abschnitt, bzw. zwischen zweitem und drittem Abschnitt betrug im Mittel genau sieben Tage.

3.3.3.1 Verhaltensregeln während der Teilnahme

Während der Tage zwischen den Ergometrien waren die Probanden angehalten ihre normale sportliche Betätigung fortzuführen, dabei aber ungewöhnliche Anstrengung zu vermeiden. Zwei Tage vor den jeweiligen Ergometrietagen durften keine intensiven Einheiten mehr trainiert werden. Im Freien sollten die Probanden bei Sonnenschein Sonnenbrillen tragen und speziell an den Vormittagen der jeweiligen Ergometrietage und bis zum Erscheinen im Testzentrum Exposition gegenüber Tageslicht im Freien meiden. Die Einhaltung dieser Vorgaben wurde durch das tägliche Führen eines Sonnenexpositions- und Trainingstagebuchs kontrolliert (siehe Kap. 3.3.2.6 und 3.3.2.7 sowie 4.2.5 und 4.2.6).

Des Weiteren wurde noch einmal ausdrücklich auf die Ausschlusskriterien, besonders Schichtarbeit, Reisen über Zeitzonen und photosensibilisierende Medikation, hingewiesen.

3.3.3.2 Ablauf des zweiten Abschnitts

Nach der Ankunft der Probanden im Testzentrum (gegen 13:45 Uhr bzw. gegen 15:45 Uhr) wurde nach einer Ruhepause von mindestens fünf Minuten die Körpertemperatur mit einem handelsüblichen Ohrthermometer bestimmt. Dies erfolgte durch die Mittelung von jeweils fünf unmittelbar aufeinander folgenden Messungen, immer abwechselnd am rechten und linken Ohr.

Vor dem Beginn der experimentellen Lichtexposition füllten die Probanden ein Exemplar der KSS, des PANAS und des PSQI aus. Bezugszeitraum hierfür waren die Tage seit dem Stufentest bzw. seit dem ersten Lichttermin.

In der Folge wurde für jeden Probanden nach dem Zufallsprinzip die Art der Lichtexposition zu den beiden Messterminen festgelegt; entweder BL zum zweiten Abschnitt und DL zum dritten oder umgekehrt. Die Lichtexposition selbst wurde folgendermaßen vorgenommen: Die Probanden saßen an einem normalen Schreibtisch mit weißer Oberfläche, auf dem zwei Lichtquellen, basierend auf dem Philips EnergyLight® HF3309, positioniert waren. Diese waren in einem Zielabstand von 60 cm zu den Augen der Probanden und in der Frontalebene um ca. 30 ° zum Probanden gedreht aufgestellt (s. Abbildung 3.2). Während der Expositionszeit von 120 Minuten konnten sich die Probanden mit selbst mitgebrachter Lektüre beschäftigen, solange sie diese nicht in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Augen brachten und so das Licht vom Eintritt ins Auge hinderten.



Abbildung 3.2: Versuchsaufbau für die 120-minütige Präexposition. Das Hervortreten der beiden Leuchtröhren je Lampe ist lediglich fototechnisch bedingt. In der Realität bewirkt der Diffusorschirm einen komplett homogenen Seheindruck.

Der Raum, in dem die Lichtexposition stattfand hatte weder Fenster, noch waren andere Lichtquellen als die genannten in Betrieb. In der BL-Kondition erreichten wir mit dem beschriebenen Setup in 60 cm Entfernung von den Lichtquellen ca. 4420 lx, während die DL-Kondition nur ca. 230 lx Beleuchtungsstärke brachte. Um eine möglichst gute Placebosituation zu schaffen, wurden die Lampen mit jeweils vier roten LEDs modifiziert, die vor allem der DL-Bedingung einen speziellen visuellen Eindruck verliehen (s. Abbildung 3.3).



*Abbildung 3.3: Visueller Eindruck einer einzelnen Leuchte in der DL- (links) und BL-Kondition (rechts).
Durch das wesentlich höhere Beleuchtungsniveau in der BL-Kondition fällt der Bildhintergrund im rechten Foto durch die entsprechend kürzere Belichtungszeit des Fotoapparates dunkler aus. Die ebenfalls eingeschalteten LEDs treten im rechten Bild noch weniger in Erscheinung als in der Realität.*

Die installierten LEDs trugen jedoch zur Gesamtbeleuchtungsstärke der DL-Kondition nur marginale zwei Lux bei. Während der BL-Kondition waren die LEDs ebenfalls eingeschaltet, nur kamen sie hier aufgrund der insgesamt wesentlich intensiveren Beleuchtungsstärke nur sehr viel weniger zur Geltung. Um eine weitere Beeinflussung der Probanden zu vermeiden, waren sämtliche Einstellungsknöpfe und Displays in einer kleinen, verschließbaren Metallbox am Lampenfuß verborgen. Zudem waren sowohl Firmenname als auch Modelbezeichnung und sämtliche andere Aufschriften entfernt worden.

Während der letzten zehn Minuten füllten die Probanden erneut die bereits vor Beginn der Lichtexposition beantworteten Fragebögen zu momentaner Schläfrigkeit (KSS) und Stimmungslage (PANAS) aus und machten Angaben auf visuellen Analogskalen zur persönlichen Wahrnehmung des Lichts und des Raumklimas.

Direkt im Anschluss (für Startzeiten der Ergometrien s. Kap. 4.9) erfolgte die ergometrische Belastung unter Beleuchtung mit identisch eingestellten Lampen wie in den zwei Stunden zuvor (s. Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5). Diese wurden wiederum 60 cm von den Augen des Probanden entfernt positioniert und sorgten für ein Beleuchtungsniveau von ca. 4045 lx in der BL-Kondition und ca. 265 lx in der DL-Kondition.



Abbildung 3.4: Überblick über den Gesamtaufbau im Ergometrierraum. Rechts des Probanden der Computer zur Steuerung des Ergometers, links die Spirometrie- und EKG-Einheit. Zu beachten ist, dass das Umfeld im Bild durch das verwendete Blitzlicht beträchtlich aufgehellte wurde.



Abbildung 3.5: Ansicht von der Gegenseite mit dem vom Probanden weggedreht und somit für ihn nicht einseharen Monitor der Spirometrie- und EKG-Einheit.

Die von der Vorexposition abweichenden Beleuchtungswerte entstehen zum einen durch die unterschiedlichen räumlichen Gegebenheiten und damit den unterschiedlichen Reflexionseigenschaften im Ergometrieraum, zum anderen durch die Tatsache, dass ein kleiner Teil der normalen, fest installierten Deckbeleuchtung angeschaltet werden musste. Dieser Teil der Deckenbeleuchtung erzielte für sich alleine angeschaltet auf Augenhöhe des Probanden eine Beleuchtungsstärke von lediglich ca. 125 lx.

Bei der Auswahl eines geeigneten Ergometrieprotokolls wurde besonderer Wert auf eine möglichst geringe Test-Retest-Variabilität, die aus dem Protokolltyp selbst erwächst gelegt. Bei der Literaturrecherche wurde deutlich, dass vor allem Protokolle mit dem Charakter eines Zeitfahrens oder aber einer fixen Fahrzeit innerhalb derer möglichst viel Arbeit verrichtet werden soll die kleinsten testbedingten Variabilitäten aufweisen^{13, 49, 62, 79, 93, 112}. Einige Autoren berichten von noch geringeren Variabilitäten, wenn eine Gewöhnungsfahrt vor den eigentlichen Testfahrten stattfand^{62, 72, 112}. Zudem scheint der Trainingszustand der Probanden ein nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor auf die zu erwartende Variabilität zu sein: Je leistungsfähiger und vertrauter mit hohen Belastungsintensitäten die Athleten, desto geringer die Test-Retest-Variabilität¹¹². Als Ergometrieprotokoll wählten wir also eine Situation, die einem 40-minütigen Zeitfahren nachempfunden war, dem eine zehnminütige Aufwärmphase mit einer Belastung von 40% der IANS voranging. Das eigentliche Zeitfahren wurde direkt und ohne Unterbrechung im Anschluss an die Aufwärmphase gestartet, so dass die Probanden nie aufhören mussten zu treten.

Im linearen Modus kann das Lode Ergometer so programmiert werden, dass jeder Proband mit seiner im Stufentest bevorzugten Trittfrequenz (TF) seine persönliche Schwellenleistung an der IANS erbringt. Tritt er nun etwas schneller, steigt die erbrachte Leistung P (in W) in Abhängigkeit des linearen Faktors α und der Trittfrequenz (TF) gemäß der Formel $P = \alpha \cdot (TF)^2$. Bei niedrigerer Trittfrequenz erniedrigt sich die erbrachte Leistung entsprechend. Die Probanden erhielten die Vorgabe innerhalb von 40 Minuten Fahrzeit so viel Arbeit zu leisten wie möglich, oder bildlich gesprochen, so weit zu fahren wie möglich. Die geleistete Arbeit wurde laufend mittels Lode Ergometry Manager (LEM) aufgezeichnet und konnte so im Anschluss in Excel exportiert werden.

Um Verzerrungen und Beeinflussung während der Ergometrie zu vermeiden waren sämtliche Anzeigen, Uhren und Monitore für die Probanden verdeckt bzw. nicht einsehbar (s. Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6).



Abbildung 3.6: Ansicht aus der Fahrerperspektive bei ausgeschalteten Lampen. Die Trittfrequenzanzeige sowie die Anzeige und Einstellknöpfe der Lampen sind abgedeckt. Direkt vor dem Fahrer wurde die Borgskala befestigt.

Weiterhin wurden die Belastungen immer vom gleichen Untersucher durchgeführt. Es wurde bis auf ein alle vier Minuten einmaliges, standardisiertes „Sehr gut. Weiter so.“ keinerlei weitere verbale Unterstützung gegeben. Um den Probanden dennoch eine ungefähre zeitliche Einschätzung der verbleibenden Fahrzeit zu ermöglichen, wurde ihnen ebenfalls alle vier Minuten die bereits verstrichene Zeit angesagt. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Probanden zudem gebeten ihren momentanen Anstrengungsgrad auf einer vor ihnen liegenden Borgskala einzuschätzen, indem sie auf die entsprechende Zahl deuteten. Es wurden sowohl Blutdruck als auch die Körpertemperatur ermittelt, die Herzfrequenz notiert und 20 µl Kapillarblut aus einem zuvor mit Finalgon®-Salbe hyperämisierten Ohrläppchen zur sofortigen Bestimmung der Laktatkonzentration entnommen. Wie bereits beim Stufentest standen die Probanden unter kontinuierlichem

EKG-Monitoring. Die Atemgase O₂ und CO₂ wurden lückenlos registriert und abgeleitete Parameter wie z. B. der RQ errechnet. Die Spirometriedaten sind über eine integrierte Funktion im ZAN Programm in Excel exportierbar. Das 40-minütige Zeitfahren war gefolgt von einer fünfminütigen Erholungsphase, in der die Messung der eben genannten Parameter fortgeführt wurde.

Bevor die Probanden den Ergometrieräum verließen, füllten sie einen Fragebogen zur Einschätzung ihrer soeben absolvierten Testfahrt aus. Hierbei kamen, wie schon zur Beurteilung von Lichtqualität und Raumklima, visuelle Analogskalen (VAS) in Form einer 10cm langen Linie zum Einsatz, auf der der Proband die Stelle zwischen den Extrema kennzeichnen sollte, die am besten seine Antwort auf die Frage widerspiegelt. Der Punktwert der jeweiligen Antwort ergibt sich durch einfaches Ausmessen des Abstands der gesetzten Markierung in cm vom Nullpunkt der VAS. Der zuerst genannte Pol der VAS repräsentiert immer denjenigen mit dem zugeordneten Wert „0“ der Skala, der zweite immer den mit dem Wert „10“. (s. Fragebogen 7.4.11)

Der Bogen beinhaltete auch die Frage, wie viel Bedeutung sie dem Erfahrungswert, der aus der gerade absolvierten Testfahrt erwuchs, im Hinblick auf den noch ausstehenden Test in einer Woche beimaßen.

3.3.3.3 Ablauf des dritten Abschnitts

Der dritte Abschnitt gestaltete sich im Ablauf genau wie der zweite mit dem einzigen Unterschied, dass für die Lichtexposition vor bzw. während der Ergometrie die jeweils andere Lichtkondition verwendet wurde. Der zeitliche Abstand zwischen dem zweiten und dritten Abschnitt betrug, wie bereits der Abstand zwischen Stufentest und zweitem Abschnitt, im Mittel genau sieben Tage.

3.4 Statistik

Für die statistische Auswertung wurde das Programm SPSS in den Versionen 16.0 und 17.0 für Windows (SPSS Inc., Chicago, USA) herangezogen. Die Tests, die im Einzelnen zur Anwendung kamen werden im jeweiligen Abschnitt benannt und genauer erläutert. Wo nicht anders aufgeführt wurde dem Signifikanznachweisen eine zweiseitige Fragestellung zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ zugrunde gelegt.

3.5 Fallzahlkalkulation

Vor Durchführung der Studie erfolgte eine Literaturrecherche zur Wirkung von Bright Light auf verschiedene Körperfunktionen, um die Ziele der Arbeit genauer zu definieren. Mangels Voruntersuchungen bzw. Pilotstudien zum Thema Licht und körperliche Leistungsfähigkeit musste die anschließende Fallzahlkalkulation auf möglichst realistischen Schätzungen der zu erwartenden Effektgröße bzw. der Störfaktoren beruhen. Die Fallzahlkalkulation wurde mit dem Programm „nQuery Advisor“ von Statcon vorgenommen. Auf Basis einer angenommenen Leistungssteigerung von zwei Prozent und einer Standardabweichung der Testergebnisse von ebenfalls zwei Prozent werden bei zweiseitiger Fragestellung (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ und Power $\beta = 0,80$) mindestens $n = 34$ Probanden benötigt. Letztlich wurden $n = 43$ Probanden in die Studie eingeschlossen.

4. Ergebnisse

4.1 Probandenkollektiv

Einen Überblick über die Charakteristika des Untersuchungskollektivs bietet die unter stehende Tabelle 4.1.

	N	Mittelwert	Standardabweichung	Spannweite	Minimum	Maximum
Alter (Jahre)	43	24,47	2,33	9	20	29
Größe (cm)	43	180,6	7,3	32	163	196
Gewicht (kg)	43	77,1	8,9	33,5	61,0	94,5
BMI (kg/m ²)	43	23,58	1,82	8,5	19,4	27,9
Körperfett (%)	42	12,4	3,1	12,4	7,6	20,0
waist-to-hip Ratio	42	,97	,029	,12	,89	1,01
VC (l)	43	5,55	,75	2,76	4,10	6,86
FEV1 (l)	43	4,46	,61	2,42	3,13	5,55
FEV1/VC	43	,80	,05	,19	,69	,88
PEF (l/s)	43	9,52	1,70	6,83	6,45	13,28
IANS (W)	43	218	46	189	146	335
IANS (W/kg KG)	43	2,85	,53	2,47	1,87	4,34
HF an der IANS	43	159,6	12,5	54	130	184
VO ₂ max (ml/min·kg KG)	43	57,87	6,20	29,7	41,3	71,0

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Charakteristika des Probandenkollektivs

Vor dem Hintergrund, dass die Teilnahme an der Studie allen Männern im entsprechenden Alter offen stand, die die weit gefassten Einschlusskriterien (siehe Abschnitt 3.2) erfüllten, bleibt festzuhalten, dass die oben beschriebenen Eckdaten zur Konstitution und Leistungsfähigkeit einem deutlich über dem Durchschnitt liegenden Kollektiv entsprechen.

4.2 Fragebögen zur Kontrolle möglicher Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit nach Lichtexposition

Zur Kontrolle möglicher Einflussfaktoren auf das Ergebnis des primären Endpunktes (geleistete Arbeit in 40 min Zeitfahren) und weiterer untersuchter Parameter wurden nachfolgende Fragebögen eingesetzt.

4.2.1 Situational Motivation Scale (SIMS)

Ziel der Befragung mittels der SIMS war es zum einen festzustellen, wie groß der Motivationsgrad der Probanden im Hinblick auf Sport und körperlicher Betätigung war und zum anderen, ob sich diese Motivationslage während der Studienteilnahme wesentlich veränderte. Nach Zusammenfassung der einzelnen Punktwerte in vier Cluster und Mittelung der zugehörigen Rohwerte stellen sich die Punktwerte für die Untergruppen wie folgt dar (s. Tabelle 4.2):

	Befragungszeitpunkt	
	vor Termin mit BL	vor Termin mit DL
intrinsic motivation	5,25 (3,25/6,00)	5,25 (3,50/6,00)
identified regulation	5,33 (2,67/6,00)	5,33 (3,33/6,00)
external regulation	2,00 (0,00/4,67)	2,17 (0,00/5,00)
amotivation	0,00 (0,00/1,75)	0,00 (0,00/1,75)

Tabelle 4.2: SIMS; angegeben sind Median und in Klammern Minimum und Maximum; $n=34$

Als statistischer Test wurde der Wilcoxon-Test als nichtparametrischer Test für zwei verbundene Stichproben verwendet. Es zeigte sich für alle vier Untergruppen kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Erhebungszeitpunkten.

4.2.2 Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI)

In der vorliegenden Arbeit wurde der PSQI zu einer orientierenden Einschätzung der Schlafqualität während der Studienteilnahme herangezogen. Tabelle 4.3 gibt eine Übersicht über die PSQI-Gesamtscores zu den zwei Befragungszeitpunkten. Auch in diesem Fall kam der Wilcoxon-Test für zwei verbundene Stichproben zur Anwendung. Es zeigte sich zwischen den beiden Erhebungszeitpunkten kein statistisch signifikanter Unterschied.

Sowohl vor BL- als auch vor DL-Terminen erreichten jeweils sechs Probanden Punktwerte von sechs und mehr. Ein Gesamtwert zwischen sechs und 21 Punkten gilt als Ausdruck einer gering bis stark ausgeprägten Schlafstörung.

	Befragungszeitpunkt	
	vor Termin mit BL	vor Termin mit DL
PSQI Gesamtscore	4,00 (0,0/9,0)	4,00 (0,0/11,0)

Tabelle 4.3: PSQI; angegeben sind Median und in Klammern Minimum und Maximum; $n=41$

4.2.3 Schlafqualität im Morgenprotokoll

Die Probanden führten über die Nächte während der Studienteilnahme jeweils morgens nach dem Erwachen Protokoll (s. Fragebogen 7.4.4). Als möglicherweise relevante Einflussfaktoren auf das Ergometrieergebnis wurden die Fragen zur Einschlafzeit, der Zeit, die nachts wach verbracht wurde, der Schlafdauer und der Erholsamkeit des Schlafs der Nacht vor dem jeweiligen Ergometrietermin ausgewertet. Die Daten stellten sich als nicht normalverteilt dar, weshalb abermals der Wilcoxon-Test für zwei verbundene Stichproben zur Anwendung kam.

Lediglich die Angaben zur Erholsamkeit des Schlafs in den Nächten vor den Ergometrien unterschieden sich signifikant voneinander ($p=0,022$). Dabei wurden die Nächte vor Ergometrien unter DL erholsamer erlebt als jene vor Ergometrien unter BL [(Median 4,0 (Min. 0, Max 5) vs 3,0 (Min 0, Max 5)] (s. Abbildung 4.1).

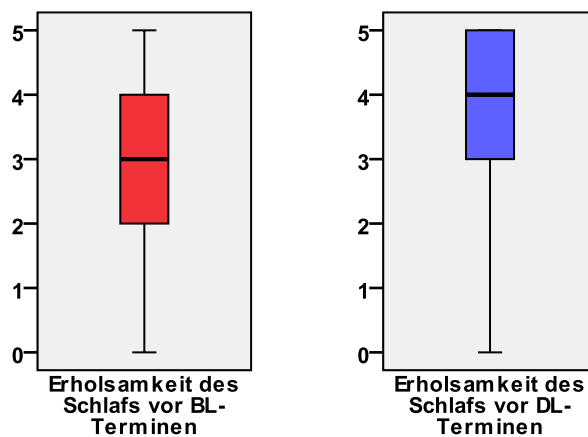


Abbildung 4.1: Erholsamkeit des Schlafs in den Nächten vor den Ergometrien mit BL (links) bzw. DL (rechts); Skalenextrema: „gar nicht erholsam“ (0); „sehr erholsam“ (5)

Auch wenn sich im Hinblick auf die Schlafdauer keine statistisch signifikanten Unterschiede zeigten, sind dennoch für Nächte vor DL-Terminen tendenziell längere Schlafdauern als vor BL-Terminen zu verzeichnen. Hierbei handelt es sich um eine Differenz von im Mittel 20 Minuten. Dies könnte mit dafür verantwortlich sein, dass der Schlaf

vor DL-Terminen als erholsamer empfunden wurde. Ähnliche Tendenzen zeichnen sich für Einschlafzeit und die Zeit, die nachts wach verbracht wurde ab.

4.2.4 Alkoholkonsum

Der Alkoholkonsum an den Tagen bzw. Abenden vor den Ergometrieterminen, ausgedrückt in g konsumierten Ethanol, war im Allgemeinen sehr mäßig ausgefallen. An Abenden vor BL-Terminen tranken 38 von 43 Probanden weniger als 20 g Alkohol; an Abend vor DL-Terminen waren es 41 von 43. (s. Abbildung 4.2) 20 g Ethanol entsprechen ungefähr der in einem halben Liter Bier mit 5 vol% enthaltenen Menge Alkohol. Als statistischer Test der Wahl kam bei stetigen, jedoch nicht normalverteilten Werten zweier verbundener Stichproben einmal mehr der Wilcoxon-Test in Frage. Das Ergebnis verfehlt knapp die statistische Signifikanz.

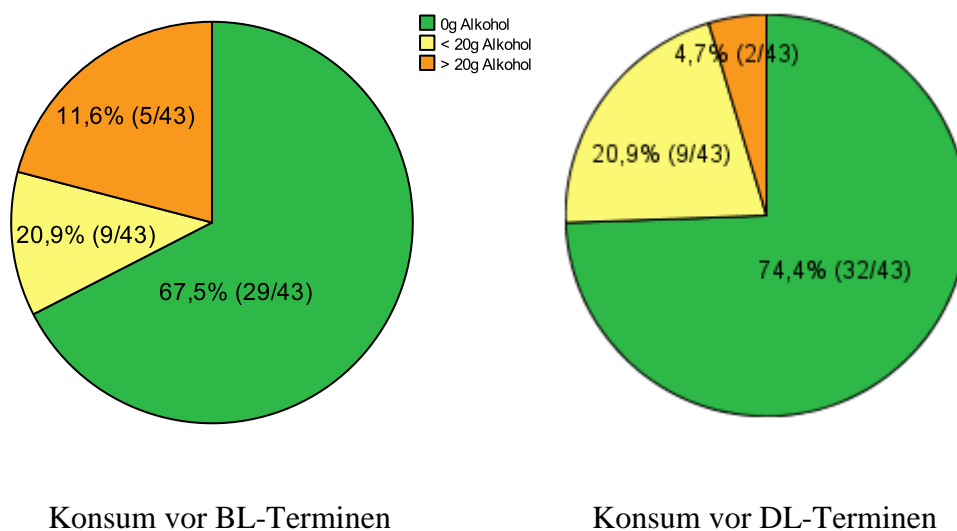


Abbildung 4.2: Alkoholkonsum an den Abenden vor BL- bzw DL-Terminen

4.2.5 Sonnenexposition

Für die Auswertung der Exposition mit natürlichem Sonnenlicht als stetige, aber nicht normalverteilte Größe wurde der Wilcoxon-Test für zwei verbundene Stichproben als Test der Wahl herangezogen. Bei den Expositionszeiten mit natürlichem Sonnenlicht bestand kein signifikanter Unterschied zwischen Tagen vor BL-Terminen und solchen vor DL-Terminen. Die median im Freien verbrachte Zeit betrug in beiden Fällen 30 Minuten (Min 0 min, Max 270 min vor BL bzw. 330 min vor DL) (s. Abbildung 4.3).

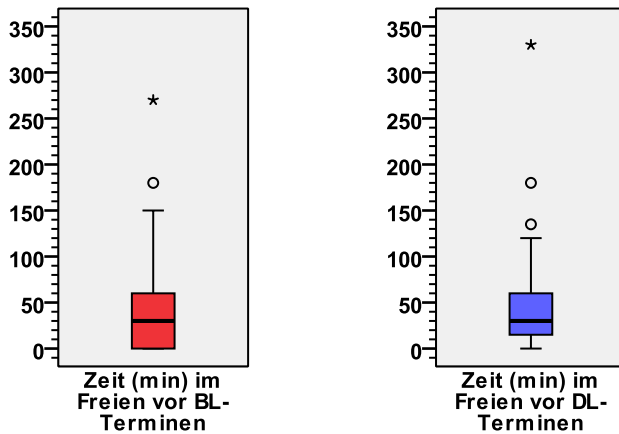


Abbildung 4.3: Im Freien verbrachte Zeit (in min) vor Terminen mit BL (links) bzw. DL (rechts)

4.2.6 Training

Für Trainingsumfang und -intensität während der zwei Tage direkt vor den Ergometrietagen konnte genauso wenig ein signifikanter Unterschied gefunden werden wie für die Gesamttrainingsdauer aller Tage (im Mittel jeweils sieben) zwischen den Ergometrien.

Die Trainingsaufzeichnungen der Probanden zeigten weder für die Gesamttrainingsdauer in den durchschnittlich sieben Tagen vor den Ergometrien, noch für die Trainingsdauer und -intensität an den zwei Tagen direkt vor Ergometrie signifikante Unterschiede auf. Als statistischer Test kam der Wilcoxon-Test zur Anwendung. Graphische Darstellungen der absolvierten Trainingsumfänge und der trainierten Intensitäten finden sich in Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5. Die mediane Trainingsdauer an den zwei Tagen vor Ergometrie von 60 min (BL) bzw. 45 min (DL) fällt dabei in Relation zur medianen Gesamttrainingszeit von 300 min während der gesamten Woche vor Ergometerbelastung unterdurchschnittlich aus: An den beiden Vorergometrietagen wurden vor BL jeweils nur 70 % der durchschnittlichen täglichen Trainingszeit absolviert, vor DL lediglich knapp 53 %. Während dieser beiden Tage vor den Ergometrien belasteten sich die Teilnehmer bis auf wenige Ausnahmen (ein Proband vor BL und 3 Probanden vor DL) höchstens moderat.

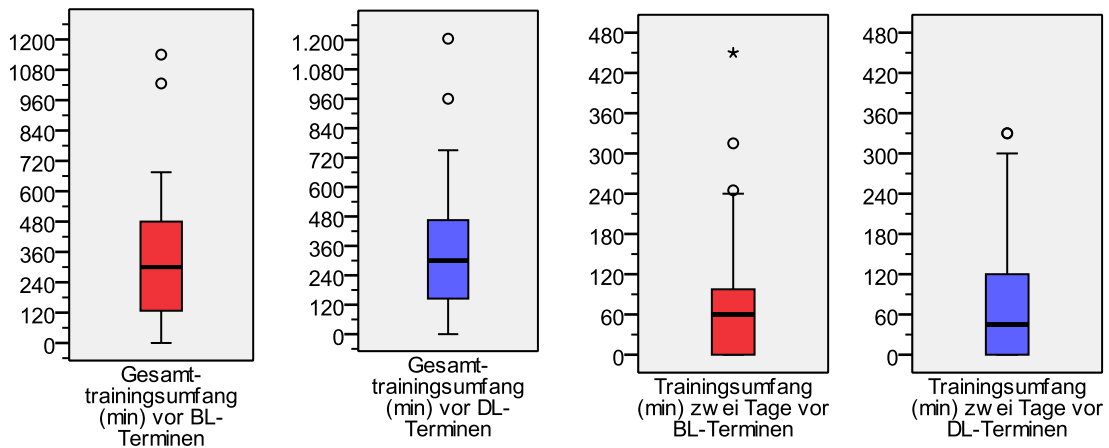


Abbildung 4.4: Gesamttrainingsumfang (in min) bzw. Trainingsumfang während der zwei Tage vor Ergometrie (in min) jeweils für BL- (rot) und DL-Termine (blau)

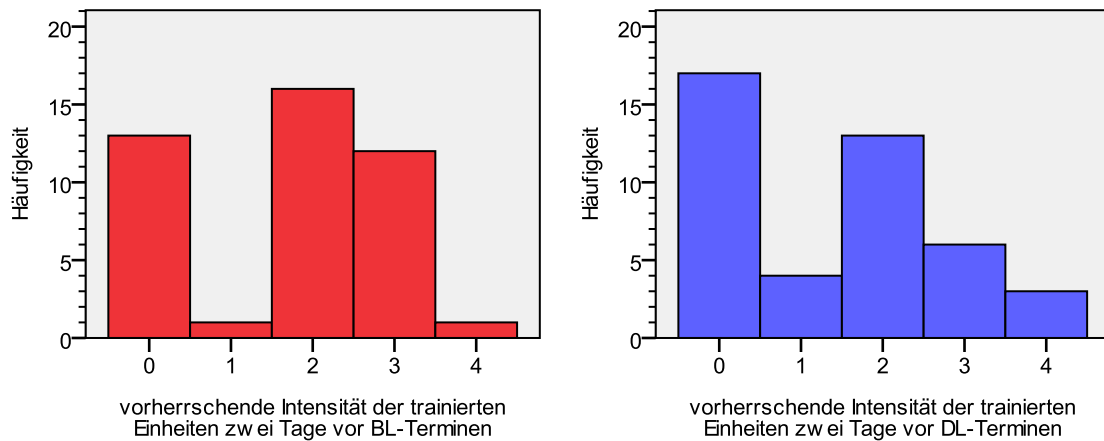


Abbildung 4.5: Training vor Ergometrietagen mit BL (rot) und DL (blau)
 0=kein Training; 1=regenerativ; 2=GA I bzw. locker; 3=GA II bzw. mittel; 4=EB bzw. intensiv

4.3 Vor und nach Lichtexposition ermittelte Parameter

4.3.1 Körpertemperatur

Für die vor Beginn und zum Ende der 120-minütigen Lichtexposition tympanal gemessene Körpertemperatur stellen sich die Ergebnisse wie folgt dar: Die Rohdaten vor und nach Lichtexposition können für beide Konditionen als normalverteilt angenommen werden. Damit ist die Bedingung für die Anwendung des t-Tests für verbundene Stichproben gegeben. Sowohl für die BL- als auch für die DL-Kondition ergaben sich signifikante Unterschiede vor vs. nach Exposition ($p=0,006$ bzw. $p=0,043$).

Im Falle der Lichtsituation BL betrug der mittlere Unterschied $0,2\text{ °C}$ (vor BL: $36,1 \pm 0,35\text{ °C}$ vs. nach BL: $35,9 \pm 0,32\text{ °C}$). Für die Situation DL betrug der Unter-

schied im Mittel $0,1\text{ °C}$ (vor DL: $36,1 \pm 0,36\text{ °C}$ vs. nach DL: $36,0 \pm 0,30\text{ °C}$). Die Abbildung 4.6 stellt die Werte zusammenfassend graphisch dar. Im Vergleich der Temperaturänderung Δt unter BL vs. DL ergibt sich kein signifikanter Unterschied.

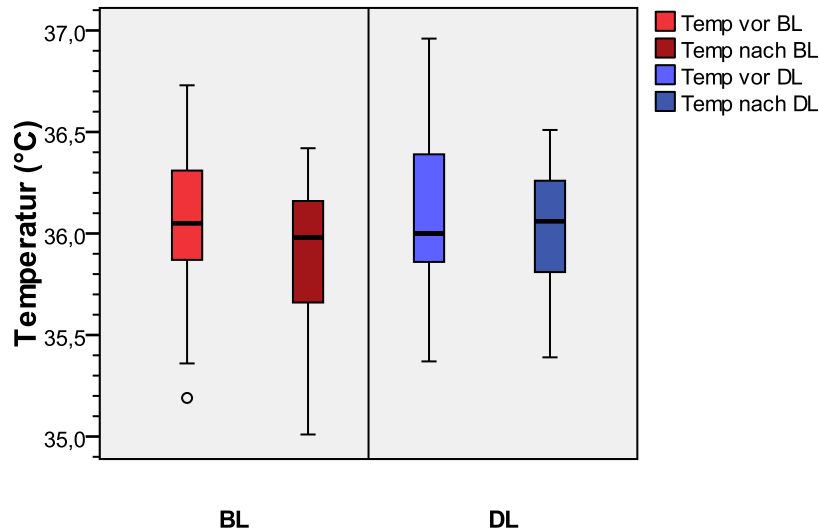


Abbildung 4.6: tympanal gemessene Körpertemperatur vor und nach BL (rot) bzw. DL (blau); $n=42$

4.3.2 Karoliska Sleepiness Scale (KSS)

Für die mit der KSS erhobenen Werte konnten mit dem Wilcoxon-Test für zwei verbundene Stichproben keine signifikanten Unterschiede im Wachheits- bzw. Schläfrigkeitsgrad vor vs. nach der jeweiligen Lichtexposition gezeigt werden.

4.3.3 Positive and Negative Affect Scale (PANAS)

Für die PANAS ergibt sich lediglich für einen einzigen Punkt unter der BL-Kondition ein primär signifikanter Unterschied im Vergleich vor vs. nach Lichtexposition. Dieses Ergebnis muss aber vor dem Hintergrund der multiplen Testproblematik als zufällig signifikant eingestuft werden. Alle übrigen Unterpunkte verfehlen unter beiden Lichtkonditionen die statistische Signifikanz im Wilcoxon-Test für zwei verbundene Stichproben.

4.4 Fragen zu Licht und Raumklima nach erfolgter Lichtexposition

Im Folgenden repräsentiert der zuerst genannte Pol der VAS immer denjenigen mit dem zugeordneten Wert „0“ der Skala, der zweite immer den mit dem Wert „10“.

Die Daten zu den VAS „zu schummrig – zu grell“ und „beim Lesen störend – beim Lesen unterstützend“ können als normalverteilt angenommen werden und der Vergleich von BL vs. DL kann mittels t-Test für zwei verbundene Stichproben erfolgen. Nur für erstere VAS ergibt sich dabei ein statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0,001$; $n = 34$) von im Mittel $6,84 \pm 1,39$ für BL vs. $4,03 \pm 1,12$ für DL (s. Abbildung 4.7).

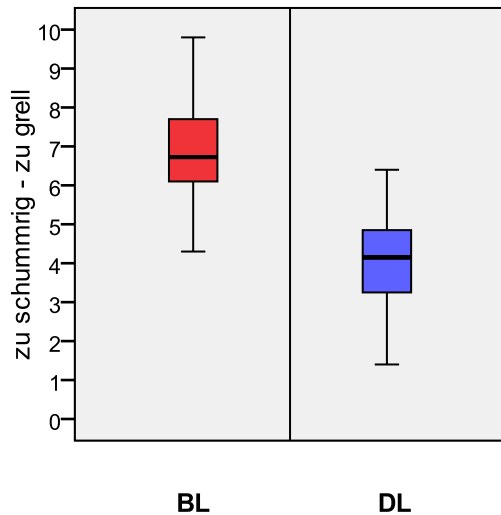


Abbildung 4.7: VAS „zu schummrig – zu grell“; links für BL, rechts für DL; $n = 34$

Die Rohdaten der übrigen Gegenüberstellungen des Fragebogens sind nicht normalverteilt, weshalb für die Analyse der Wilcoxon-Test für zwei verbundene Stichproben verwendet wurde. Die statistisch signifikanten Ergebnisse sind in der Abbildung 4.8 bis Abbildung 4.12 dargestellt.

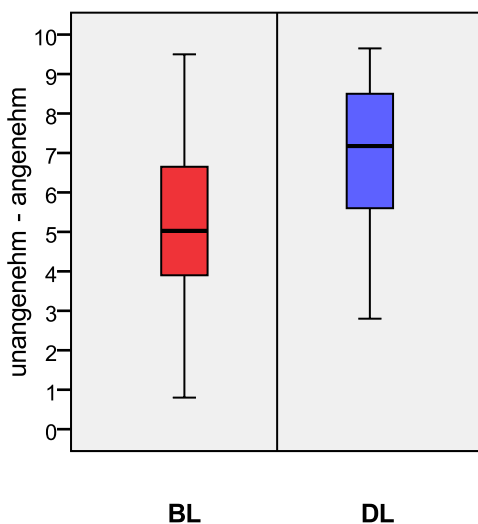


Abbildung 4.8: VAS „unangenehm – angenehm“; links für BL, rechts für DL; $p < 0,001$, $n = 34$

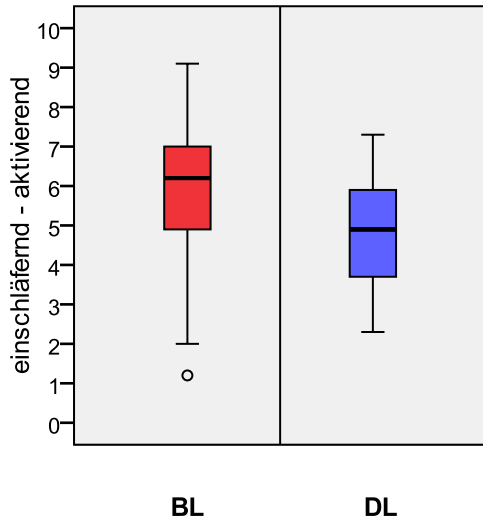


Abbildung 4.9: VAS „einschläfernd – aktivierend“; links für BL, rechts für DL; $p=0,008$, $n=34$

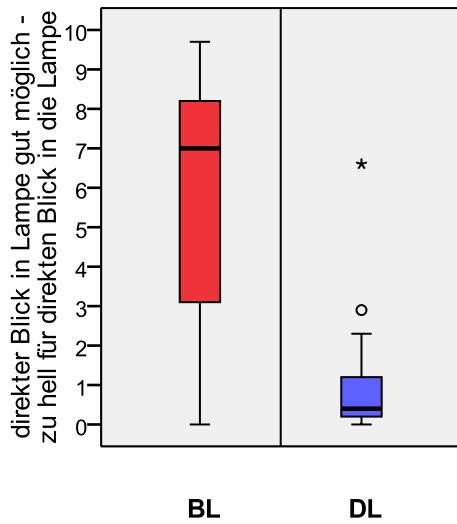


Abbildung 4.10: VAS „direkter Blick in die Lampe gut möglich – zu hell für direkten Blick in die Lampe“; links für BL, rechts für DL; $p<0,001$, $n=34$

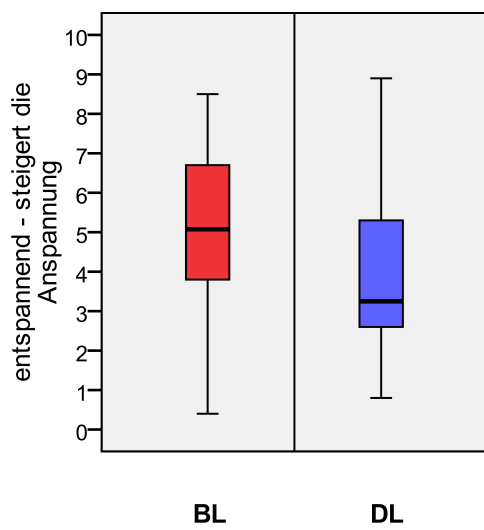


Abbildung 4.11: VAS „entspannend – steigert die Anspannung“; links für BL, rechts für DL; $p=0,002$, $n=34$

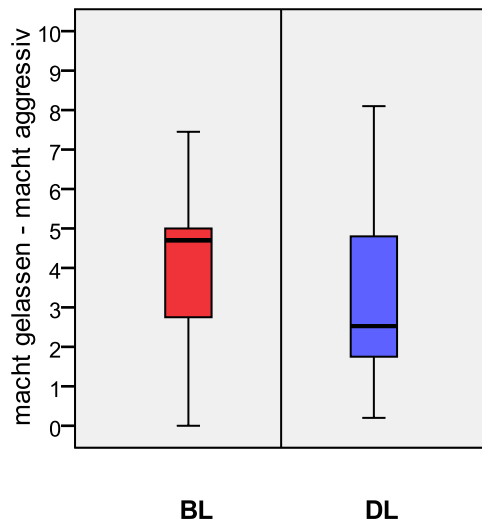


Abbildung 4.12: VAS „macht gelassen – macht aggressiv“; links für BL, rechts für DL;
 $p=0,014$, $n=34$

Das Raumklima betreffend ergab sich bei objektiv konstanten äußeren Bedingungen kein signifikanter Unterschied in der Temperaturwahrnehmung der Probanden unter BL vs. DL. Abbildung 4.13 gibt Lage und Verteilung der Daten wieder. Zudem ist ersichtlich, dass die Temperaturbedingungen insgesamt als weder zu warm, noch als zu kalt empfunden wurden.

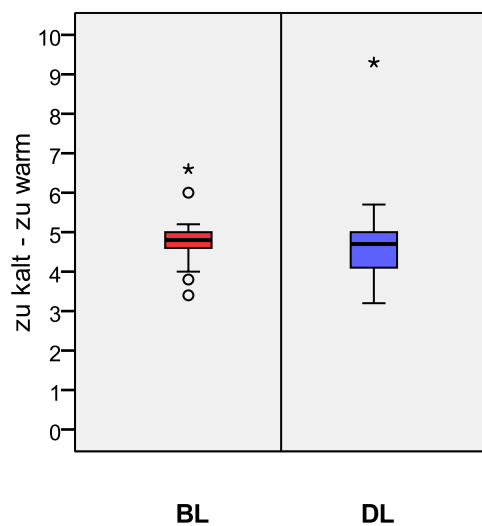


Abbildung 4.13: VAS zum Raumklima „zu kalt – zu warm“; links für BL, rechts für DL;
 $n=34$

4.5 Reihenfolgeeffekte in Bezug auf Motivation, Bedenken der Probanden und Lerneffekte durch das erste Zeitfahren

Bei der Datenauswertung taucht zwangsläufig die Frage auf, ob sich die Reihenfolge der Lichtexposition an den beiden Testterminen trotz Randomisierung auf die Ergebnisse auswirken konnte. So stellt sich z. B. die Frage, ob die Motivation der Probanden im Test „alles zu geben“ beim zweiten Zeitfahren niedriger ausfiel als beim ersten und dies einen signifikanten Effekt auf die im Zeitfahren verrichtete Arbeit haben konnte.

Aus Tabelle 4.4 geht hervor, dass zwischen den Terminen 2 und 3 die Ausprägung der Motivationslage sehr homogen verteilt war. So gaben 15 Probanden zu T2 einen höheren Motivationsgrad an als zu T3; bei 17 verhielt es sich umgekehrt; 2 gaben identische Werte an. Auf die in der Ergometrie verrichtete Arbeit wirkte sich dies nicht maßgeblich aus: Von den 17 an T2 stärker motivierten Probanden verrichteten 8 an T2 mehr Arbeit als an T3, bei 9 verhielt es sich umgekehrt. Von den 15 an T3 höher Motivierten leisteten 8 an T3 mehr Arbeit, 7 jedoch weniger. Die erwähnten Unterschiede erweisen sich im exakten Test nach Fischer als nicht signifikant.

		verrichtete Arbeit an T2-T3		
		mehr Arbeit an T3	mehr arbeit an T2	Gesamt
Motivation an T2-T3	keine Differenz	1	1	2
	an T3 besser motiviert	8	7	15
	an T2 besser motiviert	9	8	17
	Gesamt	18	16	34

Tabelle 4.4: Zusammenhänge zwischen Motivation an den Ergometrieterminen T2 und T3 und der dabei verrichteten Arbeit; n=34

Aus Abbildung 4.14 wird die Lage der Datenverteilung für beide Testtermine hinsichtlich der Motivation zu den beiden Testterminen deutlich. Der Vergleich der Motivationslagen ohne Berücksichtigung der verrichteten Arbeit ergibt bei den nicht normalverteilten Rohdaten im Wilcoxon-Test keinen signifikanten Unterschied zwischen T2 und T3.

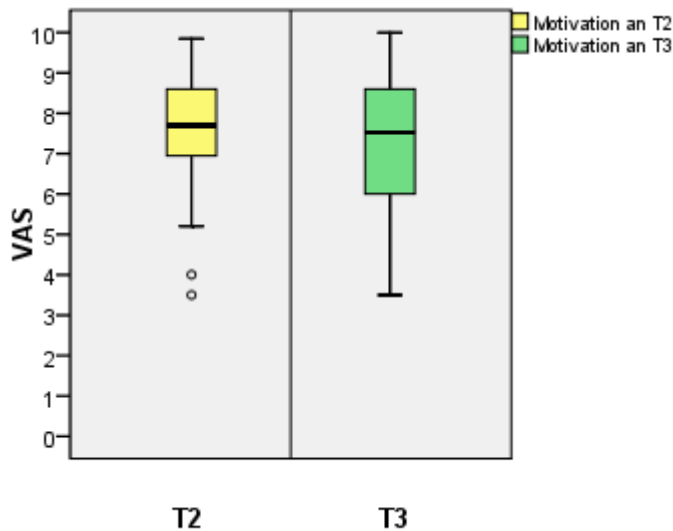


Abbildung 4.14: Motivationslage im Probandenkollektiv zu den Ergometrieterminen 2 und 3

Die Probanden wurden vor jedem Ergometriestart mittels VAS ebenfalls nach dem Grad ihrer Bedenken befragt, im folgenden Zeitfahren über die gesamte Dauer ihre volle Leistung zeigen zu können. Tabelle 4.5 zeigt eine fast identische Verteilung wie die oben stehende Tabelle 4.4, mit dem einzigen Unterschied, dass die Probanden, die ihre Bedenken beide Male gleich hoch einschätzten, beide an T3 mehr Arbeit verrichteten als an T2.

		verrichtete Arbeit an T2-T3		
		mehr Arbeit an T3	mehr Arbeit an T2	Gesamt
Bedenken an T2-T3	keine Differenz	2	0	2
	an T3 mehr Bedenken	7	8	15
	an T2 mehr Bedenken	9	8	17
	Gesamt	18	16	34

Tabelle 4.5: Zusammenhang zwischen den vor Ergometriebeginn geäußerten Bedenken der Probanden im folgenden Test über die gesamte Ergometriedauer „alles geben“ zu können und der dann tatsächlich verrichteten Arbeit an den Terminen T2 und T3; n=34

Auch in diesem Fall fällt der exakte Test nach Fischer ohne signifikantes Ergebnis aus. Die Abbildung 4.15 zeigt die Verteilung der Rohdaten in Bezug auf den Grad der Bedenken, im Zeitfahren über die ganze Dauer volle Leistung erbringen zu können. Im Wilcoxon-Test ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Terminen 2 und 3.

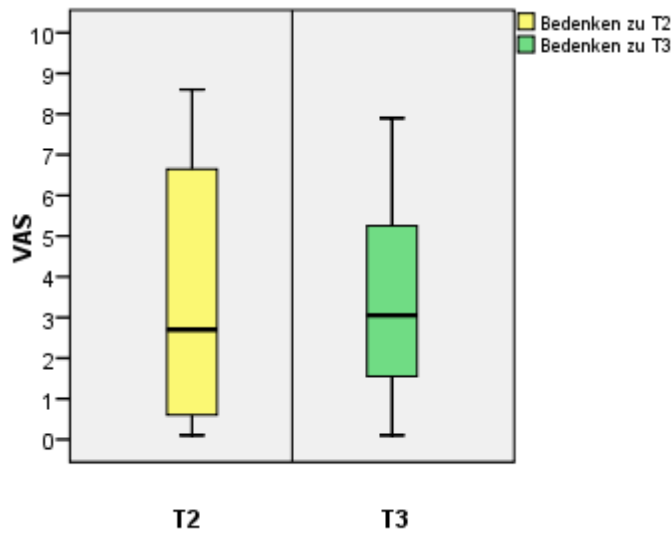


Abbildung 4.15: Grad der Bedenken seitens der Probanden im Zeitfahren über die gesamte Dauer volle Leistung bringen zu können; n=34

Um das Ausmaß eines möglichen Lerneffektes von Ergometrie T2 auf T3 quantifizieren zu können, wurden die Probanden mittels VAS befragt, wie viel Bedeutung sie diesem eventuellen Lerneffekt beimessen bzw. wie hoch sie die Beeinflussung ihres Herangehens an den Testtermin 3 durch Termin 2 einschätzen. Abbildung 4.16 verdeutlicht die Angaben zusammen mit dem Streudiagramm der Abbildung 4.17 graphisch.

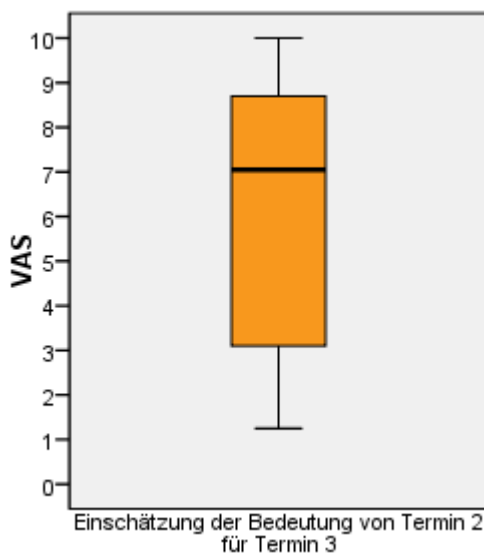


Abbildung 4.16: Einschätzung der Bedeutung von T2 für T3

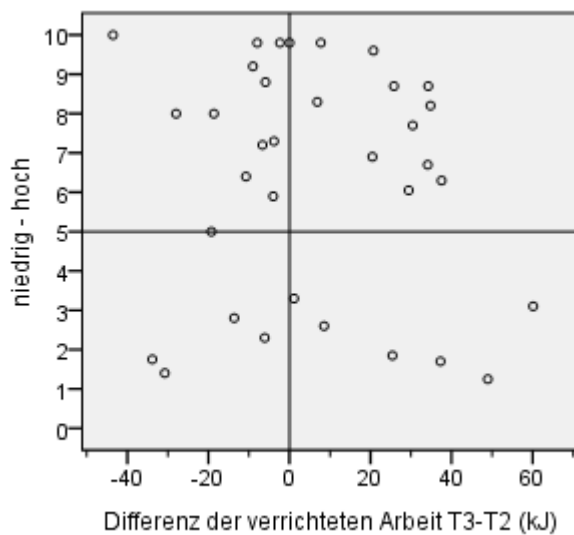


Abbildung 4.17: Darstellung im Streudiagramm; y-Achse: Grad der Bedeutung von T2 für T3; x-Achse: Differenz der an T3 und T2 verrichteten Arbeit [kJ]

Die Hälfte der Probanden gab Punktwerte größer 7,05 an, wohingegen lediglich ein Viertel Werte bis 3,03 angaben. Die verbleibenden 25 % der Testpersonen äußerten sich eher indifferent. Die Differenz der verrichteten Arbeit an den beiden Testterminen korreliert dabei nicht signifikant mit der Einschätzung der Bedeutung des Termins 2 in Hinblick auf Termin 3 (Korrelation nach Spearman-Rho).

4.6 Primärer Endpunkt und belastungsbeschreibende Parameter im Zeitfahren

4.6.1 Geleistete Arbeit und Reihenfolgeeffekt der Lichtexposition

Primärer Endpunkt der Studie war der Vergleich der unter Lichtexposition BL und DL während 40 Minuten Zeitfahrsimulation insgesamt geleisteten Arbeit, gemessen in kJ. Die median verrichtete Arbeit unter Bright Light betrug 548,45 kJ (Min 411,82 kJ, 25 %-Quartil 494,52 kJ, 75 %-Quartil 610,90 kJ, Max 875,20 kJ), unter Dim Light 521,52 kJ (Min 384,33 kJ, 25 %-Quartil 470,49 kJ, 75 %-Quartil 617,01 kJ, Max 861,23 kJ). Was aus der graphischen Darstellung dieser Daten in Abbildung 4.18 ebenfalls hervorgeht ist, dass unter beiden Lichtkonditionen jeweils drei Kandidaten als Ausreißer mit hohen absoluten Leistungswerten markiert sind, was allerdings im Falle der rechten Abbildungshälfte (DL) wegen der teilweisen Überlagerung zweier Punkte nur bei genauem Hinsehen zu erkennen ist.

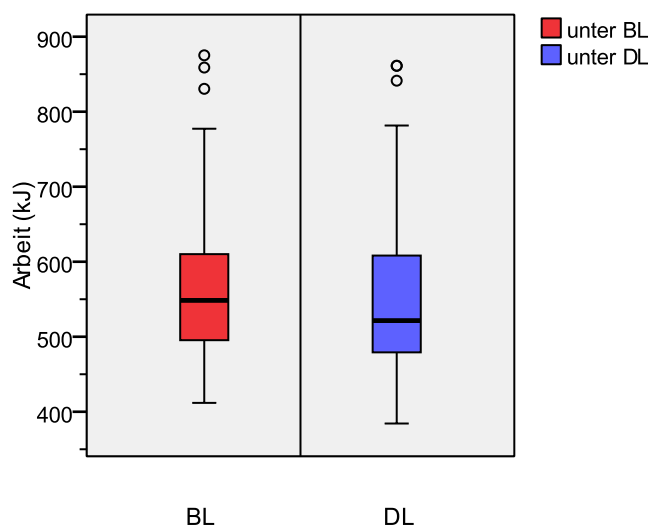


Abbildung 4.18: unter BL (rot) bzw. DL (blau) geleistete Arbeit in 40min Zeitfahr-simulation

Abbildung 4.19 gibt den zeitlichen Verlauf der über die gesamte Zeitfahrdauer kontinuierlich aufsummierten Arbeit mittels Box Plots wieder, wobei alle vier Minuten ein Messzeitpunkt gesetzt wurde. Aus der Abbildung wird deutlich, dass zu sämtlichen Zeitpunkten die Boxen und Mediane für DL niedriger liegen als für BL. Meist ist dies auch für Minimum und Maximum der Fall.

Zum Vergleich der unter den beiden Lichtkonditionen geleisteten Arbeit wurde als statistischem Test wegen der bereits genannten weiten Ausreißer dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben gegenüber dem t-Test der Vorzug gegeben. Der Wilcoxon-Test zeichnet sich im Vergleich zum t-Test durch eine höhere Robustheit gegenüber Ausreißern aus. Für den primären Endpunkt, die geleistete Arbeit nach 40 Minuten Zeitfahren, ergab sich dabei ein statistisch signifikanter Unterschied ($p=0,004$; $n=43$) zugunsten der BL-Situation.

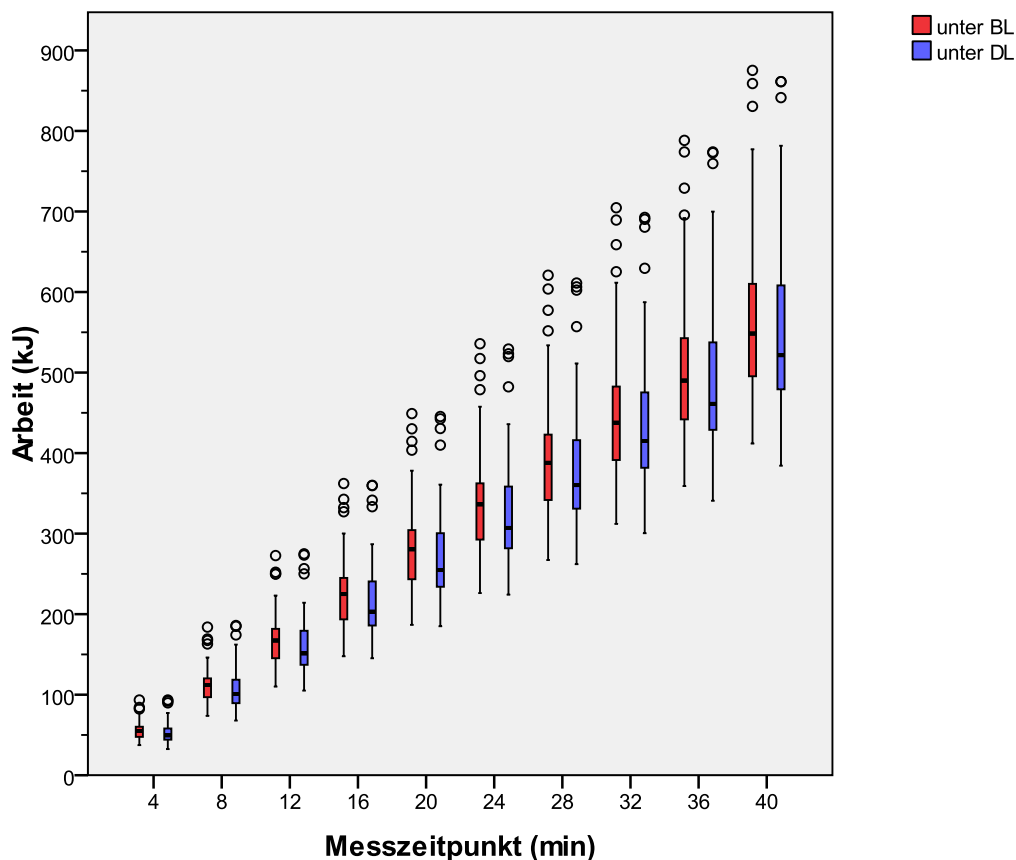


Abbildung 4.19: zeitlicher Verlauf der über die Zeitfahrdauer von 40min kontinuierlich aufsummierten verrichteten Arbeit [kJ]

Auch zu allen anderen Messzeitpunkten bestand ein gleichsinniger, statistisch signifikanter Unterschied in der geleisteten Arbeit zwischen der BL- und DL-Kondition. Um der Problematik des multiplen Testens adäquat zu begegnen, wurde eine Korrektur des

Signifikanzniveaus nach Bonferroni um den Faktor 10 vorgenommen (\rightarrow neues $\alpha=0,005$). Die errechneten p-Werte werden in Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Messzeitpunkt	p-Wert; n=43
4min	p=0,001
8min	p=0,001
12min	p=0,001
16min	p=0,001
20min	p<0,001
24min	p=0,001
28min	p=0,001
32min	p=0,002
36min	p=0,004
40min	p=0,004

Tabelle 4.6: p-Werte für die aufsummierte Arbeit (BL vs. DL) zu den einzelnen Messzeitpunkten; korrigiertes $\alpha=0,005$

Um die Frage nach einem möglichen Reihenfolgeeffekt der Lichtexposition zu beantworten, wurde die unten stehende Kreuztabelle (Tabelle 4.7) erstellt und mit dem exakten Test nach Fisher die statistischen Zusammenhänge berechnet. Die zu beantwortende Frage lautete: Leisteten jene Probanden, die zuerst gegenüber DL exponiert waren im Vergleich der beiden Zeitfahren am BL-Termin systematisch mehr, weil dies für sie das zweite Zeitfahren war und sie bereits einen gewissen Lerneffekt durch das erste hatten? Von den 23 Probanden, die zuerst gegenüber DL exponiert waren, erbrachten tatsächlich 16 unter der BL-Kondition mehr Leistung als unter DL. Jedoch leisteten auch 15 von 20, die zuerst BL-exponiert waren unter BL mehr. Mit dem exakten Test nach Fisher konnte hier kein signifikanter Einfluss der Reihenfolge der Lichtexposition auf die geleistete Arbeit gezeigt werden.

Umgekehrt weisen auch diejenigen mit BL-Exposition an erster Stelle, gegenüber denen mit umgekehrter Expositionsreihenfolge, zum zweiten Termin nicht systematisch häufiger niedrigere Leistungswerte auf.

	zuerst BL	zuerst DL	Gesamt
unter BL mehr geleistet	15	16	31
unter DL mehr geleistet	5	7	12
Gesamt	20	23	43

Tabelle 4.7: Einfluss der Reihenfolge der Lichtexposition auf die geleistete Arbeit

Für die nun folgende Betrachtung der leistungsbeschreibenden, physiologischen Parameter wurden die jeweils zehn Messwerte, die pro Parameter und Proband während des Zeitfahrens erhoben wurden gemittelt. Anschließend wurde ein Vergleich dieser Mittelwerte mit dem t-Test für verbundene Stichproben bei zweiseitiger Fragestellung zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ angestellt.

In den graphischen Darstellungen zu den einzelnen Parametern finden sich teilweise noch folgende weitere Messzeitpunkte: Ruhemessung (R), nach fünf bzw. zehn Minuten Einfahrzeit (-5 bzw. -10) und ein, drei und fünf Minuten in der Nachbelastungsphase (+1, +3, +5).

4.6.2 Laktat

Unter BL betrug der im Durchschnitt über das Zeitfahren erreichte Laktatwert $5,47 \pm 1,49$ mmol/l, unter DL dagegen $4,85 \pm 1,87$ mmol/l. Dieser mittlere Unterschied von $0,62 \pm 1,46$ mmol/l erweist sich als statistisch signifikant ($p=0,009$; $n=43$).

Bei Betrachtung der Abbildung 4.20 fällt während des Zeitfahrens eine durchgehend höhere Lage des Medians unter BL auf. Die Streuung der Werte fällt unter BL besonders in der zweiten Hälfte der Ergometrie bei niedrigeren Maximal- und höheren Minimalwerten bedeutend geringer aus. Insgesamt ist v. a. unter BL ein s-förmiger Verlauf über die Zeit mit initialem Anstieg, Abflachung bzw. leichtem Rückgang im Mittelteil und einem erneuten Anstieg zum Ende zu beobachten.

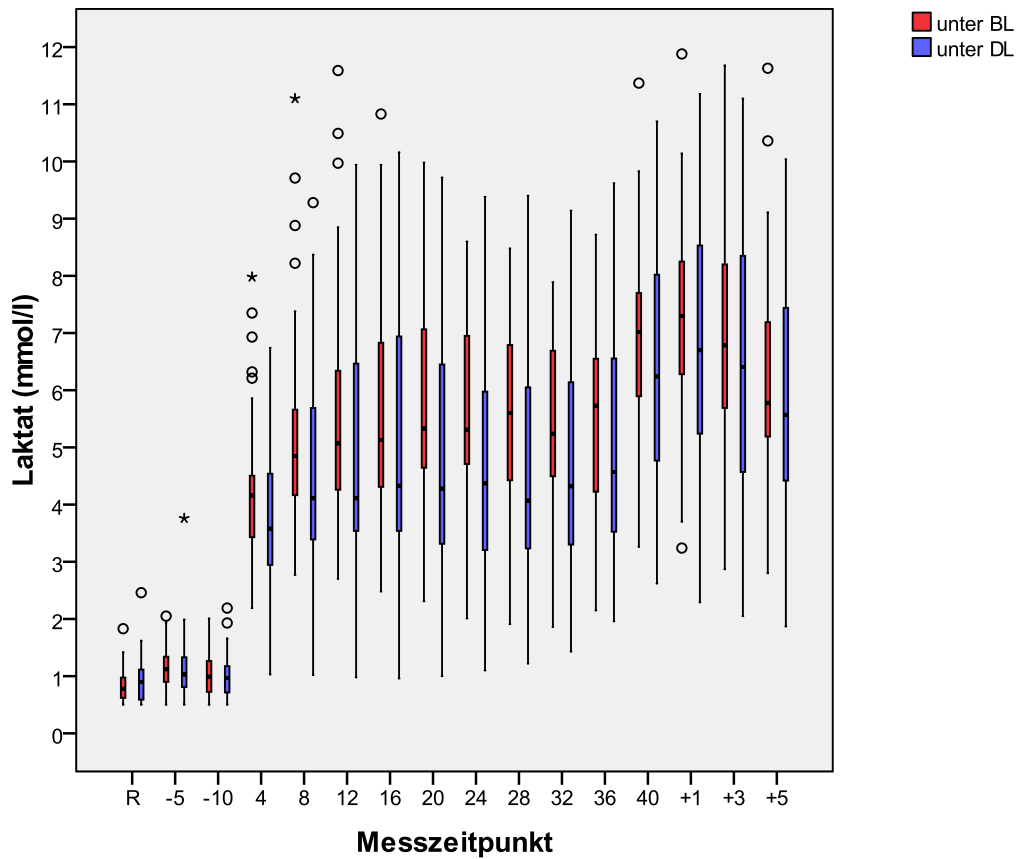


Abbildung 4.20: zeitlicher Verlauf der Laktatentwicklung während der Testfahrten

4.6.3 Herzfrequenz

Die mittlere Herzfrequenz im Zeitfahren betrug unter BL 168 ± 12 bpm und 165 ± 11 bpm unter DL. Der Unterschied von 3 ± 8 bpm ist mit einem p-Wert von 0,031 (n=42) statistisch signifikant. Die Spannweiten der Werte über die Ergometriedauer fallen unter den beiden Lichtexpositionen, bei im Schnitt höheren Punktwerten unter BL, ähnlich aus. Die Streuung im Kollektiv nimmt unter DL gegen Ende der Belastung jedoch deutlich ab (s. Abbildung 4.21).

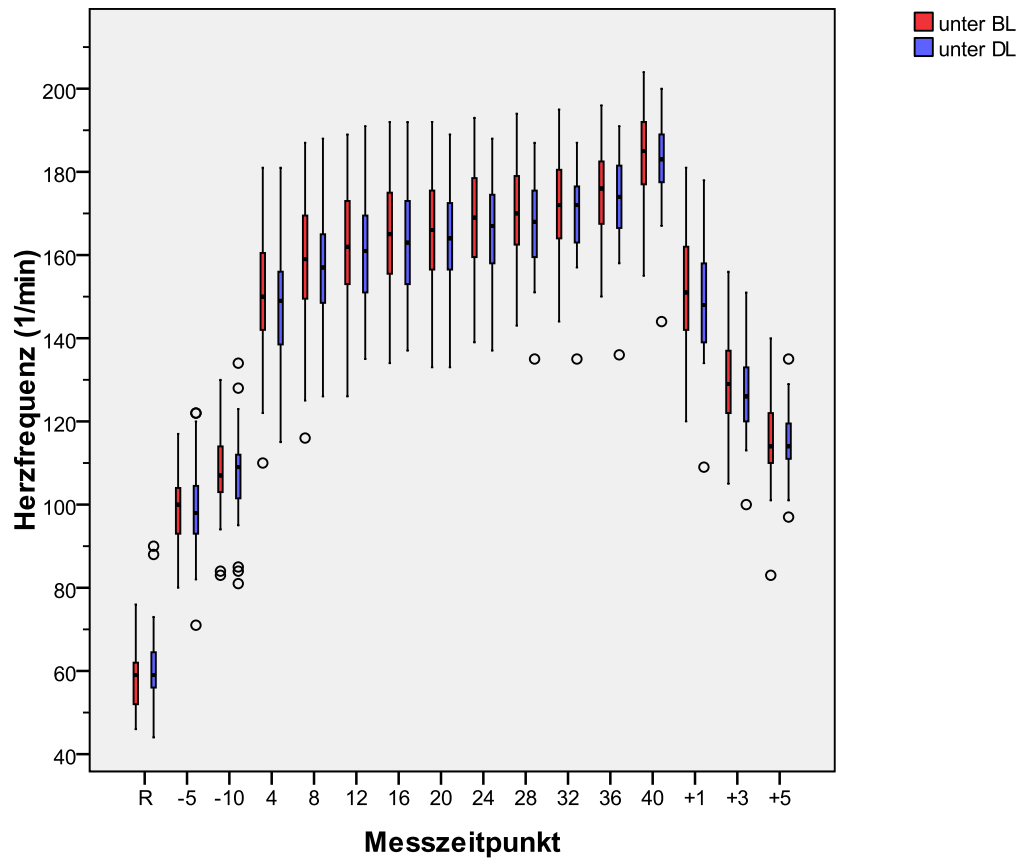


Abbildung 4.21: zeitlicher Verlauf der Herzfrequenzentwicklung während der Testfahrten

4.6.4 Anstrengungsskala nach Borg

Für die Anstrengungsskala nach Borg stellen sich die Ergebnisse wie folgt dar: Unter BL liegt der mittlere Punktwert bei $15,7 \pm 1,1$ vs. $15,3 \pm 1,1$ unter DL. Auch hier erweist sich der durchschnittliche Unterschied von $0,4 \pm 0,9$ Punkten als statistisch signifikant ($p=0,005$; $n=43$). Aus Abbildung 4.22 geht hervor, dass sich die Bewertung des subjektiven Anstrengungsgrades während der Ergometrie im Median zwischen 13 („etwas anstrengend“) und 19 Punkten („sehr, sehr anstrengend“) bewegt und von Beginn bis zum Ende relativ kontinuierlich ansteigt.

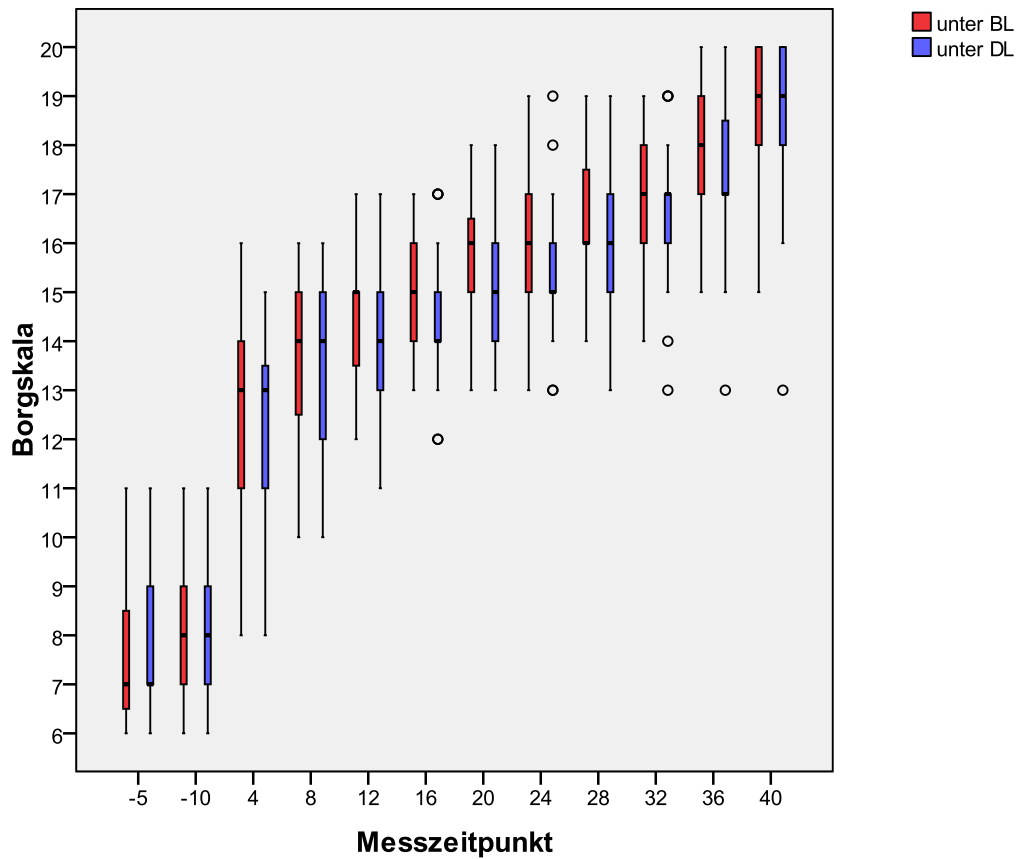


Abbildung 4.22: zeitlicher Verlauf der Borgwerteentwicklung während der Testfahrten

4.6.5 Sauerstoffaufnahme (VO_2), Kohlendioxidabatemung (VCO_2) und respiratorischer Quotient (RQ)

Unter BL wurde über die Zeitfahrdauer eine durchschnittliche Sauerstoffaufnahme von $3,30 \pm 0,58$ l/min registriert. Unter DL betrug diese $3,23 \pm 0,62$ l/min. Der mittlere Unterschied von $0,07 \pm 0,23$ l/min verfehlt knapp den Nachweis der statistischen Signifikanz. Die Verteilung der Messwerte über die Zeit ist in Abbildung 4.23 wiedergegeben.

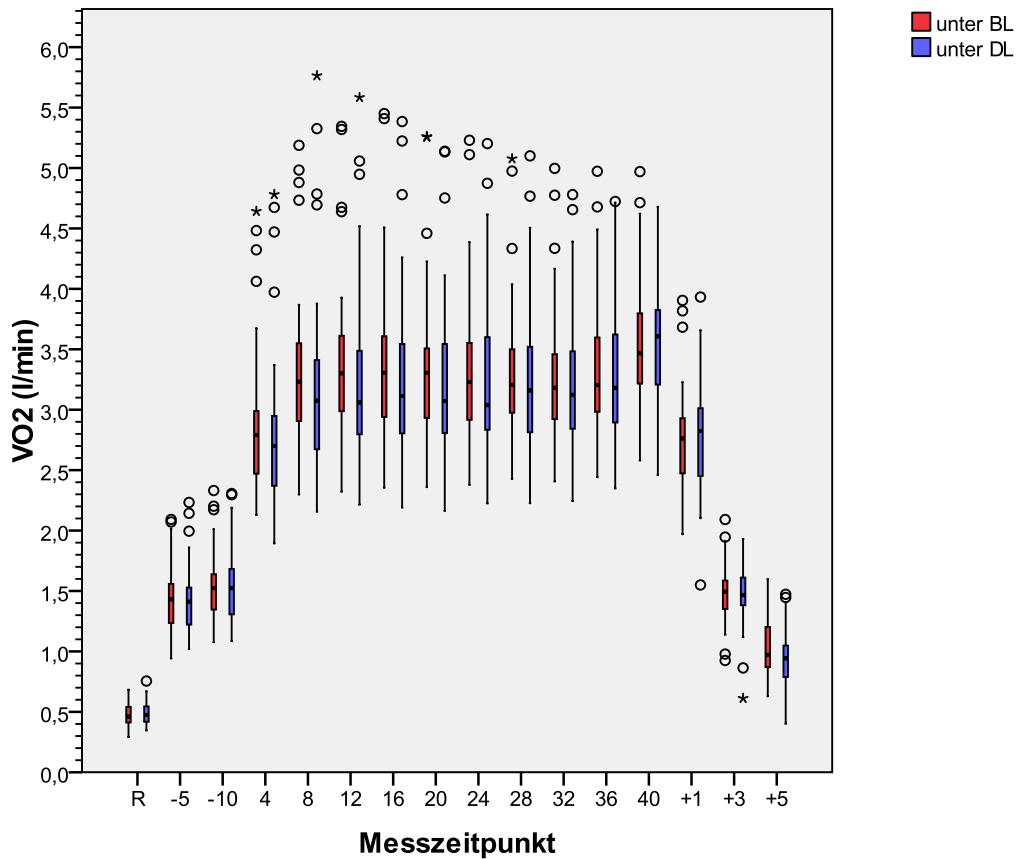


Abbildung 4.23: zeitlicher Verlauf der O₂-Aufnahme während der Testfahrten

Für den in Abbildung 4.24 dargestellten zeitlichen Verlauf der CO₂-Abatmung ergeben sich ebenfalls keine statistisch signifikanten Zusammenhänge. Die durchschnittliche Abatmung betrug unter BL $3,25 \pm 0,6$ l/min vs. $3,20 \pm 0,6$ l/min unter DL.

Sowohl im Falle der O₂-Aufnahme als auch der CO₂-Abgabe wird aus den zugehörigen Abbildungen eine Streuung der Messwerte etwa um den Faktor zwei zwischen den schwächsten und den stärksten Probanden im Kollektiv deutlich. Ebenfalls ersichtlich ist der bereits für die Laktatwerte beschriebene leicht s-förmige Verlauf der Datenverteilung über die Zeit.

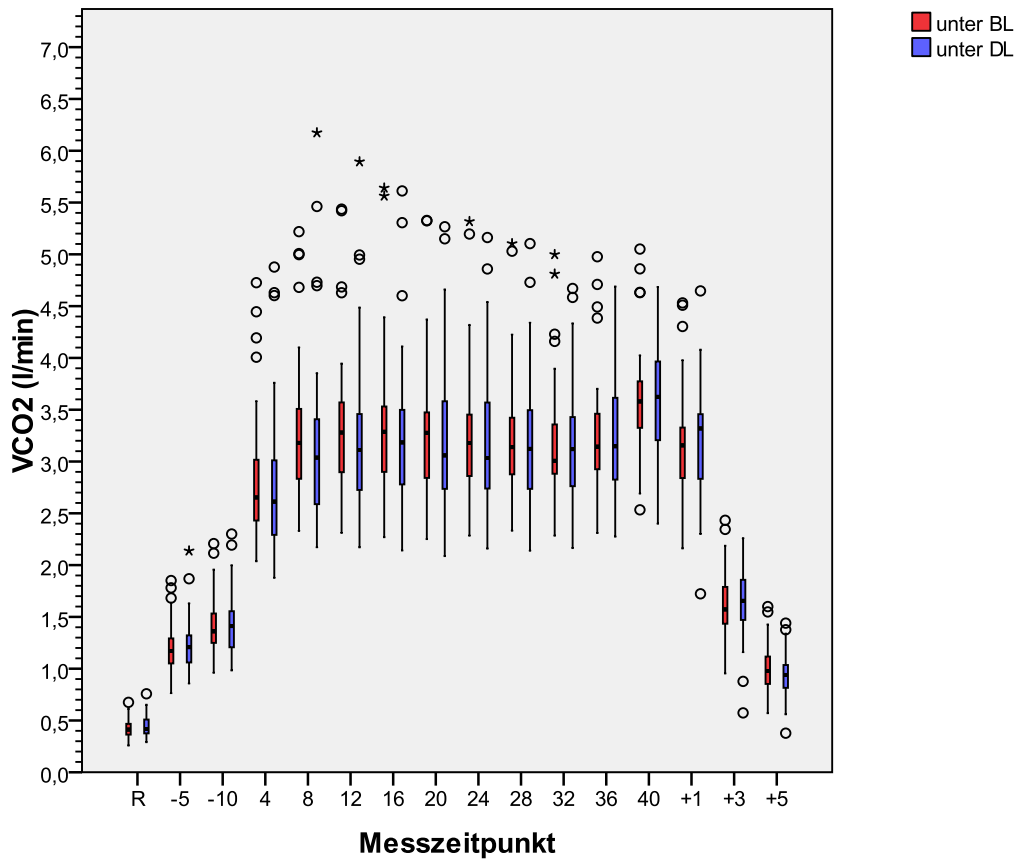


Abbildung 4.24: zeitlicher Verlauf der CO₂-Abgabe während der Testfahrten

In Bezug auf den errechneten respiratorischen Quotienten ergeben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der BL- ($0,984 \pm 0,03$) und der DL-Kondition ($0,987 \pm 0,03$). Während der Belastung weisen die Messwerte eine relativ geringe Streuung um den Wert von 1 auf, was für eine gleichmäßige Belastung im Bereich der Schwellenleistung spricht. Auch im Fall des respiratorischen Quotienten ist ein leicht s-förmiger Verlauf der Werte über die Zeit zu verzeichnen (s. Abbildung 4.25).

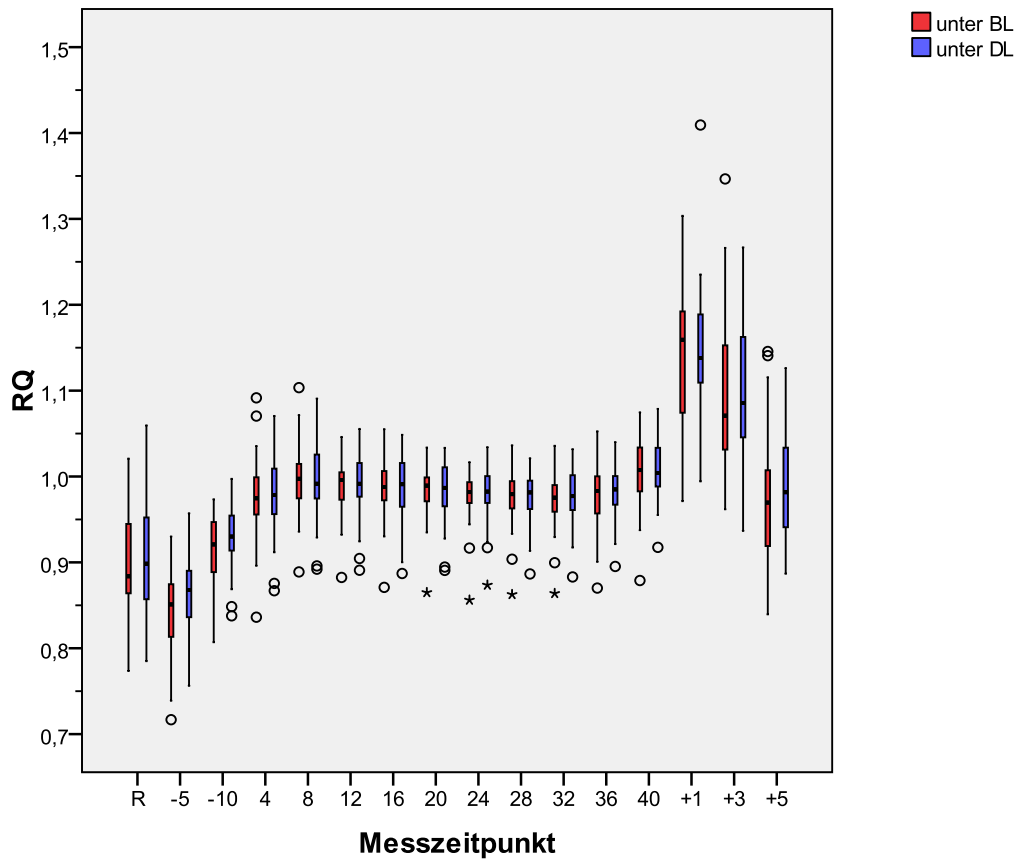


Abbildung 4.25: zeitlicher Verlauf der RQ-Werte während der Testfahrten

4.6.6 Körpertemperatur

Die Messwerte für die Körpertemperatur unterscheiden sich für die beiden Lichtkonditionen erst in der zweiten Nachkommastelle: $36,78 \pm 0,44 \text{ °C}$ unter BL vs. $36,71 \pm 0,39 \text{ °C}$ unter DL. Dieser Unterschied erweist sich als nicht signifikant. Weiterhin ist eine Interpretation in diesem Bereich bei einer Messgenauigkeit von nur einer Nachkommastelle ohnehin problematisch.

Aus Abbildung 4.26 wird ersichtlich, dass die mediane Körpertemperatur während der Ergometrie von $36,1 \text{ °C}$ (BL und DL) zum Zeitpunkt $t=4\text{min}$ auf $37,2 \text{ °C}$ (L1) bzw. $37,1 \text{ °C}$ (DL) zum Ende der Belastung ansteigt. Dabei nähert sich die gedachte Kurve durch die Medianwerte einem Maximalwert asymptotisch an.

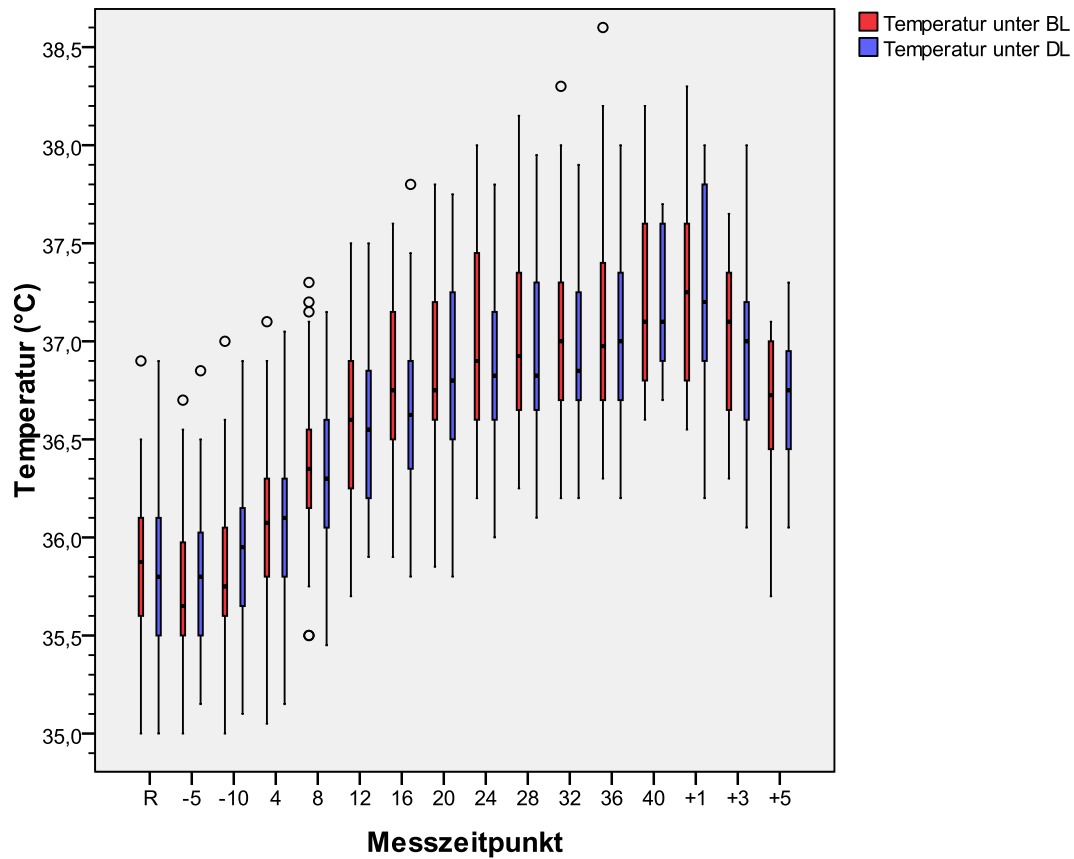


Abbildung 4.26: zeitlicher Verlauf der Temperaturwerte während der Testfahrten

4.7 Fragen zur Ergometrie

Im Folgenden repräsentiert der zuerst genannte Pol der VAS immer denjenigen mit dem zugeordneten Wert „0“ der Skala, der zweite immer den mit dem Wert „10“. Für die Auswertung aller fünf VAS wurde bei jeweils nicht normalverteilter Datenlage der Wilcoxon-Test verwendet.

Lediglich für die Gegenüberstellung „von Anfang an richtig gefahren – am Anfang zu falsch losgefahren“ ergibt sich ein signifikantes Testergebnis: Unter BL liegt der mediane Punktwert bei 4,1, unter DL dagegen bei 2,5 ($p=0,025$; $n=34$). Abbildung 4.27 zeigt die Datenverteilung mittels Box Plots auf. Das Ergebnis indiziert, dass die Probanden ihrem subjektiven Eindruck nach unter BL die Ergometrie forscher angingen als unter DL.

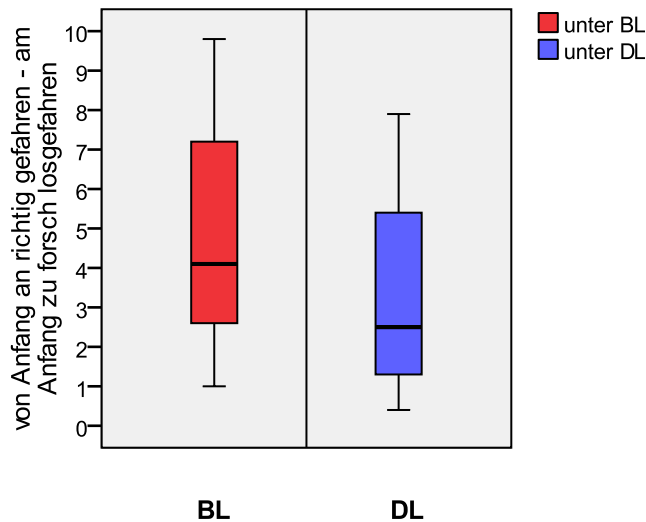
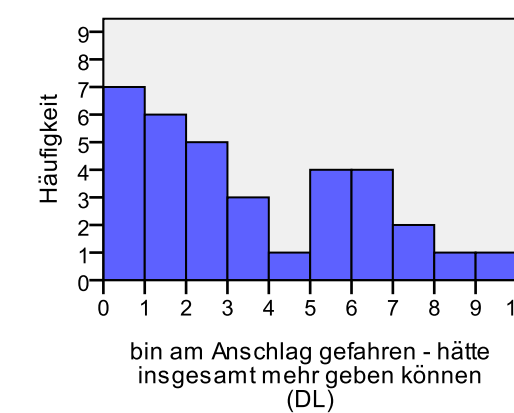
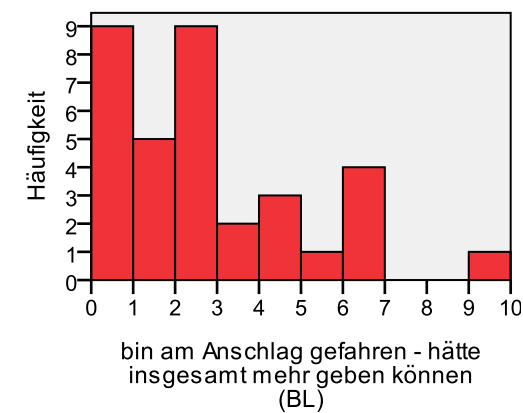
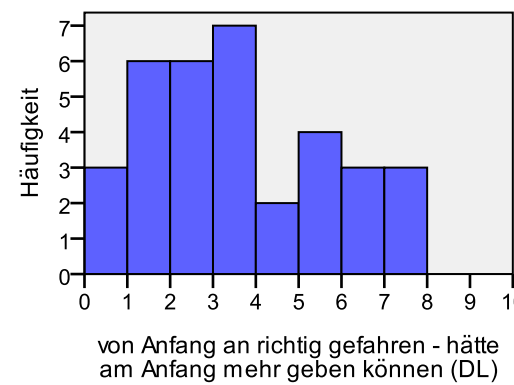
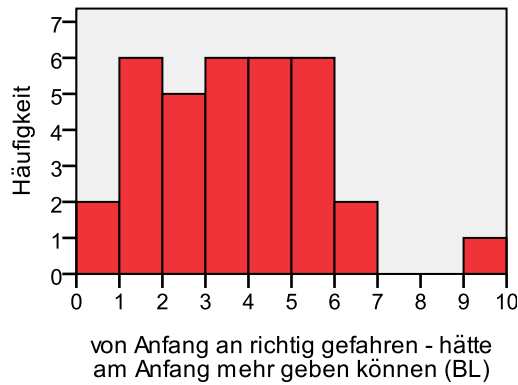
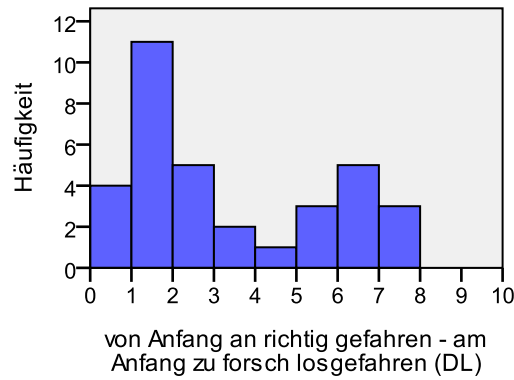
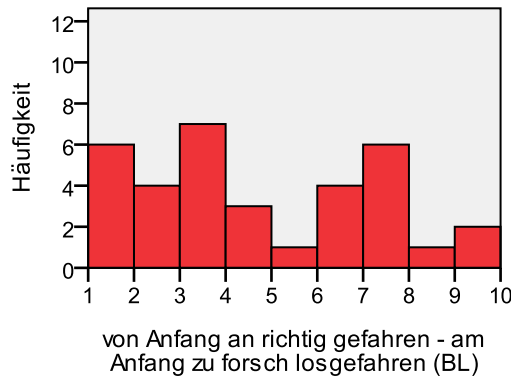
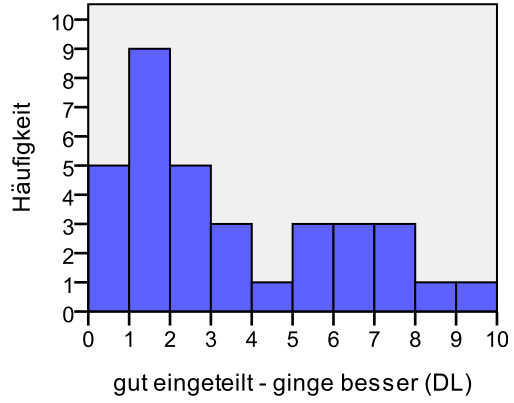
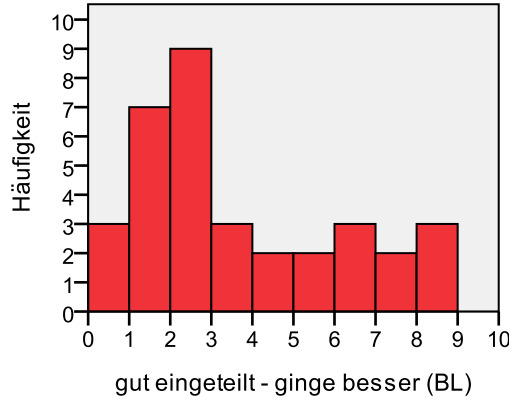


Abbildung 4.27: subjektive Einschätzung der Herangehensweise an die Startphase der Ergometrien

Hierbei, wie auch bei den restlichen vier gestellten Fragen, fällt auf, dass eine Streuung der Daten fast über den gesamten Skalenbereich vorliegt. Allerdings lässt sich jeweils eine deutliche Schiefe der Verteilung erkennen. Diese Schiefe verleiht den von den Probanden gemachten Angaben eine gewisse Aussagekraft, obwohl eine insgesamt breite Streuung vorliegt. Am deutlichsten wird dies in der Darstellung im Histogramm (s. Abbildung 4.28).

Aus der Analyse der Histogramme geht weiterhin hervor, dass 24 (BL) bzw. 23 (DL) von 34 Probanden angaben, sich die Ergometrie gut eingeteilt zu haben. 28 (BL) bzw. 22 (DL) von 34 gaben an, dass sie insgesamt nicht mehr hätten leisten können. Über den Endteil der Belastung befragt, gaben 25 (BL) bzw. 23 (DL) von 34 an, auch in dieser Phase tendenziell am Limit ihrer Belastbarkeit gefahren zu sein. Die letztgenannten Beobachtungen weisen alle keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Lichtexpositionen auf.

Ergebnisse



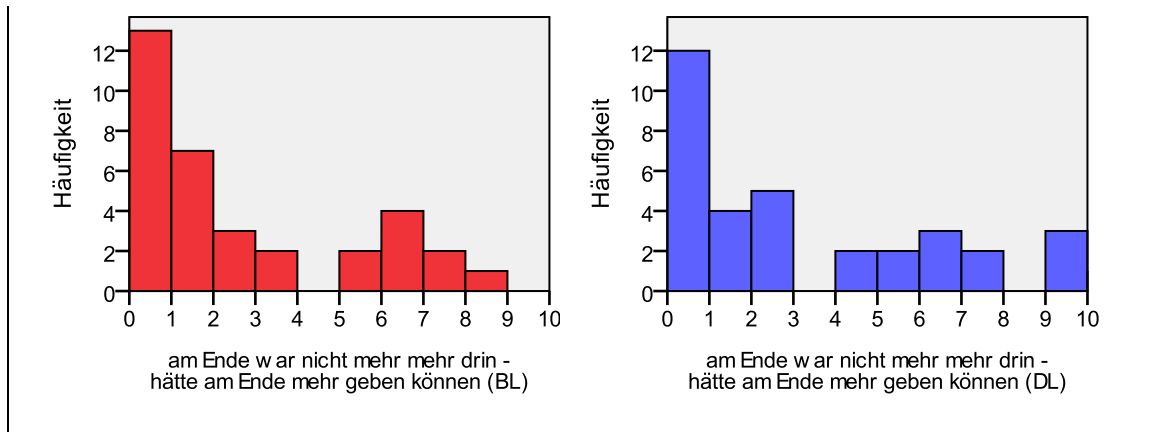


Abbildung 4.28: Fünf Abbildungspaare zur subjektiven Einschätzung der Herangehensweise an die Ergometrien. In roter Farbe dargestellt die Fahrten unter BL, in blau jene unter DL. Die Extrema der Skalen sind jeweils an der x-Achse angegeben, wobei der erstgenannte Pol immer der „0“, der zweite der „10“ entspricht.

4.8 Chronotypenverteilung im MCTQ, Schlafdauer und Aufstehzeitpunkt

Die Abbildung 4.29 und Abbildung 4.30 geben einen Überblick über die Häufigkeitsverteilung der Chronotypen nach dem Munich ChronoType Questionnaire (MCTQ; s. auch Kap. 3.3.2.1) im Kollektiv der Teilnehmer (n=43).

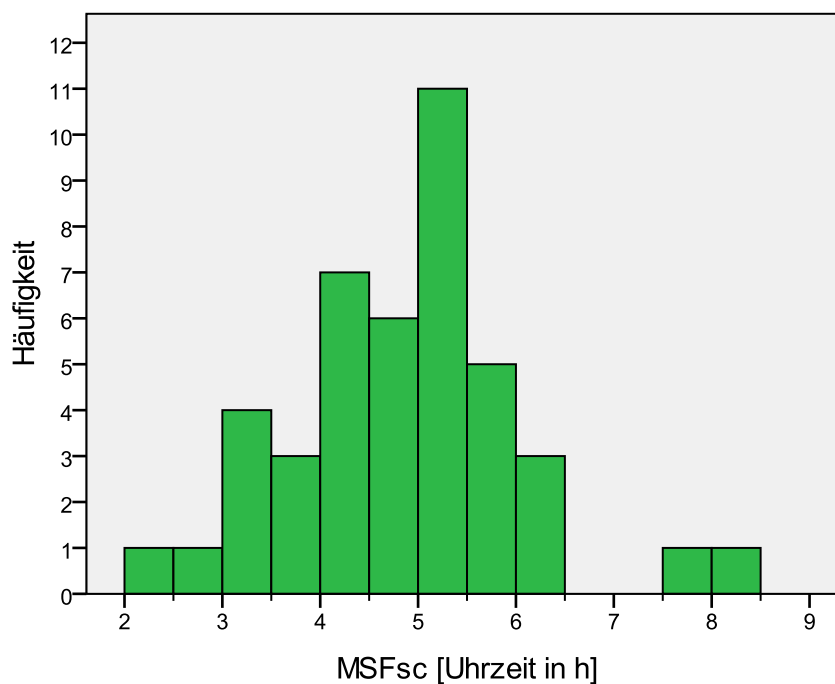


Abbildung 4.29: Häufigkeitsverteilung der MSFsc-Werte im Histogramm; y-Achse [%]
n=43

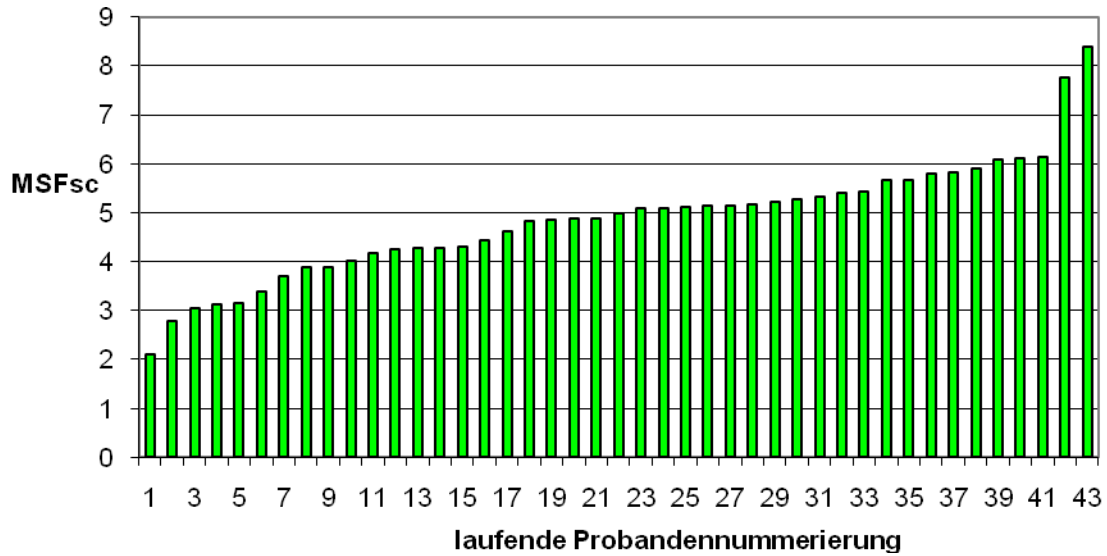


Abbildung 4.30: Übersicht über die MSFsc-Werte der einzelnen Probanden; $n=43$

Die mittlere Schlafdauer während der Versuchsteilnahme wird in der folgenden Abbildung 4.31 wiedergegeben. Gut 80 % der Teilnehmer schliefen zwischen sechseinhalb und acht Stunden pro Nacht.

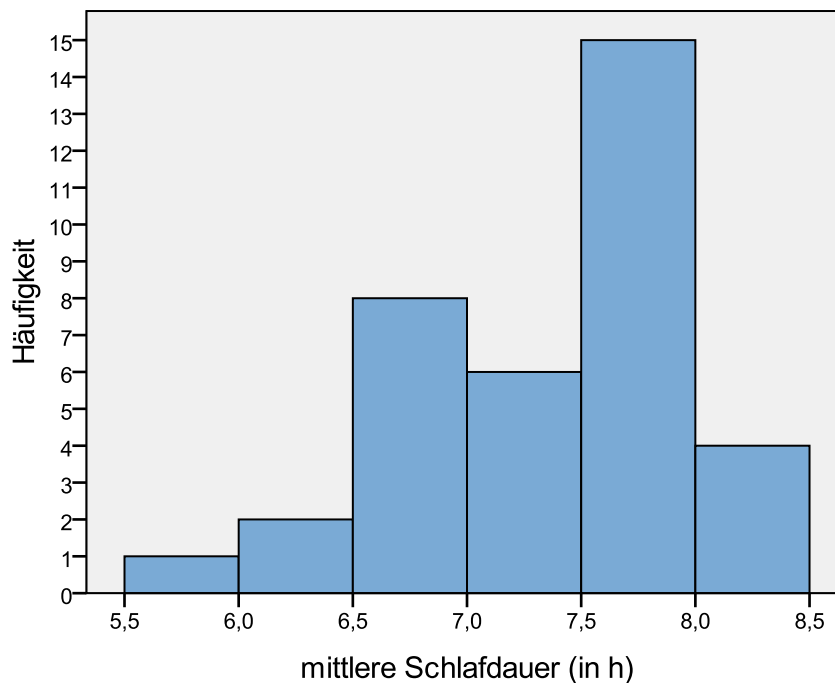


Abbildung 4.31: mittlere Schlafdauer der Probanden [h]; $n=36$

Die mittleren Aufwachzeiten der Probanden über die Dauer der Versuchsdurchführung stellen sich wie in Abbildung 4.32 dar. Sie ergeben sich aus MSFsc und der Schlafdauer.

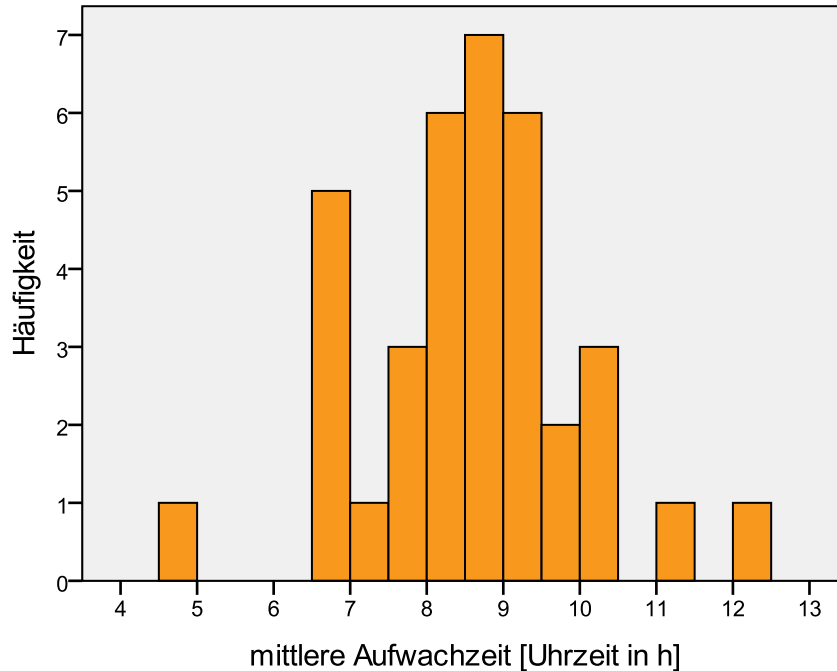


Abbildung 4.32: mittlere Aufwachzeit der Probanden; $n=36$

4.9 Belastungszeitpunkt im Kontext des MCTQ

Alle Uhrzeiten, auch die MSFsc-Angaben sind Angaben unter Sommerzeit.

Der Median für den Ergometriebeginn unter BL liegt bei 17:30 h, unter DL bei 17:31 h. Unter BL wurden 50 % der Ergometrien zwischen 17:08 h und 19:12 h gestartet, unter DL zwischen 17:04 h und 19:14 h. Der früheste Ergometriestart unter BL fand um 16:30h, der späteste um 22:26 h statt. Die entsprechend frühesten und spätesten Zeiten unter DL waren 16:03 h bzw. 21:38 h. Abbildung 4.33 fasst die Verteilung in Box Plots zusammen.

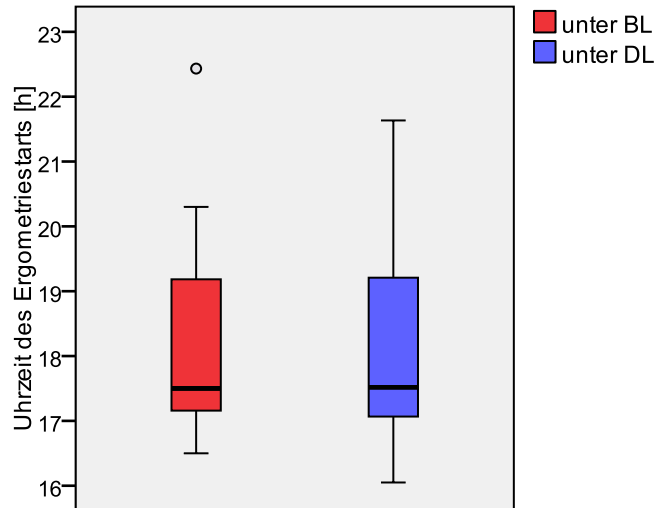


Abbildung 4.33:
Startzeitverteilung der Ergometrien unter
BL (rot) und DL (blau); n=43

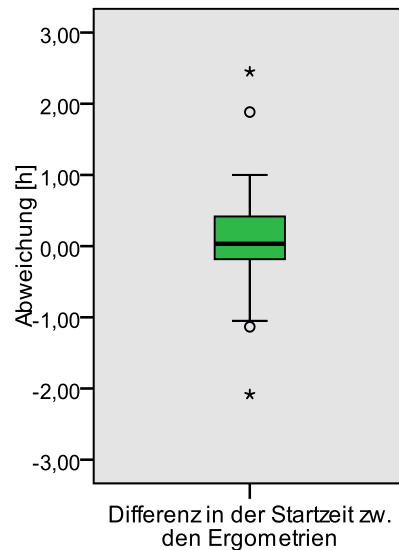


Abbildung 4.34:
Abweichung der Startzeiten der
Ergometrien (in h)

Intraindividuell betrug die Differenz zwischen den beiden Ergometriestartzeiten im Mittel lediglich sechs Minuten und bis auf vier Ausnahmen höchstens eine Stunde (s. Abbildung 4.34). In 32 von 43 Fällen ($\approx 74\%$) lag die tageszeitliche Abweichung in der Startzeit der Ergometrien bei höchstens 34 Minuten. Die vorliegenden Zeitabstände erweisen sich im Wilcoxon-Test als statistisch nicht signifikant.

Der zeitliche Abstand des jeweiligen Ergometriebeginns vom individuellen MSFsc lag für die BL-Kondition zwischen 10 h 53 min und 17 h 21 min, für die DL-Kondition zwischen 10 h 22 min und 16 h 33 min. Die mittleren 50 % der Probanden lagen dabei im Zeitfenster von 11 h 52 min bis 14 h 28 min (BL) bzw. zwischen 11 h 50 min bis 14 h 31 min (DL) nach ihrem MSFsc (s. Abbildung 4.35). Nach dem oben beschriebenen kann sich auch hier logischerweise kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Lichtkonditionen ergeben.

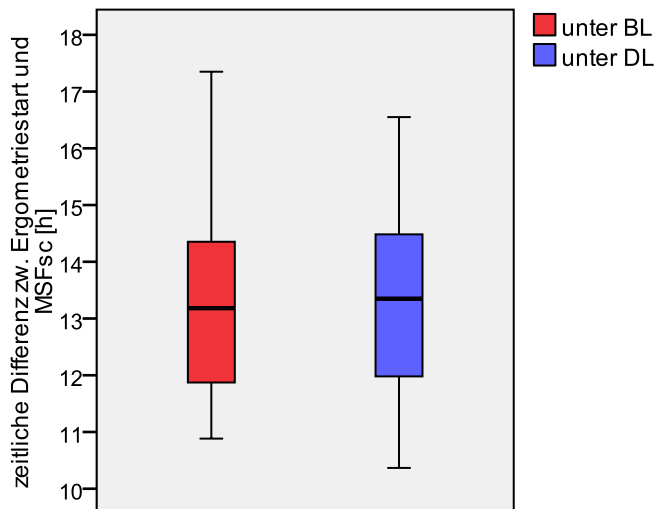


Abbildung 4.35: zeitliche Differenz (in h) zwischen Ergometriestartzeiten und MSFsc für BL (rot) und DL (blau); $n=43$

Unterteilt man das Kollektiv in zwei Gruppen (jeweils $n=18$), nämlich in Probanden mit langem bzw. kurzem Abstand zwischen MSFsc und dem Ergometriebeginn unter der jeweiligen Lichtsituation, so lässt sich feststellen, dass die Mediane der Ergometriestartzeit für BL um 2 h 00 min (19:09 vs. 17:09 Uhr), für DL um 2 h 07 min (19:12 vs. 17:05 Uhr) für die beiden Gruppen auseinander liegen. Die eben beschriebenen Befunde werden in Abbildung 4.36 graphisch veranschaulicht.

Von den zehn frühesten Chronotypen (MSFsc zwischen 2:06 Uhr und 4:01 Uhr) zählen vier zu dem Viertel der Probanden, die unter beiden Lichtkonditionen den größten zeitlichen Abstand zwischen MSFsc und Beginn der Ergometrie aufweisen. Von den zehn spätesten Chronotypen (MSFsc zwischen 5:39 Uhr und 8:22 Uhr) zählen sechs zu dem Viertel der Probanden, die unter beiden Lichtkonditionen den kleinsten zeitlichen Abstand zwischen MSFsc und Beginn der Ergometrie aufweisen.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass ein Teil der besonders frühen Chronotypen in Relation zu ihrem MSFsc besonders spät lichtexponiert und belastet wurde und ein Teil der besonders späten Chronotypen, relativ gesehen, besonders früh. Umgekehrte Konstellationen lassen sich dagegen nicht feststellen.

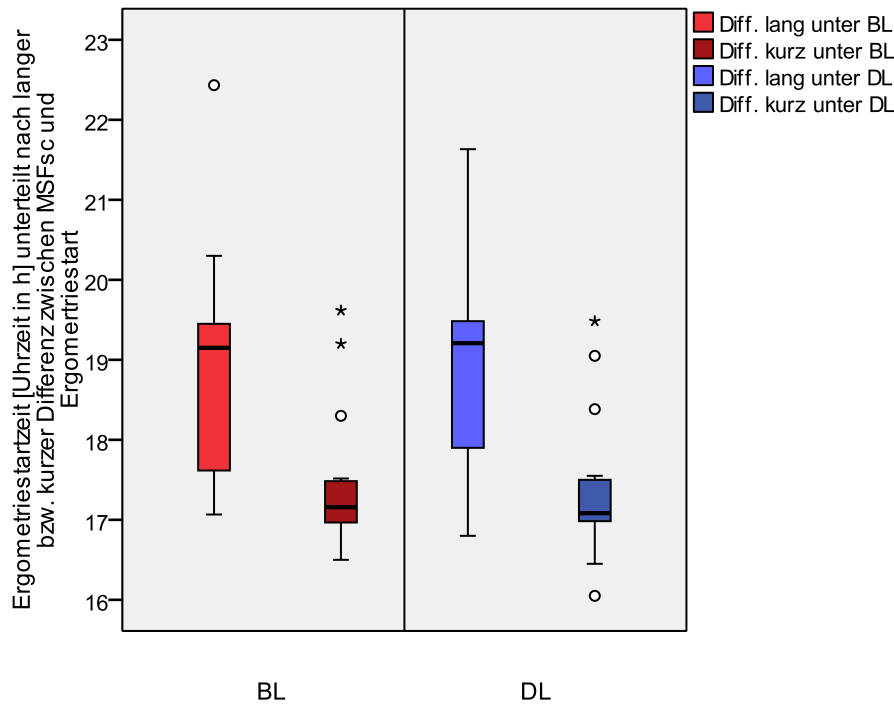


Abbildung 4.36: Darstellung der Ergometriestartzeiten. Jeder Box Plot der beiden Abbildungshälften repräsentiert 18 Probanden.

Der linke Box Plot einer jeden Abbildungshälfte repräsentiert den Ergometriestartzeitpunkt der jeweils 18 Teilnehmer, die unter der jeweiligen Lichtkondition eine relativ lange zeitliche Differenz zwischen ihrem individuellen MSFsc und der Ergometriestartzeit aufwiesen. Der rechte Box Plot zeigt die Startzeit jeweils für die 18 Probanden mit relativ kurzer Zeitspanne zwischen MSFsc und Ergometriestart.

4.10 Erzielte Leistungswerte im Kontext des MCTQ

Abbildung 4.37 verdeutlicht die zeitlichen Differenzen zwischen MSFsc und dem Ergometriestart. Die linken Box Plots in jeder Abbildungshälfte stellen die 18 Probanden mit relativ langem zeitlichen Abstand zwischen ihrem MSFsc und dem Ergometriebeginn dar, die rechten Boxen jeder Hälfte repräsentieren die 18 Probanden mit kurzen Abständen zum Ergometriestart. Im Median liegen die langen Abstände zwischen MSFsc und Ergometrie bei 14 h 31 min (BL) bzw. 14 h 34 min (DL), die kurzen bei 11 h 46 min (BL) bzw. 11 h 47 min (DL). Die in der Graphik ersichtlichen Unterschiede (lang vs. lang, kurz vs. kurz) erweisen sich im Wilcoxon-Test als statistisch nicht signifikant.

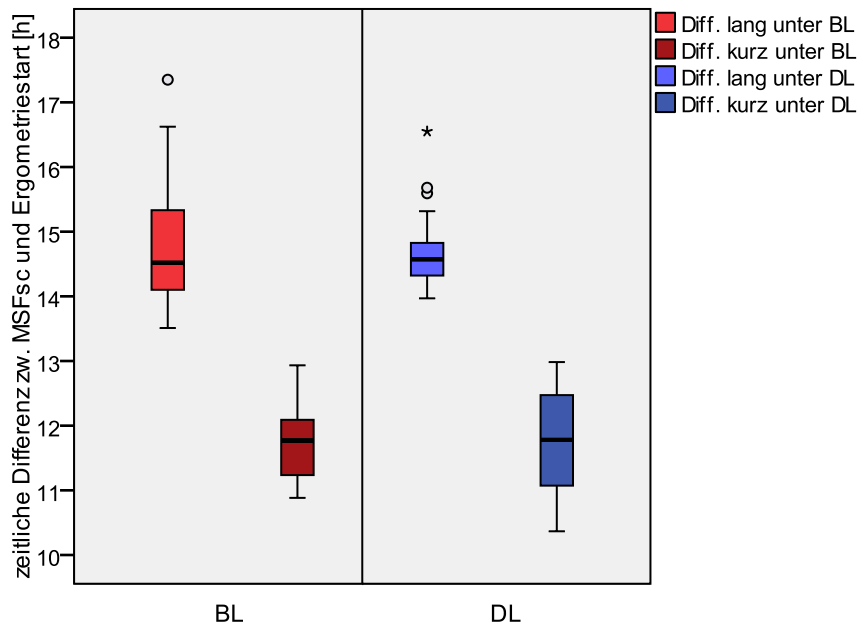


Abbildung 4.37: Zeitliche Differenz zwischen MSFsc und Ergometriestart [h]. Angegeben sind die zeitlichen Differenzen (in h) zwischen MSFsc und Ergometriestart getrennt für BL (linke Hälfte) und DL (rechte Hälfte). Auch hier erfolgte die Einteilung in 2 Gruppen zu je 18 Probanden, repräsentiert durch die linke bzw. rechte Box einer jeden Abbildungshälfte. Die Mediane in der BL-Kondition liegen bei 14h30min bzw. 11h46min, unter DL bei 14h34min bzw. 11h47min.

Die Probanden, die bei beiden Ergometrien einen relativ langen zeitlichen Abstand zwischen MSFsc und Ergometriestart aufweisen (hellrot (BL) in Abbildung 4.37: Median 14 h 30 min, Min. 13 h 30 min, Max. 17 h 21 min und hellblau (DL) in Abbildung 4.37: Median 14 h 34 min, Min. 13 h 58 min, Max. 16 h 33 min; n=18) zeigen im Vergleich zu jenen mit relativ kurzem Abstand zum Ergometriestart (dunkelrot (BL) in Abbildung 4.37: Median 11 h 46 min, Min. 10 h 53 min, Max. 12 h 56 min und dunkelblau (DL) in Abbildung 4.37: Median 11 h 47 min, Min. 10 h 22 min, Max. 12 h 59 min; n=18) im Mann-Whitney-Test signifikant höhere Differenzen zugunsten der BL-Kondition bei der in der Ergometrie verrichteten Arbeit ($p=0,004$). Der Median liegt für erstere Untergruppe bei einem Unterschied von +27,6 kJ (Min -30,7kJ, Max 60,7kJ, 25%-Quartil 8,7kJ / 75%-Quartil 37,7kJ), für letztere bei lediglich +2,6 kJ (Min -34,8kJ, Max 43,5kJ, 25%-Quartil -13,2kJ, 75%-Quartil 19,1kJ). (s. Abbildung 4.38). Dies indiziert, dass Probanden, die relativ spät nach ihrer persönlichen Nachtmittag (MSFsc) belastet wurden im Vergleich mit jenen, die relativ näher an ihrem MSFsc belastet wurden unter BL signifikant mehr zu leisten vermochten als unter DL.

Die zur Gesamtprobandenzahl von $n=43$ fehlenden sieben Kandidaten fallen bei der Einteilung in „lange“ und „kurze“ Abstände zwischen MSFsc und Ergometriebeginn unter BL der einen Gruppe zu und unter DL der anderen. Deshalb blieben sie bei den obigen Betrachtungen unberücksichtigt.

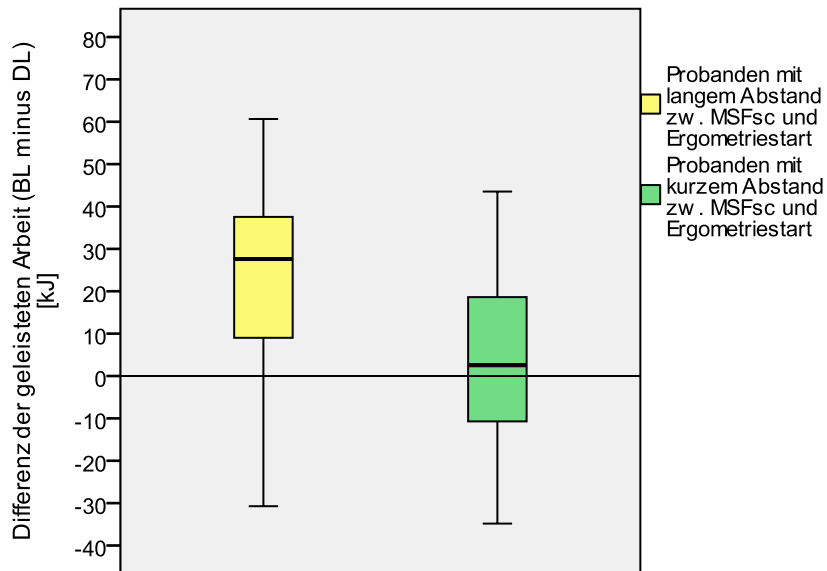


Abbildung 4.38: Differenz der geleisteten Arbeit (BL minus DL) in kJ; $n=36$
 Links der Box Plot für die Probanden mit langem Abstand zwischen MSFsc und Ergometriestart (gelb), rechts für die mit kurzem zeitlichen Abstand (grün)

5. Diskussion

5.1 Primärer Endpunkt und belastungsbeschreibende Parameter im Zeitfahren

Primäres Ziel der Studie war es, den Einfluss einer Exposition mit Bright Light vor (ca. 4420 lx) und während (ca. 4045 lx) einer Ausdauerbelastung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zu quantifizieren. Für die in 40 Minuten Zeitfahrsimulation auf dem Fahrradergometer verrichtete Arbeit, liegt ein statistisch signifikanter Unterschied zugunsten der Bright Light-Kondition (BL) vor. Der mediane Unterschied beträgt +26,93 kJ für BL, was einer Leistung von 11,22 W bzw. einem Plus von 5,164 % in Bezug auf Dim Light (DL) entspricht.

Um die Bedeutung eines solchen Effekts zu demonstrieren und ein Gefühl für die Größenordnung und Praxisrelevanz zu vermitteln, wird folgendes Beispiel angestellt: Der Strömungswiderstand F , den ein Radsportler beim Fahren zu überwinden hat, folgt der Formel:

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_F \quad [\text{N}]$$

Dabei entspricht ρ der Luftdichte, v der Geschwindigkeit, A der Angriffsfläche des Sportlers und C_F dem dimensionslosen Strömungswiderstandskoeffizienten, der sich unter anderem mit der Form des Körpers, der Geschwindigkeit, der Temperatur und der Beschaffenheit des Oberflächenmaterials ändert. Dieser Koeffizient wird auch häufig als c_w -Wert oder Widerstandsbeiwert bezeichnet.⁴⁸ Anhand dieser Formel wird deutlich, dass die aufzubringende Kraft um schneller voran zu kommen maßgeblich von der im Quadrat stehenden Fortbewegungsgeschwindigkeit v abhängt. Betrachtet man nun die zur Fortbewegung nötige Leistung P [W] steht die Fortbewegungsgeschwindigkeit v in der dritten Potenz.⁴⁸

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot C_F \quad [\text{W}]$$

Somit muss also, um doppelt so schnell fahren zu können, die achtfache Leistung erbracht werden. Allgemein gesprochen bewirkt also eine Leistungssteigerung um den Faktor x eine um $\sqrt[3]{x}$ höhere Geschwindigkeit.

In unserem konkreten Fall liegt die Verbesserung unter BL bei 5,164 %, was folglich in einer um ca. 1,728 % höheren Geschwindigkeit resultiert. Setzt man nun willkürlich – aber nicht unrealistisch für das Probandenkollektiv – für DL eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 35 km/h (= 9,722 m/s) an, so resultiert die oben aufgeführte mediane Differenz von 26,93 kJ in einem Vorsprung von ca. 403 m (23,736 km statt 23,333 km)

nach 40 Minuten Fahrzeit unter BL. Legt man umgekehrt die nach 40 Minuten unter DL zurückgelegte Strecke von 23,333 km (ebenfalls bei 35 km/h) als 100 % fest, so fährt ein Fahrer unter BL (mit dann 35,605 km/h bzw. 9,890 m/s) einen Zeitvorteil von näherungsweise 41 s gegenüber DL heraus. Dieses Rechenbeispiel belegt anschaulich die Relevanz des beschriebenen Leistungsunterschieds unter den beiden Lichtkonditionen selbst für Gelegenheitsrennfahrer. Im Profiradsport werden Rennen häufig durch wesentlich geringere Zeitdifferenzen entschieden. Als Beispiele seien die Deutsche Meisterschaft im Einzelzeitfahren der Männer U23 2010 über 30,4 km und das Einzelzeitfahren der Tour de France 2010 über 52 km genannt. Bei ersterem Rennen überquerten die ersten sechs Finisher bei einer Bestzeit von 36 min 41 s innerhalb von 56 s die Ziellinie³; bei der Tour trennten den Erstplatzierten Cancellara bei einer Fahrzeit von 1 h 00 min 56 s nur 17 s vom Zweiten Martin².

Im Weiteren ergaben sich statistisch signifikante Unterschiede für die unter BL vs. DL erhobenen Laktat-, Herzfrequenz- und Borgwerte (s. Kap. 4.6.2 bis 4.6.4). Die mittleren Unterschiede von $0,62 \pm 1,46$ mmol/l ($p=0,009$; $n=43$), 3 ± 8 bpm ($p=0,031$; $n=42$) bzw. $0,4 \pm 0,9$ Punkten auf der Borgskala ($p=0,005$; $n=43$) fallen verhältnismäßig gering aus. Jedoch kann die Frage nach der klinischen Relevanz dieser Ergebnisse mit Hinweis auf das oben ausgeführte Beispiel gut beantwortet werden. Während Laktatspiegel und Herzfrequenz direkt messbare physiologische Parameter darstellen, führt die Borgskala zu einem sich aus dem subjektiven Anstrengungsgrad ergebenden Punktwert. Dieser korreliert gut mit physiologischen Größen wie Herzfrequenz, Laktatspiegel, Sauerstoffaufnahme oder Atemfrequenz während der Belastung.⁶⁹

In den vorliegenden Versuchen verfehlt der Unterschied in den Atemgasen O₂ und CO₂ unter BL vs. DL nur knapp die statistische Signifikanz, weist aber sehr wohl in die gleiche Richtung wie die restlichen Parameter. Eine Erklärung hierfür lässt sich nicht zweifelsfrei geben. Ein möglicher Erklärungsansatz sind kleinere Messungenauigkeiten, die gegen Ende einiger weniger Testfahrten durch Sekret in den Messapparaturen zustande kamen. Das Ausmaß dieser Beeinträchtigungen rechtfertigte allerdings nicht einen Ausschluss der betroffenen Datensätze von der Analyse.

Die Erhöhung der tympanal gemessenen Körpertemperatur als Folge der körperlichen Anstrengung bleibt mit ihrem Unterschied zwischen BL und DL ebenfalls unterhalb der statistischen Nachweisgrenze. Ansteigende Körpertemperatur unter Belastung wird in der Literatur als ein limitierender Einfluss auf die Ausdauerleistungsfähigkeit diskutiert.

^{39, 77, 109} In den Daten der vorliegenden Arbeit zeigt sich ein Anstieg der medianen

Körpertemperatur im Laufe der Ergometrie um jeweils ca. 1,5 °C. Dabei wird ein asymptotischer Verlauf der Temperaturkurve hin auf einen Maximalwert deutlich, was vor dem Hintergrund der oben zitierten Arbeiten plausibel erscheint.

Von den in der Literatur zu findenden Studien, die die Auswirkung von Lichtexposition auf verschiedene Aspekte körperlicher Leistungsfähigkeit untersuchen^{74, 75, 113}, konnte lediglich eine signifikant höhere Leistungswerte unter der Anwendung von hellem Licht (5000 lx) zeigen.¹¹³ Allgemein muss man zur Betrachtung dieser Studien vorausschicken, dass sie in ihren Versuchsprotokollen erhebliche Unterschiede aufweisen und allein aus diesem Grund untereinander und auch mit der vorliegenden Arbeit schwer vergleichbar sind.

So untersuchten Zhang und Tokura¹¹³ an acht jungen Frauen den Effekt von acht Stunden Exposition (10-18 Uhr) gegenüber 5000 lx vs. 50 lx auf die am Folgetag um 6:00 Uhr morgens absolvierte Anzahl von Handkontraktionen gegen einen Widerstand von 10 % des zuvor ermittelten Maximalkraftwertes. Nach der 5000 lx-Exposition wurden signifikant mehr Kontraktionen geleistet als nach 50 lx am Vortag. Außerdem wurden sowohl tags als auch nachts signifikant niedrigere rektale Temperaturwerte in der 5000 lx-Kondition gemessen. Diesen Befund ziehen die Autoren als möglichen Erklärungsansatz für die höhere Anzahl an Handkontraktionen nach 5000 lx-Beleuchtung heran. Das gewählte Lichtexpositionsprotokoll, der zeitliche Abstand zum Ende der Exposition, der tageszeitliche Belastungszeitpunkt sowie die Belastungsform lassen einen direkten Vergleich mit der vorliegenden Arbeit jedoch kaum zu. Als Limitationen der Studie sind festzuhalten: Die Untersuchungen wurden nur an einem kleinen Kollektiv sämtlich untrainierter Probandinnen durchgeführt. Die Ergometrie stellte eine ungewohnte Belastung dar, in der sie sich mangels Erfahrung nur schlecht einschätzen konnten. Zudem waren die Abstände zwischen den einzelnen Testtagen mit ein bis zwei Tagen sehr kurz gehalten. Eine negative Beeinflussung des Folgetermins durch nicht ausreichende Regeneration ist nicht auszuschließen. Über die spektrale Verteilung bzw. Gewichtung der verwendeten Lichtquelle wird von den Autoren keine Auskunft gegeben. Als Belastungsform wurde ein Protokoll mit einer all-out-Charakteristik gewählt. Diese unterliegt einer vergleichsweise hohen Test-Retest-Variabilität, was ein zufällig signifikantes Testergebnis begünstigen kann.

Ähnlicher im Versuchsablauf war dagegen die Studie von Ohkuwa et al. angelegt.⁷⁵ Sie sah eine 90-minütige Lichtexposition (5000 lx vs. 50 lx) vor einem 45 s dauernden

supramaximalen Test auf dem Fahrradergometer unter 500 lx Beleuchtung vor. Verglichen wurden die erzielte Leistung, Laktat-, Adrenalin-, Noradrenalin-, Glukose- und Ammoniakwerte. Dabei konnte kein Unterschied in der erbrachten Leistung, bei Laktat-, Ammoniak- und Noradrenalinwerten festgestellt werden. Einzig Adrenalin nach der Lichtexposition und Glukose kurz nach der Belastung fielen unter der 5000 lx-Kondition signifikant erniedrigt aus. Die Hauptlimitation der Studie besteht neben der geringen Probandenzahl darin, dass Langstreckenläufer mit einer extrem kurzen, hochintensiven Belastung auf dem Fahrrad konfrontiert wurden. Weiterhin wird die Tageszeit, zu der die Versuche stattfanden nicht näher angegeben, was eine Einordnung und Vergleichbarkeit mit der vorliegenden Arbeit in dieser Hinsicht unmöglich macht. Genauso wenig sind Daten zur spektralen Verteilung bzw. Gewichtung der verwendeten Lichtquelle bekannt.

Die besten Ansatzpunkte für einen direkten Vergleich bietet die Arbeit von O'Brien und O'Connor.⁷⁴ Sie untersuchten den Einfluss von hellem Licht (1411 lx, 2788 lx und 6434 lx) während einer 20-minütigen Belastung auf dem Fahrradergometer auf die in den Zeitfahrsimulationen erbrachte Leistung, ausgesuchte physiologische Parameter und die Stimmungslage der Probanden. Sie konnten in keinem der untersuchten Parameter einen Unterschied im Vergleich der drei Lichtkonditionen feststellen. Allerdings machte sich ein signifikanter Reihenfolgeeffekt bemerkbar: Trotz randomisierter Lichtreihenfolge an den verschiedenen Testtagen wurde am ersten Testtag signifikant weniger geleistet als am dritten. Eine Erklärung hierfür bleiben die Autoren allerdings schuldig. Die Studie kontrolliert eine Reihe von Einflussfaktoren wirkungsvoll mit kreativen Ideen, andere bleiben als deutliche Limitationen unberücksichtigt: Die geringe Probandenzahl von lediglich zwölf hochtrainierten, wettkampferfahrenen Teilnehmern erschwert die Extrapolation der Ergebnisse auf die Gesamtbevölkerung. Die tageszeitliche Streuung der Ergometrien über ein breites Zeitfenster des Tages (8:00 bis 18:00 Uhr) führt aus chronobiologischer Sicht zu Belastungen in grundlegend verschiedenen zirkadianen Phasenlagen des Körpers. Zudem ist der Organismus zu verschiedenen Tageszeiten unterschiedlich empfänglich für die experimentelle Lichteinwirkung. So führt Lichtexposition am frühen Morgen zu Phasenverschiebung nach vorne, Lichteinwirkung am frühen Abend „bremst“ die innere Uhr dagegen. Dies erschwert die Vergleichbarkeit von Ergometrieleistungen ein und derselben Person an mehreren Terminen erheblich. Die Anzeige von Parametern wie Trittfrequenz, Herzfrequenz, Leistung und der verstrichenen Zeit während der Ergometriedurchführung birgt großes Confoundingpotenzial,

zumal es sich bei den Studienteilnehmern um in hohem Maße ausdauertrainierte und wettkampferfahrene Radsportler handelte. Sie dürften in der Lage sein, gerade mit Einsicht in solche Parameter ihre Leistung sehr genau zu steuern. Hierin liegt sicherlich ein weiterer Grund für die nichtsignifikanten Unterschiede in der Studie. Auch geben die Autoren keine Information bezüglich der spektralen Verteilung des verwendeten Lichts an. Es ist weiterhin fraglich ob eine experimentelle Lichtexposition tagsüber von lediglich 20 min überhaupt einen messbaren Effekt auf die untersuchten Parameter ausüben kann. Außerdem ist es denkbar, dass die durch Lichtanwendung getriggerten Effekte erst bei längeren Ausdauerbelastungen zum Tragen kommen.

In der vorliegenden Arbeit ist von Anfang an unter der BL-Kondition ein Mehr an verrichteter Arbeit nachweisbar (Kap. 4.6.1). Dies deutet auf einen bereits zu Beginn der Ergometrie bestehenden Effekt durch die Präexposition hin.

Die physische Leistungsfähigkeit ist tageszeitabhängig und am Nachmittag und Abend bekanntermaßen am höchsten^{84, 85}. Interessant ist nun, dass dieses natürliche Leistungsmaximum durch zusätzliches Lichtangebot noch einmal signifikant angehoben werden kann. Im Vergleich zu den oben angeführten Studien kam in der vorliegenden erstmals eine Lichtexposition sowohl vor als auch während der Belastung auf dem Ergometer zum Einsatz.

Was als Ursache der beobachteten Leistungssteigerung unter BL ausgeschlossen werden kann, ist ein Reihenfolgeeffekt der Lichtexposition. Dies wurde bereits im Kapitel 4.6.1 im Einzelnen dargestellt. Aus dieser Feststellung kann gefolgert werden, dass die Randomisierung der Lichtreihenfolge effektiv erfolgte. Weitere mögliche Reihenfolgeeffekte werden im Kapitel 5.4 diskutiert.

5.2 Chronotypenverteilung im MCTQ

Die im Kapitel 4.8 dargestellte Verteilung der Chronotypen im Kollektiv der Studie unterscheidet sich in gewisser Weise von den von Rönneberg et al. publizierten Daten für den MSFsc für die Gesamtbevölkerung: Die Zeitspanne zwischen drei und vier Uhr fällt in der Studienstichprobe um ca. 7 % unterrepräsentiert aus. Die Chronotypen zwischen fünf und sechs Uhr sind dagegen um ca. 15 % stärker vertreten als in der Gesamtbevölkerung. Vor dem Hintergrund der Geschlechts- und Altersabhängigkeit relativiert sich die beobachtete Verschiebung wieder. Im Alter von 20-30 Jahren ist für das männliche Geschlecht eine eher späte Chronotypenlage beschrieben. Die Mittelwerte des

MSFsc für jedes Lebensjahr dieser Altersgruppe der Männer liegen ungefähr zwischen 4:50 Uhr und 5:20 Uhr und damit ca. eine Stunde später als in der Grundgesamtheit⁸⁷. Die Chronotypenverteilung im Teilnehmerkollektiv der vorliegenden Studie ist also altersentsprechend repräsentativ und vergleichbar mit den Daten von Rönneberg et al.

5.3 Belastungszeitpunkt und Leistung im Kontext des MCTQ

Von den 18 Probanden, die unter beiden Lichtkonditionen zwischen Ergometriestart und ihrem MSFsc einen relativ langen zeitlichen Abstand aufweisen wurde unter BL signifikant mehr geleistet als von den 18 Teilnehmern mit relativ geringem Abstand zwischen MSFsc und Ergometriestart (s. Kap. 4.10). Anders ausgedrückt wurden 18 Probanden im Median knapp drei Stunden später in Bezug auf ihren persönlichen, endogenen Tagesrhythmus lichtexponiert und belastet als die anderen 18. Unter diesen Bedingungen vermochten erstere unter BL signifikant mehr zu leisten als unter DL. Graphische Darstellungen hierzu finden sich im Kapitel 4.9 und 4.10.

Zeitlich gesehen tritt bei den spät belasteten frühen Chronotypen die experimentelle Lichtexposition in einem späteren Zeitfenster des individuellen Tagesrhythmus auf als bei früh belasteten späten Chronotypen (s. Abbildung 4.36). Der menschliche Organismus erreicht normalerweise gegen 19 Uhr sein natürliches Maximum der Körperkern-temperatur²³. An diesem Temperaturmaximum verbleibt nunmehr ein reduzierter Spielraum bis zum Erreichen leistungslimitierender Kerntemperaturen unter körperlicher Belastung^{39, 77, 109}. Eine Verzögerung der zirkadianen Phasenlage durch die experimentelle Lichtexposition und damit ein späteres Erreichen des Kerntemperaturmaximums müsste mit BL bei den spät belasteten frühen Chronotypen nach Khalsa et al. in ausgeprägterem Umfang möglich sein als bei den früh belasteten späten Chronotypen. Khalsa et al. beschreiben in ihrer Arbeit sog. phase-response curves (PRCs) für einzelne Pulse hellen Lichts am Menschen. Eine PRC beschreibt das Ausmaß einer physiologischen Antwort auf einen gewissen Stimulus zu verschiedenen Zeitpunkten in Relation zur zirkadianen Phasenlage des betreffenden Individuums. In der Arbeit werden maximale Phasenverschiebungen durch Lichtintervention relativ kurz vor bzw. nach der Mitte der nächtlichen Melatoninsekretion und dem damit assoziierten Temperaturminimum als Maß der Phasenlage beschrieben. Jedoch wird genauso von Phasenverzögerungen am späteren subjektiven Tag berichtet, die umso ausgeprägter ausfallen je später am Tag

die Lichtexposition stattfindet⁵⁵. Frühere Funde von Jewett et al. bekräftigen die Beeinflussbarkeit des zirkadianen Systems zu allen Tageszeiten und widerlegen die Hypothese einer anergen Zeitspanne tagsüber⁵⁰. Im Fall der vorliegenden Arbeit liegt der Ergometriebeginn im Mittel 14 h 50 min (BL, lang) bzw. 11 h 50 min (BL, kurz) und 14 h 45 min (DL, lang) bzw. 11 h 45 min (DL, kurz) nach dem MSFsc. Die Lichtexposition begann jeweils ca. 2,5 h eher. Damit ist ersichtlich, dass die Lichtintervention für die Probanden mit kurzem Abstand zwischen ihrem MSFsc und Licht- bzw. Ergometriebeginn etwa in die Mitte ihres subjektiven Tages fällt. Für die Teilnehmer mit langem zeitlichem Abstand liegt der Licht- und Ergometriebeginn in einer bedeutend späteren Phase des individuellen Tages und kann somit mutmaßlich eine stärkere Phasenverzögerung bewirken. Die (relativ gesehen) spät belasteten Fröhlytypen unterliegen also unter diesen Umständen bereits einem höheren Schlafdruck und sind damit sensitiver gegenüber zusätzlichem Lichtangebot.

Eine durchgehende Reduktion der tympanal gemessenen Körpertemperatur unter der hellen Lichtkondition BL wie bei Aizawa und Tokura ist in dem vorliegenden Datenset jedoch nicht feststellbar. Aizawa und Tokura exponierten ihre Probanden aber zwischen 9:30 Uhr und 18:00 Uhr und damit wesentlich länger, was für eine tympanal registrierbare Temperaturreduktion nötig zu sein scheint. Ein weiterer Grund für nicht signifikante Temperaturunterschiede mag in den methodischen Nachteilen der tympanalen gegenüber der rektalen Temperaturmessung liegen.

Insgesamt ist die Beeinflussbarkeit des menschlichen Organismus durch zusätzliches Lichtangebot tagsüber im Vergleich zu nächtlicher Lichtexposition zwar gegeben (s.o.), allerdings in Umfang und Effekthöhe eher abgeschwächt. Eine vergleichende Studie, die die tageszeitabhängige Auswirkung von hellem vs. Dämmerlicht (5000 lx vs. <10 lx über vier Stunden tags bzw. nachts) auf Herzfrequenz, Körperkerntemperatur, Cortisolspiegel, Schläfrigkeit und Erschöpfung untersuchte, zeigte z. B. nur unter der nächtlichen „bright light“-Kondition einen Anstieg von Herzfrequenz und Körpertemperatur, nicht aber unter der Tagexposition. Schläfrigkeit und Erschöpfung wurden sowohl nachts als auch tags signifikant und ähnlich in der Effekthöhe reduziert. Eine Beeinflussung des Cortisolspiegels konnte nicht gezeigt werden.⁸⁹ Dieser Fund impliziert, dass bei einer noch später am Tag stattfindenden Lichtexposition und Belastung die Effekthöhe in einigen Teilaspekten noch größer hätte ausfallen können. Lichtexposition zu solch späten Tageszeiten könnte z. B. bei Boxkämpfen oder auch bei 6-Tagerennen und Nachtveranstaltungen im Skilanglauf eine relevante Rolle spielen.

5.4 Reihenfolgeeffekte in Bezug auf Motivation, Bedenken der Probanden und Lerneffekte durch das erste Zeitfahren

Nahezu 60 % der Probanden (20/34) zeigten sich vor Termin 2 sehr motiviert (VAS > 7,5) im folgenden Zeitfahren „alles zu geben“, weitere 35 % (12/34) gaben an tendenziell gut motiviert zu sein (VAS zwischen 5 und 7,5). Lediglich zwei von 34 gaben eine tendenziell niedrige Motivationslage an (VAS zwischen 5 und 2,5). Für den folgenden Termin 3 zeichnete sich ein ganz ähnliches Bild ab: 18 von 34 (52,9 %) zeigten sich hoch motiviert, 11 von 34 (32,4 %) gut motiviert und lediglich fünf Probanden wiesen leichte Motivationsprobleme auf (VAS zwischen 5 und 2,5). Ein Reihenfolgeeffekt auf die in den Tests verrichtete Arbeit ließ sich dabei nicht nachweisen, was auf eine effektive Randomisierung schließen lässt.

In mehreren Arbeiten konnte zuvor gezeigt werden, dass die Reproduzierbarkeit von Zeitfahrtest auf dem Fahrradergometer durch eine Gewöhnungsfahrt verbessert werden kann^{62, 72, 112}. Dies stellt eine Limitation der vorliegenden Arbeit dar. Andererseits fanden andere Autoren bei wiederholten Zeitfahrtests keine auffallend hohen Variabilitäten zwischen einem ersten und zweiten Zeitfahren bzw. konnten keinen signifikanten Effekt einer Gewöhnungsfahrt nachweisen^{13, 93}. Es wurde bei der Planung der vorliegenden Arbeit bewusst auf eine Testfahrt im Zeitfahrmodus zu Gewöhnungszwecken verzichtet, um durch eine möglichst geringe Zahl von Ergometrieterminen Motivationsproblemen seitens der Probanden und damit negativen Auswirkungen auf die Testergebnisse entgegen zu wirken. Durch den eingangs absolvierten Stufentest (Termin 1) konnten die Probanden zudem die Räumlichkeiten bereits kennen lernen und auch Erfahrung mit hohen Belastungsintensitäten auf dem Fahrradergometer sammeln.

Im Hinblick auf die von den Probanden geäußerten Bedenken während der gesamten Ergometriedauer ihre volle Leistung zeigen zu können, ergaben sich genauso wenig Reihenfolgeeffekte wie für die eben dargestellte Motivationslage der Teilnehmer. Was bei der Datenverteilung allerdings auffällt, ist die relativ weite Streuung über den Skalbereich der VAS. Für Termin 2 liegt das Minimum bei 0,1 und das Maximum bei 8,6. Im Fall von Termin 3 liegen die entsprechenden Werte bei 0,1 und 7,9. Als Erklärung für die breite Streuung kommt am ehesten ein gewisses Maß an Unsicherheit seitens der Teilnehmer in Frage, das sich damit erklären lässt, dass die wenigsten Erfahrung im Zeitfahren und/oder fahrradergometrischen Belastungen im Allgemeinen

hatten. Wie aus Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15 zu ersehen ist, nahm die oben beschriebene Streuung aber von T2 auf T3 nicht signifikant ab.

Bei der Abschätzung eines möglichen Lerneffektes durch den Termin 2 und damit einer eventuellen Beeinflussung der Herangehensweise an Termin 3 durch die Probanden ergab sich folgendes Bild: Lediglich knapp 30 % (10/34) der Probanden maßen T2 eine geringe bis marginale Bedeutung (VAS 3,3 bis 1,25) zu im Hinblick auf die Herangehensweise an Termin 3. Ein Großteil der Teilnehmer (gut 70 %; 24/34) schätzte dagegen die Erfahrung aus der absolvierten Testfahrt T2 als mäßig bis sehr bedeutsam für T3 ein. Dieser subjektive Eindruck steht im Kontrast zur tatsächlich in den beiden Zeitfahren verrichteten Arbeit. Die Differenz der Arbeit aus beiden Testfahrten korreliert nämlich nicht signifikant mit der Einschätzung des Lerneffekts durch die Probanden. So kann also nicht behauptet werden, dass Probanden mit hohen VAS-Werten auf obiger Skala an T3 systematisch mehr geleistet hätten als jene mit niedrigen Werten.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass keine Reihenfolgeeffekte nachgewiesen werden konnten, die einen systematischen Einfluss auf den Motivationsgrad der Probanden, deren Bedenken bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit im Zeitfahren, oder auf Lerneffekte von Termin 2 auf Termin 3 gezeigt hätten.

5.5 Fragen zur Ergometrie

Nimmt man die Antworten auf die fünf Fragen, die den Probanden zur Einteilung der Ergometerfahrt gestellt wurden genauer in Augenschein, so kann man im Allgemeinen feststellen, dass sie sich zum Großteil die Belastungen gut einteilen konnten. So gaben 24 von 34 unter BL bzw. 23 unter DL an, sich die Kräfte global gut eingeteilt zu haben. Nur einige der Teilnehmer (sechs unter BL bzw. zwölf unter DL) waren der Meinung, dass sie insgesamt mehr hätten leisten können, ohne dass sich hier aber ein signifikanter Unterschied zwischen der BL- und DL-Kondition zeigte.

Interessanterweise ergab sich für die Anfangsphase der Ergometrien folgende Situation: Unter BL gaben 14 Teilnehmer an, die Ergometrie tendenziell zu forsch angegangen zu sein, unter DL lediglich elf. Der Schwerpunkt dieser Angaben lag für BL bei deutlich höheren Skalenwerten (entsprechend einem forscheren Start) als unter DL, was den hier bestehenden statistisch signifikanten Unterschied erklären kann (s. Abbildung 4.27). Zudem weist die Verteilung unter DL eine ausgeprägtere Verteilungsschiefe in Richtung einer gemäßigeren Kräfteeinteilung zu Beginn der Ergometrie auf als unter BL (s.

Abbildung 4.28). Das forschere Angehen der Ergometrie wird auf eine verstärkte unbewusste bzw. unterbewusste Aktivierung der Probanden unter BL zurückgeführt. Der von ihnen vor Ergometriebeginn angegebene Motivationsgrad unterschied sich jedoch nicht signifikant im Vergleich BL vs. DL. Was die während der Belastung erhobenen physiologischen Parameter angeht darf an dieser Stelle auf die Kapitel 4.6 bzw. 5.1 verwiesen werden.

Zum Ende der Zeitfahren gab die Mehrheit der Probanden unabhängig von der Lichtkondition an, an oder nahe ihrer persönlichen Leistungsgrenze gefahren zu sein. Lediglich neun vs. zehn Teilnehmer (BL vs. DL) hätten ihrer Aussage zufolge am Ende der Tests tendenziell noch mehr leisten können, ohne dass die vorliegenden Unterschiede die statistische Signifikanz erreicht hätten.

Es kann festgehalten werden, dass sich in Abhängigkeit von der Lichtexposition die Einschätzung der Belastungseinteilung am Anfang der Zeitfahren signifikant unterscheidet. Dies wird am ehesten auf eine lichtbedingte, unbewusste Aktivierung des Organismus zurückgeführt.

5.6 Probandenkollektiv

Das in der Arbeit untersuchte Kollektiv ist mit 43 eingeschlossenen Probanden im Hinblick auf die der Fallzahlkalkulation zugrunde gelegten Effektgrößen mehr als ausreichend groß, um die in der Planungsphase vermuteten Effekte abbilden zu können. Wie aus dem Ergebnisteil hervorgeht, stellt sich das Probandenkollektiv im Durchschnitt gegenüber einem untrainierten Vergleichskollektiv als deutlich leistungsfähiger dar. Den Probanden wurde als Gegenleistung für ihre Teilnahme nach Beendigung der Studie eine Auswertung des initial absolvierten Stufentests (Kap. 3.3.1.2) inklusive Trainingsempfehlungen ausgehändigt. Dies dürfte bei einem Großteil der Teilnehmer einer der Hauptmotivationsgründe für die Studienteilnahme gewesen sein, was wiederum hilft, das gehobene Leistungsniveau zu erklären.

5.7 Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren

Die Kontrolle der Rahmenbedingungen und möglicher Einflussfaktoren auf das Ergometrieergebnis zeigt keine erheblichen Unterschiede in der Zeit vor den jeweiligen Testfahrten.

Die Exposition mit natürlichem Sonnenlicht ist als besonders relevant für die in der Studie durchgeführte Lichtexposition anzunehmen. Dies gilt im Speziellen für Expositionszeiten im Freien an Ergometrietagen, die zeitlich vor den durchgeführten Untersuchungen lagen.

Die vor den Testfahrten median im Freien verbrachte Zeit lag für beide Lichtkonditionen bei 30 Minuten. Eine Differenzierung zwischen „im Freien verbrachter Zeit“ und „direkter Sonnenexposition“ war anhand der eingesetzten Fragebögen nicht zuverlässig möglich, so dass die Frage nach der tatsächlich unter direkter Sonnenbestrahlung verbrachten Zeit unbeantwortet bleiben muss. In Abhängigkeit der vorherrschenden Wetterlage und der Tageszeit ist der Photoneneinfall ins Auge des jeweiligen Probanden zudem als äußerst variabel einzustufen. Als wichtigste Feststellung zur Zeitspanne, die vor den Ergometrien der vorliegenden Arbeit im Freien verbracht wurde, bleibt festzuhalten, dass hierin zwischen den untersuchten Lichtkonditionen kein signifikanter Unterschied besteht und die Probanden somit mit vergleichbaren Voraussetzungen in die experimentelle Lichtexposition gingen. Hébert et al. konnten zeigen, dass die Melatonsuppression durch einen nächtlichen Lichtstimulus von 500 lx geringer ausfiel, wenn die Probanden während der Woche zuvor stark lichtexponiert waren⁴⁴.

Inwieweit eine Exposition mit natürlichem Licht vor der experimentellen Lichtexposition die durch Bright Light erzielbare Effekthöhe in Bezug auf die danach abgerufene körperliche Leistungsfähigkeit abschwächen kann, bzw. Probanden unter DL-Exposition durch das zusätzliche Lichtangebot mehr zu leisten vermögen als unter der reinen experimentellen DL-Exposition lässt sich nicht genau sagen. Hierzu fehlen Studien in der Literatur.

Mit dem Trainingstagebuch, das die Probanden während der gesamten Studienteilnahme führten, wurden auch die beiden Tage vor den Ergometrieterminen erfasst. Diese werden als besonders relevant im Hinblick auf das Ergometrieergebnis eingeschätzt, vor allem im Sinne einer möglichen negativen Beeinträchtigung durch hohe Trainingsumfänge oder -intensitäten an diesen beiden Tagen.

Insgesamt wurden die Vorgaben zur Vermeidung negativer Einflüsse auf die ergometrischen Belastungen weitestgehend eingehalten, so dass durch das weitergeführte Training der Probanden keine Beeinträchtigung der Studienergebnisse zu erwarten war. Es kann zudem als ausgeschlossen angesehen werden, bei dem eingangs erläuterten gehobenen Trainingszustand der Probanden innerhalb einer Woche signifikante Trainingseffekte im Ausdauerbereich im Sinne einer positiven Verfälschung der Leistung in der

Ergometrie zu erreichen. Edwards et al. beschrieben eine Verbesserung der Leistung im Zeitfahren am frühen Morgen durch mäßige körperliche Belastung zu gleicher Zeit am Morgen zuvor³⁷. Als Erklärungsansatz führen sie hauptsächlich einen Gewöhnungs-/Routineeffekt an, der durch die Trainingseinheit am Tag zuvor entsteht. Physiologische, chronobiologische Faktoren sowie äußere Einflüsse hätten, wenn überhaupt, nur einen marginalen Einfluss gehabt.

In der Erfassung der Trainingsumfänge unserer Probanden wurden nur Zeitdauer und Intensität, nicht aber der Zeitpunkt des Trainings abgefragt. Insofern muss eine Einordnung der Ergebnisse in die Funde von Edwards und Kollegen offen bleiben.

Was die subjektive Schlafqualität angeht wurden einzig die Nächte vor DL-Terminen signifikant erholsamer erlebt als vor BL-Terminen. Dieser Unterschied kann offensichtlich für die Ergometrien als unwesentlich angesehen werden, da insgesamt unter BL mehr Arbeit verrichtet wurde als unter DL. Es kann höchstens angenommen werden, dass die Differenz zwischen BL- und DL-Fahrten noch größer ausfallen könnte, wenn die Nächte zuvor als gleich erholsam erlebt würden.

Im Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) zeigte sich ein Großteil der Studienteilnehmer als schlafgesund. Lediglich sechs Probanden müssen als leicht gestört in ihrer Schlafqualität eingestuft werden. Unterschiede zwischen den Erhebungszeitpunkten bestehen nicht.

In Studien, die sich mit dem Themenkomplex „Schlafqualität und körperliche Leistungsfähigkeit“ auseinandersetzen, ist vor allem der Einfluss von Schlafentzug Gegenstand der Forschung. Inwieweit die in der hier vorliegenden Arbeit leicht ausgeprägten Schlafstörungen die Ergometrieergebnisse beeinflussen konnten, lässt sich anhand der vorhandenen, heterogenen Literatur nicht sicher klären. Da aber kein signifikanter Unterschied zwischen der BL- und DL-Kondition besteht und da es sich nur um leichte Alterationen der Schlafqualität bei wenigen Teilnehmern handelt, ist nicht von einer substantiellen Beeinträchtigung der Resultate auszugehen.

Die Situational Motivation Scale (SIMS) erbrachte hohe mediane Werte für die Cluster „intrinsic motivation“ und „internal regulation“, was auf ein hohes Maß an Motivation und Selbstbestimmtheit der Teilnehmer im Hinblick auf die Ausübung von Sport schließen lässt. Eine signifikante Änderung über die Zeit der Studienteilnahme bzw. im Vergleich der Lichtkonditionen war nicht festzustellen.

Der Alkoholkonsum am Vortag der Ergometrien fiel beim überwiegenden Großteil der Probanden mit weniger als 20 g Alkohol gering aus. Eine negative Beeinflussung der Ergometrieergebnisse ist bei solch moderatem Alkoholgenuss nicht anzunehmen. Zudem erwiesen sich die vorhandenen Unterschiede als nicht signifikant.

5.8 Vor und nach Lichtexposition ermittelte Parameter

Die tympanal gemessene Körpertemperatur der Probanden zeigte sowohl unter BL als auch unter DL eine signifikante Abnahme über die 120-minütige Lichtexposition hinweg. Die mittlere Reduktion belief sich unter BL auf 0,2 °C, die damit doppelt so hoch ausfiel wie unter DL. Ein Vergleich der Temperaturänderungen (innerhalb eines jeden Probanden) unter BL vs. DL bleibt zwar ohne statistisch signifikanten Unterschied, ist aber schon aus methodischen Gründen (mittlerer Abstand der zwei Erhebungszeitpunkte von sieben Tagen) nicht besonders aussagekräftig.

Die normale Tagestemperaturkurve des Menschen weist in den Nachtstunden zwischen zwei und drei Uhr ihr natürliches Minimum und in den frühen Abendstunden gegen 18-19 Uhr ihr Maximum auf²³. Die Melatoninsekretion steigt physiologischerweise in Abhängigkeit des abnehmenden Tageslichts gegen 21-22 Uhr an, liegt nachts um ein acht- bis zehnfaches höher als tags und fällt gegen sechs Uhr morgens wieder ab^{45, 107}. Gegen neun Uhr vormittags erreicht sie wieder Ausgangswerte^{19, 108}, zeigt also ein inverses Verhalten zur Tagestemperaturkurve^{21, 28}.

Melatonin gilt als einer *der* Faktoren für die Temperaturregelung beim Menschen²¹. Bekanntermaßen weist Melatonin temperatursenkende Eigenschaften auf²⁸⁻³⁰ und seine Sekretion ist maßgeblich durch Licht beeinflussbar. So zeigt sich der nächtliche Melatoninanstieg durch abendliches/nächtliches helles Licht unterdrückbar^{8, 14, 17, 67}.

Für die Suppression sind relativ kürzlich entdeckte, photosensitive Zellen der Retina verantwortlich, die nichts mit dem Stäbchen- und Zapfensystem des retinalen Pigmentepithels zu tun haben^{16, 99}. Dies kann auch die Entdeckung erklären, dass sich die Melatoninsekretion in einem Subkollektiv von komplett blinden Patienten durch Licht in einem Maße unterdrückbar zeigt, wie es bei Gesunden der Fall ist²⁷. Weiterhin besteht eine ungleiche Verteilung der Sensitivität innerhalb der Retina auf melatoninunterdrückende Lichtstimuli: Licht aus dem oberen⁶¹ bzw. temporalen¹⁰⁶ Gesichtsfeld erwies sich hierin als besonders effektiv.

Nun konnte eine Gruppe um Aizawa, Kim und Tokura in ihren Arbeiten zeigen, dass sich Lichtexposition auf die Körpertemperatur je nach Tageszeit der Beleuchtung unterschiedlich auswirkt. Unter abendlicher Exposition mit hellem Licht (3000 lx zwischen 16:00 und 20:30 h) wurden höhere Körpertemperaturen gemessen, die Probanden fühlten sich bei experimentell fallender Umgebungstemperatur kühler, zogen sich wärmer an und die Melatoninausscheidung lag niedriger als unter der Kondition mit schummrigen Licht (10 lx) über den identischen Zeitraum. Die Autoren diskutieren die Ergebnisse im Sinne eines gegenüber normal *erhöhten* Sollwerts für die Körpertemperatur, am ehesten erklärbar durch die Suppression der Melatoninproduktion⁵⁷. Liegt der Sollwert für die Körpertemperatur höher als der momentane tatsächliche Wert, so ist der Organismus automatisch bestrebt diese Differenz auszugleichen, in letzterem Fall u. a. durch das Anlegen von mehr Bekleidung.

Die Ergebnisse unter Lichtexposition der Probanden mit 4000 lx vs. 10 lx *tagsüber* (10:00-18:00 h) verhielten sich bei Kim und Tokura umgekehrt und werden ebenfalls auf eine Sollwertverschiebung für die Körpertemperatur zurückgeführt, allerdings in Richtung *niedrigerer* Werte⁵⁶. Aizawa und Tokura berichten ebenfalls über signifikant niedrigere tympanal gemessene Körpertemperaturen nach mehrstündiger Exposition gegenüber hellem Licht tagsüber (09:30-18:00 h) von 4000 lx im Vergleich zu Lichtexposition von 100 lx⁵. Die letztgenannten beiden Arbeiten stehen in Einklang mit den Ergebnissen von Teramoto et al., die nach vormittäglicher Exposition (09:00-12:00 h) mit hellem Licht (4000 lx vs. 200 lx) sowohl höhere Melatoninwerte im Urin, als auch ein attenuiertes Kälteempfinden nachweisen konnten⁹⁶. Die Ergebnisse aller drei Arbeiten werden letztlich mit einer Sollwert*erniedrigung* für die Körpertemperatur durch die Lichtexposition erklärt. Auf diesen Mechanismus wird auch der in der vorliegenden Arbeit festgestellte Rückgang der tympanalen Temperatur zurückgeführt. Die genauen Gründe der unterschiedlichen Reaktion der Melatoninsekretion auf Lichtstimuli zu unterschiedlichen Tageszeiten liegen nach wie vor im Dunkeln und bedürfen weiterer Untersuchung.

Ein interessanter Unterschied zwischen der vorliegenden Arbeit und der von Kim und Tokura⁵⁶ besteht darin, dass unsere Probanden je nach vorherrschender Lichtkondition keinen subjektiven Unterschied in der Wahrnehmung der Umgebungstemperatur festhielten (s. Kap. 4.4). Im vorliegenden Fall wurde die Raumtemperatur allerdings auch konstant gehalten, so dass für einen direkten Vergleich der beiden Experimente nicht identische Bedingungen vorliegen.

Weder für die Karolinska Sleepiness Scale (KSS) noch für die Positive and Negative Affect Scale (PANAS) konnten signifikante Unterschiede im Vergleich vor vs. nach Lichtexposition nachgewiesen werden (s. Kap. 4.3.2 und 4.3.3).

Arbeiten, die sich mit der Beeinflussbarkeit von Wachheit/Schläfrigkeit durch Licht auseinandersetzen zeichnen hierzu ein uneinheitliches bis gegensätzliches Bild bezüglich der Wirkung von Licht auf den subjektiven Schläfrigkeitsgrad: In einigen dieser Experimente, die eine Verbesserung des Wachheitsgrades zeigen konnten, wurde mit Lichtexpositionen am späten Abend und während der frühen Nacht gearbeitet^{10, 22, 73}, was deren Resultate nicht direkt vergleichbar mit den hier vorliegenden macht. Andere wiederum konnten auch nach mittäglicher Exposition gegenüber natürlichem, hellem Licht ein niedrigeres Schläfrigkeitsniveau am Nachmittag nachweisen⁵⁴, bzw. nach Schlafrestriktion während der Nächte zuvor durch Lichtanwendung tagsüber die Schläfrigkeit der Probanden abmildern⁸². Rüger et al. fanden sowohl tags als auch nachts signifikant reduzierte Schläfrigkeit unter der Anwendung von hellem Licht (5000 lx vs. <10 lx)⁸⁹, während Dollins et al. selbst unter nächtlicher Illumination keinen Einfluss von unterschiedlich hellem Licht (300 lx, 1500 lx, 3000 lx) auf Vigilanz, Reaktionszeit und andere, standardisierte Aufgaben feststellen konnten³³. Keine der letztgenannten Studien bezog eine Chronotypbestimmung in ihre Untersuchungen mit ein. Damit sind die uneinheitlichen Ergebnisse gut erklärbar.

Im Themenkomplex der Beeinflussung von Stimmungszuständen durch Licht ist die „Winterdepression“ (SAD) wohl mit am besten untersucht. In zahlreichen Arbeiten konnte hier durch gezielte Lichtanwendung eine im Allgemeinen positive Einflussnahme auf die Gemütslage der Betroffenen bei gleichzeitig vergleichsweise geringen Nebenwirkungen erreicht werden⁹⁷. Studien, die eine Beeinflussung der im PANAS abgefragten Affektdimensionen durch gezielte Lichtinterventionen zum Inhalt haben, konnten in der gegenwärtigen Literatur nicht ausfindig gemacht werden.

5.9 Lichtwahrnehmung

Drei Viertel der visuellen Analogskalen (sechs von acht) zur Einschätzung der individuellen Wahrnehmung des Lichts weisen signifikante Unterschiede in der Beurteilung von BL vs. DL auf (s. Kap. 4.4). Dabei fällt als erstes eine weite Streuung über fast den gesamten Skalenbereich auf, wobei trotzdem Richtung weisende Schwerpunkte und Schiefen in den jeweiligen Verteilungen ersichtlich sind: Eine besonders starke Polari-

sation der Probanden fällt für die VAS „ich kann gut direkt in die Lampe schauen – zu hell um direkt in die Lampe zu schauen“ auf. Unter DL hatten die Teilnehmer kein Problem direkt in die Lichtquelle zu blicken. Unter BL differierten die Angaben jedoch sehr stark, wobei mit einem Median von 7,0 deutlich wird, dass die Lampe den meisten Probanden ($24/34 = 70,6\%$) zu hell war für einen direkten Blick ins Licht. Dies wird unterstützt von den Ergebnissen der VAS „zu schummrig – zu grell“, bei der die Probanden mit einem Mittelwert von 6,84 (BL) vs. 4,03 (DL) die BL-Kondition als tendenziell zu grell evaluierten. Insgesamt empfand trotzdem die Hälfte der Teilnehmer BL als angenehm; für DL ist dies sogar für knapp 80 % der Probanden ($27/34$) der Fall. Im Tierversuch an der Ratte gelang es Okamoto et al. erst kürzlich die Aktivierung nozizeptiver, trigeminaler Bahnen durch Einwirkung hellen Lichts nachzuweisen⁷⁶.

Knapp zwei Drittel gaben nach BL-Exposition einen gelassenen Gemütszustand an, vier von 34 Probanden äußerten sich diesbezüglich völlig indifferent und nur etwas über 23 % empfanden unter BL eine Zunahme von aggressiven Tendenzen. Gut die Hälfte vermerkte einen gesteigerten Anspannungsgrad und etwas über 70 % fühlten sich aktiver nach zweistündiger BL-Exposition, ohne dass sich dies in den Werten der KSS (s. oben) niedergeschlagen hätte. Hierin besteht also eine gewisse Diskrepanz in den Angaben der Probanden. DL dagegen machte die Teilnehmer eher gelassen (knapp 80 %) und wirkte sich entspannend aus (73,5 %), ohne dass es auf deutlich mehr Teilnehmer einschläfernd (52,9 %) als aktivierend gewirkt hätte.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass unter Bright Light gewisse subjektive Aktivierungseffekte bei gleichzeitigen Abstrichen beim visuellen Komfort durch das Licht auftraten. Die Ausprägung des letztgenannten Aspekts scheint unter BL einer erheblich größeren interindividuellen Variabilität zu unterliegen (hohe Streuung zwischen den Probanden) als unter DL. Dim Light präsentierte sich insgesamt eher entspannend und vom visuellen Eindruck her angenehmer.

5.10 Limitationen und Ausblick

Als Limitationen der vorliegenden Arbeit sind folgende Punkte aufzuführen: In einigen Teilaspekten konnte zur statistischen Analyse nur ein Teil der insgesamt 43 teilnehmenden Probanden herangezogen werden. Dies ist hauptsächlich dadurch bedingt, dass die restlichen Datensätze entweder Unzulänglichkeiten in der Signalqualität beinhalteten oder inkomplett und damit unbrauchbar waren. Hierdurch wurde aber in keinem Fall die

in der Fallzahlkalkulation errechnete nötige Probandenzahl unterschritten, um die erwarteten Effektgrößen abbilden zu können. Damit basiert die statistische Auswertung auf einem umfangreicheren Kollektiv als in den drei weiter oben zitierten Vergleichsstudien^{74, 75, 113}.

In puncto Sonnenlichtanamnese vor den Ergometrieterminen konnte mit dem eingesetzten Fragebogen nicht sicher zwischen „im Freien verbrachter Zeit“ und „unter direkter Sonneneinstrahlung verbrachter Zeit“ differenziert werden. Somit blieb unklar, ob die im Freien verbrachte Zeit auch mit besonders hohem Photoneneinfall ins Auge der Probanden verbunden war und damit eventuell verzerrende Wirkung auf die sich anschließende experimentelle Lichtexposition und ihre Effekte ausüben konnte. Dieser Unzulänglichkeit könnte mit einem noch früheren Eintreffen der Probanden im Testzentrum oder durch ambulatorische Messung der Lichtexposition (z. B. Actiwatch, Daqtimer) begegnet werden. Ein weiterer Ansatzpunkt die Menge an natürlichem Lichteinfall ins Probandenauge zu begrenzen, besteht im Tragen von dunklen Sonnenbrillen mit Blaulichblockerlinsen. Diese Maßnahme wurde aber von den Studienteilnehmern trotz entsprechender Aufklärung leider nicht mit letzter Konsequenz umgesetzt.

Eine weitere Limitation, die direkt mit der Tages-/Sonnenlichtproblematik verknüpft ist, ist die Tatsache, dass sämtliche Versuche während der Sommerzeit durchgeführt wurden. Die durch die Jahreszeit bedingt längeren Tage resultierten eventuell in einem höheren Maß an Exposition gegenüber natürlichem Sonnenlicht während der Zeit, die die Probanden nicht im Testzentrum verbrachten, als dies zur Winterzeit wahrscheinlich der Fall gewesen wäre.

Was die Erhebung der Körpertemperatur angeht, ließen sich die Nachteile der tympanalen Messung durch eine rektal platzierte Temperatursonde umgehen. Allerdings bleibt hierbei das Akzeptanzniveau der Messmethode durch die Probanden fraglich. Dadurch wiederum könnte die Rekrutierung ausreichend großer Kollektive ungleich schwieriger werden. Eine weitere denkbare Alternative stellt der Einsatz einer Version des Thermochron® iButton® von Maxim dar.

Mit der vorliegenden Arbeit konnten interessante Aspekte der Auswirkung von hellem Licht auf die Ausdauerleistungsfähigkeit auf dem Fahrradergometer aufgezeigt werden. Gleichzeitig tut sich aber eine Reihe an Fragen auf, die in Zukunft in weiterführenden Arbeiten untersucht werden müssen.

Um herauszufinden inwiefern ein Lichtstimulus zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten Auswirkungen auf den Organismus haben kann, sind z. B. Versuche während der Nacht, am frühen Morgen oder eben im Winterhalbjahr nötig. Hierbei ist die Einbeziehung des Chronotyps unumgänglich, wie die Resultate dieser Arbeit zeigen. Ebenso sind zum Beispiel Versuchsanordnungen denkbar, in denen die vorhandenen Ergebnisse mit Resultaten nach ausschließlicher Vorexposition oder alleiniger Lichtexposition während der Ergometrie verglichen werden.

Interessante Ansätze für künftige Arbeiten ergeben sich weiterhin aus dem Vergleich von extrem frühen und extrem späten Chronotypen in ihrer Empfänglichkeit für präsentierte Lichtstimuli. Hierbei wäre eine zusätzliche Präzisierung der endogenen Phasenlage durch Melatonin- und/oder Cortisolbestimmung hilfreich.

Mit anderen, spezialisierten Kollektiven könnten Einflussfaktoren wie der Trainingszustand (Hochtrainierte vs. Untrainierte) oder die Abhängigkeit von der Sportart (Laufen, Skilanglauf, Kraftsport, etc.) untersucht werden. Andere Ansatzpunkte für weiterführende Arbeiten ergeben sich aus der Variierung von Belastungslänge und Belastungsintensität (sehr kurze, supramaximale Belastungen bzw. (ultra-)lange Tests unterhalb der IANS).

Ein weiterer, einfach zu variierender Faktor für künftige Testprotokolle besteht in der Verwendung noch stärker im blaugrünen Spektralbereich akzentuierter Leuchten mit höheren Farbtemperaturen. Unter diesen Bedingungen sind noch höhere Effektgrößen denkbar. Nicht zuletzt bieten Trainingsstudien unter Verwendung unterschiedlicher Lichtsettings interessante Anknüpfungspunkte an die vorliegende Arbeit.

6. Zusammenfassung

Licht ist für die visuelle Wahrnehmung unserer Umgebung unabdingbar, hat aber auch zahlreiche so genannter „non image forming effects“ (NIF-Effekte) auf den menschlichen Organismus. Diese NIF-Effekte werden von intrinsisch photoaktiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC) vermittelt, die über den Tractus retinohypothalamicus (RHT) zum Nucleus suprachiasmaticus (SCN), sowie über das Rückenmark und den sympathischen Grenzstrang zur Glandula pinealis projizieren. Durch diese neuronalen Verschaltungen ist Licht als Taktgeber des Organismus maßgeblich an der Synchronisation desselben mit seiner Umwelt beteiligt und bestimmt so zum Beispiel über Aktivitäts- und Ruhephasen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es die NIF-Effekte verschiedener Lichtsettings auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zu ermitteln.

Hierzu absolvierten 43 männliche Probanden zwischen 20 und 30 Jahren nach 120 Minuten Vorexposition mit der jeweiligen Lichtsituation (Bright Light [BL] oder Dim Light [DL] in randomisierter Reihenfolge) zwei 40-minütige Zeitfahrsimulationen auf dem Fahrradergometer unter derselben Beleuchtung wie in der Vorexposition. Untersucht wurden die insgesamt geleistete Arbeit (in kJ), Laktat im Kapillarblut, Herzfrequenz, Körpertemperatur, Sauerstoffaufnahme, Kohlendioxidabgabe und subjektiver Anstrengungsgrad auf der Borg-Skala. Ebenso wurden Fragebögen zur subjektiven Lichtwahrnehmung, zur Einschätzung der jeweils gerade absolvierten Ergometerfahrt und zu externen Einflussfaktoren ausgewertet. Zur Einbettung in den chronobiologischen Kontext erfolgte die Ermittlung des Chronotyps eines jeden Probanden anhand des Munich ChronoType Questionnaire (MCTQ).

Die insgesamt verrichtete Arbeit in 40min unterschied sich signifikant ($p=0,004$) zugunsten der Bright Light-Kondition (Median: 548,4 kJ vs 521,5 kJ). Signifikante Unterschiede zeigten sich auch für Herzfrequenz [MW unter BL: $168,8 \text{ bpm} \pm 11,4$; mittl. Änderung unter DL: $-2,6 \text{ bpm} \pm 7,1$ ($p = 0,031$)], Laktat [MW unter BL: $5,6 \text{ mmol/l} \pm 1,5$; mittl. Änderung unter DL: $-0,54 \text{ mmol/l} \pm 1,47$ ($p = 0,009$)] und Anstrengungsskala nach Borg [MW unter BL: $15,9 \pm 1,1$; mittl. Änderung unter DL: $-0,47 \pm 0,88$ ($p = 0,005$)]. Die Chronotypenverteilung im Teilnehmerkollektiv der vorliegenden Studie erwies sich als altersentsprechend repräsentativ und vergleichbar mit den Daten von Rönneberg et al. In ihrem individuellen Tagesrythmus relativ spät belastete frühe Chronotypen vermochten unter BL vs. DL signifikant mehr zu leisten als relativ früh belastete späte Chronotypen. Dieser Effekt wird auf eine stärker ausgeprägte

Phasenverzögerung zurückgeführt, die durch den größeren Abstand zwischen MSFsc und Lichtexposition bzw. Ergometrie möglich wird, da das zusätzliche Lichtangebot bei ersteren in eine spätere Phase des individuellen Tagesrhythmus fällt.

Die Vorteile der vorliegenden Arbeit gegenüber den zitierten Vergleichsstudien liegen im deutlich umfangreicheren und in keiner Hinsicht zu extremen Probandenkollektiv, der tageszeitlichen Streuung der Ergometrien über ein enges Zeitfenster des Tages und der Verwendung eines Ergometrieprotokolls mit möglichst geringer Test-Retest-Variabilität. Zudem wurde auf ausreichend lange Abstände zur Regeneration zwischen den Ergometrien geachtet ohne aber Verzerrungen durch Trainingseffekte befürchten zu müssen. Weiterhin handelt es sich bei dieser Arbeit um Langzeitbelastungen mit Vorexposition gegenüber der jeweiligen Lichtkondition. Details über die spektrale Zusammensetzung der verwendeten Leuchtquelle sind bekannt und werden aufgeführt. Die Teilnehmer hatten während der Tests keine Einsicht in Anzeigen von Parametern.

Limitationen der vorliegenden Arbeit liegen u. a. darin begründet, dass die Versuche sämtlich zur Sommerzeit durchgeführt wurden. Eine genaue Abschätzung der Exposition gegenüber natürlichem Licht an Ergometrietagen war nicht möglich. Zur statistischen Analyse standen durch Unzulänglichkeiten in der Aufzeichnungsqualität in Teilauswertungen nicht alle 43 Datensets zur Verfügung. Die Messung der Körpertemperatur wurde außerdem nur tympanal durchgeführt.

Weiterführende Untersuchungen sind notwendig um die Abhängigkeit der Beeinflussung von physischer Leistungsfähigkeit durch Lichtanwendung von tages- und jahreszeitlichen Umständen, von extremen Chronotypen, von spezialisierten Probandenkollektiven oder bestimmten Sportarten zu untersuchen. Weiterhin stellen die Belastungsform und -dauer sowie die verwendeten Leuchtmittel Ansatzpunkte für Variationsmöglichkeiten weiterführender Arbeiten dar. Nicht zuletzt bieten Trainingsstudien unter Verwendung verschiedener Lichtszenarien interessante Ansätze für künftige Untersuchungen.

7. Anhang

7.1 Literaturverzeichnis

1. <http://www.die-bibel.de/online-bibeln/luther-bibel-1984>; Stand: 23.09.2010
2. <http://www.radsport-seite.de/tour-2010-e-19.html>; Stand: 10.08.2010
3. http://www.rad-net.de/html/bdr/meisterschaften/10-bdr/strasse/dm-ezf-u23_erg.pdf; Stand: 10.08.2010
4. **CIE Central Bureau.** *Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems.* Report number: CIE S 009/E, UDC 612.014.481, 2002.
5. **Aizawa S., Tokura H.** *Exposure to bright light for several hours during the daytime lowers tympanic temperature.* Int J Biometeorol. 1997; 41: 90-93
6. **Aschoff J.** *Circadian Rhythms in Man.* Science. 1965; 148: 1427-1432
7. **Aschoff J.** *Human circadian rhythms in activity, body temperature and other functions.* Life Sci Space Res. 1967; 5: 159-173
8. **Atkinson G., Barr D., Chester N., Drust B., Gregson W., Reilly T., Waterhouse J.** *Bright light and thermoregulatory responses to exercise.* Int J Sports Med. 2008; 29: 188-193
9. **Backhaus J., Junghanns K., Broocks A., Riemann D., Hohagen F.** *Test-retest reliability and validity of the Pittsburgh Sleep Quality Index in primary insomnia.* J Psychosom Res. 2002; 53: 737-740
10. **Badia P., Myers B., Boecker M., Culpepper J., Harsh J. R.** *Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior.* Physiol Behav. 1991; 50: 583-588
11. **Belenky M. A., Smeraski C. A., Provencio I., Sollars P. J., Pickard G. E.** *Melanopsin retinal ganglion cells receive bipolar and amacrine cell synapses.* J Comp Neurol. 2003; 460: 380-393
12. **Berson D. M., Dunn F. A., Takao M.** *Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock.* Science. 2002; 295: 1070-1073
13. **Bishop D.** *Reliability of a 1-h endurance performance test in trained female cyclists.* Med Sci Sports Exerc. 1997; 29: 554-559
14. **Bojkowski C. J., Aldhous M. E., English J., Franey C., Poulton A. L., Skene D. J., Arendt J.** *Suppression of nocturnal plasma melatonin and 6-sulphatoxymelatonin by bright and dim light in man.* Horm Metab Res. 1987; 19: 437-440

15. **Boulos Z., Campbell S. S., Lewy A. J., Terman M., Dijk D. J., Eastman C. I.** *Light treatment for sleep disorders: consensus report. VII. Jet lag.* J Biol Rhythms. 1995; 10: 167-176
16. **Brainard G. C., Hanifin J. P., Greeson J. M., Byrne B., Glickman G., Gerner E., Rollag M. D.** *Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor.* J Neurosci. 2001; 21: 6405-6412
17. **Bunnell D. E., Treiber S. P., Phillips N. H., Berger R. J.** *Effects of evening bright light exposure on melatonin, body temperature and sleep.* J Sleep Res. 1992; 1: 17-23
18. **Burgess H. J., Crowley S. J., Gazda C. J., Fogg L. F., Eastman C. I.** *Preflight adjustment to eastward travel: 3 days of advancing sleep with and without morning bright light.* J Biol Rhythms. 2003; 18: 318-328
19. **Burgess H. J., Revell V. L., Molina T. A., Eastman C. I.** *Human phase response curves to three days of daily melatonin: 0.5 mg versus 3.0 mg.* J Clin Endocrinol Metab. 2010; 95: 3325-3331
20. **Buysse D. J., Reynolds C. F., 3rd, Monk T. H., Berman S. R., Kupfer D. J.** *The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research.* Psychiatry Res. 1989; 28: 193-213
21. **Cagnacci A., Elliott J. A., Yen S. S.** *Melatonin: a major regulator of the circadian rhythm of core temperature in humans.* J Clin Endocrinol Metab. 1992; 75: 447-452
22. **Cajochen C., Munch M., Kobiacka S., Krauchi K., Steiner R., Oelhafen P., Orgul S., Wirz-Justice A.** *High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light.* J Clin Endocrinol Metab. 2005; 90: 1311-1316
23. **Cook D. I., Lingard J. M., Wegmann E. A., Young J. A.** Ernährung, Energiehaushalt und Stoffwechsel. In: "*Lehrbuch der Physiologie*". Klinker R, Silbernagl S. (Hrsg.). Thieme, Stuttgart, 2001; 3., komplett überarbeitete Auflage: 365-442.
24. **Crawford J. R., Henry J. D.** *The positive and negative affect schedule (PANAS): construct validity, measurement properties and normative data in a large non-clinical sample.* Br J Clin Psychol. 2004; 43: 245-265
25. **Crowley S. J., Lee C., Tseng C. Y., Fogg L. F., Eastman C. I.** *Combinations of bright light, scheduled dark, sunglasses, and melatonin to facilitate circadian entrainment to night shift work.* J Biol Rhythms. 2003; 18: 513-523
26. **Czeisler C. A., Duffy J. F., Shanahan T. L., Brown E. N., Mitchell J. F., Rimmer D. W., Ronda J. M., Silva E. J., Allan J. S., Emens J. S., Dijk D. J., Kronauer R. E.** *Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker.* Science. 1999; 284: 2177-2181

27. **Czeisler C. A., Shanahan T. L., Klerman E. B., Martens H., Brotman D. J., Emens J. S., Klein T., Rizzo J. F., 3rd.** *Suppression of melatonin secretion in some blind patients by exposure to bright light.* N Engl J Med. 1995; 332: 6-11
28. **Dawson D., van den Heuvel C. J.** *Integrating the actions of melatonin on human physiology.* Ann Med. 1998; 30: 95-102
29. **Deacon S., Arendt J.** *Melatonin-induced temperature suppression and its acute phase-shifting effects correlate in a dose-dependent manner in humans.* Brain Res. 1995; 688: 77-85
30. **Deacon S., English J., Arendt J.** *Acute phase-shifting effects of melatonin associated with suppression of core body temperature in humans.* Neurosci Lett. 1994; 178: 32-34
31. **Deci E. L., Ryan R. M.** *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior.* Plenum Press, New York, 1985
32. **Desan P. H., Weinstein A. J., Michalak E. E., Tam E. M., Meesters Y., Ruitter M. J., Horn E., Telner J., Iskandar H., Boivin D. B., Lam R. W.** *A controlled trial of the Litebook light-emitting diode (LED) light therapy device for treatment of Seasonal Affective Disorder (SAD).* BMC Psychiatry. 2007; 7: 38
33. **Dollins A. B., Lynch H. J., Wurtman R. J., Deng M. H., Lieberman H. R.** *Effects of illumination on human nocturnal serum melatonin levels and performance.* Physiol Behav. 1993; 53: 153-160
34. **Eastman C. I., Boulos Z., Terman M., Campbell S. S., Dijk D. J., Lewy A. J.** *Light treatment for sleep disorders: consensus report. VI. Shift work.* J Biol Rhythms. 1995; 10: 157-164
35. **Eastman C. I., Gazda C. J., Burgess H. J., Crowley S. J., Fogg L. F.** *Advancing circadian rhythms before eastward flight: a strategy to prevent or reduce jet lag.* Sleep. 2005; 28: 33-44
36. **Eastman C. I., Young M. A., Fogg L. F., Liu L., Meaden P. M.** *Bright light treatment of winter depression: a placebo-controlled trial.* Arch Gen Psychiatry. 1998; 55: 883-889
37. **Edwards B. J., Edwards W., Waterhouse J., Atkinson G., Reilly T.** *Can cycling performance in an early morning, laboratory-based cycle time-trial be improved by morning exercise the day before?* Int J Sports Med. 2005; 26: 651-656
38. **Edwards R. H., Harris R. C., Hultman E., Kaijser L., Koh D., Nordesjo L. O.** *Effect of temperature on muscle energy metabolism and endurance during successive isometric contractions, sustained to fatigue, of the quadriceps muscle in man.* J Physiol. 1972; 220: 335-352

39. **Febbraio M. A., Snow R. J., Stathis C. G., Hargreaves M., Carey M. F.** *Effect of heat stress on muscle energy metabolism during exercise.* J Appl Physiol. 1994; 77: 2827-2831
40. **Freedman M. S., Lucas R. J., Soni B., von Schantz M., Munoz M., David-Gray Z., Foster R.** *Regulation of mammalian circadian behavior by non-rod, non-cone, ocular photoreceptors.* Science. 1999; 284: 502-504
41. **Glickman G., Byrne B., Pineda C., Hauck W. W., Brainard G. C.** *Light therapy for seasonal affective disorder with blue narrow-band light-emitting diodes (LEDs).* Biol Psychiatry. 2006; 59: 502-507
42. **Guay F., Vallerand R. J., Blanchard C.** *On the assessment of situational intrinsic and extrinsic motivation: The Situational Motivation Scale (SIMS).* Motiv Emot. 2000; 24: 175-213
43. **Hattar S., Liao H. W., Takao M., Berson D. M., Yau K. W.** *Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity.* Science. 2002; 295: 1065-1070
44. **Hebert M., Martin S. K., Lee C., Eastman C. I.** *The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans.* J Pineal Res. 2002; 33: 198-203
45. **Heinzow B., Hardeland R., Lerchl A.** *Melatonin in der umweltmedizinischen Diagnostik im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern (EMF). Mitteilung der Kommission "Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin". Empfehlung des Robert Koch-Instituts.* Bundesgesundheitsbl Gesundheitsforsch Gesundheitsschutz. 2005; 48: 1406-1408
46. **Hirata K., Nagasaka T., Nunomura T., Hirai A., Hirashita M.** *Effects of facial fanning on local exercise performance and thermoregulatory responses during hyperthermia.* Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 1987; 56: 43-48
47. **Horowitz T. S., Cade B. E., Wolfe J. M., Czeisler C. A.** *Efficacy of bright light and sleep/darkness scheduling in alleviating circadian maladaptation to night work.* Am J Physiol Endocrinol Metab. 2001; 281: E384-391
48. **Hunt R. G.** *Essay: Die Aerodynamik des Radfahrens.* In: "Physik". Gerlich D, und Jerke G. (Hrsg.). Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, Berlin, Oxford, 1994; korrigierter Nachdruck 1995 der 1. Auflage: 368-371.
49. **Jeukendrup A., Saris W. H., Brouns F., Kester A. D.** *A new validated endurance performance test.* Med Sci Sports Exerc. 1996; 28: 266-270
50. **Jewett M. E., Rimmer D. W., Duffy J. F., Klerman E. B., Kronauer R. E., Czeisler C. A.** *Human circadian pacemaker is sensitive to light throughout subjective day without evidence of transients.* Am J Physiol. 1997; 273: R1800-1809

51. **Juslen H., Wouters M., Tenner A.** *The influence of controllable task-lighting on productivity: a field study in a factory.* Appl Ergon. 2007; 38: 39-44
52. **Juslen H. T., Wouters M. C., Tenner A. D.** *Lighting level and productivity: a field study in the electronics industry.* Ergonomics. 2007; 50: 615-624
53. **Kaida K., Takahashi M., Akerstedt T., Nakata A., Otsuka Y., Haratani T., Fukasawa K.** *Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables.* Clin Neurophysiol. 2006; 117: 1574-1581
54. **Kaida K., Takahashi M., Haratani T., Otsuka Y., Fukasawa K., Nakata A.** *Indoor exposure to natural bright light prevents afternoon sleepiness.* Sleep. 2006; 29: 462-469
55. **Khalsa S. B., Jewett M. E., Cajochen C., Czeisler C. A.** *A phase response curve to single bright light pulses in human subjects.* J Physiol. 2003; 549: 945-952
56. **Kim H. E., Tokura H.** *Influence of different light intensities during the daytime on evening dressing behavior in the cold.* Physiol Behav. 1995; 58: 779-783
57. **Kim H. E., Tokura H.** *Influence of two different light intensities from 16:00 to 20:30 hours on evening dressing behavior in the cold.* Coll Antropol. 2007; 31: 145-151
58. Kleitman N. *Sleep and Wakefulness (Midway Reprint).* University of Chicago Press, Chicago, London, 1987. 131-161.
59. **Lam R. W., Buchanan A., Mador J. A., Corral M. R., Remick R. A.** *The effects of ultraviolet-A wavelengths in light therapy for seasonal depression.* J Affect Disord. 1992; 24: 237-243
60. **Lam R. W., Levitt A. J., Levitan R. D., Enns M. W., Morehouse R., Michalak E. E., Tam E. M.** *The Can-SAD study: a randomized controlled trial of the effectiveness of light therapy and fluoxetine in patients with winter seasonal affective disorder.* Am J Psychiatry. 2006; 163: 805-812
61. **Lasko T. A., Kripke D. F., Elliot J. A.** *Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields.* J Biol Rhythms. 1999; 14: 122-125
62. **Laursen P. B., Shing C. M., Jenkins D. G.** *Reproducibility of a laboratory-based 40-km cycle time-trial on a stationary wind-trainer in highly trained cyclists.* Int J Sports Med. 2003; 24: 481-485
63. **Lee C., Smith M. R., Eastman C. I.** *A compromise phase position for permanent night shift workers: circadian phase after two night shifts with scheduled sleep and light/dark exposure.* Chronobiol Int. 2006; 23: 859-875
64. **Lee T. M., Chan C. C., Paterson J. G., Janzen H. L., Blashko C. A.** *Spectral properties of phototherapy for seasonal affective disorder: a meta-analysis.* Acta Psychiatr Scand. 1997; 96: 117-121

-
65. **Lemyre P.-N., Treasure D. C., Roberts G. C.** *Influence of variability in motivation and affect on elite athlete burnout susceptibility.* J Sport Exercise Psy. 2006; 28: 32-48
 66. **Lewy A. J., Bauer V. K., Cutler N. L., Sack R. L., Ahmed S., Thomas K. H., Blood M. L., Jackson J. M.** *Morning vs evening light treatment of patients with winter depression.* Arch Gen Psychiatry. 1998; 55: 890-896
 67. **Lewy A. J., Wehr T. A., Goodwin F. K., Newsome D. A., Markey S. P.** *Light suppresses melatonin secretion in humans.* Science. 1980; 210: 1267-1269
 68. **Lockley S. W., Brainard G. C., Czeisler C. A.** *High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light.* J Clin Endocrinol Metab. 2003; 88: 4502-4505
 69. **Löllgen H.** *Das Anstrengungsempfinden (RPE, Borg-Skala).* Dt Zeitsch Sportmed. 2004; 55: 299-300
 70. **Lucas R. J., Freedman M. S., Munoz M., Garcia-Fernandez J. M., Foster R. G.** *Regulation of the mammalian pineal by non-rod, non-cone, ocular photoreceptors.* Science. 1999; 284: 505-507
 71. **Mills P. R., Tomkins S. C., Schlangen L. J.** *The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance.* J Circadian Rhythms. 2007; 5: 2
 72. **Montfort-Steiger V., Williams C. A., Armstrong N.** *The reproducibility of an endurance performance test in adolescent cyclists.* Eur J Appl Physiol. 2005; 94: 618-625
 73. **Myers B. L., Badia P.** *Immediate effects of different light intensities on body temperature and alertness.* Physiol Behav. 1993; 54: 199-202
 74. **O'Brien P. M., O'Connor P. J.** *Effect of bright light on cycling performance.* Med Sci Sports Exerc. 2000; 32: 439-447
 75. **Ohkuwa T., Itoh H., Yamamoto T., Yanagi H., Yamazaki Y., Akimaru T.** *Effect of varying light intensity on maximal power production and selected metabolic variables.* Arch Physiol Biochem. 2001; 109: 430-434
 76. **Okamoto K., Tashiro A., Chang Z., Bereiter D. A.** *Bright light activates a trigeminal nociceptive pathway.* Pain. 2010; 149: 235-242
 77. **Olschewski H., Bruck K.** *Thermoregulatory, cardiovascular, and muscular factors related to exercise after precooling.* J Appl Physiol. 1988; 64: 803-811
 78. **Oren D. A., Brainard G. C., Johnston S. H., Joseph-Vanderpool J. R., Sorek E., Rosenthal N. E.** *Treatment of seasonal affective disorder with green light and red light.* Am J Psychiatry. 1991; 148: 509-511

79. **Palmer G. S., Dennis S. C., Noakes T. D., Hawley J. A.** *Assessment of the reproducibility of performance testing on an air-braked cycle ergometer.* Int J Sports Med. 1996; 17: 293-298
80. **Parry B. L.** *Jet lag: minimizing it's effects with critically timed bright light and melatonin administration.* J Mol Microbiol Biotechnol. 2002; 4: 463-466
81. **Perez-Leon J. A., Warren E. J., Allen C. N., Robinson D. W., Lane Brown R.** *Synaptic inputs to retinal ganglion cells that set the circadian clock.* Eur J Neurosci. 2006; 24: 1117-1123
82. **Phipps-Nelson J., Redman J. R., Dijk D. J., Rajaratnam S. M.** *Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance.* Sleep. 2003; 26: 695-700
83. **Provencio I., Rodriguez I. R., Jiang G., Hayes W. P., Moreira E. F., Rollag M. D.** *A novel human opsin in the inner retina.* J Neurosci. 2000; 20: 600-605
84. **Reilly T., Baxter C.** *Influence of time of day on reactions to cycling at a fixed high intensity.* Br J Sports Med. 1983; 17: 128-130
85. **Reilly T., Waterhouse J.** *Sports performance: is there evidence that the body clock plays a role?* Eur J Appl Physiol. 2009; 106: 321-332
86. **Revell V. L., Arendt J., Terman M., Skene D. J.** *Short-wavelength sensitivity of the human circadian system to phase-advancing light.* J Biol Rhythms. 2005; 20: 270-272
87. **Roenneberg T., Kuehnle T., Juda M., Kantermann T., Allebrandt K., Gordijn M., Meroow M.** *Epidemiology of the human circadian clock.* Sleep Med Rev. 2007; 11: 429-438
88. **Roenneberg T., Wirz-Justice A., Meroow M.** *Life between clocks: daily temporal patterns of human chronotypes.* J Biol Rhythms. 2003; 18: 80-90
89. **Ruger M., Gordijn M. C., Beersma D. G., de Vries B., Daan S.** *Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology: comparison of daytime and nighttime exposure.* Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 2006; 290: R1413-1420
90. **Ruhrmann S., Kasper S., Hawellek B., Martinez B., Hoflich G., Nickelsen T., Moller H. J.** *Effects of fluoxetine versus bright light in the treatment of seasonal affective disorder.* Psychol Med. 1998; 28: 923-933
91. **Sack R. L.** *The pathophysiology of jet lag.* Travel Med Infect Dis. 2009; 7: 102-110
92. **Smith M. R., Fogg L. F., Eastman C. I.** *Practical interventions to promote circadian adaptation to permanent night shift work: study 4.* J Biol Rhythms. 2009; 24: 161-172

93. **Sporer B. C., McKenzie D. C.** *Reproducibility of a laboratory based 20-km time trial evaluation in competitive cyclists using the Velotron Pro ergometer.* Int J Sports Med. 2007; 28: 940-944
94. **Strong R. E., Marchant B. K., Reimherr F. W., Williams E., Soni P., Mestas R.** *Narrow-band blue-light treatment of seasonal affective disorder in adults and the influence of additional nonseasonal symptoms.* Depress Anxiety. 2009; 26: 273-278
95. **Takahashi J. S., DeCoursey P. J., Bauman L., Menaker M.** *Spectral sensitivity of a novel photoreceptive system mediating entrainment of mammalian circadian rhythms.* Nature. 1984; 308: 186-188
96. **Teramoto Y., Tokura H., Ohkura H., Ohmasa Y., Suho S., Inoshiri R., Masuda M.** *Effect of different light intensities during the forenoon on afternoon thermal sensation in mild cold.* Physiol Behav. 1996; 21: 339-343
97. **Terman M., Terman J. S.** *Light therapy for seasonal and nonseasonal depression: efficacy, protocol, safety, and side effects.* CNS Spectr. 2005; 10: 647-663; quiz 672
98. **Terman M., Terman J. S., Ross D. C.** *A controlled trial of timed bright light and negative air ionization for treatment of winter depression.* Arch Gen Psychiatry. 1998; 55: 875-882
99. **Thapan K., Arendt J., Skene D. J.** *An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans.* J Physiol. 2001; 535: 261-267
100. **Thogersen-Ntoumani C., Ntoumanis N.** *The role of self-determined motivation in the understanding of exercise-related behaviours, cognitions and physical self-evaluations.* J Sports Sci. 2006; 24: 393-404
101. **Trepel M.** *Neuroanatomie - Struktur und Funktion.* Urban & Fischer Verlag, München - Jena, 1999. 2. komplett überarb. Aufl.: 170-172.
102. **van Bommel W. J. M., van den Beld G. J.** *Lighting for work: a review of visual and biological effects.* Lighting Res Technol. 2004; 36: 255-269
103. **Vandewalle G., Gais S., Schabus M., Balteau E., Carrier J., Darsaud A., Sterpenich V., Albouy G., Dijk D. J., Maquet P.** *Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure.* Cereb Cortex. 2007; 17: 2788-2795
104. **Vandewalle G., Schmidt C., Albouy G., Sterpenich V., Darsaud A., al. e.** *Brain responses to violet, blue, and green monochromatic light exposures in humans: Prominent role of blue light and the brainstem.* PLoS ONE. 2007; 2(11): e1247. doi:1210.1371/journal.pone.0001247

105. **Viola A. U., James L. M., Schlangen L. J., Dijk D. J.** *Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality.* Scand J Work Environ Health. 2008; 34: 297-306
106. **Visser E. K., Beersma D. G., Daan S.** *Melatonin suppression by light in humans is maximal when the nasal part of the retina is illuminated.* J Biol Rhythms. 1999; 14: 116-121
107. **Voigt K.** Endokrines System. In: "*Lehrbuch der Physiologie*". Klinke R, Silbernagl S. (Hrsg.). Thieme, Stuttgart, 2001; 3., vollständig überarbeitete Auflage: 443-516.
108. **Waldhauser F., Dietzel M.** *Daily and annual rhythms in human melatonin secretion: role in puberty control.* Ann N Y Acad Sci. 1985; 453: 205-214
109. **Waterhouse J., Drust B., Weinert D., Edwards B., Gregson W., Atkinson G., Kao S., Aizawa S., Reilly T.** *The circadian rhythm of core temperature: origin and some implications for exercise performance.* Chronobiol Int. 2005; 22: 207-225
110. **Watson D., Clark L. A., Tellegen A.** *Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales.* J Pers Soc Psychol. 1988; 54: 1063-1070
111. **Zaidi F. H., Hull J. T., Peirson S. N., Wulff K., Aeschbach D., Gooley J. J., Brainard G. C., Gregory-Evans K., Rizzo J. F., 3rd, Czeisler C. A., Foster R. G., Moseley M. J., Lockley S. W.** *Short-wavelength light sensitivity of circadian, pupillary, and visual awareness in humans lacking an outer retina.* Curr Biol. 2007; 17: 2122-2128
112. **Zavorsky G. S., Murias J. M., Gow J., Kim D. J., Poulin-Harnois C., Kubow S., Lands L. C.** *Laboratory 20-km cycle time trial reproducibility.* Int J Sports Med. 2007; 28: 743-748
113. **Zhang P., Tokura H.** *Influence of two different light intensities during daytime on endurance performance of handgrip exercise.* Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 1996; 74: 318-321

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Spektrale Verteilung der PL-L 36W Philips EnergyLight® Lampen	13
Abbildung 3.2:	Versuchsaufbau für die 120-minütige Präexposition	23
Abbildung 3.3:	Visueller Eindruck einer einzelnen Leuchte in der DL- (links) und BL-Kondition (rechts)	24
Abbildung 3.4:	Überblick über den Gesamtaufbau im Ergometrieraum	25
Abbildung 3.5:	Ansicht von der Gegenseite mit dem vom Probanden weggedrehten Monitor der Spirometrie- und EKG-Einheit	25
Abbildung 3.6:	Ansicht aus der Fahrerperspektive bei ausgeschalteten Lampen	27
Abbildung 4.1:	Erholbarkeit des Schlafs in den Nächten vor den Ergometrien mit BL (links) bzw. DL (rechts)	32
Abbildung 4.2:	Alkoholkonsum an den Abenden vor BL- bzw DL-Terminen	33
Abbildung 4.3:	Im Freien verbrachte Zeit (in min) vor Terminen mit BL (links) bzw. DL (rechts)	34
Abbildung 4.4:	Gesamttrainingsumfang (in min) bzw. Trainingsumfang während der zwei Tage vor Ergometrie (in min) jeweils für BL- (rot) und DL-Termine (blau)	35
Abbildung 4.5:	Training vor Ergometrietagen mit BL (rot) und DL (blau)	35
Abbildung 4.6:	tympanal gemessene Körpertemperatur vor und nach BL (rot) bzw. DL (blau)	36
Abbildung 4.7:	VAS „zu schummrig – zu grell“	37
Abbildung 4.8:	VAS „unangenehm – angenehm“	37
Abbildung 4.9:	VAS „einschläfernd – aktivierend“	38
Abbildung 4.10:	VAS „direkter Blick in die Lampe gut möglich – zu hell für direkten Blick in die Lampe“	38
Abbildung 4.11:	VAS „entspannend – steigert die Anspannung“	38
Abbildung 4.12:	VAS „macht gelassen – macht aggressiv“	39
Abbildung 4.13:	VAS zum Raumklima „zu kalt – zu warm“	39
Abbildung 4.14:	Motivationslage im Probandenkollektiv zu den Ergometrieterminen 2 und 3	41
Abbildung 4.15:	Grad der Bedenken seitens der Probanden im Zeitfahren über die gesamte Dauer volle Leistung bringen zu können	42
Abbildung 4.16:	Einschätzung der Bedeutung von T2 für T3	42
Abbildung 4.17:	Darstellung im Streudiagramm; y-Achse: Grad der Bedeutung von T2 für T3; x-Achse: Differenz der an T3 und T2 verrichteten Arbeit [kJ]	42
Abbildung 4.18:	unter BL (rot) bzw. DL (blau) geleistete Arbeit in 40min Zeitfahrsimulation	43
Abbildung 4.19:	zeitlicher Verlauf der über die Zeitfahrdauer von 40min kontinuierlich aufsummierten verrichteten Arbeit [kJ]	44
Abbildung 4.20:	zeitlicher Verlauf der Laktatentwicklung während der Testfahrten	47
Abbildung 4.21:	zeitlicher Verlauf der Herzfrequenzentwicklung während der Testfahrten	48
Abbildung 4.22:	zeitlicher Verlauf der Borgwerteentwicklung während der Testfahrten	49
Abbildung 4.23:	zeitlicher Verlauf der O ₂ -Aufnahme während der Testfahrten	50
Abbildung 4.24:	zeitlicher Verlauf der CO ₂ -Abgabe während der Testfahrten	51
Abbildung 4.25:	zeitlicher Verlauf der RQ-Werte während der Testfahrten	52

Abbildung 4.26:	zeitlicher Verlauf der Temperaturwerte während der Testfahrten	53
Abbildung 4.27:	subjektive Einschätzung der Herangehensweise an die Startphase der Ergometrien	54
Abbildung 4.28:	Fünf Abbildungspaare zur subjektiven Einschätzung der Herangehensweise an die Ergometrien	56
Abbildung 4.29:	Häufigkeitsverteilung der MSFsc-Werte im Histogramm	56
Abbildung 4.30:	Übersicht über die MSFsc-Werte der einzelnen Probanden	57
Abbildung 4.31:	mittlere Schlafdauer der Probanden [h]	57
Abbildung 4.32:	mittlere Aufwachzeit der Probanden	58
Abbildung 4.33:	Startzeitverteilung der Ergometrien unter BL (rot) und DL (blau)	59
Abbildung 4.34:	Abweichung der Startzeiten der Ergometrien (in h)	59
Abbildung 4.35:	zeitliche Differenz (in h) zwischen Ergometriestartzeiten und MSFsc für BL (rot) und DL (blau)	60
Abbildung 4.36:	Darstellung der Ergometriestartzeiten	61
Abbildung 4.37:	Zeitliche Differenz zwischen MSFsc und Ergometriestart [h]	62
Abbildung 4.38:	Differenz der geleisteten Arbeit (BL minus DL) in kJ	63

7.3 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 4.1:</i>	<i>Zusammenfassung der Charakteristika des Probandenkollektivs</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 4.2:</i>	<i>SIMS; angegeben sind Median und in Klammern Minimum und Maximum</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 4.3:</i>	<i>PSQI; angegeben sind Median und in Klammern Minimum und Maximum</i>	<i>32</i>
<i>Tabelle 4.4:</i>	<i>Zusammenhänge zwischen Motivation an den Ergometrieterminen T2 und T3 und der dabei verrichteten Arbeit</i>	<i>40</i>
<i>Tabelle 4.5:</i>	<i>Zusammenhang zwischen den vor Ergometriebeginn geäußerten Bedenken der Probanden im folgenden Test über die gesamte Ergometriedauer „alles geben“ zu können und der dann tatsächlich verrichteten Arbeit an den Terminen T2 und T3</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 4.6:</i>	<i>p-Werte für die aufsummierte Arbeit (BL vs. DL) zu den einzelnen Messzeitpunkten</i>	<i>45</i>
<i>Tabelle 4.7:</i>	<i>Einfluss der Reihenfolge der Lichtexposition auf die geleistete Arbeit</i>	<i>45</i>

7.4 Verwendete Fragebögen

7.4.1 Munich Chronotype Questionnaire (MCTQ)



INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE PSYCHOLOGIE
Zentrum für Chronobiologie
Ludwig-Maximilians-Universität München



Prof. Dr.rer.nat. Dr.med.habil. Till Roenneberg

Institut für Medizinische Psychologie, Goethestraße 31, D-80336 München

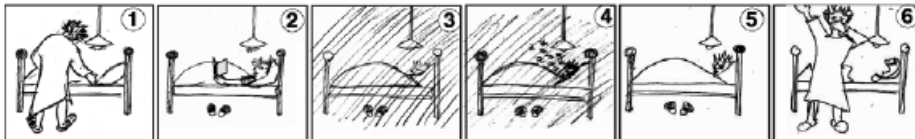
Tel. &49-(0)89-2180-75-608

MCTQ

Fax &49-(0)89-2180-75-238

e-mail roenneberg@lmu.de

- Munich Chronotype Questionnaire -



Waren Sie innerhalb der **letzten 3 Monate** Schichtarbeiter? Ja Nein

Uhrzeiten bitte anhand der 24 Stunden Skala, also z.B. 23.00 statt 11.00 abends!!!

Tage an denen Sie Ihre Schlafzeiten NICHT frei wählen können

(z.B. Arbeitstage oder Werktage)

Wieviele Tage sind dies in einer Woche? 0 1 2 3 4 5 6 7

Ich gehe ins Bett um _____ Uhr. (Zeichnung 1)

Manche Menschen bleiben noch eine Weile wach, wenn sie im Bett liegen. (Zeichnung 2)

Ich bin bereit einzuschlafen um _____ Uhr. (Zeichnung 3)

Um einzuschlafen, brauche ich _____ Minuten. (Zeichnung 4)

Ich wache um _____ Uhr auf. (Zeichnung 5)

durch einen Wecker

durch eine externe Quelle (z.B. Lärm, Familienmitglied, Hund)

von allein

Ich stehe auf nach _____ Minuten. (Zeichnung 6)

Tage an denen Sie Ihre Schlafzeiten FREI wählen können

(z.B. Wochenende, Feiertage)

Wieviele Tage sind dies in einer Woche? 0 1 2 3 4 5 6 7

Ich gehe ins Bett um _____ Uhr. (Zeichnung 1)

Manche Menschen bleiben noch eine Weile wach, wenn sie im Bett liegen. (Zeichnung 2)

Ich bin bereit einzuschlafen um _____ Uhr. (Zeichnung 3)

Um einzuschlafen, brauche ich _____ Minuten. (Zeichnung 4)

Ich wache um _____ Uhr auf. (Zeichnung 5)

durch einen Wecker

durch eine externe Quelle (z.B. Lärm, Familienmitglied, Hund)

von allein

Ich stehe nach _____ Minuten auf. (Zeichnung 6)

Nummer

MCTQ_Basic_D ©2007 Till Roenneberg & Martha Merrow, LMU Muenchen

7.4.2 Situational Motivation Scale (SIMS)

Name:

Datum:

(Probandenkennzahl:)

Lesen Sie bitte jeden Punkt aufmerksam durch. Benutzen Sie die unten angeführte Skala sorgsam und kreisen Sie die Zahl ein, die am besten den Grund angibt, weshalb Sie Sport treiben.

Benutzen Sie bitte folgende Skala:

1= Trifft überhaupt nicht zu;

2 = Trifft kaum zu;

3 = Trifft bedingt zu;

4 = Trifft in etwa zu;

5 = trifft zu;

6 = trifft ziemlich genau zu;

7 = trifft exakt zu.

Warum treiben Sie gegenwärtig Sport?

- | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Weil ich denke, dass es interessant ist | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 2. | weil ich es zu meinem eigenen Wohl mache | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 3. | weil ich es tun soll | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 4. | es mag eine Menge guter Gründe geben
aber ich sehe im Moment keinen für mich | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 5. | weil ich denke, dass Sport treiben angenehm ist/gut tut | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 6. | weil ich denke, dass es gut für mich ist | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 7. | weil es etwas ist, was ich einfach machen muss | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 8. | ich treibe Sport, aber ich bin mir nicht sicher,
ob es das wert ist | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 9. | weil Sport treiben Spaß macht | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 10. | ich weiß nicht, ich sehe nicht, was Sport treiben
mir bringen soll | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 11. | weil ich mich gut fühle, wenn ich Sport treibe | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 12. | weil ich glaube, dass Sport treiben wichtig für mich ist | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 13. | weil ich glaube, dass ich es machen muss | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 14. | ich treibe Sport, aber ich weiß nicht, ob es gut ist,
es fortzusetzen | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

7.4.3 Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI)

Die folgenden Fragen beziehen sich auf Ihre üblichen Schlafgewohnheiten und zwar *nur während der letzten Woche*. Ihre Antworten sollten möglichst genau sein und sich auf die Mehrzahl der Tage und Nächte während der letzten Woche beziehen. Beantworten Sie bitte alle Fragen.

1. Wann sind Sie während der letzten Woche gewöhnlich abends zu Bett gegangen?

übliche Uhrzeit:

2. Wie lange hat es während der letzten Woche gewöhnlich gedauert, bis Sie nachts eingeschlafen sind?

in Minuten:

3. Wann sind Sie während der letzten Woche gewöhnlich morgens aufgestanden?

übliche Uhrzeit:

4. Wie viele Stunden haben Sie während der letzten Woche pro Nacht tatsächlich geschlafen?

(Das muss nicht mit der Anzahl der Stunden, die Sie im Bett verbracht haben, übereinstimmen.)

Effektive Schlafzeit (Stunden) pro Nacht:

Kreuzen Sie bitte für jede der folgenden Fragen die für Sie zutreffende Antwort an. Beantworten Sie bitte alle Fragen.

5. Wie oft haben Sie während der letzten Woche schlecht geschlafen, ...

- a) ... weil Sie nicht innerhalb von 30 Minuten einschlafen konnten?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

- b) ... weil Sie mitten in der Nacht oder früh morgens aufgewacht sind?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

Anhang

c) ... weil Sie aufstehen mussten, um zur Toilette zu gehen?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

d) ... weil Sie Beschwerden beim Atmen hatten?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

e) ... weil Sie husten mussten oder laut geschnarcht haben?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

f) ... weil Ihnen zu kalt war?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

g) ... weil Ihnen zu warm war?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

h) ... weil Sie schlecht geträumt hatten?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

i) ... weil Sie Schmerzen hatten?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

j) ... aus anderen Gründen?

Bitte beschreiben:

Und wie oft während der letzten Woche konnten Sie aus diesem Grund schlecht schlafen?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

6. Wie würden Sie insgesamt die Qualität Ihres Schlafes während der letzten Woche beurteilen?

- Sehr gut
- Ziemlich gut
- Ziemlich schlecht
- Sehr schlecht

7. Wie oft haben Sie während der letzten Woche Schlafmittel eingenommen (vom Arzt verschriebene oder frei verkäufliche)?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

8. Wie oft hatten Sie während der letzten Woche Schwierigkeiten wach zu bleiben, etwa beim Autofahren, beim Essen oder bei gesellschaftlichen Anlässen?

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

9. Hatten Sie während der letzten Woche Probleme, mit genügend Schwung die üblichen Alltagsaufgaben zu erledigen?

- Keine Probleme
- Kaum Probleme
- Etwas Probleme
- Große Probleme

10. Schlafen Sie allein in Ihrem Zimmer?

- Ja
- Ja, aber ein Partner/Mitbewohner schläft in einem anderen Zimmer
- Nein, der Partner schläft im selben Zimmer, aber nicht im selben Bett
- Nein, der Partner schläft im selben Bett

Falls Sie einen Mitbewohner / Partner haben, fragen Sie sie/ihn bitte, ob und wie oft er/sie bei Ihnen folgendes bemerkt hat.

a) Lautes Schnarchen

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

b) Lange Atempausen während des Schlafes

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

Anhang

c) Zucken oder ruckartige Bewegungen der Beine während des Schlafes

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

d) Nächtliche Phasen von Verwirrung oder Desorientierung während des Schlafes

- Während der letzten Woche gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

e) Oder andere Formen von Unruhe während des Schlafes

Bitte beschreiben:

Machen Sie bitte noch folgende Angaben zu Ihrer Person:

Alter: _____ Jahre Körpergröße: Gewicht:.....

Geschlecht: weiblich Beruf: Rentner(in) Angestellte(r)
 männlich selbständig Arbeiter(in)
 Schüler/Student(in)
 arbeitslos/ Hausfrau(mann)

7.4.4 Morgenprotokoll

MORGENPROTOKOLL

Name: _____
Datum: _____

Hinweis:

Zur Beantwortung dieser Fragen brauchen Sie keine Uhr, da wir an Ihrer subjektiven Einschätzung von Zeiträumen interessiert sind.

<p>• Wie fühlen Sie sich jetzt ?</p>	<p>unbeschwert <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> bedrückt</p> <p>frisch <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> matt</p> <p>entspannt <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> angespannt</p>																		
<p>• Wie erholsam war ihr Schlaf?</p>	<p>sehr erholsam <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> gar nicht erholsam</p>																		
<p>• Wie lange haben Sie wohl zum Einschlafen gebraucht ?</p> <p>• die Einschlafdauer war für Sie vergleichsweise...</p>	<p>.....Std.....Min</p> <p>sehr kurz <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> sehr lang</p>																		
<p>• Wie <u>oft</u> waren Sie nachts wach ?</p>	<p>..... mal das ist für Sie.. <input type="checkbox"/> viel</p> <p><input type="checkbox"/> normal</p> <p><input type="checkbox"/> wenig</p>																		
<p>• Wie <u>lange</u> waren Sie nachts insgesamt wach ?</p>	<p>..... Std Min das ist für Sie.. <input type="checkbox"/> viel</p> <p><input type="checkbox"/> normal</p> <p><input type="checkbox"/> wenig</p>																		
<p>• Sofern Sie schlecht geschlafen haben, woran hat es denn gelegen ?</p> <p>(mehrfaches Ankreuzen möglich)</p>	<table border="0"> <tr> <td><input type="checkbox"/> persönliche Probleme</td> <td><input type="checkbox"/> Geräusche/Lärm</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> berufliche Probleme</td> <td><input type="checkbox"/> fremde Umgebung</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> ich hatte geträumt</td> <td><input type="checkbox"/> Hunger / Durst</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> innere Unruhe</td> <td><input type="checkbox"/> ich mußte zur Toilette</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Schmerzen</td> <td><input type="checkbox"/> körperliche Mißempfindungen</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Herzbeschwerden</td> <td><input type="checkbox"/> konnte nicht aufhören zu denken</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Atembeschwerden</td> <td><input type="checkbox"/> Beschäftigung mit Banalitäten</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> starkes Schwitzen</td> <td><input type="checkbox"/> weiß ich nicht</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> sonstiges.....</td> <td></td> </tr> </table>	<input type="checkbox"/> persönliche Probleme	<input type="checkbox"/> Geräusche/Lärm	<input type="checkbox"/> berufliche Probleme	<input type="checkbox"/> fremde Umgebung	<input type="checkbox"/> ich hatte geträumt	<input type="checkbox"/> Hunger / Durst	<input type="checkbox"/> innere Unruhe	<input type="checkbox"/> ich mußte zur Toilette	<input type="checkbox"/> Schmerzen	<input type="checkbox"/> körperliche Mißempfindungen	<input type="checkbox"/> Herzbeschwerden	<input type="checkbox"/> konnte nicht aufhören zu denken	<input type="checkbox"/> Atembeschwerden	<input type="checkbox"/> Beschäftigung mit Banalitäten	<input type="checkbox"/> starkes Schwitzen	<input type="checkbox"/> weiß ich nicht	<input type="checkbox"/> sonstiges.....	
<input type="checkbox"/> persönliche Probleme	<input type="checkbox"/> Geräusche/Lärm																		
<input type="checkbox"/> berufliche Probleme	<input type="checkbox"/> fremde Umgebung																		
<input type="checkbox"/> ich hatte geträumt	<input type="checkbox"/> Hunger / Durst																		
<input type="checkbox"/> innere Unruhe	<input type="checkbox"/> ich mußte zur Toilette																		
<input type="checkbox"/> Schmerzen	<input type="checkbox"/> körperliche Mißempfindungen																		
<input type="checkbox"/> Herzbeschwerden	<input type="checkbox"/> konnte nicht aufhören zu denken																		
<input type="checkbox"/> Atembeschwerden	<input type="checkbox"/> Beschäftigung mit Banalitäten																		
<input type="checkbox"/> starkes Schwitzen	<input type="checkbox"/> weiß ich nicht																		
<input type="checkbox"/> sonstiges.....																			
<p>• Haben Sie nachts geträumt ?</p> <p>• falls Sie geträumt haben, war das....</p> <p>• falls Sie geträumt haben, notieren Sie bitte einige Stichworte zum Trauminhalt</p>	<p>gar nicht geträumt <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> sehr viel geträumt</p> <p>angenehm <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> unangenehm</p> <p>.....</p> <p>.....</p>																		
<p>• Hatten Sie auch einen Alptraum</p>	<p><input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Ja, ich bin daraus erwacht</p>																		
<p>• Wann und wie sind Sie heute endgültig aufgewacht ?</p>	<p>..... : Uhr <input type="checkbox"/> ich wurde geweckt</p> <p><input type="checkbox"/> ich wurde von alleine wach</p>																		
<p>• Wie empfanden Sie den Weckzeitpunkt ?</p>	<p><input type="checkbox"/> zu früh</p> <p><input type="checkbox"/> genau richtig</p> <p><input type="checkbox"/> zu spät</p>																		
<p>• Wie lange haben Sie insgesamt geschlafen ?</p> <p>• die Schlafdauer war für Sie vergleichsweise...</p>	<p>.....Std.....Min</p> <p>sehr lang <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> sehr kurz</p>																		

7.4.5 Alkoholkonsum

Bitte füllen Sie **JEDEN** Tag einen dieser Fragebögen aus!

Name, Vorname:

Datum:

1. Haben Sie **gestern** alkoholische Getränke zu sich genommen?

Wenn ja, Was? (Bier, Wein Schnaps, etc.)

Wie viel von jeder Art von alkoholischem Getränk?

Wie hoch war der Alkoholgehalt in Vol.%?

Wann? (Uhrzeit)

2. Haben Sie gestern andere berauschende Substanzen konsumiert?

Wenn ja, Welche?

Wie viel von jeder Art?

7.4.6 Sonnenexposition

Bitte füllen Sie **JEDEN** Tag einen dieser Fragebögen aus!

Name, Vorname:

Datum:

Waren Sie **gestern** im Freien?

Falls ja, wie lange insgesamt? (in Stunden:Minuten)

Zu welcher Tageszeit? (Uhrzeit: von... bis...)

Wie war die Wetterlage? (sonnig, heiter bis wolzig, bewölkt, bedeckt, diesig, neblig, ...)

Wie lange waren Sie dem Tageslicht im Freien ausgesetzt?

Wie lange waren Sie direktem Sonnenlicht ausgesetzt?

Haben Sie eine Sonnenbrille getragen?

Falls ja, welche Glastönung hatte sie?

7.4.7 Trainingslogbuch

Bitte machen Sie für jeden Tag, an dem Sie sportlich aktiv sind folgende Angaben:

- Datum
- Sportart
- effektive Trainingzeit (h:min)
- Inhalt der Trainingseinheit / trainierte Intensität

1.

2.

3.

4.

5.

6.

7.

7.4.8 Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Name:

Datum:

Uhrzeit:

vor Lichtexposition ()

nach Lichtexposition ()

Kreisen Sie bitte die Zahl auf der folgenden Skala ein, die Ihren momentanen Wachheits- bzw. Schläfrigkeitsgrad am besten charakterisiert.

1 sehr wachsam / aufmerksam / munter

2

3 wachsam / aufmerksam / munter – normaler Level

4

5 weder wachsam / aufmerksam / munter noch schläfrig

6

7 schläfrig – aber keine Anstrengung wach zu bleiben

8

9 sehr schläfrig – große Anstrengung wach zu bleiben, ich kämpfe mit dem Schlaf

7.4.9 Positive and Negative Affect Scale (PANAS)

Name:

Datum:

vor Lichtexposition ()

nach Lichtexposition ()

Die folgende Liste besteht aus einer Reihe von Wörtern, die unterschiedliche Gefühle und Emotionen beschreiben. Lesen Sie jedes der Reihe nach aufmerksam durch und kreisen Sie in der jeweiligen Zeile daneben die zutreffende Antwort an. Geben Sie dabei an, in welchem Ausmaß diese Gefühle *im Moment* auf Sie zutreffen.

Benutzen Sie folgenden Schlüssel für Ihre Antworten:

(1) = stimmt gar nicht (2) = stimmt nur etwas (3) = unentschieden (4) = stimmt überwiegend (5) = stimmt genau

	stimmt gar nicht	stimmt nur etwas	unentschieden	stimmt überwiegend	stimmt genau
1. interessiert	1	2	3	4	5
2. bekümmert	1	2	3	4	5
3. aufgeregt	1	2	3	4	5
4. geknickt	1	2	3	4	5
5. stark	1	2	3	4	5
6. schuldig	1	2	3	4	5
7. verängstigt	1	2	3	4	5
8. feindselig	1	2	3	4	5
9. begeistert	1	2	3	4	5
10. stolz	1	2	3	4	5
11. gereizt	1	2	3	4	5
12. munter	1	2	3	4	5
13. beschämt	1	2	3	4	5
14. inspiriert	1	2	3	4	5
15. nervös	1	2	3	4	5
16. entschlossen	1	2	3	4	5
17. aufmerksam	1	2	3	4	5
18. überspannt	1	2	3	4	5
19. aktiv	1	2	3	4	5
20. besorgt	1	2	3	4	5

7.4.10 Licht und Raumklima

Name:

Datum:

(Lichtsituation:)

Markieren Sie zu den folgenden Fragen auf der langen horizontalen Linie mit einem Strich zu welchem Ausmaß die beiden gegensätzlichen Ausdrücke auf Sie zutreffen, indem Sie ihre Markierung entsprechend näher an den zutreffenderen Begriff setzen.

Wie empfinden/empfanden Sie das Licht?

zu schummrig _____ zu grell

unangenehm _____ angenehm

einschläfernd _____ aktivierend

beim Lesen störend _____ beim Lesen unterstützend

ich kann gut direkt in die Lampe schauen _____ zu hell um direkt in die Lampe zu schauen

Zwei Stunden vor dem Licht zu sitzen (ist)

nicht zu lang _____ zu lang

entspannend _____ steigert die Anspannung

macht gelassen _____ macht aggressiv

Das Raumklima war

zu kalt _____ zu warm

zu still _____ zu laut

7.4.11 Fragebogen zum Pacing der Testfahrt

Name:

Datum:

(Lichtsituation:)

Markieren Sie zu den folgenden Fragen auf der langen horizontalen Linie mit einem Strich zu welchem Ausmaß die beiden gegensätzlichen Ausdrücke auf Sie zutreffen, indem Sie ihre Markierung entsprechend näher an den zutreffenderen Begriff setzen.

Wie haben Sie sich die heutige Testfahrt eingeteilt?

gut _____ ginge besser

von Anfang _____ am Anfang
 richtig _____ zu forschen
 gefahren _____ losgefahren

von Anfang _____ ich hätte am
 an richtig _____ Anfang
 gefahren _____ mehr geben
 können

ich bin am _____ ich hätte am
 Anschlag _____ Anfang
 gefahren _____ mehr geben
 können

am Ende war _____ ich hätte am
 nicht mehr _____ Ende mehr
 mehr drin _____ geben
 können

Welche Störfaktoren haben Sie daran gehindert ihre volle Leistung zu bringen?

(Freitext)

Wie hoch schätzen Sie den Wert der heutigen Testfahrt in Bezug auf das pacing der kommenden Testfahrt nächste Woche ein?

niedrig _____ hoch

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Schmidt-Trucksäss bedanken für die Initiation dieser Arbeit, das Knüpfen erster Kontakte zu wichtigen Partnern und die enge Betreuung auch über die zuletzt bestehende Distanz nach Basel. Gerade an kritischen Punkten bekam ich von ihm immer motivierende Worte und einen Fingerzeig in die richtige Richtung. Mein Dank gilt außerdem Herrn Prof. Dr. Halle für die Bereitstellung der räumlichen und materiellen Voraussetzungen zur Versuchsdurchführung und -auswertung im Institut der Sportmedizin an der ZHS. Besonderer Dank gilt den MTAs der Abteilung, die mich im Labor unterstützen und gerade in technisch-praktischen Fragen immer ein offenes Ohr hatten. Herr Dr. Johannes Scherr führte dankenswerterweise in Teilen die echokardiographischen Voruntersuchungen der Probanden durch. Herrn Luc Schlangen von Philips danke ich für den sehr engagierten technischen Input in Sachen der verwendeten Lichtquellen und detaillierter Hintergrundinformationen dazu. Herrn Prof. Rönneberg und speziell Herrn Dr. Thomas Kantermann sei gedankt für ihre wertvollen Beiträge zum Themenkomplex der Chronobiologie. Frau Petra Wolf und Herrn Dr. Tibor Schuster vom IMSE danke ich für ihren fachlichen Rat in Fragen der statistischen Auswertung.

Ein großer Dank gebührt auch all meinen Probanden, die viele Stunden ihrer oft eng bemessenen Freizeit opferten und diese Arbeit durch ihre Teilnahme erst ermöglichten.

Meinen Eltern und meiner ganzen Familie danke ich für ihre bedingungslose Unterstützung. Allen voran meine Frau Eva bewies stellenweise starke Nerven und verstand es, mich immer wieder aufs Neue zu motivieren – Danke!