



Hitzebeanspruchung und Leistungsfähigkeit in Büroräumen bei erhöhten Außentemperaturen

R. T. Hellwig, I. Nöske, S. Brasche, Hj. Gebhardt, I. Levchuk, W. Bischof

**Forschung
Projekt F 2039**

R. T. Hellwig
I. Nöske
S. Brasche
Hj. Gebhardt
I. Levchuk
W. Bischof

**Hitzebeanspruchung und
Leistungsfähigkeit in Büroräumen bei
erhöhten Außentemperaturen**

Dortmund/Berlin/Dresden 2012

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Bewertung der Hitzebeanspruchung bei erhöhten Außentemperaturen in Arbeitsräumen – HESO“ – Projekt F 2039 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

- Autoren: Runa T. Hellwig
Hochschule Augsburg
Fachgebiet Energie Effizienz Design und Bauklimatik
im Auftrag des Fraunhofer IBP
- Iris Nöske
Fraunhofer – Institut für Bauphysik
Fraunhoferstr. 10, 83626 Valley
www.ibp.fraunhofer.de
- Sabine Brasche, Wolfgang Bischof
Universitätsklinikum Jena
Institut für Arbeits-, Sozial-, Umweltmedizin und -hygiene
Bachstr. 18, 07743 Jena
www.med.uni-jena.de
- Hansjürgen Gebhardt, Inna Levchuk
ASER – Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und
Ergonomie e. V. an der Bergischen Universität Wuppertal
Corneliusstr. 31, 42329 Wuppertal
www.institut-aser.de
- Fachliche Beratung: Kersten Bux, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- Titelfoto: Uwe Völkner, Fotoagentur FOX, Lindlar/Köln
- Umschlaggestaltung: Rainer Klemm, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn
- Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Telefon 0231 9071-0
Fax 0231 9071-2454
poststelle@baua.bund.de
www.baua.de
- Berlin:
Nöldnerstr. 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Fax 030 51548-4170
- Dresden:
Fabricestr. 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Fax 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.
Aus Gründen des Umweltschutzes wurde diese Schrift auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt

ISBN 978-3-88261-142-7

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	4
Abstract	5
Résumé	6
1 Motivation	7
2 Ziele	9
3 Stand der Forschung	10
3.1 Einfluss erhöhter Temperatur auf die Leistungsfähigkeit bei Büroarbeit	10
3.2 Leistungstests	14
4 Hypothesen	20
5 Versuchsdesign	21
5.1 Untersuchte Expositionen	21
5.2 Versuchszeitraum	21
5.3 Versuchsraum	21
5.4 Physikalische Messgrößen	22
5.5 Physiologische Messgrößen	23
5.6 Messgrößen der subjektiven Befindlichkeit	24
5.7 Testbatterie zur objektiven Messung der Leistungsfähigkeit	24
5.8 Probandenauswahl und -information	26
5.9 Versuchsablauf	27
6 Auswertemethodik	29
7 Ergebnisse	32
7.1 Physikalische Messgrößen	32
7.2 Physiologische Messgrößen	34
7.3 Subjektive Befindlichkeit	39
7.4 Leistungsfähigkeit	42
7.5 Übungseffekt	49
7.6 Zusammenhänge zwischen einzelnen Zielgrößen	52
8 Diskussion	54
9 Schlussfolgerungen und Ausblick	60
Literaturverzeichnis	61

Hitzebeanspruchung und Leistungsfähigkeit in Büroräumen bei erhöhten Außentemperaturen

Kurzreferat

Infolge der globalen Erwärmung ist zukünftig auch in Deutschland an Arbeitsplätzen, die bisher keiner Hitze ausgesetzt waren, mit einer erhöhten Wärmebelastung zu rechnen. Die Arbeitsstättenverordnung fordert während der Arbeitszeit unter Berücksichtigung der Arbeitsverfahren, der körperlichen Beanspruchung der Beschäftigten und des spezifischen Nutzungszwecks des Raumes eine „gesundheitlich zuträgliche Raumtemperatur“. Die diese Forderungen konkretisierende Arbeitsstättenregel ASR A3.5 Raumtemperatur legt fest, dass die Lufttemperatur +26 °C nicht überschreiten soll. Der Fall sommerlicher Außentemperaturen wird in einem Stufenmodell, das unter bestimmten Voraussetzungen höhere Raumtemperaturen zulässt, geregelt.

Am Beispiel eines realitätsnahen Büroarbeitsplatzes wird bei sommerlichen Außentemperaturen der Einfluss hoher Raumtemperaturen auf die Leistungsfähigkeit von 20 Personen, die über 4 ¼ Stunden Büroarbeit verrichten, untersucht. Die Raumlufttemperatur wird in drei Bereichen (23-26 °C als Referenztemperaturbereich, 29-32 °C und 33-35 °C, vergleichbar den Temperaturbereichen des Stufenmodells der Arbeitsstättenregel ASR A3.5) eingestellt. Dabei werden physiologische Parameter und das subjektive Empfinden der Probanden erfasst sowie mit verschiedenen Tests die momentane Leistungsfähigkeit der Probanden ermittelt.

Hauttemperatur, Hautfeuchte und Herzfrequenz steigen proportional zur Raumtemperatur, bleiben jedoch im physiologisch unbedenklichen Bereich. Die Trinkmenge steigt ebenfalls mit der Raumtemperatur. Aufmerksamkeit, verbales und numerisches Denkvermögen zeigen entgegen den Erwartungen bei höheren Lufttemperaturen keine signifikanten Veränderungen. Die subjektive Akzeptanz höherer Temperaturen ist jedoch reduziert und die Erholtheit der Probanden verringert sich ebenso wie die Anstrengungsbereitschaft. Die Erkenntnisse sind in einer betrieblichen Handlungshilfe zusammengefasst worden.

Schlagwörter:

Raumklima, thermische Behaglichkeit, Leistungsfähigkeit, Sommer, Büro

Heat strain and performance in offices at elevated outside temperatures

Abstract

As a consequence of global warming, German office workplaces which have not been exposed to heat so far will be faced with a higher heat load in the future. The German Ordinance on Workplaces calls for a “room temperature conducive to health” taking into account the working process, the physical strain of the workers and the specific use of the room during working hours. This requirement is depicted in the German Technical Rules for Workplaces ASR A3.5: Room Temperature which constitutes that the air temperature shall not exceed 26 °C. In the case of high outside temperatures a step model defines the requirements for acceptable higher room temperatures.

In a realistic office environment the impact of a high room temperature on the performance of 20 subjects carrying out office work during 4 ¼ hours exposure and during elevated outside temperatures was determined. The room air temperature was controlled within three ranges (23-26 °C as reference temperature range, 29-32 °C and 33-35 °C, comparable with the temperature ranges of the step model of the German ASR A3.5). During the exposure physiological parameters and the subjective state of the subjects were recorded and different performance tests were conducted.

Skin temperature, skin moisture and heart rate proportionally increase with the room temperature but stay in a physiologically inoffensive range. The consumption of drinks increases with the room temperature, too. Contrary to expectations, alertness, verbal and numerical thinking do not show significant changes at higher room temperature. However, the subjective acceptance of higher room temperature is significantly reduced, the subjects feel less relaxed and the willingness to exert effort decreases. The results are summarised in an operative guideline.

Key words:

indoor climate, thermal comfort, performance, summer, office

Stress thermiques et performances dans les bureaux à températures extérieures élevées

Résumé

En tant que conséquence du réchauffement global, les lieux de travail allemands qui n'ont jamais trop été exposés à la chaleur seront confrontés à une charge thermique plus élevée dans le futur. L'Ordonnance Allemande sur les Lieux de Travail appelle à une "température ambiante propice à la santé", en tenant compte des processus de travail, des contraintes physiques des employés et de l'utilisation spécifique des salles durant les heures de travail. Ces exigences sont consignées dans les Règles Techniques Allemandes pour les Espaces de Travail ASR A3.5 : Température Ambiante qui stipule que la température de l'air ne doit pas dépasser 26 °C. Dans le cas de températures supérieures, un modèle intermédiaire est appliqué et permet de traiter les températures ambiantes élevées acceptables.

Dans un environnement de bureau réaliste, l'impact d'une température ambiante élevée a été déterminé sur les performances de 20 sujets réalisant un travail de bureau pendant une exposition de 4h et quart à des températures extérieures élevées. La température de l'air ambiant a été contrôlée sur trois intervalles (23-26 °C la gamme de température de référence, 29-32 °C et 33-35 °C, comparables aux gammes de température du modèle étape de l'ASR A3.5 allemand). Durant l'exposition, les paramètres physiologiques et l'état subjectif des sujets ont été enregistrés et différents tests de performance ont été menés.

La température et l'hydratation de la peau, et le rythme cardiaque augmentent proportionnellement avec la température ambiante mais restent dans un intervalle physiologiquement inoffensif. La consommation de boissons augmente aussi avec la hausse de température. Contrairement aux attentes, la vigilance, le raisonnement verbal et numérique ne montrent pas de changements significatifs à température ambiante élevée. Cependant, l'acceptation subjective d'une température ambiante élevée est significativement réduite et la relaxation du sujet, ainsi que sa volonté à l'effort diminuent. Les résultats sont résumés dans un guide opératoire.

Mots clés:

climat intérieur, confort thermique, performance, été, bureau

1 Motivation

Infolge der globalen Erwärmung ist zukünftig auch in Deutschland an Arbeitsplätzen, die bisher keiner Hitze ausgesetzt waren, mit einer erhöhten Hitzebelastung zu rechnen. Aus der Sicht des Arbeitsschutzes muss frühzeitig auf derartige Veränderungen reagiert werden und es sind Maßnahmen anzubieten. Die ArbStättV (2004) fordert unter Berücksichtigung der Arbeitsverfahren, der körperlichen Beanspruchung der Beschäftigten und des spezifischen Nutzungszwecks des Raumes eine "gesundheitlich zuträgliche Raumtemperatur" während der Arbeitszeit. Bei sommerlichen Hitzeperioden können Raumtemperaturen mit neutralem bis leicht warmem thermischem Empfinden nicht immer gewährleistet werden. In der Folge werden eine erhöhte Beanspruchung und bedingt durch das verminderte Wohlbefinden auch Einbußen der Leistungsfähigkeit vermutet.

Mit der Neufassung der früheren Arbeitsstätten-Richtlinie Raumtemperaturen ASR 6 (2001) in der neuen Arbeitsstättenregel „Raumtemperatur“ ASR A3.5 (2010) wird im Gegensatz zur früheren Definition der oberen Begrenzung der Raumtemperatur durch einen einzigen Wert von 26 °C nun ein Stufenmodell eingeführt. Dieses Stufenmodell sieht für Arbeitsräume mit geringem betriebstechnisch bedingtem Wärmeinfluss folgendes Vorgehen bei der Bewertung von hohen Innentemperaturen vor:

Zunächst wird unterschieden, ob der betrachtete Zeitraum in eine sommerliche Hitzeperiode fällt, bei der Außentemperaturen über 26 °C auftreten. Ist dies nicht der Fall, so wird die Innentemperatur wie bisher auf 26 °C begrenzt. Bei einer Außentemperatur über 26 °C wird in Abhängigkeit von der gemessenen Lufttemperatur wie folgt vorgegangen:

- Lufttemperatur im Arbeitsraum von über 26 °C bis 30 °C:
Liegt die Außenlufttemperatur über 26 °C und wird ein geeigneter Sonnenschutz bereits verwendet, soll der Arbeitgeber Maßnahmen nach Tabelle 4 der ASR A3.5 (2010) ergreifen.
- Lufttemperatur im Arbeitsraum von über 30 °C bis 35 °C:
Wirksame Maßnahmen nach Tabelle 4 der ASR A3.5 (2010) müssen vom Arbeitgeber ergriffen werden.
- Lufttemperatur im Arbeitsraum von über 35 °C:
Der Raum ist während der Überschreitungszeit ohne Maßnahmen wie bei Hitzearbeit (BGI 7002, 2007; BGI 579, 2007) als Arbeitsraum ungeeignet.

Abb. 1.1 verdeutlicht dieses Stufenmodell in grafischer Form. In Tabelle 4 der ASR A3.5 (2010) werden folgende beispielhafte Maßnahmen genannt:

- a) effektive Steuerung des Sonnenschutzes (z. B. Jalousien auch nach der Arbeitszeit geschlossen halten)
- b) effektive Steuerung der Lüftungseinrichtungen (z. B. Nachtauskühlung)
- c) Reduzierung der inneren thermischen Lasten (z. B. elektrische Geräte nur bei Bedarf betreiben)

- d) Lüftung in den frühen Morgenstunden
- e) Nutzung von Gleitzeitregelungen zur Arbeitszeitverlagerung
- f) Lockerung der Bekleidungsregelungen
- g) Bereitstellung geeigneter Getränke (z. B. Trinkwasser)

Für die Anwendung der neuen Arbeitsstättenregel Raumtemperatur ASR A3.5 (2010) in der Praxis liegen noch keine systematischen Erkenntnisse seit ihrer Einführung vor.

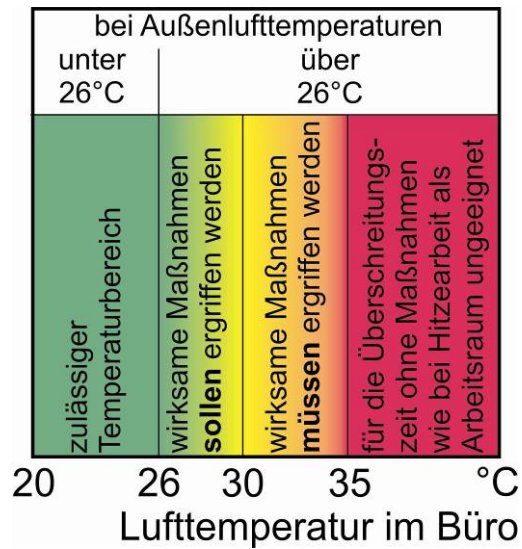


Abb. 1.1 Begrenzung der Innenlufttemperatur nach ASR A3.5 (2010)

2 Ziele

Ziel des Projektes ist die Konkretisierung von Maßnahmen zum Schutz der Gesundheit der Beschäftigten in Arbeitsräumen mit geringem betriebstechnisch bedingtem Wärmeeinfluss bei hochsommerlichen Außentemperaturen. Am Beispiel des Büroarbeitsplatzes soll festgestellt werden, ob die bei hohen Raumtemperaturen erwarteten Leistungseinbußen eintreten und deren Ausmaß in Abhängigkeit von der herrschenden Innentemperatur abgeschätzt und quantifiziert werden. Hierzu werden Untersuchungen unter den Bedingungen eines möglichst realen Büroarbeitsplatzes durchgeführt. Die abgeleiteten Maßnahmen werden in einer praxisorientierten betrieblichen Handlungshilfe dokumentiert. Dabei soll die zu erwartende Belastungssituation abgeschätzt und angepasste Schutzmaßnahmen abgeleitet werden.

3 Stand der Forschung

3.1 Einfluss erhöhter Temperatur auf die Leistungsfähigkeit bei Büroarbeit

In verschiedenen deutschsprachigen Arbeiten sind bereits Erkenntnisse zum Zusammenhang von erhöhter Temperatur und Leistungsfähigkeit zusammengefasst worden (z. B. BUX, 2006; SCHÄDLICH et al., 2006; URLAUB, 2009; URLAUB et al., 2010).

URLAUB (2009) beschäftigt sich in ihrer Arbeit mit Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit bei Büroarbeit. Sie unterscheidet zwischen den verschiedenen Arten von Leistungstests und arbeitet die Unterschiede zwischen den Studien bzgl. Probandenzahl und -alter sowie Dauer der Untersuchungen heraus. Tab. 3.1 fasst eine Reihe von Studien, die im Bereich moderater Wärmebelastung die Leistungsfähigkeit von Personen untersucht haben, zusammen. Es werden neben den angewendeten Leistungstests die Probandenzahl, das Probandenalter und die Expositionsdauer aufgeführt. Die Erkenntnisse der dort aufgeführten Studien werden im Folgenden kurz dargestellt.

PEPLER und WARNER (1968) testeten bei sechs verschiedenen Temperaturen (16,7 - 20 - 23,3 - 26,6 - 30 - 33,3 °C) wie schnell und effektiv Studierende wissenschaftliche Ausdrücke und Konzepte erlernten. Aufgezeichnet wurden die Geschwindigkeit beim Lernen, die Fehlerrate und der subjektiv empfundene Aufwand beim Lernen. Die Studenten konnten die Genauigkeit und die Fehlerrate außer bei den zwei niedrigsten Temperaturen (16,7 und 20 °C) im üblichen Bereich aufrechterhalten, obwohl sie die erbrachte Leistung bei den beiden wärmsten Temperaturen (30 und 33,3 °C) wesentlich mehr Aufwand kostete. Auch bei der niedrigsten Temperatur war der subjektiv empfundene Aufwand sehr hoch. Bei 26,6 °C war der empfundene Aufwand am geringsten, die Fehlerrate am niedrigsten und die Studenten lernten am schnellsten. Da die Versuche bei noch relativ hohen Außentemperaturen im Oktober in Kansas stattfanden, vermuten die Autoren, dass die Probanden durch die Gewöhnung an warme Temperaturen sensibler auf kalte Raumtemperaturen reagierten, als bei früheren Versuchen im Winter.

LANGKILDE et al. (1973) testeten die Leistungsfähigkeit von Studierenden bei ihrer Komforttemperatur (ca. 22,6 °C) und jeweils einer um 4 K nach oben (26,5 °C) bzw. nach unten (18,6 °C) von der Komforttemperatur abweichenden Raumtemperatur. Für den durchgeführten Additionstest, den Wortgedächtnistest und den Pfadfindertest berichten LANGKILDE et al. (1973) keine signifikanten Zusammenhänge mit der Raumtemperatur. Aber die Schläfrigkeit und die Erschöpfung der Probanden nahmen signifikant mit der höheren Temperatur zu. Der berichtete Aufwand für die Aufgabenerfüllung veränderte sich nicht mit der Temperatur. Die Autoren machen keine Angaben zu der während der Untersuchung herrschenden Außentemperatur.

LANGKILDE (1978) untersuchte die Leistungsfähigkeit von 15 in Büroarbeit geübten Probandinnen im Alter von 19 bis 53 Jahren (Mittelwert 31 Jahre) bei fünf verschiedenen Raumtemperaturen (18 - 21 - 24 - 27 - 30 °C). Vor dem ersten Versuch wurden die Probandinnen in einem dreistündigen Vorversuch instruiert und sie konnten die verschiedenen Leistungstests ausprobieren. Die Probandinnen waren über den

Zweck der Untersuchung nicht informiert. Die Probandinnen arbeiteten bei Kühlempfinden (18 °C) schneller und bei Warmempfinden (30 °C) langsamer als im Zustand der Behaglichkeit bei 24 °C. Bei nur einem der sechs Leistungstests war die verringerte Bearbeitungsgeschwindigkeit, die bei 30°C auftrat, signifikant. Bei größerer Bearbeitungsgeschwindigkeit nahm die Anzahl der Fehler zu. In vier der sechs Tests arbeiteten die Probandinnen am Nachmittag signifikant schneller als am Vormittag. Mit steigender Temperatur wurde eine größere Schläfrigkeit berichtet. Der empfundene Aufwand für die Aufgabenerfüllung veränderte sich nicht.

NISHIHARA, YAMAMOTO und TANABE (2002) führten Untersuchungen mit Studierenden in einem Klimaraum im November und Dezember in Tokio durch. Drei verschiedene operative Temperaturen wurden eingestellt (25 - 28 - 33 °C). Ein Übungsdurchgang wurde bei 25 °C durchgeführt. Den Probanden wurde ein Bonus für besonders gute Leistungen in Aussicht gestellt. Bei den weiblichen Probanden veränderte sich die Leistungsfähigkeit nicht mit der Temperatur. Bei männlichen Studenten nahmen die Ergebnisse eines Items der Walter Reed Performance Assessment Battery (PAD) bei 33 °C signifikant ab. Die männlichen Probanden erzielten beim Schreibtest bei höheren Temperaturen eine höhere Leistungsfähigkeit als bei 25 °C. NISHIHARA, YAMAMOTO und TANABE (2002) stellten außerdem fest, dass Beschwerden hinsichtlich Erschöpfung mit der Temperatur zunahmen.

UEKI et al. (2007) führten im Juli und August in Tokio eine Studie mit Studenten bei 25 °C und 28 °C mit einer Bekleidungsämmung von 0,93 clo durch. Den Untersuchungen war eine Übungseinheit bei 25 °C vorangestellt. Es wurde die Leistung beim Addieren getestet und ein Bonus für gute Leistungen in Aussicht gestellt. Die Leistung beim Addieren änderte sich bei 25 °C nicht mit der Zeit. Bei 28 °C wurde die Leistung nach der sechsten Wiederholung des Additionstests (von insgesamt neun) signifikant niedriger als zu Beginn der Untersuchung. Die Ermüdung nahm generell mit der Versuchszeit von 5,8 Stunden zu.

HANEDA et al. (2008) untersuchten in 5,8 Stunden dauernden Untersuchungen im September und Oktober in Japan den Unterschied zwischen Ergebnissen von Multiplikationsaufgaben (6 x 30 Minuten) von zwei dreistelligen Zahlen während zweier Temperaturexpositionen: 25,5 °C und 28,5 °C und zweier Lüftungsraten. Der Geräuschpegel betrug während der Untersuchungen 50 dB(A). Den Studenten wurde ein Bonus für besonders gute Leistungen in Aussicht gestellt. HANEDA et al. (2008) fanden keinen signifikanten Unterschied in der Leistungsfähigkeit zwischen den beiden Temperaturkonditionen bei jeweils gleicher Lüftungsrate. Sie fanden aber mit der Versuchszeit ansteigende Ermüdung und bei 28,5 °C stärkere Ermüdungserscheinungen als bei 25,5 °C. Sie fanden einen proportionalen Zusammenhang zwischen der individuell berichteten Unzufriedenheit mit dem Raumklima bzw. der berichteten Anzahl von Ermüdungserscheinungen (aus insgesamt 30 Items) und der Leistungsfähigkeit.

LAN et al. (2009) führten Untersuchungen mit einer neuropsychologischen Testbatterie bei vier Temperaturen (19 °C - 24 °C - 27 °C - 32 °C) durch. Je eine Gruppe wurde vormittags und nachmittags am gleichen Wochentag in zwei aufeinanderfolgenden Wochen getestet. Die Versuchsdauer betrug jeweils 1,2 h inklusive 40 Minuten Adaptation an die Bedingungen im Raum. Vor den Versuchen wurde eine Trainingseinheit durchgeführt. LAN et al. (2009) untersuchten vier neuropsychologische Funktionen: Wahrnehmung, Lernen und Gedächtnis, Denken sowie exekutive Gedächtnis-

nisleistung. Insgesamt wurden neun Tests durchgeführt. Die Fehlerrate veränderte sich bei keinem der Tests in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Geschwindigkeit der Bearbeitung der Rechentests wuchs signifikant mit steigender Temperatur. Für alle anderen Tests sind die Unterschiede in der Geschwindigkeit nicht signifikant.

LAN und LIAN (2009) untersuchten den Einfluss dreier Temperaturen (17 - 21 - 28 °C, 1,2 clo) auf die Leistungsfähigkeit von Studierenden. Die Temperaturen wurden in jeweils zwei Stunden langen Versuchen drei Gruppen von Probanden in unterschiedlicher Reihenfolge an einem Tag präsentiert. Eine Trainingseinheit wurde eine Woche vor den Versuchen durchgeführt. Für gute Leistungen wurde ein Bonus in Aussicht gestellt. Zusätzlich zu den neun Leistungstests, die auch in LAN et al. (2009) durchgeführt wurden, kamen vier weitere Tests zur Anwendung. Die Fehlerrate zeigte sich in nur einem dieser Tests von der Temperatur beeinflusst. Sie war bei 17 °C am höchsten und bei 28 °C am niedrigsten. Die Geschwindigkeit zeigte ebenfalls nur bei einem Test eine Abhängigkeit von der Temperatur. Sie war am höchsten bei 21 °C und am niedrigsten bei 17 °C. Bei 17 °C war der selbstberichtete Aufwand zur Aufgabenerfüllung signifikant höher als bei 21 °C. Zwischen der Leistungsfähigkeit bei den anderen Temperaturen wurde kein signifikanter Unterschied gefunden. Die Probanden äußerten mehr negative Emotionen bei 28 °C im Vergleich zu 21 °C.

LAN et al. (2011) führten mit Studierenden insgesamt 13 Leistungstests bzw. -testvarianten bei zwei verschiedenen Temperaturen während einer Versuchsdauer von 4,5 Stunden im März in Dänemark aus. Der Schallpegel betrug während der Versuche 55 dB(A). Es wurde kein Bonus für gute Leistungen gezahlt. Im Vergleich der beiden Temperaturen waren die Leistungen bei 30 °C bei einem Additionstest und bei vier von sieben Tests einer neuropsychologische Testbatterie reduziert. Die Bereitschaft Anstrengung aufzubringen nahm mit der Versuchsdauer ab und war bei 30 °C geringer ausgeprägt als bei einer Temperatur von 22 °C. Die Ermüdung war am Ende höher als zu Beginn der Tests. LAN et al. (2011) verwendeten den NASA TLX Fragebogen (HART und STAVELAND, 1988) zur Charakterisierung der Beanspruchung durch die Tests. Die Probanden berichteten von höheren geistigen und körperlichen Anforderungen bei 30 °C im Vergleich zu 22 °C, sie empfanden die Aufgabenerfüllung bei 30 °C schlechter als bei 22 °C und waren am Ende des Versuches bei 30 °C frustrierter.

Tab. 3.1 Durchgeführte Studien zur Leistungsfähigkeit unter moderater Wärmebelastung aus URLAUB et al. (2010), gekürzt, verändert und erweitert um weitere Literaturquellen und Angaben

	Pepler, Warner 1968	Langkilde et al. 1973	Langkilde 1978	Nishihara et al. 2002	Ueki et al. 2007	Haneda et al. 2008	Lan et al. 2009	Lan und Lian 2009	Lan et al. 2011
Anzahl Temperaturen	6 T	3 T	5 T	3 T	2 T	2 T	4 T	3 T	2 T
Bekleidungsdämmung [clo]	0,52	0,6	0,6-0,8	0,76	0,93	0,57	0,6	1,2	0,9
Probandenanzahl	72	12	15	40	15	11	24	21	12
Probandenalter	Stud.	23±2	19-53	Stud.	Stud.	22±1,7	19-30	18-20	23±2
Geschlecht	m/w	m/w	w	m/w	m	m	m/w	m/w	m/w
Expositionsdauer [h]	3	2,5	3	1,6	5,8	5,8	1,2	2	4,5
Testwiederholung je Exposition	1	1	1	1	9	6	1	1	2
PAB-Testbatterie (7 Tests)				X					
Schreibaufgabe				X					2X
Gedächtnisspanne/Wortgedächtnis		X	X				X	X	X
Bildererkennung							X	X	X
Symbol-Ziffern-Komb. wiedergeben							X	X	
Lernverständnis	X								
Satz vervollst./schlussfolgern			X				X	X	X
Ereignisse sortieren								X	
Räumliche Vorstellung							X	X	X
Bildliches Abstrahieren								X	
Pfadfindertest		X	X						
Aufmerksamkeit									2X
Konzentration							X	X	X
Addition, Multiplikation		X	X	X	X	X	X	X	4X
Positionierung				X					
Hand-Auge-Koordination								X	
Wörter/Nummern vergleichen			2X						
Buchstaben suchen							X	X	
Überlappung geom. Figuren							X	X	
Summe	1	3	6	10	1	1	9	13	13

URLAUB et al. (2010) vergleichen den Anteil korrekter Antworten bei Additionstests aus vier Studien bei Temperaturen im moderat kühlen bis moderat warmen Bereich. Dabei treten im moderat warmen Bereich sowohl Leistungsverbesserungen (LANGKILDE, 1978; LAN et al., 2009) als auch geringfügige Verschlechterungen (LAN und LIAN, 2009) auf. URLAUB et al. (2010) zeigen, dass es auch Untersuchungen gibt, die bei veränderter Temperatur praktisch keine veränderten Ergebnisse zeigen (LANGKILDE et al. 1973).

Leider sind nicht bei allen Studien mögliche Störgrößen angegeben. In einigen Studien wurden Boni für besonders gute Leistungen gezahlt. Damit sollte die Motivation der Studienteilnehmer hochgehalten werden. In wenigen Studien, welche die Leistungsfähigkeit untersuchen, wird der Geräuschpegel der im Untersuchungsraum herrschte angegeben.

In den letzten Jahrzehnten wurde eine Reihe von Leistungstests durchgeführt, die den Einfluss von erhöhter Raumtemperatur auf die Leistungsfähigkeit untersuchten. In einer Mehrzahl der Studien wurden keine signifikanten Effekte gefunden, teilweise tendenzielle. Es gibt aber auch wenige Studien, die in mehreren Tests eine Leistungsabnahme bei moderat erhöhten Raumtemperaturen zeigen. Die Studien, die Erschöpfung oder Ermüdung parallel zu den Leistungstests untersuchten, zeigen eine Zunahme der Erschöpfung oder Ermüdung mit der Versuchsdauer bereits bei kurzen Versuchsdauern und bei erhöhten Raumtemperaturen.

3.2 Leistungstests

Für die Bestimmung von Kenngrößen zur kognitiven Leistungsfähigkeit ist eine Vielzahl psychologischer Tests verfügbar, die unter dem Begriff „Leistungstests“ zusammengefasst sind. Quellen für solche Tests sind u. a.:

- die Testzentrale des Hogrefe-Verlages (www.testzentrale.de),
- das Wiener Testsystem (www.schuhfried.at) sowie
- das Angebot der Psychologischen Testsysteme (PSYTEST, www.psytest.net).

Darüber hinaus finden sich Übersichten in verschiedenen Quellen (z. B. BRÄHLER et al., 2002). Das Angebot ist dabei zumindest nur grob dem Aspekt „Büroarbeiten“ zuordenbar, vielmehr geht es darum, diagnostische Verfahren zur Erfassung von Eigenschaften eines Probanden im Vergleich zu einem größeren Kollektiv zu beschreiben.

Arten von Leistungstests

Eine in der Literatur eingesetzte Einteilung unterscheidet allgemeine und spezielle Leistungstests und grenzt diese von Tests zur allgemeinen kognitiven Leistungsfähigkeit, Entwicklungstests und Schultests ab (BRÄHLER et al., 2002; KRUMM und SCHMIDT-ATZERT 2009). Dabei ist festzustellen, dass keine starren Abgrenzungen bestehen, vielmehr stellen sich die Übergänge eher fließend dar. Abb. 3.1 gibt diese Einteilung grafisch wieder.

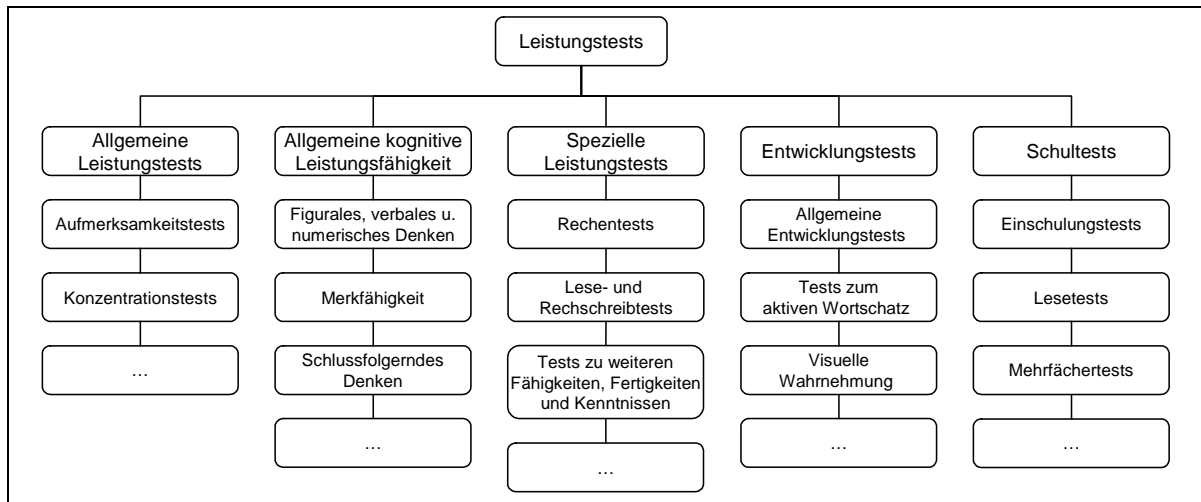


Abb. 3.1 Abgrenzung und Inhalte unterschiedlicher Leistungstests nach Angaben aus BRICKENKAMP (2002) und KRUMM und SCHMIDT-ATZERT (2009)

Mit Entwicklungstests soll die Entwicklung von Kindern beobachtet werden. Sie sollen den Leistungsstand eines Kindes in Relation zu seinem Lebensalter erfassen. Sie zielen darauf ab, durch den Vergleich mit Normwerten, Entwicklungsretardierungen zu erkennen. Hierzu werden Merkmale erfasst, die im Kindes- und Jugendalter relevant sind, wie die allgemeine Entwicklung, der aktive Wortschatz, die visuelle Wahrnehmung, die Körperkoordination etc. (BRÄHLER et al., 2002).

Unter Schultests werden solche Tests zusammengefasst, die im Zusammenhang mit der schulischen Entwicklung stehen. Hierzu zählen Einschulungstests, spezielle Schuleignungstests, Mehrfächertests, Lesetests, Rechtschreibtests, Mathematik- oder Rechentests (BRÄHLER et al., 2002).

Allgemeine Leistungstests umfassen solche Tests, die allgemeine Voraussetzungen für das Erbringen kognitiver Leistungen erfassen sollen (AMELANG und SCHMIDT-ATZERT, 2006). Solche Voraussetzungen sind z. B. Aufmerksamkeit, Konzentration oder die allgemeine Aktiviertheit. BRÄHLER et al. (2002) sprechen hier von einem Faktor, der als „anhaltende Konzentration bei geistiger Tempoarbeit“ bezeichnet werden kann.

Dabei ist eher offensichtlich, dass kognitive Leistungen, wie sie insbesondere auch bei Büroarbeit gefordert werden, immer ein gewisses Maß an Aufmerksamkeit und Konzentration erfordern. Ein in diesem Zusammenhang häufig eingesetzter Test ist der sogenannte d2-Aufmerksamkeits-Belastungs-Test (BRICKENKAMP, 1972). Obwohl in der Bezeichnung der Begriff „Konzentration“ fehlt, wird er allgemein auch als Konzentrationstest bezeichnet. Dabei ist festzustellen, dass Aufmerksamkeit und Konzentration häufig wenig abgegrenzt genannt werden. AMELANG und SCHMIDT-ATZERT (2006) schlagen hier eine Unterscheidung vor, die sich am Grad der Weiterverarbeitung orientiert (Abb. 3.2).

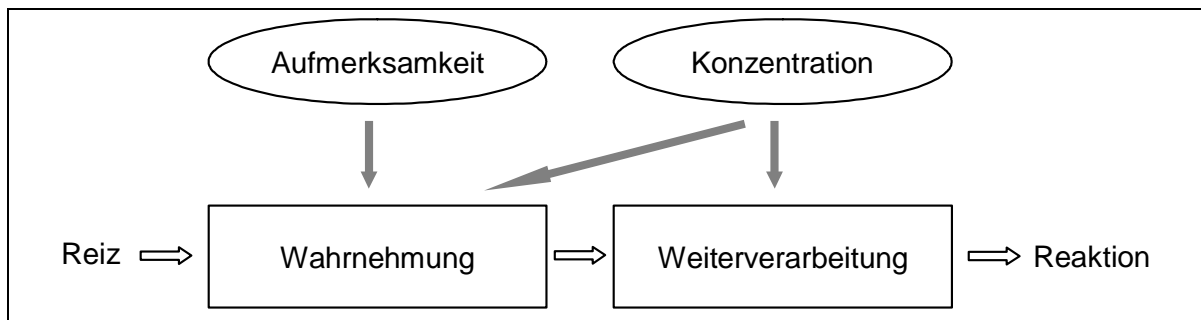


Abb. 3.2 Abgrenzung der Begriffe Aufmerksamkeit und Konzentration aus AMELANG und SCHMIDT-ATZERT (2006)

Bei dieser Abgrenzung wird unter Aufmerksamkeit in ihren verschiedenen Ausprägungsformen allein die Wahrnehmung von Reizen oder Informationen verstanden. Ausprägungsformen sind dabei je nach Anzahl verschiedener Reizklassen und zeitlicher Ausprägung selektive, geteilte und Daueraufmerksamkeit. Demgegenüber wird der Begriff Konzentration auf alle Stufen der Verarbeitung von Informationen bezogen. Konzentration schließt damit neben der selektiven Wahrnehmung (= Aufmerksamkeit) auch die Weiterverarbeitung bis hin zur Handlungsplanung im Sinne einer mehr oder weniger komplexen Reaktion ein. Konzentration kann so als Fähigkeit verstanden werden, „unter Bedingungen schnell und genau zu arbeiten, die das Erbringen einer kognitiven Leistung normalerweise erschweren“ (AMELANG und SCHMIDT-ATZERT, 2006).

Auch bei dieser Abgrenzung kann der zuvor genannte d2-Test der Kategorie Konzentrationstest zugeordnet werden, da die Aufmerksamkeitsleistung kontinuierlich und dabei schnell und richtig erbracht werden muss. Wichtige Kennwerte sind dabei Arbeitstempo, mittlere Reaktionszeit, Auslassungsfehler ebenso wie Verwechslungsfehler (AMELANG und SCHMIDT-ATZERT, 2006).

Bei der Aufgabengestaltung zu Konzentrationstests kann zwischen Diskriminations-, Additions- und Sortieraufgaben unterschieden werden. Bei Diskriminationsaufgaben wird eine fortlaufende Unterscheidung zwischen „Target“- und mehr oder weniger ähnlichen „Non-Target“-Reizen gefordert. Andere Testformen bestehen aus einfachen Additions- und Subtraktionsaufgaben, die je nach Ergebnis nach unterschiedlichen Regeln weiterzuverarbeiten sind. Im Fall der Sortieraufgaben besteht die Aufgabe z. B. darin, Zahlenkarten nach bestimmten Kriterien zuzuordnen (SCHWEIZER, 2006).

Spezielle Leistungstests werden auch als spezielle Funktions- und Eignungstests bezeichnet (BRÄHLER et al., 2002) und werden eingesetzt, um Informationen über spezielle Leistungsvoraussetzungen, z. B. sensorische Merkmale (Sehschärfe, Farbwahrnehmung), motorische Funktionen (Fingerfertigkeit, Feinmotorik) oder spezielle Leistungsmerkmale (technisches Verständnis, Rechtschreibungs- und Rechenkenntnisse) zu erhalten.

Tests zur allgemeinen kognitiven Leistungsfähigkeit, deren Inhalte sich auch in allgemeinen Intelligenztests wiederfinden, sind darauf ausgerichtet, allgemeine kognitive Merkmale zu erfassen. Eines von mehreren Konstrukten unterscheidet vier operative Fähigkeiten (Verarbeitungskapazität, Einfallsreichtum, Bearbeitungsgeschwin-

digkeit, Merkfähigkeit) und drei inhaltsbezogene Fähigkeiten (verbales Denken, numerisches Denken, figural-bildhaftes Denken), deren Ausprägung versucht wird in Testaufgaben zu ermitteln (JÄGER, z. B. in FISSENI, 2004). Für die Merkfähigkeit bedeutsam ist das Arbeitsgedächtnis. Eines der verschiedenen Konstrukte definiert das Arbeitsgedächtnis als Kurzzeitgedächtnis plus kontrollierte Aufmerksamkeit. In diesem Sinne steht es für das kurzfristige Speichern und Anwenden relevanter Informationen (SCHMIDT-ATZERT, KRUMM und BÜHNER, 2008).

Kennzeichnend für die verschiedenen zuletzt genannten Testarten ist, dass eine Verschiebung zwischen reiner Wahrnehmung und Weiterverarbeitung besteht. Steht bei Aufmerksamkeitstests die Reiz- bzw. Informationswahrnehmung im Vordergrund der Betrachtung (die Reizreaktion ist wenig komplex gestaltet), so erfordern Konzentrationstests bereits eine komplexere Verarbeitung der wahrgenommenen Reize. Tests zur allgemeinen kognitiven Leistungsfähigkeit legen ihren Schwerpunkt dann deutlich stärker auf die Verarbeitung von Informationen, deren Verknüpfung mit Wissen bis hin zur Ableitung von Schlussfolgerungen.

Neben dieser eher nach Zielsetzung ausgerichteten Einteilung wird in der praktischen Umsetzung und Durchführung zwischen „Speed-Tests“ und „Power-Tests“ unterschieden (JANKISZ und MOOSBRUGGER, 2008). Speed- oder Geschwindigkeitstests verwenden einfache Aufgaben, die meist von allen Probanden gelöst werden können. Die Differenzierung nach Leistungen erfolgt hier durch eine Begrenzung der Bearbeitungszeit, wobei erfasst wird, wie viele Aufgaben ein Proband in der begrenzten Bearbeitungszeit richtig bearbeiten konnte.

Demgegenüber verwenden Power- oder Niveautests eher schwierige Aufgaben, die auch bei unbegrenzter Zeitvorgabe theoretisch nicht von allen Teilnehmern richtig gelöst werden können. In diesem Fall erfolgt die Differenzierung der Leistungen über das Schwierigkeitsniveau der Aufgaben, die der Proband ohne Zeitbegrenzung bewältigen konnte.

In der praktischen Durchführung bedeutet dies, dass Speed- oder Geschwindigkeitstests jeweils eine definierte Zeitdauer aufweisen, während bei Power- oder Niveautests die Testdauer von Proband zu Proband variiert, da unterschiedliche Schwierigkeitsniveaus erreicht werden. Dieser Umstand ist bei einer parallelen Bearbeitung durch mehrere Probanden, wie sie im Rahmen der Untersuchungen vorgesehen sind, allerdings eher von Nachteil.

Anwendung auf Büroarbeit

WARGOCKI (1998) weist darauf hin, dass psychologische Tests häufig dadurch charakterisiert sind, dass sie kurze Bearbeitungszeiten aufweisen, der unmittelbare Bezug zur Büroarbeit eher gering ist und sie mehrheitlich darauf ausgerichtet sind, interindividuelle Unterschiede zu Merkmalen der Probanden im Vergleich zu einem größeren Kollektiv zu erfassen.

Demgegenüber sind näher an Büroarbeiten orientierte Aufgaben häufig zeitintensiv und nicht selten schwierig auswertbar. Insbesondere kreative Aspekte erfordern nicht selten die Interpretation des Testleiters und mindern damit die Objektivität.

Bei der subjektiven Einschätzung der Leistungsfähigkeit durch die Probanden muss berücksichtigt werden, dass diese meist auch durch andere, nicht kontrollierbare Einflüsse überlagert sind.

Die reine Aufmerksamkeit im Sinne der schnellen Reizwahrnehmung wie sie z. B. für den Straßenverkehr bedeutsam ist, spielt dabei für Büroarbeit eine eher untergeordnete Rolle. Vielmehr geht es hier darum, Aspekte der schnellen und möglichst präzisen Weiterverarbeitung zu ermitteln und in Kennzahlen zu fassen.

Letztlich ist eine geeignete Mischung erforderlich, die unterschiedliche Schwerpunkte kognitiver Leistungsmerkmale abbildet und in Kennzahlen fasst, ohne damit jedoch den Anspruch erheben zu können, die Anforderungen von Büroarbeit als Ganzes in ihren unterschiedlichen Ausprägungen wiederzugeben. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Schwerpunkte vermag jedoch auch unterschiedliche Veränderungen abzubilden, die bei einer konkreten Arbeitssituation wirksam werden.

Überlegungen zur Gestaltung von Testaufgaben

Mit Blick auf die Projektzielsetzung sollten die Testaufgaben so gestaltet sein, dass sie möglichst solche Aspekte beschreiben, die bei Büroarbeit häufig zu beobachten sind. Dabei sind interindividuelle Unterschiede eher unbedeutend, vielmehr geht es darum, intraindividuelle Änderungen aufgrund veränderter Bedingungen zu erfassen und zu quantifizieren.

Die in der Aufstellung ebenfalls unter Leistungstests genannten Entwicklungs- und Schultests weisen von ihren Inhalten und Zielsetzungen auf eine andere Zielgruppe und entsprechen damit nicht der Projektzielsetzung.

Bei der Gestaltung der Testaufgaben sollte berücksichtigt werden, dass die Leistung aus der Leistungsmenge in einer vorgegebenen Zeitdauer abgelesen werden kann. Die Leistungsmenge spiegelt sich dabei in der Anzahl der jeweils richtig bearbeiteten Aufgaben, wodurch auch dem Aspekt der sorgfältigen Bearbeitung Rechnung getragen wird.

Dies hat in der Testdurchführung einerseits zur Folge, dass die Testdauer für alle Probanden weitgehend identisch ist, andererseits kann so vermieden werden, dass die Testsituation als personenbezogene Prüfungssituation verstanden wird.

Eingeschlossen werden sollten Voraussetzungen für die kognitive Leistungsfähigkeit, wie sie z. B. über den d2-Test erfasst werden können. Weiter sind die Merkfähigkeit bzw. das Arbeitsgedächtnis zu berücksichtigen, da dieses nicht zuletzt für die Weiterverarbeitung von Informationen notwendig ist. Ebenso sollten Aufgaben, die auf das numerische und verbale Denken ausgerichtet sind, Berücksichtigung finden, wobei ein Bezug zur Büroarbeit deutlich werden sollte.

Hieraus wurden die in Abschnitt 5.7 näher erläuterten Testmodule abgeleitet. Legt man die in Abb. 3.1 wiedergegebene Struktur zugrunde, so lassen sich diese Testmodule den in Abb. 3.3 unterlegt gekennzeichneten Feldern zuordnen, wobei die Felder jeweils Schwerpunktsetzungen wiedergeben.

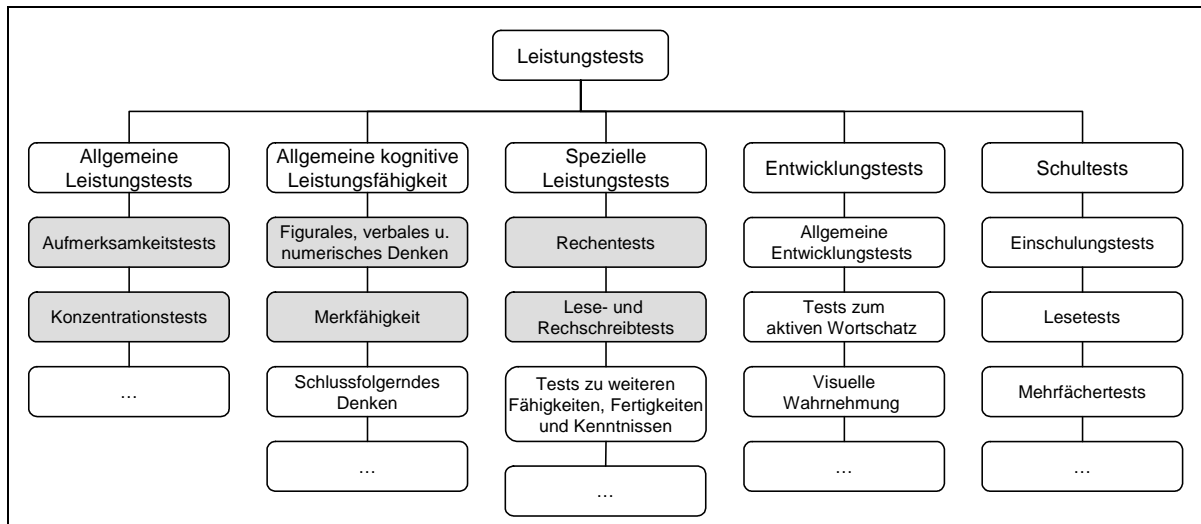


Abb. 3.3 Vorschlag für eine Auswahl und Zuordnung von Testmodulen mit der Zielrichtung der Ermittlung von Auswirkungen unterschiedlicher Umgebungsbedingungen bei Büroarbeit

4 Hypothesen

Folgende Hypothesen wurden formuliert:

Hypothese 1

Eine thermische Belastung durch eine hohe Raumtemperatur (Lufttemperatur):

- verändert physiologische Parameter,
- verschlechtert die subjektive Einschätzung des Eigenzustandes und der eigenen Leistung,
- beeinträchtigt die thermische Behaglichkeit und
- verringert die objektiv bestimmbare momentane Leistungsfähigkeit

während einer Versuchsdauer von 4,3 Stunden.

Hypothese 2

Diese Veränderungen werden vom Zeitpunkt im Versuchsablauf (Messzeitpunkt) modifiziert.

5 Versuchsdesign

Ziel des Versuchsdesigns war es, für jede Messgröße möglicherweise vorhandene intraindividuelle Unterschiede zwischen verschiedenen thermischen Expositionen messen zu können. Dazu war es erforderlich, dass alle Probanden allen Expositionen ausgesetzt werden. Interindividuelle Unterschiede, also diejenigen zwischen den einzelnen Probanden, waren als Ergebnis nicht von Hauptinteresse.

5.1 Untersuchte Expositionen

Um für die Temperaturbereiche des Stufenmodells der ASR A3.5 (2010) die angestrebten Informationen zu Physiologie, subjektiver Einschätzung des Eigenzustandes, der thermischen Behaglichkeit und der Leistungsfähigkeit zu erlangen, wurden folgende thermische Expositionen für die Untersuchungen festgelegt:

- Exposition 1: 23-26 °C Lufttemperatur, Referenzexposition
- Exposition 2: 29-32 °C Lufttemperatur
- Exposition 3: 33-35 °C Lufttemperatur
- Exposition 4: 23-26 °C Lufttemperatur, Referenzexposition, Wiederholung

Exposition 1 wurde allen Probanden jeweils am ersten Tag der viertägigen Versuchsreihe präsentiert. Um Einflüsse der Reihenfolge ausschließen zu können, wurde die Reihenfolge der anderen thermischen Expositionen gewechselt. Die Referenzsituation wurde wiederholt, um eventuell vorhandene Einflüsse durch Gewöhnung oder Übungseffekte beim Ausführen der Leistungstests auf die gemessene Leistungsfähigkeit erkennen und ihre Größenordnung abschätzen zu können.

5.2 Versuchszeitraum

Die Studie wurde im Zeitraum vom 28. Juni 2010 bis zum 29. Juli 2010 durchgeführt. Die Versuchsdurchführung wurde für die warme Jahreszeit geplant, um natürliche Akklimatisationseffekte an hohe Temperaturen, wie sie auch in der Praxis bei längeren Hitzeperioden auftreten, berücksichtigen zu können. Dieser Ansatz berücksichtigt die Regelung der ASR A3.5 (2010), höhere Temperaturen als 26 °C in Innenräumen ausschließlich bei entsprechend hohen Außentemperaturen, zuzulassen.

5.3 Versuchsraum

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik betreibt am Standort Holzkirchen ein mehrgeschossiges, modulares Freiland-Versuchsgebäude für energetische und raumklimatische Untersuchungen (VERU). Für die Versuche zur Bewertung der „Hitzebeanspruchung und Leistungsfähigkeit in Büroräumen bei erhöhten Außentemperaturen“ wurde ein Raum der Versuchseinrichtung als Büroraum ausgestattet. Der Raum ist ca. 28 m² groß und besitzt Ostorientierung. Jedem Probanden war ein Fenster mit au-

ßenliegendem, halbtransparentem Sonnenschutz, der während der Versuchszeit geschlossen war, zugeordnet. Die Beleuchtung im Büroraum war während der Versuche angeschaltet. Abb. 5.1 zeigt die Fassadenansicht und die Innenansicht des Versuchsraumes.



Abb. 5.1 Links: Ansicht der Fassade des Versuchsgebäudes und Kennzeichnung des Versuchsraumes. Rechts: Ansicht des Versuchsraumes von innen mit arbeitenden Probanden

5.4 Physikalische Messgrößen

An je zwei Arbeitsplätzen wurden die folgenden physikalischen Messgrößen erfasst:

- Lufttemperatur (°C): in 0,1; 0,6; 1,1 m Höhe und 0,1 m unterhalb der Decke,
- Globetemperatur (°C): in 1,1 m Höhe mit einem nicht genormten Globethermometer geringer thermischer Speichermasse, das schnell auf veränderte thermische Einflüsse reagieren kann,
- Relative Luftfeuchte (%): in 1,1 m Höhe,
- Kohlendioxid-Konzentration (ppm): in 1,1 m Höhe,
- Oberflächentemperatur des Bodens und
- Oberflächentemperatur an der Decke.

Zusätzlich wurde die Oberflächentemperatur (°C) an allen raumbegrenzenden Bauteilen erfasst. Außerdem wurde die Beleuchtungsstärke (lx) an jedem Arbeitsplatz gemessen. An jedem Messpunkt wurde ein Wert alle 15 s abgegriffen und aus je vier Werten ein Minuten-Mittelwert errechnet, der über das institutseigene System

IMEDAS gespeichert wird. Die Witterung wurde über die am Fraunhofer-Institut für Bauphysik vorhandene Wetterstation erfasst.

5.5 Physiologische Messgrößen

Die Hauttemperatur wurde auf der Mitte der Stirn und an zwei Positionen an der Innenseite des Unterarms bestimmt. Die Temperatur der Hautoberfläche gilt als Indikator des thermischen Empfindens. Obwohl die thermoregulatorischen Mechanismen eines gesunden Menschen nur geringe Veränderungen der Kerntemperatur zulassen, reagieren periphere Hauttemperaturen deutlich auf Veränderungen in Umgebungstemperatur oder Metabolismus.

Die Hauttemperatur wurde mit dem Skin-Thermometer ST 500 (CK electronic GmbH, Köln) standardisiert gemessen. Das Verfahren basiert auf berührungsloser Infrarotmessung der Abstrahlung der Hautoberfläche durch einen Spezi­alsensor in der Messsonde. Der Abstand zur Hautoberfläche ist dabei fixiert. Zur statistischen Auswertung wurden der vom Handgelenk weiter entfernte und der auf der Stirn gemessene Wert (in °C) verwendet.

Die Hautfeuchte wurde an fünf Messpositionen am Unterarm erfasst. Für die Messung der Hautfeuchte wurde das Corneometer CM 825 (CK electronic GmbH, Köln) eingesetzt. Die Messung selbst erfolgt durch druckstandardisiertes Aufsetzen einer Sonde auf die Haut. Für die Hautfeuchtemessung wird die elektrische Kapazität der oberen Hautschicht als Maß für deren Wassergehalt ermittelt. Laut Angabe des Herstellers beeinflussen auf die Hautoberfläche aufgetragene Produkte den Messwert nicht. Aufgrund der geringen Eindringtiefe des elektrischen Streufeldes wird die Oberflächenfeuchtigkeit der Haut gemessen. Der dimensionslose Messwert (Corneometer-Einheiten) liegt nach Angabe des Herstellers im Bereich zwischen 0 und 130. Zur weiterführenden Auswertung wurde ein Mittelwert aus diesen fünf Einzelmessungen verwendet.

Als weitere Messgröße wurde die Herzfrequenz erfasst. Die Herzfrequenz von jeweils drei Probanden pro Versuch (d. h. insgesamt von 15 Probanden der 20 Teilnehmer) wurde kontinuierlich über die gesamte Laufzeit eines Versuchs mit Brustgurten und Movesticks der Firma Suunto, Vantaa erfasst. Bedingt durch die enge Korrelation von Herzfrequenz und Sauerstoffverbrauch und damit auch Metabolismus ist die Kenntnis dieses Parameters aus thermophysiologischer Sicht essentiell.

Während des Versuches wurden den Probanden kalte Getränke angeboten. Die Probanden durften soviel trinken, wie sie mochten. Kaffee wurde vor dem Versuch und in den Pausen des Versuches im Vorbereitungsraum angeboten. Die Flüssigkeitsaufnahme in Form von kalten und warmen Getränken der Probanden wurde protokolliert.

Die Probanden wurden gebeten, mit einer leichten Hose und mit kurzärmeligem T-Shirt bekleidet zu erscheinen. Kurz vor Start jedes Versuches wurde die Bekleidung fotografisch dokumentiert. Die Probanden selbst dokumentierten das An- oder Ablegen von Bekleidung während des Versuches.

5.6 Messgrößen der subjektiven Befindlichkeit

Eigenzustandsbeschreibung

Zur Erfassung der subjektiv erlebten Beanspruchung existiert eine Reihe von Messverfahren, die meist als Adjektiv-Skalen konzipiert sind (APENBURG, 1986). Grundgedanke dabei ist, die momentane Befindlichkeit über Adjektive zu erfassen, indem diese hinsichtlich ihrer Ausprägung eingeschätzt werden. Die Ausprägung mehrerer Eigenschaften wird zu Sub-Skalen zusammengefasst und so eine Kenngröße für diese Dimensionen ermittelt. Daraus kann die momentane Beanspruchung abgeleitet werden. APENBURG (1986) nennt acht solche Subskalen, von denen in der vorliegenden Studie lediglich die Subskalen mit den zugehörigen Adjektiven verwendet wurden, die in der Versuchsumgebung einen konkreten Bezug zur Beanspruchungssituation aufweisen. Ausgewählt wurden vier Subskalen: Anstrengungsbereitschaft, Spannungslage, Erholtheit und Schläfrigkeit mit insgesamt 19 Adjektiven. Die Skalierung der Adjektive erfolgt auf einer sechsstufigen Intensitätsskala von 1 („kaum“) bis 6 („völlig“). Der Fragebogen wurde von den Probanden während des Versuches auf dem ihnen zugeordneten Rechner abgerufen und ausgefüllt.

Subjektive Bewertung der thermischen Umgebung

Es wird in der Regel unterstellt, dass eine Leistung nur im vollen Umfang erbracht werden kann, wenn das thermische Raumklima als behaglich eingestuft wird. Daher bewerten die Probanden auch ihre thermische Umgebung. Dazu wurden folgende Momentan-Bewertungen abgefragt: das thermische Empfinden insgesamt (siebenstufige Skala nach DIN EN ISO 7730, 2006), die thermische Behaglichkeit insgesamt (siebenstufige Skala von zu kühl über behaglich bis zu warm), die thermische Präferenz (siebenstufige Skala von viel kälter über keine Änderung bis viel wärmer). Außerdem wurde die lokale thermische Behaglichkeit am Kopf und Fuß auf je einer dreistufigen Skala (unbehaglich kühl, behaglich, unbehaglich warm) erfasst. Der Fragebogen wurde von den Probanden während des Versuches auf dem ihnen zugeordneten Rechner abgerufen und ausgefüllt.

5.7 Testbatterie zur objektiven Messung der Leistungsfähigkeit

Zu Beginn der Testbatterie wurde über die Eigenschaftswörter: konzentriert, tatkräftig, ideenreich, merkfähig, aufmerksam, motiviert, leistungsfähig auf einer sechsstufigen Intensitätsskala von 1 („kaum“) bis 6 („völlig“) das momentane Leistungsempfinden der Probanden abgefragt.

Dann schlossen sich fünf Einzeltests an, die Aufschluss über Anforderungs- und Leistungsdimensionen geben sollen. Im Einzelnen wurden:

- die Aufmerksamkeit und Konzentration über den d2-Aufmerksamkeits-Belastungstest,
- die Daueraufmerksamkeit bei der Textkorrektur,
- das numerische Denken und
- das verbale Denken erfasst.

Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit

Der d2-Aufmerksamkeits-Belastungstest (BRICKENKAMP, 1972; MERTENS und HÄNSGEN, 1994) dient der Erfassung der Aufmerksamkeitsleistung und der Konzentrationsfähigkeit. Der d2-Test misst Tempo und Sorgfalt bei der Unterscheidung ähnlicher visueller Reize, die den Probanden in Form von Buchstabenreihen vorgegeben werden (Abb. 5.2). Dabei sind aus einer Reihe von Buchstaben solche Buchstaben "d" auszuwählen, die mit zwei Punkten versehen sind. Die Dauer der reinen Testdurchführung betrug ca. 6 Minuten. Der Durchführung wurden jeweils eine Einweisung sowie eine Testphase vorgeschaltet.



Abb. 5.2 Testmodul zum Schwerpunkt „Aufmerksamkeit und Konzentration“ (d2-Test)

Daueraufmerksamkeit bei Textkorrektur

Bei diesem Test bestand die Aufgabe darin, in einem vorgegebenen zweiseitigen Text möglichst schnell und sorgfältig Tippfehler zu identifizieren. Die Beschränkung auf Tippfehler liegt darin begründet, dass es nicht darum gehen sollte, die Rechtschreibfähigkeit der Testpersonen zu überprüfen, sondern vielmehr in jedem Fall bestehende Fähigkeiten auf eine Büroaufgabe anzuwenden. Der Leistungsbezug spiegelt sich in den in einer vorgegebenen Zeit von 5 Minuten richtig erkannten Fehlern. Von Umfang und Inhalt her vergleichbare Texte und Fehlerdichte sichern die Vergleichbarkeit der Ergebnisse weitgehend unabhängig von dem jeweiligen Text.

Numerisches Denken

Bei den Testaufgaben zum numerischen Denken bestand die Aufgabe darin, eine vorgegebene Rechenaufgabe, bestehend aus der Addition von zwei zweizifferigen Zahlen gefolgt von der Subtraktion einer einzifferigen Zahl möglichst schnell und richtig ohne weitere Hilfsmittel zu lösen. In diesem Fall wurde schwerpunktmäßig das numerische Denken angesprochen. Die Beschränkung auf zwei- und einzifferige Zahlen sichert die Bearbeitung durch einen möglichst großen Personenkreis. Die Zahlenwerte stellen Zufallszahlen dar, die in der computergestützten Fassung auf dem Bildschirm angezeigt werden. Ähnlich wie im Fall des d2-Aufmerksamkeits-Belastungstestes wurden die Aufgaben in vier Serien von jeweils 30 s dargeboten. Nach jeder Serie folgte eine kurze Unterbrechung bevor die nächste Serie folgte.

Verbales Denken

Zum Betrachtungsschwerpunkt verbales Denken wurde eine Buchstabenfolge dargestellt, aus denen ein Wort gebildet werden sollte. Die Anzahl der Buchstaben je Folge betrug vier bzw. fünf. Sie wurden aus einer Liste vorbereiteter Buchstabenfolgen ausgewählt. Um die Schwierigkeit weitgehend nur von der Anzahl der Buchstaben abhängig zu machen, wurden ähnliche Wörter wie z. B. Haus, Maus oder Ball, Fall vermieden. Es wurden die Buchstabenfolgen in vier Serien mit jeweils acht Buchstabenfolgen – sechs davon mit vier Buchstaben, zwei mit fünf Buchstaben – dargeboten. Aufgabe war es, möglichst viele Wörter richtig zu bestimmen. Dabei konnten die Testpersonen einzelne Buchstabenfolgen überspringen. Zusätzlich wurde die maximale Bearbeitungszeit bei vierstelligen Buchstabenfolgen auf 10 s, bei fünfstelligen Buchstabenfolgen auf 20 s begrenzt. Wurden diese Zeiten überschritten, erschien automatisch die nächste Buchstabenfolge.

Erlebte Belastung und Beanspruchung

Das abschließende Modul beinhaltete Fragen zur erlebten Belastung und Beanspruchung, die dem NASA-TLX-Fragebogen (HART und STAVELAND, 1988) entnommen wurden. Im Einzelnen werden dabei die Dimensionen: geistige Anforderungen, körperliche Anforderungen, zeitliche Anforderungen, Aufgabenerfüllung, Anstrengung sowie Frustration erfasst. Wie im NASA-TLX-Fragebogen vorgegeben, erfolgt die Skalierung auf einer Skala von „sehr gering“ bis „sehr hoch“, wobei insgesamt 21 Skalenteile vorgegeben werden. In der umgesetzten computergestützten Version erfolgte die Angabe der Ausprägung durch einen Schieberegler.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde die Testbatterie zunächst erprobt und damit ihre Eignung ermittelt. Gleichzeitig konnten so Hinweise von Anwendern erfragt und somit ein Beitrag zur weiteren Optimierung geleistet werden.

5.8 Probandenauswahl und -information

In der Probandengruppe sollten Männer und Frauen zu gleichen Anteilen vertreten sein. Für die Untersuchung wurde eine Altersgruppe der 35 – 45-jährigen angestrebt. Die ausgewählte Probandengruppe umfasste aber aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit der angestrebten Altersgruppe auch Personen bis 50 Jahre (Minimum: 36, Median: 44, Maximum: 50). Die Probanden mussten bereit sein, eine eigene leichte Hose und ein eigenes kurzärmeliges T-Shirt während der Versuche zu tragen. Erfahrung mit Bildschirmarbeit und überwiegende Tätigkeit im bisherigen beruflichen Werdegang am Schreibtisch war Bedingung, wobei die Eignung für Bildschirmarbeit in der Probandenvorauswahl überprüft wurde. Die Probanden mussten eine unbedingte Verständigungsfähigkeit in der deutschen Sprache besitzen und durften keine Schreib- und Leseprobleme haben. Die Tauglichkeit der Probanden bezüglich ihrer Gesundheit wurde über einen Gesundheitsfragebogen abgefragt. Alkohol- oder Drogenabusus wurde ausgeschlossen. Weiterhin wurden eine unbedingte Verfügbarkeit in der Untersuchungsphase und die Bereitschaft, in dieser Zeit auf exzessives Feiern zu verzichten, verlangt. Es wurde mit den Probanden vereinbart, dass eine Zahlung der Aufwandsentschädigung nach Abschluss und nur dann erfolgt, wenn der Proband alle Experimente absolviert hat.

Ziel der Probandenvorauswahl war es, diejenigen potenziellen Probanden zu ermitteln, die mit den Leistungstests nicht kognitiv überfordert sind. Das bedeutet, dass für die Auswahl von Probanden ein ausreichender Wertebereich für negative Veränderungen bei den Expositionen mit erhöhten Temperaturen zur Verfügung stehen musste. Eine Begrenzung des Wertebereiches nach oben war für die Auswahl eines Probanden nicht bedeutend, da die Möglichkeit bestand, die vorgegebene Zeitdauer der Bearbeitung nach unten hin anzupassen. Daher wurden die für eine Auswahl als Proband zu erreichenden Testwerte auf $\frac{1}{3}$ bzw. $\frac{1}{4}$ des beobachteten Wertebereiches festgelegt. $\frac{1}{3}$ des beobachteten Wertebereiches wurde dabei als optimal erachtet, $\frac{1}{4}$ des beobachteten Wertebereiches wurde toleriert, wenn nicht alle Testergebnisse betroffen waren.

Für eine geeignete Probandengruppe von 20 Probanden, wurden am 21. Mai 2010 32 Probanden eingeladen. In Stundenabständen wurden jeweils vier Probanden bestellt. Jeder Proband war ca. 1,5 Stunden anwesend. Eine halbe Stunde wurde für die Vorbereitung und Einführung der Probanden benötigt. Eine Stunde waren die Probanden im Versuchsraum. Der Versuchsraum war auf 24 °C konditioniert. Die Probanden füllten je einmal den Fragebogen zur Eigenzustandsbeschreibung und zur Thermischen Behaglichkeit aus. Außerdem bearbeiteten sie einmal die Leistungstestbatterie. Anhand der Ergebnisse aus dem Leistungstest wurden nach den genannten Auswahlkriterien 20 Probanden ausgewählt.

Die Probanden wurden in einer Probandeninformation darüber informiert, dass die Untersuchung dazu dient, Erkenntnisse über Büroarbeit unter sommerlichen Bedingungen zu gewinnen. Außerdem wurden die Probanden über den Ablauf und die Art der physiologischen Messungen informiert. Die Probanden erklärten ihr Einverständnis mit der Teilnahme an den Versuchen.

5.9 Versuchsablauf

Jeder einzelne Versuch gliederte sich in drei Abschnitte, denen wiederum Messzeitpunkte (MZP) zugeordnet waren und an deren Ende jeweils subjektive und objektive Messungen durchgeführt wurden. Abb. 5.3 zeigt den Ablauf eines einzelnen Versuches. Die Probanden begannen morgens mit simulierter Büroarbeit. Nach 45 Minuten wurde der Eigenzustand der Probanden und die Bewertung der thermischen Behaglichkeit erfragt und anschließend die Hauttemperatur und Hautfeuchte gemessen. Dann wurde die Leistungstestbatterie bearbeitet (Messzeitpunkt 1).

Nach einer 10-minütigen Pause führten die Probanden nochmals 60 Minuten Büroarbeiten aus, füllten im Anschluss den Behaglichkeitsfragebogen aus und absolvierten die physiologischen Messungen (Messzeitpunkt 2). Anschließend hatten die Probanden eine längere Pause von ca. 30 Minuten, in der auch ein Imbiss angeboten wurde.

Nach der Pause begann der letzte Abschnitt mit einer Phase von 35 Minuten Büroarbeit, dann folgten die Leistungstests, der Behaglichkeitsfragebogen, der Fragebogen zur Beschreibung des Eigenzustandes und zum Abschluss die physiologischen Messungen (Messzeitpunkt 3).

Als Büroarbeiten wurden das Ausfüllen einer Adressdatei mit Angaben von Visitenkarten und das Eintippen von Fragebogendaten in eine Excel-Datei den Probanden aufgetragen.

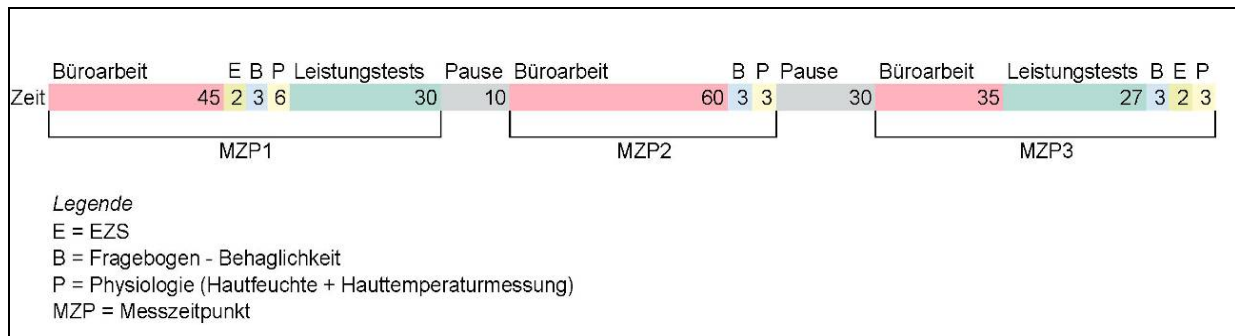


Abb. 5.3 Ablaufschema für alle Versuche mit Angabe der mittleren Zeitdauer pro Aktivität in Minuten

Die 20 Probanden wurden in fünf Gruppen eingeteilt. Jede Gruppe wurde an vier aufeinander folgenden Tagen (Mo – Do) getestet. Jede Probandengruppe wurde damit allen festgelegten thermischen Expositionen ausgesetzt. Eine Ausnahme stellte der vierte Versuchstag in der vierten Versuchswoche dar. Aufgrund eines Stromausfalls konnten die angestrebten Raumklimabedingungen im Raum nicht aufrechterhalten werden. Der Versuch wurde daher nicht ausgewertet.

Versuchsdurchführung und -ablauf wurden der Ethik-Kommission der Friedrich-Schiller-Universität vorgelegt. In ihrer Sitzung vom 6. April 2010 hat diese den Antrag beraten. Es bestanden keine ethischen oder berufsrechtlichen Bedenken.

6 Auswertemethodik

Nach der Datenerhebung erfolgt zunächst die Zusammenstellung der Daten mit einer Überprüfung auf Plausibilität. Einzelmesswerte- oder -angaben werden dann zu Summenwerten zusammengefasst oder neue Größen berechnet. Es werden Differenzen der Bewertungsgrößen zwischen den Expositionen berechnet.

Physikalische Messdaten

Alle physikalischen Messgrößen, die kontinuierlich erfasst wurden, werden für die drei Messzeitpunkte (Abb. 5.3) bestimmt. Dazu werden jeweils vom Ende des Messzeitpunktes aus gesehen Mittelwerte über 65 Minuten gebildet.

Physiologische Messgrößen

- Hauttemperatur:
Zur statistischen Auswertung wird der vom Handgelenk weiter entfernte und der auf der Stirn gemessene Wert (in °C) je Messzeitpunkt verwendet.
- Hautfeuchte:
Zur weiterführenden Auswertung wird ein Mittelwert aus den fünf Einzelmessungen je Messzeitpunkt verwendet.
- Herzfrequenz:
Für die drei Probanden je Versuch, deren Herzfrequenz jeweils kontinuierlich erfasst wurde, wird ein 65-Minuten-Mittelwert je Messzeitpunkt bestimmt.
- Trinkmenge:
Am Ende jedes Versuches wird ein Summenwert für die Flüssigkeitsaufnahme über den gesamten Versuchstag bestimmt.
- Bekleidungsämmung und deren Änderung:
Für jeden Messzeitpunkt wird ein Wert für die Bekleidungsämmung jedes Probanden bestimmt.

Subjektive Befindlichkeit

- Einschätzung des Eigenzustandes:
Die Einzelantworten, die zu den Messzeitpunkten 1 und 3 erhoben wurden, werden für die Auswertung entsprechend den von APENBURG (1986) genannten Subskalen zusammengefasst.
- Bewertung der thermischen Umgebung:
Die Auswertung der von den Probanden zu den Messzeitpunkten 1, 2 und 3 gegebenen Einschätzungen erfolgt direkt.

Testbatterie zur objektiven Messung der momentanen Leistungsfähigkeit

- Momentanes Leistungsempfinden: Von den auf einer sechsstufigen Skala abgefragten Eigenschaften ‚konzentriert‘, ‚tatkraftig‘, ‚ideenreich‘, ‚merkfähig‘, ‚aufmerksam‘, ‚motiviert‘ und ‚leistungsfähig‘ wurde ein Mittelwert als „Gesamtwert momentanes Leistungsempfinden“ berechnet. Die Auswertung erfolgt sowohl für diesen Mittelwert als auch für die Einzelwerte.
- Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit:
Die Auswertung erfolgt im Hinblick auf die Leistungsmenge (Gesamtzahl der bearbeiteten Zeichen), die Sorgfalt (Anzahl der Auslassungen und Verwechslungen) sowie einem möglichen Gesamtwert als Differenz zwischen den bearbeiteten Zeichen und der Anzahl der Fehler. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass im Regelfall die Fehleranzahl im Vergleich zu der Gesamtzahl der bearbeiteten Zeichen eher gering ist, sodass der Gesamtwert sich nicht wesentlich von der Anzahl der bearbeiteten Zeichen unterscheidet.
- Daueraufmerksamkeit bei Textkorrektur:
Die Auswertung erfolgt über den prozentualen Anteil der richtig erkannten Fehler.
- Numerisches Denken:
Die Anzahl der bearbeiteten Aufgaben mit richtigem Ergebnis wird als Vergleichsgröße herangezogen.
- Verbales Denken:
Ausgewertet wird die Anzahl der richtig erkannten Begriffe.
- Erlebte Belastung und Beanspruchung (NASA-TLX):
Der Ausprägungswert, der vom Probanden mittels Schieberegler angegeben wurde, wurde aufgezeichnet und direkt ausgewertet.

Statistische Auswertung

Zunächst erfolgt die Deskription der Daten. Die einzelnen Versuchstage mit gleichen Zielpositionen werden bezüglich ihrer Vergleichbarkeit bewertet. Dann werden die Zielgrößen, Einflussgrößen und mögliche Confounder (Störgrößen) statistisch beschrieben. Die Zielgrößen sind:

- die physiologischen Messgrößen,
- die subjektive Befindlichkeit mit Einschätzung des Eigenzustandes und die Bewertung der thermischen Umgebung sowie
- die Ergebnisse des momentanen Leistungsempfindens, die Ergebnisse der Leistungstests sowie der erlebten Belastung und Beanspruchung.

Als durch das experimentelle Studiendesign fixierte Einflussgrößen fungieren in dieser Untersuchung die Raumlufthtemperatur (Exposition) und der Messzeitpunkt (Tagszeit). Die Confounder sind beispielsweise das Außenklima und Übungseffekte.

In einem zweiten Auswerteschritt werden ausgewählte Zielgrößen aus den Bereichen Physiologie, subjektive Befindlichkeit und Leistungsfähigkeit für jede Exposition zu jedem Messzeitpunkt deskriptiv dargestellt. Mit dem Friedman-Test werden die Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten jeder Exposition auf Signifikanz getestet. Ebenso werden die Unterschiede zwischen den Expositionen bezogen auf jeden Messzeitpunkt mit dem Friedman-Test untersucht.

Die intraindividuellen Differenzen werden zwischen den Expositionen 4 und 1 gebildet. Bei beiden handelt es sich um die Referenzexpositionen. Erwartet werden hier keine signifikanten Unterschiede. Außerdem werden die intraindividuellen Differenzen zwischen den Expositionen 2 und 4, 3 und 2 sowie 3 und 4 zu jedem Messzeitpunkt berechnet. Die Prüfung der Differenzen auf Signifikanz erfolgt mit dem Wilcoxon signed rank Test für abhängige Stichproben. Dieser Auswerteschritt ist maßgeblich für die Einschätzung der Expositionswirkung auf den Menschen.

Die Zielgrößen werden auf Korrelationen untereinander mit dem Spearman'schen Rang-Korrelationskoeffizienten getestet. Das Signifikanzniveau wird für die durchgeführten statistischen Tests auf 0,05 festgelegt.

7 Ergebnisse

7.1 Physikalische Messgrößen

Tab. 7.1 zeigt für jeden Versuch in den fünf Versuchswochen den Tagesmittelwert und den Maximalwert der Außenlufttemperatur, den gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur nach DIN EN 15251 (2007), die Behaglichkeitsbereiche entsprechend Kategorie III des Wärmebilanzmodells und des adaptiven Modells nach DIN EN 15251 (2007) sowie die mittlere Raumlufttemperatur während der Versuchsdauer.

Tab. 7.1 Tagesmittel- und Maximalwert der Außenlufttemperatur, gleitender Mittelwert der Außenlufttemperatur, zulässige Maximaltemperatur für Kategorie III nach Wärmebilanzmodell und nach adaptivem Modell sowie mittlere Lufttemperatur für jeden Versuch in °C

Woche	Wochentag	Exposition	Außenlufttemperatur			zulässiger Maximalwert der Operativtemperatur Kategorie III		mittlere Lufttemperatur im Raum
			Tagesmittelwert	Maximalwert	gleitender Mittelwert	Wärmebilanzmodell	adaptives - Modell	
1	Mo	1	19,3	25,5	16,4	22-27	20,2-28,2	25,6
	Di	2	20,2	26,9	17,5	22-27	20,6-28,6	29,7
	Mi	3	19,4	26,0	18,6	22-27	20,9-28,9	33,1
	Do	4	20,9	27,2	19,0	22-27	21,1-29,1	24,7
2	Mo	1	19,5	23,4	21,0	22-27	21,7-29,7	24,7
	Di	2	16,5	19,9	20,7	22-27	21,6-29,6	29,5
	Mi	4	16,6	22,0	19,6	22-27	21,3-29,3	24,9
	Do	3	17,7	26,2	18,8	22-27	21,0-29,0	33,2
3	Mo	1	24,3	31,5	21,4	22-27	21,9-29,9	25,8
	Di	3	22,3	27,9	22,3	22-27	22,2-30,2	33,3
	Mi	2	24,0	31,5	22,6	22-27	22,3-30,3	30,1
	Do	4	20,4	23,1	23,3	22-27	22,5-30,5	24,7
4	Mo	1	18,0	22,4	20,1	22-27	21,4-29,4	23,7
	Di	3	18,4	25,7	19,3	22-27	21,2-29,2	33,1
	Mi	4	22,7	30,3	18,9	22-27	21,0-29,0	25,3
	Do	-	-	-	-	-	-	-
5	Mo	1	13,8	18,8	16,6	22-27	20,3-28,3	23,4
	Di	2	13,4	15,8	15,8	22-27	20,0-28,0	29,2
	Mi	3	15,2	19,9	14,9	22-27	19,7-27,7	33,1
	Do	4	14,0	16,2	14,6	22-27	19,6-27,6	24,1

Die Tagesmittelwerte an den Versuchstagen liegen zwischen 13,4 und 24,3 °C. Die Hälfte der Tagesmittelwerte liegt über 19,3 °C. Die gleitenden Mittelwerte der Außenlufttemperatur weisen in diesem Zeitraum Werte zwischen 14,6 und 23,3 °C auf.

Die Bedingungen für höhere zulässige Raumtemperaturen, welche ASR A3.5 (2010) festlegt, das heißt Außenlufttemperaturen über 26 °C, werden nicht an allen Versuchstagen erreicht. Trotzdem gehört die Untersuchungsperiode zu den wärmsten Juli-Monaten der letzten Jahre in der Region.

Während der Expositionen 1 und 4 erreicht die Raumlufttemperatur mittlere Werte zwischen 23,4 und 25,8 °C. Die einzelnen Versuche zu Exposition 2 weisen Werte zwischen 29,2 und 30,1 °C auf. Während Exposition 3 erreicht die Raumlufttemperatur Werte zwischen 33,1 und 33,3 °C. Damit entsprechen die gemessenen Innenraumlufttemperaturen für jede Exposition dem angestrebten Bereich.

Die Raumlufttemperaturen von Exposition 1 und 4, der Referenzexposition, befinden sich selbstverständlich immer im Behaglichkeitsbereich beider Bewertungsmodelle, wobei in dieser Betrachtung der Einfluss der Strahlungstemperatur vorerst vernachlässigt wird. Die Raumlufttemperaturen von Exposition 3 nehmen in allen Fällen Werte deutlich oberhalb der als behaglich angesehenen Temperaturbereiche an. Die Raumlufttemperatur bei Exposition 2 erreicht bezogen auf das Wärmebilanzmodell Werte, die sich klar außerhalb des als behaglich eingestuften Temperaturbereiches befinden. Bezogen auf das adaptive Modell werden Raumtemperaturen am oberen Rand bzw. nur etwas außerhalb des Behaglichkeitsfeldes nach Kategorie III erreicht. Nach der Definition des adaptiven Modells (DIN EN 15251, 2007) kann dies im vorliegenden Fall jedoch nicht angewendet werden, da der Raum mit einer Raumlufttechnischen Anlage während der Versuche konditioniert wurde. Die einzelnen Werte können in Tab. 7.1 nachvollzogen werden.

Die Globetemperatur ist in Exposition 1 und 4 nur 0,2 bis 0,7 K höher, in Exposition 2 nur 0,2 bis 1 K höher und in Exposition 3 0,6 bis 1 K höher als die Lufttemperatur. Weil Wärmestrahlung keine wesentliche Rolle spielt, kann die Bewertung des untersuchten Raumes nach ASR A3.5 (2010) nur mit der Lufttemperatur erfolgen.

Die relative Luftfeuchte betrug im Mittel 31 % während Exposition 3, 37 % während Exposition 2 und 46 % während der Expositionen 1 und 4 bei einer Standardabweichung von 5 %. Die Kohlenstoffdioxid-Konzentration betrug im Mittel während Exposition 3 980 ppm, während Exposition 2 ebenfalls 980 ppm und 920 ppm während der Expositionen 1 und 4. Die Standardabweichung betrug, betrachtet für alle einzelnen Messzeitpunkte zwischen 10 und 170 ppm. Die Beleuchtungsstärke betrug im Mittel 1200 lx.

7.2 Physiologische Messgrößen

Hauttemperatur

Erwartungsgemäß verhalten sich die Hauttemperaturen am Unterarm und an der Stirn proportional zur Raumlufttemperatur. Das Niveau der am Unterarm gemessenen Werte ist im Mittel 1,3 – 1,4 K niedriger in der Referenzexposition, 0,9 K niedriger in der Exposition mit erhöhter Raumlufttemperatur und 0,8 K niedriger in der Exposition mit stark erhöhter Raumtemperatur als an der Stirn. Der höchste Wert der Unterarmtemperatur von im Median 34,9 °C wird bei Exposition 3 (33-35 °C) gemessen. In der Referenzexposition und während der Exposition 2 beträgt die Median-Temperatur am Unterarm 32,5 °C bzw. 34,2 °C. Der Interquartilabstand beträgt 1,2 K bei Referenztemperatur, 0,5 K für Exposition 2 und 0,8 K für Exposition 3 (Abb. 7.1). Die Unterschiede zwischen den drei Expositionen sind signifikant. Die Hauttemperatur bleibt im Versuchsverlauf quasi konstant. Bereits nach einer Versuchsdauer von ca. einer Stunde zu Messzeitpunkt 1 wird eine stabile Hauttemperatur erreicht, die sich bis zum Versuchsende nicht mehr wesentlich verändert.

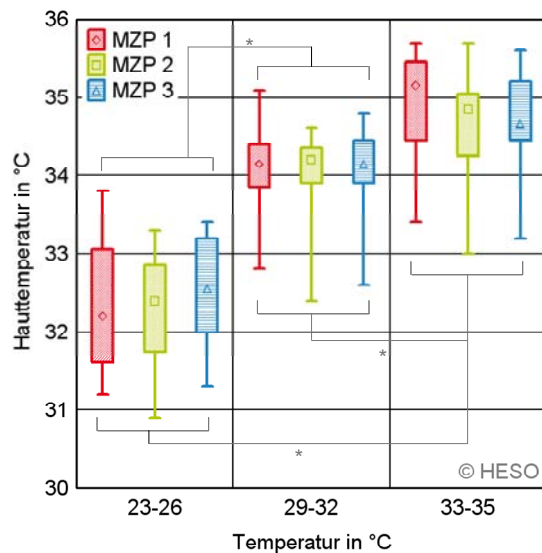


Abb. 7.1 Hauttemperatur am Unterarm in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition) und dem Messzeitpunkt (MZP). Dargestellt sind für 23-26 °C die Ergebnisse der Wiederholungsexposition 4. Gezeigt sind jeweils das Minimum, der Median, das 1. und 3. Quartil sowie das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20; \lfloor kennzeichnet signifikante Unterschiede mit * $p < 0,05$ zwischen den Expositionen; \lrcorner kennzeichnet signifikante Unterschiede mit * $p < 0,05$ zwischen den Messzeitpunkten

Hautfeuchte

Die aufgezeichneten Werte weisen einen Wertebereich zwischen 22 und 120 Corneometereinheiten auf. Die Medianwerte der drei Messzeitpunkte liegen zwischen 37 und 42 Corneometereinheiten in den Referenzexpositionen, zwischen 47 und 60 Corneometereinheiten für Exposition 2 und zwischen 64 und 96 Corneometereinheiten für Exposition 3 mit hoher Raumlufttemperatur.

Der Median der Hautfeuchte nimmt mit steigender Raumlufttemperatur zu. Abb. 7.2 zeigt die Quartile der Verteilung. Der Vergleich der gemessenen Hautfeuchtwerte ergibt für die verschiedenen Expositionen mit unterschiedlicher Raumtemperatur auch signifikant unterschiedliche Werte. Für die beiden Referenzexpositionen ergeben sich keine Unterschiede in den gemessenen Werten der Hautfeuchte. Damit können die Werte der Hautfeuchte bei gleicher thermischer Belastung reproduziert werden. Auch die Interquartilabstände als Maß für die Streuung der Messwerte nehmen mit steigender Raumlufttemperatur zu.

Über die Versuchsdauer bleibt die Hautfeuchte in beiden Referenzexpositionen konstant. Als physiologische Reaktion zur Kompensation einer höheren Raumlufttemperatur nimmt die Hautfeuchte mit der Versuchsdauer in Exposition 2 und 3 zu. Die Werte der einzelnen Messzeitpunkte unterscheiden sich signifikant.

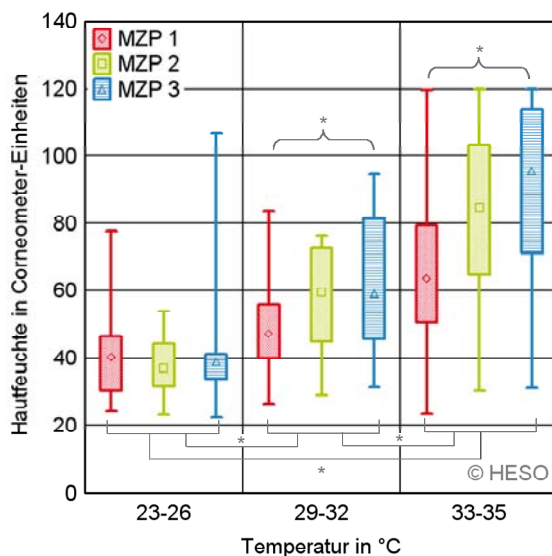


Abb. 7.2 Hautfeuchte am Unterarm in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition) und dem Messzeitpunkt (MZP). Dargestellt sind für 23-26 °C die Ergebnisse der Wiederholungsexposition 4. Gezeigt sind jeweils das Minimum, der Median, das 1. und 3. Quartil sowie das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20; ⊥ kennzeichnet signifikante Unterschiede mit * $p < 0,05$ zwischen den Expositionen; } kennzeichnet signifikante Unterschiede mit * $p < 0,05$ zwischen den Messzeitpunkten

Herzfrequenz

Die Mediane der Herzfrequenz zu den drei Messzeitpunkten während der Referenzexpositionen liegen zwischen 75 und 83 Schlägen pro Minute (bpm). Für Exposition 2 mit erhöhter Raumlufthtemperatur werden Mediane für die drei Messzeitpunkte zwischen 76 und 86 bpm ermittelt. Die Mediane der Herzfrequenz für Exposition 3 mit der höchsten Raumlufthtemperatur liegen zwischen 81 und 88 bpm (Abb. 7.3).

Mit steigender thermischer Belastung ergibt sich ein geringer, jedoch signifikanter Anstieg der Herzfrequenzen. Signifikante Unterschiede werden bei Vergleich der Werte aus Exposition 3 und 4 für jeden Messzeitpunkt gefunden. Beim Vergleich der Werte aus Exposition 2 mit denen aus Exposition 4 zeigen sich nur die Werte der Messzeitpunkte 2 und 3 signifikant verschieden voneinander. Die Unterschiede zu Messzeitpunkt 1 sind generell nicht so ausgeprägt wie für die Messzeitpunkte 2 und 3. Die Herzfrequenzen aus Exposition 1 und 4 unterscheiden sich nicht.

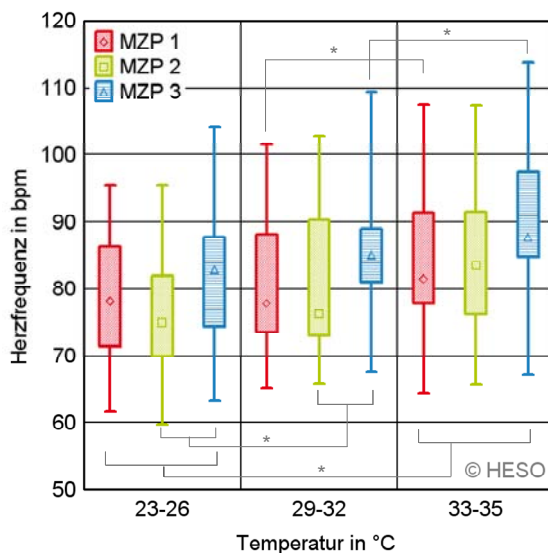


Abb. 7.3 Herzfrequenz in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition) und dem Messzeitpunkt (MZP). Dargestellt sind für 23-26 °C die Ergebnisse der Wiederholungsexposition 4. Gezeigt sind jeweils das Minimum, der Median, das 1. und 3. Quartil sowie das Maximum. Anzahl der Probanden: 15 – 12 – 15; \sqsubset kennzeichnet signifikante Unterschiede mit * $p < 0,05$ zwischen den Expositionen; \sqsubset kennzeichnet signifikante Unterschiede mit * $p < 0,05$ zwischen den Messzeitpunkten

Trinkmenge

Während der beiden Referenzexpositionen konsumieren die Probanden Getränke von 940 ml/Person in Exposition 1 bzw. 959 ml/Person in Exposition 4 (Mediane). Der Interquartilabstand beträgt 379 bzw. 608 ml/Person. Zu Exposition 2 steigt der Getränkeverbrauch im Median um ca. 360 ml/Person an auf 1381 ml/Person. Der Interquartilabstand beträgt 667 ml/Person. Hinsichtlich der Absolutwerte muss beachtet werden, dass die beschriebenen Trinkmengen nach einer Exposition von ca. 4,3 Stunden ermittelt wurden. Die Werte für einen 8 h-Arbeitstag können nur abgeschätzt werden, liegen jedoch deutlich höher.

Während der Versuche mit der höchsten Lufttemperatur (Exposition 3) steigt die Trinkmenge im Vergleich zu Exposition 2 mit ca. 230 ml/Person weniger stark an, ist jedoch gegenüber der Referenzexposition um ca. 50 % erhöht. Gegenüber Exposition 2 ist der Unterschied nicht signifikant. Die Streuung der Werte in Exposition 3 ist etwa um den Faktor 1,5 höher als in Exposition 2 (Abb. 7.4, links).

Die Überprüfung der intraindividuellen Unterschiede im Getränkekonsum zeigt für die beiden Referenzexpositionen keine Unterschiede. Verglichen mit der Referenzexposition 4 weisen beide Expositionen mit erhöhten Lufttemperaturen signifikant höhere Trinkmengen auf (Abb. 7.4, rechts).

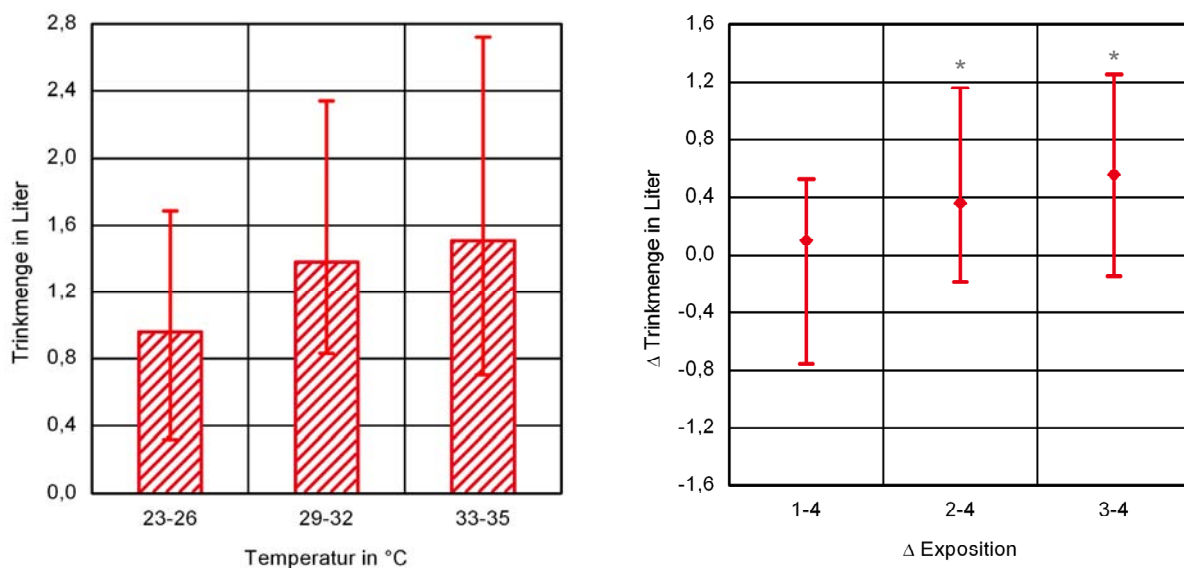


Abb. 7.4 Links: Trinkmengen nach ca. 4,3 Stunden Versuchsdauer in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition). Dargestellt sind für 23-26 °C die Ergebnisse der Wiederholungsexposition 4. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20. Rechts: Differenz der Trinkmengen zwischen den untersuchten Expositionen nach ca. 4,3 Stunden Versuchsdauer. 1-4: Unterschied zwischen der Referenzexposition und der Wiederholung, beide 23-26 °C. 2-4: Unterschied zwischen der Exposition 2 mit 29-32 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. 3-4: Unterschied zwischen der Exposition 3 mit 33-35 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. Dargestellt sind jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20; signifikante Differenzen zwischen den Expositionen mit $p < 0,05$ sind mit * gekennzeichnet

Bekleidungsdämmung

Der ermittelte Bekleidungsdämmwert ist im Median für alle Expositionen mit einem Wert von 0,6 clo gleich und entspricht damit dem angestrebten Bekleidungsdämmwert. Die höchsten Bekleidungsdämmwerte weisen die Referenzexpositionen auf. Signifikante Differenzen finden sich zwischen den Expositionen 2 und 4 als auch zwischen 3 und 4. Die Bekleidungsdämmungswerte der beiden Expositionen mit erhöhter Temperatur sind nicht signifikant verschieden. Dies spricht dafür, dass bereits unter Exposition 2 die Kleidung so weit reduziert wurde, dass unter Exposition 3 vom Ablegen weiterer Kleidungsstücke abgesehen wurde (Abb. 7.5). Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten. Das heißt, die Probanden entschieden bereits zu Beginn des Versuches, ob sie Kleidung ablegen wollten.

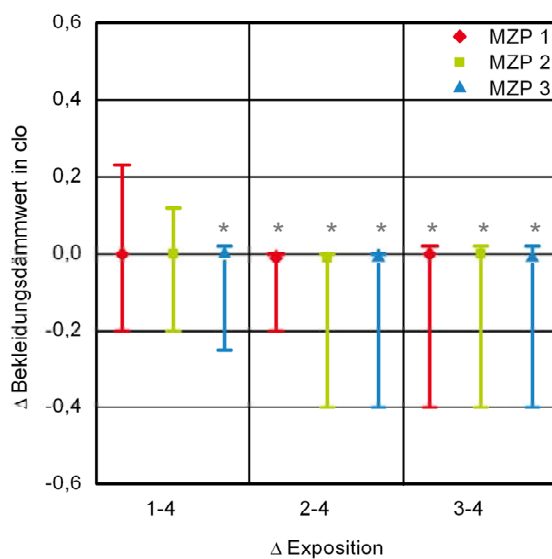


Abb. 7.5 Differenz in der Bekleidungsdämmung zwischen den untersuchten Expositionen. 1-4: Unterschied zwischen der Referenzexposition und der Wiederholung, beide 23-26 °C. 2-4: Unterschied zwischen der Exposition 2 mit 29-32 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. 3-4: Unterschied zwischen der Exposition 3 mit 33-35 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. MZP: Messzeitpunkt. Dargestellt ist jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20; signifikante Differenzen zwischen den Expositionen mit $p < 0,05$ sind mit * gekennzeichnet

7.3 Subjektive Befindlichkeit

Eigenzustandsbeschreibung

Die Anstrengungsbereitschaft, Erholtheit und Spannungslage sind generell zum Messzeitpunkt 1 signifikant höher als zum Messzeitpunkt 3 am Ende eines Versuchstages. Die Schläfrigkeit nimmt generell zum Ende des Versuchstages hin zu. Eine Übersicht über die Streuung und Mediane für die vier Eigenschaften der Eigenzustandsbeschreibung gibt Abb. 7.6.

Die Anstrengungsbereitschaft beträgt in den Referenzexpositionen im Median zu Messzeitpunkt 1 4,67 bzw. 5,17 und zu Messzeitpunkt 3 3,17 bzw. 3,75. Unter Exposition 3 mit der höchsten Raumlufttemperatur ist der Median der Anstrengungsbereitschaft sowohl zum Messzeitpunkt 1 mit 3,5 als auch zum Messzeitpunkt 3 mit 2,71 deutlich am niedrigsten. Die größten Mediane der Differenzen finden sich zwischen dieser Exposition und der Referenzexposition 4. Nur diese Differenzen -0,58 bzw. -0,67 sind zu Messzeitpunkt 1 bzw. 3 auch signifikant.

Die Erholtheit ist unter den Referenzexpositionen 1 und 4 und da zum Messzeitpunkt 1 mit 5,2 und 5,6 am höchsten. Die Unterschiede zwischen den Expositionen 2 und 3 sind marginal. Sinnvolle Differenzen finden sich zwischen den Expositionen 3 und 4 (signifikant zu beiden Messzeitpunkten) als auch den Expositionen 2 und 4 (signifikant zu MZP 1). Aber auch die Unterschiede zwischen den beiden Referenzexpositionen 4 und 1 sind zum Messzeitpunkt 3 signifikant.

Die Schläfrigkeit ist unter den Expositionen 1 und 4 mit Werten von 1,0 bis 2,17 niedriger als unter den Expositionen 2 und 3 mit Werten von 1,83 bis 3,0. Signifikante Differenzen finden sich nur zwischen den Expositionen 2 und 4 zum Messzeitpunkt 3 und zwischen den Expositionen 3 und 4 zum Messzeitpunkt 1.

Ein hoher Wert der Spannungslage bedeutet, dass die Person ruhig, ausgeglichen und gelassen ist. Die Spannungslage erscheint zum Messzeitpunkt 1 jeweils höher als zum Messzeitpunkt 3, wird aber signifikant nur für Exposition 4. Die Mediane sind unter den Expositionen 1 und 4 und da zum Messzeitpunkt 1 mit 5,2 und 5,9 am höchsten. Die Expositionen 2 und 3 unterscheiden sich nur marginal. Signifikante Differenzen gibt es nur zwischen den Expositionen 2 und 4 und den Expositionen 3 und 4 zum Messzeitpunkt 1. Ein Muster, die Messzeitpunkte betreffend, zeichnet sich nicht durchgängig ab.

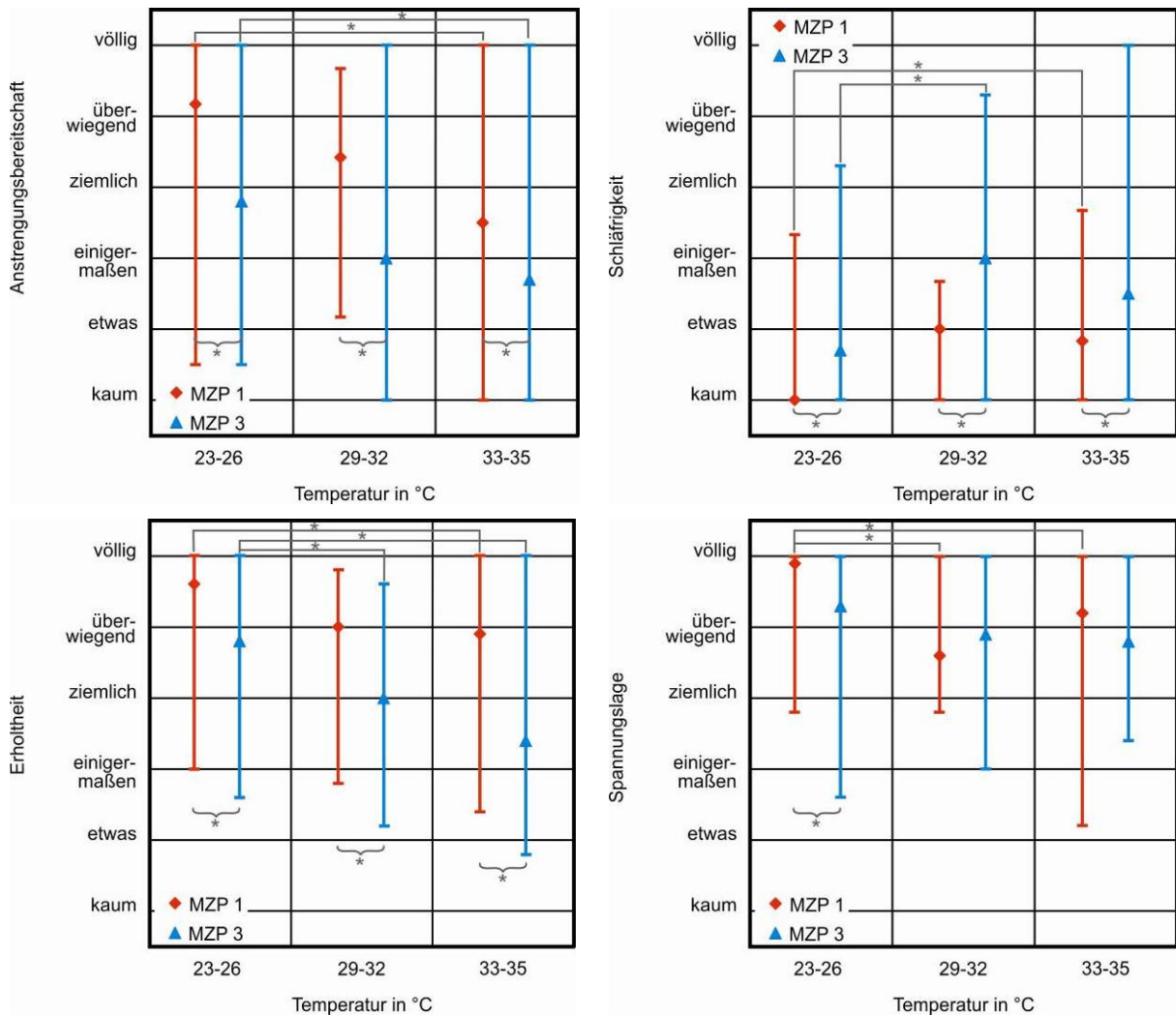


Abb. 7.6 Eigenzustandsbeschreibung nach APENBURG (1986) in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition) und dem Messzeitpunkt (MZP). Dargestellt sind für 23-26 °C die Ergebnisse der Wiederholungsexposition 4. Gezeigt sind jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – (15) 16 – 20; \sqcup kennzeichnet signifikante Unterschiede mit * $p < 0,05$ zwischen den Expositionen; \sqsubset kennzeichnet signifikante Unterschiede mit * $p < 0,05$ zwischen den Messzeitpunkten

Subjektive Bewertung der thermischen Umgebung

Das thermische Empfinden wird für beide Referenzexpositionen im Median mit „4 – neutral“ bewertet bei einer Streuung der Werte zwischen „2 – kühl“ und „6 – warm“. Die Exposition 2 wird im Median mit „6 – warm“ bewertet bei einer Streuung der Werte zwischen „5 – leicht warm“ und „7 – heiß“. Exposition 3 wird im Median mit „7 – heiß“ bewertet. Das Temperaturempfinden ändert sich nicht mit der Zeit, das heißt, das Votum zum Messzeitpunkt 1 ist gleich den Voten zu Messzeitpunkt 2 und 3.

Die Temperatur wird bei beiden Referenzexpositionen von den Probanden im Median mit „4 – behaglich“ und damit nicht verschieden bewertet. Exposition 2 erhält Bewertungen von 6 – 7 (zu warm) und Exposition 3 erhält mit 7 (zu warm) im Median die höchsten Bewertungen. Im Gegensatz zum thermischen Empfinden steigen die

Wertungen der thermischen Behaglichkeit im Tagesverlauf signifikant an, was aufgrund der begrenzten Skalenteilung an den Minimum- und Maximum-Werten zu erkennen ist. Ausgenommen davon ist Exposition 3, da hier bereits zu Versuchsbeginn die höchsten Wertungen erreicht werden. Die Differenzen zwischen den Expositionen sind erwartungsgemäß zwischen den Expositionen 3 und 4 am höchsten und zwischen den Expositionen 2 und 4 am zweithöchsten (alle signifikant). Auch zwischen den Expositionen 3 und 2 gibt es zumindest zu den Messzeitpunkten 1 und 2 signifikante Differenzen (Abb. 7.7).

Der Median der Präferenz für die beiden Referenzexpositionen beträgt 4, das bedeutet, die Probanden wünschen keine Veränderung der Raumtemperatur. In Exposition 2 wünschen die Probanden im Median eine kältere Umgebung und in Exposition 3 eine viel kältere Umgebung. Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten. Dagegen sind die Unterschiede zwischen den Expositionen zu allen Messzeitpunkten hochsignifikant. Die Differenzen zwischen den Expositionen sind erwartungsgemäß zwischen den Expositionen 3 und 4 am höchsten, zwischen den Exposition 2 und 4 am zweithöchsten (alle signifikant). Auch zwischen den Expositionen 3 und 2 gibt es signifikante Differenzen.

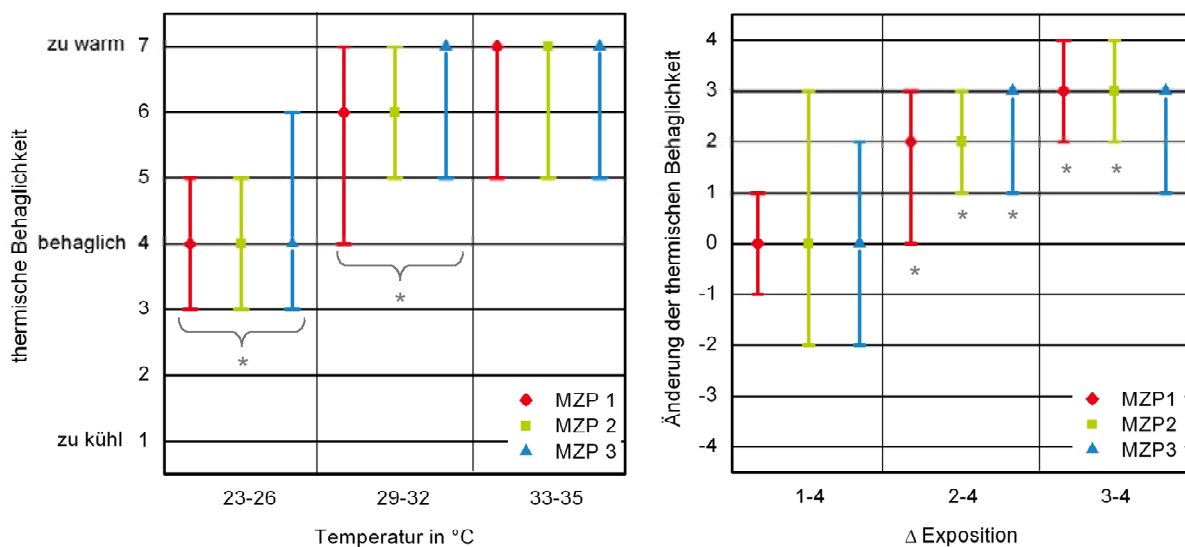


Abb. 7.7 Links: Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition) und dem Messzeitpunkt (MZP). Dargestellt sind für 23-26 °C die Ergebnisse der Wiederholungsexposition 4. Gezeigt sind jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20; \frown kennzeichnet signifikante Unterschiede mit $* p < 0,05$ zwischen den Messzeitpunkten. Rechts: Differenz in der Bewertung der thermischen Behaglichkeit zwischen den untersuchten Expositionen. 1-4: Unterschied zwischen der Referenzexposition und der Wiederholung, beide 23-26 °C. 2-4: Unterschied zwischen der Exposition 2 mit 29-32 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. 3-4: Unterschied zwischen der Exposition 3 mit 33-35 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. MZP: Messzeitpunkt. Dargestellt ist jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 (19) – 16 – 20; signifikante Differenzen zwischen den Expositionen mit $p < 0,05$ sind mit * gekennzeichnet

7.4 Leistungsfähigkeit

Momentanes Leistungsempfinden

Generell sind die Gesamtwerte des momentanen Leistungsempfindens zum Messzeitpunkt 1 signifikant höher als zum Messzeitpunkt 3. Das gilt auch für die Einzelkriterien wie Konzentriertheit, Aufmerksamkeit, Motiviertheit und Leistungsempfinden. Die jeweils höchsten Werte werden unter Exposition 4, die niedrigsten unter Exposition 3 gefunden. Erwartungsgemäß finden sich die größten signifikanten Differenzen zwischen den Expositionen 3 und 4. Auch die anderen dargestellten Differenzen sind signifikant oder tendenziell. Lediglich zwischen den beiden Referenzexpositionen gibt es keinen Unterschied (Abb. 7.8).

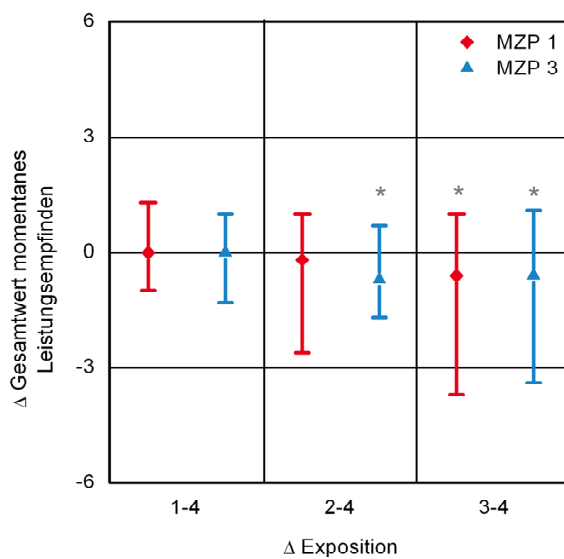


Abb. 7.8 Differenz des Gesamtwertes des momentanen Leistungsempfindens zwischen den untersuchten Expositionen 1-4: Unterschied zwischen der Referenzexposition und der Wiederholung, beide 23-26 °C. 2-4: Unterschied zwischen der Exposition 2 mit 29-32 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. 3-4: Unterschied zwischen der Exposition 3 mit 33-35 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. MZP: Messzeitpunkt. Dargestellt ist jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20; signifikante Differenzen zwischen den Expositionen mit $p < 0,05$ sind mit * gekennzeichnet

Für die Konzentriertheit ist lediglich die Differenz zwischen Exposition 3 und 4 zum Messzeitpunkt 1 signifikant. Für die Aufmerksamkeit werden die jeweils höchsten Werte unter der Referenzexposition 4, die niedrigsten unter Exposition 3 gefunden. Signifikante Differenzen finden sich nur zwischen den Expositionen 3 und 4.

Die Motiviertheit weist die jeweils höchsten Werte unter der Referenzexposition 4, die niedrigsten unter Exposition 3 auf. Die höchsten Differenzen finden sich zwischen den Expositionen 3 und 4 (signifikant), zwischen den Expositionen 2 und 4 (signifikant zum Messzeitpunkt 3) und den Expositionen 2 und 3 (signifikant zum Messzeitpunkt 1).

Für die selbsteingeschätzte Leistungsfähigkeit finden sich die höchsten Werte unter den Expositionen 4 bzw. 1, die niedrigsten unter Exposition 3. Die höchsten und auch signifikanten Differenzen finden sich zwischen den Expositionen 3 und 4, gefolgt von denen zwischen den Expositionen 2 und 4 (tendenziell und signifikant).

Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit

Ein erster Vergleich der Gesamttestwerte des Aufmerksamkeits-Belastungstestes d2 aus den Versuchen mit Referenzexposition 1 und der Wiederholung der Referenzexposition 4 ergibt signifikante Unterschiede, die nicht mit den raumklimatischen Versuchsbedingungen – beide sind gleich – erklärt werden können. Dies führt zu der These, dass ein Effekt durch wiederholtes Absolvieren des Testes hervorgerufen werden kann. Die Untersuchung des Übungseffektes ist in Abschnitt 7.5 näher beschrieben. Für den Aufmerksamkeits-Belastungstest sind daher im Folgenden die auf den gefundenen Übungseffekt adjustierten Gesamttestwerte dargestellt.

Die ermittelten auf den Übungseffekt adjustierten Werte sind in Abb. 7.9, links dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Mediane der absoluten Gesamttestwerte unabhängig von der Exposition annähernd gleich sind. Dies gilt auch für die ermittelten Minima und Maxima, wobei zu Exposition 3 etwas niedrigere Werte ermittelt werden. Der Unterschied zwischen Messzeitpunkt 1 und 3 in Exposition 3 ist signifikant, stellt aber eine Leistungsverbesserung dar, die nach der Adjustierung auf den Übungseffekt nicht erwartet werden konnte.

Die Verteilung der probandenbezogenen Differenzen des Gesamttestwertes von zwei Expositionen zeigt das rechte Bild in Abb. 7.9. Die probandenbezogenen Differenzen zwischen einzelnen Expositionen ergeben die größte Spannweite für die Differenz zwischen Exposition 3 und 4. Dabei werden sowohl Leistungsverbesserungen um bis zu 100 Punkte erreicht als auch Verschlechterungen von bis zu 165 Punkten. Im Median jedoch werden nur geringste probandenbezogene Veränderungen der Leistung registriert, die für keine der ermittelten Differenzen signifikant sind. Tab. 7.2 zeigt die Differenzen im Einzelnen und zusätzlich die Differenzen zwischen den Expositionen 3 und 2.

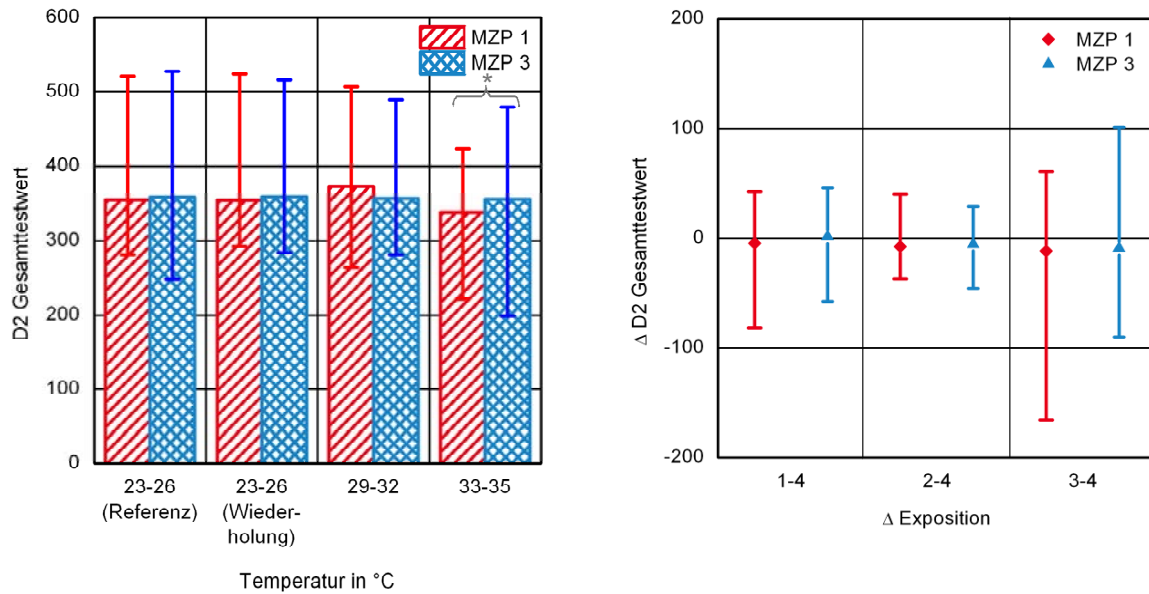


Abb. 7.9 Aufmerksamkeits-Belastungstest (d2-Test): Links: Gesamttestwert des Leistungstests adjustiert auf den Übungseffekt in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition) und dem Messzeitpunkt (MZP); \frown kennzeichnet signifikante Unterschiede mit $* p < 0,05$ zwischen den Messzeitpunkten. Rechts: Differenz zwischen den Gesamttestwerten verschiedener Expositionen adjustiert auf den Übungseffekt: 1-4: Unterschied zwischen der Referenzexposition und der Wiederholung, beide 23-26 °C. 2-4: Unterschied zwischen der Exposition 2 mit 29-32 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. 3-4: Unterschied zwischen der Exposition 3 mit 33-35 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C; signifikante Differenzen zwischen den Expositionen mit $p < 0,05$ sind mit * gekennzeichnet. MZP: Messzeitpunkt. Dargestellt ist jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20

Tab. 7.2 Deskription der probandenbezogenen Differenzen zwischen den Expositionen für den auf den Übungseffekt adjustierten Gesamttestwert für jeden Messzeitpunkt (MZP) unter Angabe der Probandenzahl N und der Irrtumswahrscheinlichkeit p (Wilcoxon signed rank Test)

Differenz zwischen Exposition	MZP	N	Maximum	Median	Minimum	p
4 - 1	1	20	81,7	-4,4	-46,1	0,2774
	3	20	57,7	1,5	-46,0	0,9563
2 - 4	1	16	65,9	-7,5	-37,0	0,9399
	3	16	29,2	-5,4	-46,0	0,4037
3 - 2	1	16	29,6	-5,4	-148,3	0,3225
	3	16	84,5	21,2	-62,6	0,2744
3 - 4	1	20	60,7	-11,8	-165,9	0,2162
	3	20	101,4	-9,2	-90,1	0,7012

Daueraufmerksamkeit bei Textkorrektur

Die Analyse der Ergebnisse des Textkorrektur-Testes der Expositionen 1 und 4 ergibt anders als beim Aufmerksamkeits-Belastungstest d2 keine Beeinflussung der Ergebnisse durch wiederholtes Ausführen des Testes (Abschnitt 7.5). Daher sind im Folgenden die nicht adjustierten Testergebnisse dargestellt.

In den beiden Referenzexpositionen 1 und 4 ergeben sich Anteile richtig erkannter Fehler im Median von 38 – 52 Prozent. In den beiden Expositionen mit erhöhter Raumlufttemperatur betragen die Anteile zwischen 42 und 48 Prozent (Abb. 7.10). Es gibt kein signifikantes Ergebnis bezüglich der Differenzen zwischen den Expositionen. Unter Exposition 4 werden aber mehr Fehler erkannt als unter Exposition 2 und 3. Lediglich die Differenz zwischen den Expositionen 3 und 4 sowie 2 und 4 zum Messzeitpunkt 3 sind schwach signifikant.

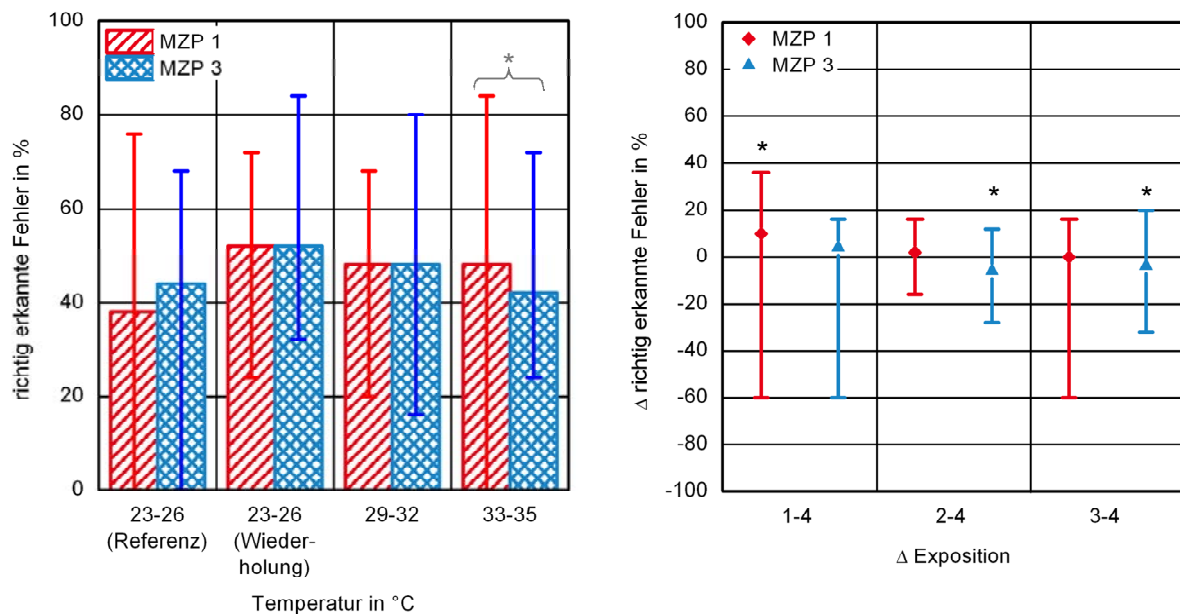


Abb. 7.10 Textkorrektur: Links: Anteil richtig erkannter Fehler in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition) und dem Messzeitpunkt (MZP); $\{$ kennzeichnet signifikante Unterschiede mit $* p < 0,05$ zwischen den Messzeitpunkten. Rechts: Differenz zwischen den Anteilen richtig erkannter Fehler verschiedener Expositionen: 1-4: Unterschied zwischen der Referenzexposition und der Wiederholung, beide 23-26 °C. 2-4: Unterschied zwischen der Exposition 2 mit 29-32 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. 3-4: Unterschied zwischen der Exposition 3 mit 33-35 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C; signifikante Differenzen zwischen den Expositionen mit $p < 0,05$ sind mit $*$ gekennzeichnet. MZP: Messzeitpunkt. Dargestellt ist jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20

Numerisches Denken

Die Analyse der Ergebnisse des Rechen-Testes der Expositionen 1 und 4 ergibt anders als beim Aufmerksamkeits-Belastungstest d2 keine Beeinflussung der Ergebnisse durch wiederholtes Ausführen des Testes (Abschnitt 7.5). Daher können die (nicht adjustierten) Testergebnisse unmittelbar übernommen und dargestellt werden.

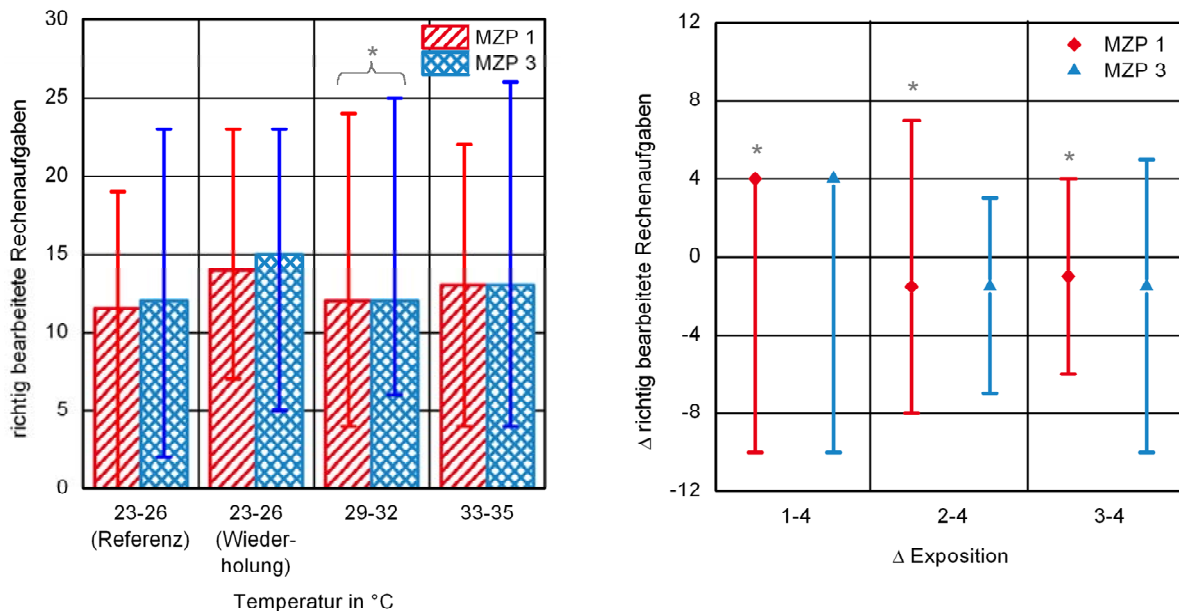


Abb. 7.11 Numerisches Denken: Links: Anzahl richtig bearbeiteter Rechenaufgaben in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition) und dem Messzeitpunkt (MZP); $\{$ kennzeichnet signifikante Unterschiede mit $* p < 0,05$ zwischen den Messzeitpunkten. Rechts: Differenz zwischen der Anzahl richtig bearbeiteter Rechenaufgaben verschiedener Expositionen: 1-4: Unterschied zwischen der Referenzexposition und der Wiederholung, beide 23-26 °C. 2-4: Unterschied zwischen der Exposition 2 mit 29-32 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. 3-4: Unterschied zwischen der Exposition 3 mit 33-35 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C; signifikante Differenzen zwischen den Expositionen mit $p < 0,05$ sind mit * gekennzeichnet. MZP: Messzeitpunkt. Dargestellt ist jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20

Die Anzahl der richtig bearbeiteten Rechenaufgaben beträgt im Median für die Referenzexpositionen 11,5 bis 15, für Exposition 2 12 und für Exposition 3 13. Die meisten richtigen Ergebnisse wurden unter der Exposition 4 erreicht. Die Spannweite der Ergebnisse je Exposition und Messzeitpunkt ist sehr groß und beträgt bis zu 23. Wird Exposition 1 außer Acht gelassen, werden die minimalen Unterschiede zwischen den Expositionen weder zum Messzeitpunkt 1 noch zum Messzeitpunkt 3 signifikant. Auch die Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten sind unbedeutend (Abb. 7.11).

Verbales Denken

Die Analyse der Ergebnisse des Begriffserkennungs-Testes der Expositionen 1 und 4 ergibt anders als beim Aufmerksamkeits-Belastungstest d2 keine Beeinflussung der Ergebnisse durch wiederholtes Ausführen des Testes (Abschnitt 7.5). Daher können die (nicht adjustierten) Testergebnisse unmittelbar übernommen und dargestellt werden.

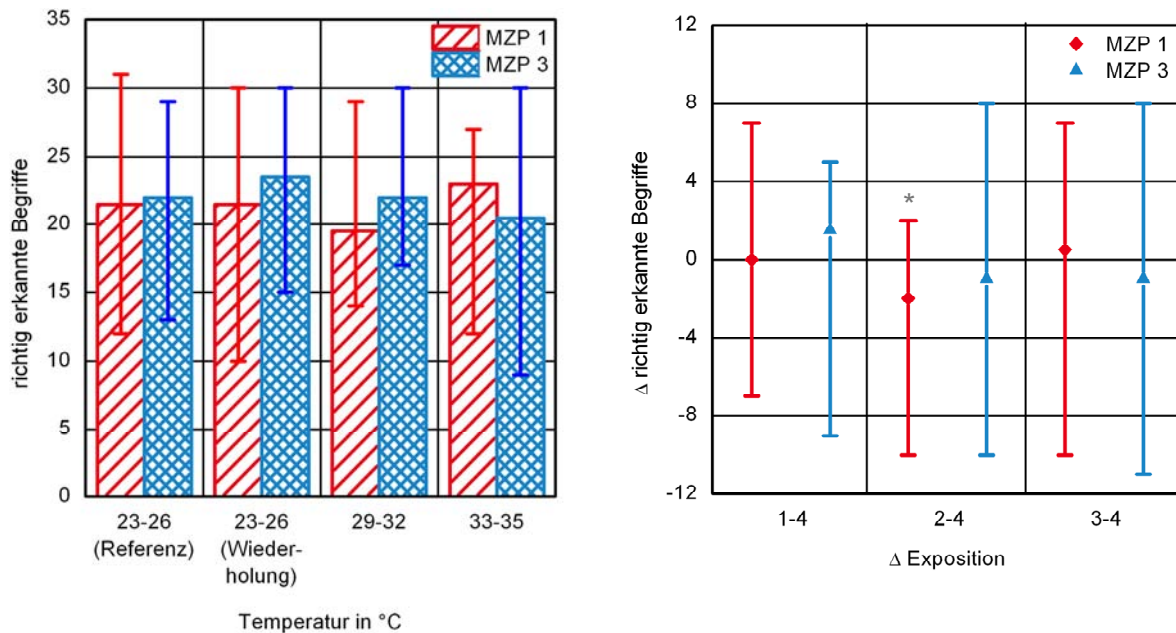


Abb. 7.12 Verbales Denken: Links: Anzahl richtig erkannter Begriffe in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Exposition) und dem Messzeitpunkt (MZP); $\{\}$ kennzeichnet signifikante Unterschiede mit $* p < 0,05$ zwischen den Messzeitpunkten. Rechts: Differenz zwischen den Gesamtestwerten verschiedener Expositionen: 1-4: Unterschied zwischen der Referenzexposition und der Wiederholung, beide 23-26 °C. 2-4: Unterschied zwischen der Exposition 2 mit 29-32 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C. 3-4: Unterschied zwischen der Exposition 3 mit 33-35 °C und der Wiederholungsexposition mit 23-26 °C; signifikante Differenzen zwischen den Expositionen mit $p < 0,05$ sind mit * gekennzeichnet. MZP: Messzeitpunkt. Dargestellt ist jeweils das Minimum, der Median und das Maximum. Anzahl der Probanden: 20 – 16 – 20.

Während der Referenzexpositionen werden im Median 21,5 bis 23 Begriffe richtig erkannt, zu Exposition 2 19,5 bis 22 und zu Exposition 3 20,5 bis 23. Den maximal möglichen Wert von 32 hat kein Proband erreicht. Es gibt keine relevanten Unterschiede sowohl zwischen den Expositionen als auch zwischen den Messzeitpunkten (Abb. 7.12). Die größte und einzige signifikante Differenz zeigt sich zwischen den Expositionen 2 und 4, hier jedoch lediglich zum Messzeitpunkt 1.

Erlebte Belastung und Beanspruchung

Die empfundenen geistigen Anforderungen werden in Exposition 1 und in Exposition 3 mit Werten von 10 bis 11 im Median am höchsten eingeschätzt. Die geringsten Mediane liefert Exposition 4 mit 7 bis 9,5 gefolgt von Exposition 2 mit Werten von 7,5 bis 10,5. Der Median und der Maximalwert steigen im Tagesverlauf an. Ein signifikanter Unterschied im Tagesverlauf ergibt sich nur für Exposition 4. Die signifikanten (Messzeitpunkt 1) und tendenziellen (Messzeitpunkt 3) Differenzen zwischen den Expositionen 4 und 1 sprechen für eine gewisse Gewöhnung an die geforderten Aufgaben. Die Differenz zwischen den Expositionen 3 und 4 zum Messzeitpunkt 1 ist signifikant.

Die empfundenen körperlichen Anforderungen steigen sowohl während des Untersuchungstages als auch mit zunehmender thermischer Belastung an. Die Ausprägung der Differenzen ist erwartungsgemäß: die Expositionen 1 und 4 mit Medianen von 1 bis 2,5, Exposition 2 mit Medianen von 2 bis 4 und Exposition 3 mit Medianen zwischen 7 und 7,5. Signifikante Differenzen zeigen sich zwischen den Expositionen 3 und 4 zu beiden Messzeitpunkten, gefolgt von denen zwischen den Expositionen 3 und 2 (signifikant zu beiden Messzeitpunkten) und zwischen den Expositionen 2 und 4 (signifikant zum Messzeitpunkt 3).

Die Werte der empfundenen zeitlichen Anforderungen folgen keinem erkennbaren Muster. Es fällt lediglich auf, dass sie unter Exposition 1 am höchsten sind. Es gibt auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten oder den Expositionen unterschiedlicher Raumtemperatur. Die signifikanten (Messzeitpunkt 3) und tendenziellen (Messzeitpunkt 1) Differenzen zwischen den Expositionen 4 und 1 sprechen für eine gewisse Gewöhnung an die geforderten Anforderungen. Ansonsten entsteht der Eindruck, dass die abgebildeten Differenzen nichts mit der thermischen Belastung zu tun haben.

Die empfundene Aufgabenerfüllung ist mit Ausnahme von Exposition 3 (marginal) zum Messzeitpunkt 1 stets höher als zum Messzeitpunkt 3 (unter Exposition 1 und 4 signifikant). Am niedrigsten ist der Wert generell unter Exposition 3, gefolgt von Exposition 2. Signifikante Differenzen zeigen sich nur zwischen den Expositionen 3 und 2 und den Expositionen 3 und 4 und zwar nur zum Messzeitpunkt 1.

Die empfundene Anstrengung ist zum Messzeitpunkt 3 generell höher als zum Messzeitpunkt 1 (signifikant unter Exposition 3). Die niedrigsten Werte finden sich unter Exposition 4. Die signifikanten (Messzeitpunkt 1) und tendenziellen (Messzeitpunkt 3) Differenzen zwischen den Expositionen 4 und 1 sprechen für eine gewisse Gewöhnung an die geforderten Aufgaben. Tendenzuelle bzw. signifikante Differenzen zeigen sich zwischen den Expositionen 2 und 4 und den Expositionen 3 und 4.

Die empfundene Frustration ist zum Messzeitpunkt 3 generell höher als zum Messzeitpunkt 1, wird aber nie signifikant. Die niedrigsten Werte finden sich unter Exposition 4. Die Werte unter Exposition 2 und 3 sind ähnlich. Es gibt zwischen den Expositionen 3 und 4 signifikante Differenzen zum Messzeitpunkt 3 und tendenzielle zum Messzeitpunkt 1. Zwischen den Expositionen 2 und 4 sind zum Messzeitpunkt 3 tendenzielle Differenzen zu verzeichnen.

7.5 Übungseffekt

Wie bereits in Abschnitt 7.4 erwähnt, ergibt ein erster Vergleich der Gesamtwerte des Aufmerksamkeits-Belastungstestes d2 aus den Versuchen mit Referenzexposition 1 und der Wiederholung der Referenzexposition 4 signifikante Unterschiede, die nicht mit den raumklimatischen Versuchsbedingungen erklärt werden können. Erwartet werden gleiche Ergebnisse bei gleichen Raumklimakonditionen. Dies führt zu der These, dass ein Übungseffekt durch wiederholtes Absolvieren des Testes hervorgerufen wurde. Tab. 7.3 zeigt die nicht adjustierten Gesamtwerte für die Expositionen 1 und 4 sowie die Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Unterschiede.

Tab. 7.3 Deskription der nicht auf den Übungseffekt adjustierten Gesamtwerte für die Expositionen 1 und 4 und die Messzeitpunkte (MZP) 1 und 3 unter Angaben der Probandenzahl N und Differenzen der Werte beider Expositionen sowie die Irrtumswahrscheinlichkeit p (Wilcoxon signed rank Test)

Exposition/Differenz	MZP	N	Maximum	Median	Minimum	p
1	1	20	558	431,5	332	-
	3	20	586	458,5	346	-
4	1	20	650	551,0	429	-
	3	20	687	570,0	432	-
4 - 1	1	20	209	117,0	26	<0,0001
	3	20	224	86,5	11	<0,0001

Mit einem varianzanalytischen Ansatz werden der Einfluss des Untersuchungstages, der Einfluss des Messzeitpunktes sowie der Einfluss der Exposition untersucht. Es zeigen sich ein signifikant starker Einfluss des Untersuchungstages und ein signifikanter Einfluss des Messzeitpunktes auf das Ergebnis des d2-Aufmerksamkeits-Belastungstests. Die Temperaturexposition wird nicht signifikant (Tab. 7.4).

Tab. 7.4 Erklärung der Gesamtwerte des d2-Aufmerksamkeits-Belastungstests durch den Untersuchungstag, den Messzeitpunkt und die Exposition im varianzanalytischen Modell, Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,323$, Angabe von F-Wert (statistischer Prüfwert) und Irrtumswahrscheinlichkeit p. Signifikante Werte sind fett dargestellt

	Untersuchungstag	Messzeitpunkt	Exposition
F	8,86	4,50	0,39
p	0,0002	0,0355	0,6792

Um trotzdem zu einem brauchbaren Ergebnis für die Leistungstestdaten zu kommen, wird der Einfluss der Testwiederholung auf die jeweilige Leistungsvariable in Regressionen mit logarithmischen Funktionen für jeden Probanden in einer Übungskurve

separat dargestellt und der Anstieg in Abhängigkeit von der Zuordnung des Messwertes in der Testwiederholung vom tatsächlichen Gesamtttestwert subtrahiert. Für die Errechnung der Regressionsgleichung werden zusätzlich zu den Daten aus den Expositionen 1 und 4 Daten aus der Probandenvorauswahl herangezogen. Der Unterschied zwischen den individuellen Übungskurven umfasst eine Differenz im Gesamtttestwert von ca. 200 Punkten. Abb. 7.13 zeigt die aus den Mittelwerten aller zur jeweiligen Testwiederholung vorliegenden Gesamtttestwerte ermittelte logarithmische Anpassung. Tab. 7.5 zeigt die mit den individuellen Übungskurven adjustierten Werte für die Expositionen 1 und 4 sowie die Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Unterschiede. Nun werden beide Expositionen als nicht verschieden voneinander betrachtet, was der Erwartung entspricht.

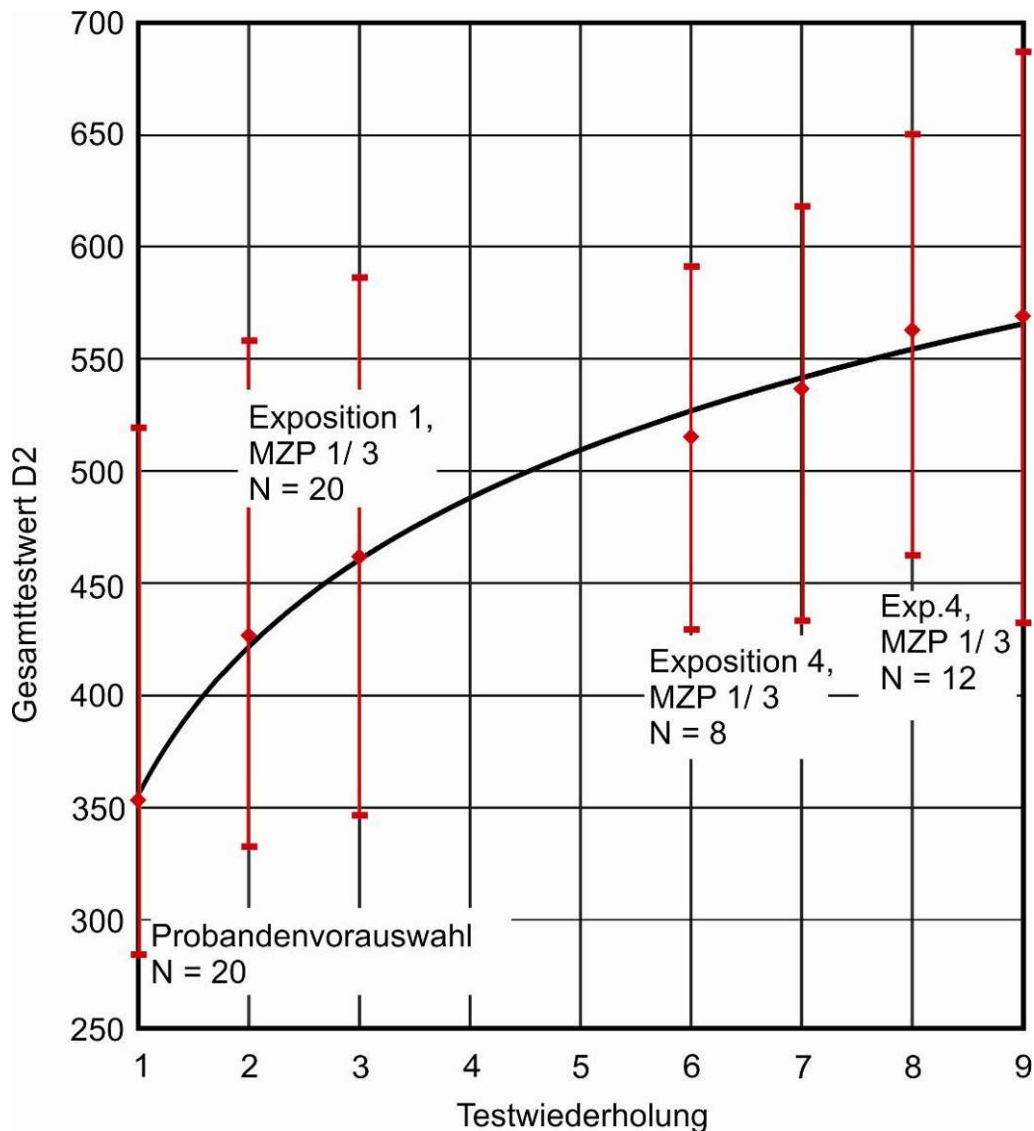


Abb. 7.13 Aufmerksamkeits-Belastungstest (d2-Test): Übungseffekt. Gesamtttestwerte bei Raumlufttemperaturen der Referenzexpositionen zu den Messzeitpunkten 1 und 3 und während der Probandenvorauswahl bei gleichen Temperaturen. Den Messwerten sind die Nummer der Testwiederholung und die Probandenzahl zugeordnet. Schätzer der logarithmischen Anpassungsfunktion aus den Mittelwerten zur jeweiligen Testwiederholung: Konstante: 355,29; Faktor: 95,688; $R^2 = 0,9928$

Tab. 7.5 Deskription der auf den Übungseffekt adjustierten Gesamttestwerte für die Expositionen 1 und 4 und die Messzeitpunkte (MZP) 1 und 3 unter Angaben der Probandenzahl N und Differenzen der Werte beider Expositionen sowie die Irrtumswahrscheinlichkeit p (Wilcoxon signed rank Test)

Exposition/Differenz	MZP	N	Maximum adjustiert	Median adj.	Minimum adj.	p
1	1	20	521,6	354,3	280,8	-
	3	20	528,2	357,7	247,7	-
4	1	20	524,6	353,7	292,3	-
	3	20	516,5	358,5	282,9	-
4 - 1	1	20	81,7	-4,4	-46,1	0,2774
	3	20	57,7	1,5	-46,0	0,9563

Wird die anhand der Datenerhebung im Temperaturbereich 23-26 °C ermittelte Übungskurve aus Abb. 7.13 erweitert um die Testergebnisse aus den Temperaturbereichen der Exposition 2 (29-32 °C) und Exposition 3 (33-35 °C), so zeigt sich nur eine unbedeutende Veränderung der Kurvenanpassungskoeffizienten. Tab. 7.6 zeigt die Koeffizienten für beide Anpassungen. Die sehr große Ähnlichkeit beider Kurven zeigt ebenfalls, dass die Testergebnisse des d2-Aufmerksamkeits-Belastungstestes nicht von den Raumlufttemperaturbedingungen beeinflusst werden.

Tab. 7.6 Logarithmische Anpassungsfunktion für die Anpassung aus Abb. 7.13 für die Testwiederholungen unter Referenztemperaturbedingungen und für alle Testwiederholungen unabhängig von der Raumlufttemperatur

Testwiederholungen	Konstante	Faktor	Bestimmtheitsmaß R ²
unter Referenztemperaturbedingung	355,29	95,688	0,9928
Alle Wiederholungen unabhängig von der Raumlufttemperatur	353,99	95,150	0,9885

Mit dem bereits oben genannten varianzanalytischen Ansatz werden der Einfluss des Untersuchungstages und der Einfluss des Messzeitpunktes sowie der Einfluss der Exposition auf die anderen Zielgrößen zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit untersucht. Die Testergebnisse für Textkorrektur, Begriffserkennung und Rechentest zeigen sich unbeeinflusst von Untersuchungstag, Messzeitpunkt aber auch unbeeinflusst von der Exposition. Für diese Tests liegt kein Übungseffekt vor (Tab. 7.7).

Tab. 7.7 Erklärung der Ergebnisse der Leistungstests durch den Untersuchungstag, den Messzeitpunkt und die Exposition im varianzanalytischen Modell unter Angabe von Bestimmtheitsmaß R^2 , F-Wert (statistischer Prüfwert) und Irrtumswahrscheinlichkeit p .

Leistungstest	Kenngrößen	Untersuchungstag	Messzeitpunkt	Exposition
Daueraufmerksamkeit bei der Textkorrektur	R^2	0,071		
	F	1,77	0,27	0
	p	0,1735	0,7670	0,9838
numerisches Denken	R^2	0,045		
	F	2,08	0,07	1,84
	p	0,1286	0,9342	0,1768
verbales Denken	R^2	0,072		
	F	1,37	0,38	0,66
	p	0,2577	0,6869	0,4182

7.6 Zusammenhänge zwischen einzelnen Zielgrößen

Physiologie

Die Werte der Hautfeuchte- und Hauttemperaturmessungen korrelieren miteinander ($r_s=0,48$ bis $0,84$). Aber nur die an der Stirn gemessene Hauttemperatur ist mit der Herzfrequenz korreliert ($r_s=0,36$; $p<0,0001$). Es gibt hohe Korrelationen zu Bewertungen der thermischen Behaglichkeit und zur Trinkmenge. Nicht so hoch, aber trotzdem signifikant sind die Korrelationen physiologischer Werte zu allen getesteten Angaben zum momentanen Leistungsempfinden sowie zur Anstrengungsbereitschaft und Erholtheit aus der Eigenzustandsbeschreibung.

Die mittlere Herzfrequenz korreliert mit den Behaglichkeitsangaben (mit Ausnahme der am Fuß), der Eigenzustandsbeschreibung (besonders Erholtheit ($r_s= -0,34$; $p=0,0001$)), den Variablen zur Einschätzung des momentanen Leistungsempfindens (besonders der selbstberichteten Leistungsfähigkeit $r_s= -0,33$; $p=0,0003$) und mit der Trinkmenge ($r_s=0,43$; $p=0,0009$), aber in keinem Fall mit der getesteten Leistungsfähigkeit.

Der Bekleidungs-dämmwert ist mit der Hautfeuchte ($r_s= -0,30$ $p<0,0001$) und den Hauttemperaturen (z. B. Unterarm $r_s= -0,40$; $p<0,0001$), aber nicht mit der Herzfrequenz korreliert. Er zeigt Zusammenhänge zu sämtlichen Variablen der Behaglichkeit nicht aber in Bezug auf die Füße, zu der Mehrheit der Variablen zur Beschreibung der erlebten Belastung und Beanspruchung und zu allen Eigenzustandsvariablen sowie den Variablen zur Beschreibung des momentanen Leistungsempfindens.

Leistungstests

Die Ergebnisse der Leistungstests sind relativ unabhängig von den anderen erfragten und gemessenen Variablen. Korrelationen zeigen sich nur punktuell, z. B. korreliert der auf den Übungseffekt adjustierte d2-Test mit dem Rechentest ($r_s=0,27$; $p=0,0008$) und mit der empfundenen Aufgabenerfüllung ($r_s=0,22$; $p=0,0073$).

Die Ergebnisse der Textkorrektur sind als einzige der Leistungstests signifikant mit allen Einschätzungen des momentanen Leistungsempfindens und der Anstrengungsbereitschaft (Eigenzustandsbeschreibung) ($r_s=0,37$; $p<0,0001$) korreliert. Die Ergebnisse der Begriffserkennung sind mit denen des Rechentests, mit der empfundenen Frustration (erlebte Belastung und Beanspruchung) ($r_s= -0,23$; $p=0,0034$), der Spannungslage (Eigenzustandsbeschreibung, $r_s=0,21$; $p=0,0092$) und der Konzentriertheit (momentanes Leistungsempfinden) ($r_s=0,21$; $p=0,0121$) korreliert.

Die Ergebnisse des Rechentests sind sowohl mit denen des d2-Test, der Begriffserkennung und der Textkorrektur, als auch mit denen der Trinkmenge ($r_s= -0,22$; $p=0,0554$) und den berichteten körperlichen Anforderungen (erlebte Belastung und Beanspruchung; $r_s=0,29$; $p=0,0002$) korreliert.

Die Angaben zur selbstberichteten Leistungsfähigkeit (momentanes Leistungsempfinden) korrelieren mit allen Eigenzustandsbeschreibungen und Einschätzungen zum momentanen Leistungsempfinden, mit der empfundenen Aufgabenerfüllung, der empfundenen geistigen Anforderung, der empfundenen Anstrengung (erlebte Belastung und Beanspruchung), mit allen Angaben zur Behaglichkeit, mit Hauttemperaturen, Hautfeuchten und Herzfrequenzen, der Trinkmenge dem Bekleidungs-dämmwert. Es gibt nur eine einzige Korrelation zu den Ergebnissen eines Leistungstests, und zwar zu denen der Textkorrektur ($r_s=0,35$; $p<0,0001$).

Subjektive Bewertung der thermischen Umgebung

Die Variablen zum thermischen Empfinden und zur thermischen Behaglichkeit sind mit Ausnahme der Leistungstests mit eigentlich allen Größen korreliert sowie auch untereinander. Dies trifft im Großen und Ganzen auch auf die Eigenzustandsbeschreibung, die Beschreibung des momentanen Leistungsempfindens und der Beschreibung der erlebten Belastung und Beanspruchung zu. Sie sind alle nicht unabhängig voneinander.

8 Diskussion

Die Besonderheit der vorliegenden Studie ist im Gegensatz zu den meisten durchgeführten Studien, dass den Probanden ein Kontext vorgegeben wurde, nämlich, dass die Büroarbeit im Sommer ausgeführt wird (Abschnitt 5.8), dass dieser vorgegebene Kontext mit den Außentemperaturen übereinstimmt und sich auch in den im Büroraum vorherrschenden Temperaturen widerspiegelt. Dadurch wird die Erwartung der Probanden beeinflusst. Die Probanden konnten während der Versuche durch einen halbtransparenten Sonnenschutz Witterung und Geschehen draußen verfolgen.

Eine weitere Besonderheit dieser Studie ist, dass sie im Gegensatz zu den meisten bereits durchgeführten Studien, die mit Probanden unter 30 Jahren arbeiteten (URLAUB et al. 2010), Probanden auswählte, die mit 36 bis 50 Jahren aus einer Altersgruppe stammen, die im Allgemeinen berufstätig und berufserfahren ist.

Die Versuchsdauer von 4,3 Stunden entspricht der Größenordnung, die in einigen Studien (z. B. WILLEM und THAM 2005; WARGOCKI et al. 2009; LAN et al., 2011) realisiert wurde. HANEDA et al. (2008) verwendeten eine längere Expositionsdauer von 5,8 Stunden; in anderen Studien, z. B. NISHIHARA, YAMAMOTO und TANABE (2002) war die Expositionsdauer auch deutlich kürzer.

In der vorliegenden Studie erhielten die Probanden zwar ihre Aufwandsentschädigung erst nach dem Absolvieren aller Versuchstage, womit die Motivation, an allen vier Tagen zu erscheinen, hoch war. Jedoch wurde, wie auch beispielsweise in LAN et al. (2011) im Gegensatz zu Untersuchungen z. B. von NISHIHARA, YAMAMOTO und TANABE (2002) oder LAN et al. (2009), auf die Zahlung eines Bonus in Abhängigkeit von der Leistung zusätzlich zur Aufwandsentschädigung verzichtet. Bonuszahlungen erhöhen die Motivation. IWASHITA und TANABE (2007) zeigen in ihrer Arbeit, dass motivierte Probanden bei erhöhten Temperaturen die gleiche Leistung beim Addieren und Korrekturlesen erbringen wie bei behaglichen Temperaturen. Bei den unmotivierten Probanden war die Leistung bei erhöhter Temperatur geringer.

Einordnung einzelner Ergebnisse

In verschiedenen Studien wurde die Hauttemperatur als Indikator für die thermische Behaglichkeit herangezogen. OLESEN und FANGER (1973) untersuchten lokale und mittlere Hauttemperaturen an 820 Probanden. Mit einem Mittelwert von 34,6 °C bzw. einer Streuung von 11,6 K an der Stirn und 32,6 °C bzw. 11,4 K am Unterarm haben sie ein recht weites Temperaturspektrum für einen ruhenden Menschen in einem Zustand der Behaglichkeit dokumentiert. Die mittlere Hauttemperatur in den untersuchten Expositionen 1, 4 und 2 stimmt recht gut mit einer vorhergesagten Hauttemperatur, berechnet anhand einer körperteilbezogenen Regression von Messwerten, die von BISCHOF und BÁNHIDI, 1990; HARDY und DUBOIS, 1938; HOUDAS und RING, 1982; MAUDERER, 1977; MOCHIDA, 1977; TAMURA et al., 1980; WERNER, 1981; WINSLOW und HERRINGTON, 1949 publiziert wurde, überein. Eine größere Schwankungsbreite der Hauttemperaturen bei Raumlufttemperaturen über 31 °C wird möglicherweise verursacht durch interindividuelle Unterschiede in der lokalen Hautbenetzung. Die Hauttemperatur dürfte daher nur im behaglichkeitsnahen Bereich als Indikator für thermische Behaglichkeit geeignet sein.

In der Thermophysio­logie wird der Begriff ‚Hautbenetzungsgrad‘ (Skin Wettedness) als Anteil der gesamten Körperoberfläche, die mit Schweiß bedeckt ist, definiert und benutzt, um Unbehaglichkeit zu beschreiben. Unbehaglichkeit wird ab einem Hautbenetzungsgrad von ca. 20 % geäußert. Unbehaglichkeit wird einem Bereich von 20 bis 40 % der mit Schweiß benetzten Körperoberfläche zugeordnet. Leistungsabfall wird ab ca. 60 % benetzter Körperoberfläche registriert. Physiologische Belastung wird einem Bereich zwischen 60 und 80 % zugeordnet (HANDBOOK ON CLOTHING, 2007). Für Operativtemperaturen unter 31 °C bleibt der Hautbenetzungsgrad relativ konstant zwischen 10 und 20 % (GAGGE, 1937). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass die Hautfeuchte im Vergleich zum Hautbenetzungsgrad ein wesentlich sensitiverer Parameter ist, um physiologische Effekte für Operativtemperaturen unter ca. 33 °C zu beschreiben. Corneometrie ist zwar eine etablierte Methode in der Dermatologie (COURAGE und KHAZAKA, Studies list: Corneometer, 2010) und bereits teilweise in der Umweltmedizin (BISCHOF et al., 2003) eingesetzt. Nur wenige Studien berichten jedoch über den Einsatz der Corneometrie in Studien zur thermischen Behaglichkeit (WARGOCKI et al., 2009).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Hauttemperatur, Hautfeuchte und Herzfrequenz in der vorliegenden Studie mit steigender Raumlufttemperatur zunehmen, jedoch im physiologisch unbedenklichen Bereich bleiben.

Im Rahmen des ProKlimA-Projektes (BISCHOF et al., 2003), in dem der d2-Aufmerksamkeits-Belastungstest bei 1295 Beschäftigten in Bürogebäuden zum Einsatz kam, wurde u. a. als Ergebnisgröße die Anzahl der korrekt bearbeiteten Zeichen (Gesamttestwert) ausgewertet. Orientierend sind dort Interpretationshilfen zur Einordnung der Testergebnisse angegeben (Tab. 8.1).

Tab. 8.1 Interpretationshilfe der Ergebnisgröße „Gesamttestwert“ (BISCHOF et al., 2003)

Gesamttestwert	Interpretation
≤ 300	geringe Konzentrationsfähigkeit als Leistungsvoraussetzung
> 300 bis 400	normale Konzentrationsfähigkeit als Leistungsvoraussetzung
> 400	hohe Konzentrationsfähigkeit als Leistungsvoraussetzung

Ein Vergleich des d2-Gesamttestwertes der untersuchten Probandengruppen in ProKlimA und in der Probandenvorauswahl der vorliegenden Studie zeigt eine gute Übereinstimmung der Verteilung der Testergebnisse (Tab. 8.2). Die für die Studie ausgewählten Probanden liegen mit ihren Testergebnissen eher oberhalb des Medians der beiden anderen Probandengruppen. Dies war eine bewusste Entscheidung bei der Auswahl der Probanden, um ausreichend Spielraum für die im Vorfeld vermutete Leistungsabnahme bei hohen Temperaturen zur Verfügung zu haben.

Tab. 8.2 Deskription des d2-Gesamttestwertes der untersuchten Probandengruppen in der ProKlimA-Studie, aller Probanden der Voruntersuchung in der vorliegenden HESO-Studie und der aus der Voruntersuchung ausgewählten Probanden in der vorliegenden HESO-Studie

Untersuchung	N	25. Perzentil	Median	75. Perzentil
ProKlimA, (BISCHOF et al., 2003)	1295	284	331	384
HESO, Probandenvorauswahl	32	294	347	371
HESO, ausgewählte Probanden	20	321	357	373

Übungseffekt

Der Übungseffekt bei Konzentrations-Durchstreichtests – also dem d2-Aufmerksamkeits-Belastungstest vergleichbaren Tests – ist in einigen Arbeiten diskutiert worden (WESTHOFF, 1989; WESTHOFF und DEWALD 1990; FAY, 1992; PRECHTL, 2004, BÜHNER, et al., 2006; KÖNIG, 2007; SCHWARZL, LANG und MURSCH-RADLGRUBER, 2009).

WESTHOFF (1989) beschreibt eine monotone Zunahme der Gesamtzahl der bearbeiteten Zeichen bei neun verschiedenen Durchstreich-Konzentrationstests in je acht Testdurchführungen. Im Mittel der neun Varianten des Durchstreich-Konzentrationstest gibt er eine Leistungssteigerung von der ersten zur achten Testdurchführung von 60 % an. Er beschreibt auch die Zunahme interindividueller Unterschiede mit der Häufigkeit der Durchführung. WESTHOFF und DEWALD (1990) konnten diese Ergebnisse replizieren. Die Übungseffekte sind nach sechs Wochen Pause nur leicht verringert. WESTHOFF (1989) und WESTHOFF und DEWALD (1990) verwenden die Gesamtzahl bearbeiteter Zeichen. Diese weicht jedoch nach ihren Aussagen wenig vom Gesamttestwert, der Anzahl der richtig bearbeiteten Zeichen, der in der vorliegenden Studie ausgewertet wurde, ab.

In der vorliegenden Untersuchung ergibt sich die Leistungssteigerung aus den Mittelwerten der Tests vom ersten bis zum achten Test zu 59 % und vom ersten bis zum neunten Test zu 61 %. Eine Zunahme der Streuung der Einzelwerte wie bei WESTHOFF (1989) ist ebenfalls erkennbar.

SCHWARZL et al. 2009 verwendeten den d2-Aufmerksamkeits-Konzentrationstest bei einer Studie zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Lernen von Schülern insgesamt in bis zu 12 Wiederholungen. Sie werteten die Konzentrationsleistung (Gesamtzahl bearbeiteter Zeichen abzüglich der Verwechslungsfehler) aus. Unter Verwendung der Mittelwerte von fünf Schülern, die alle zwölf Tests absolviert hatten, konnten SCHWARZL et al. 2009 eine Übungskurve mit einer logarithmischen Funktion bestimmen, die ein Bestimmtheitsmaß von 0,94 aufweist. Sie adjustierten dann im Gegensatz zur vorliegenden Studie die Rohwerte auf Basis der Mittelwertkurve und nicht auf Basis individueller Übungskurven. Die Verwendung der Übungskurve aus Mittelwerten kann sich aufgrund der starken Streuung der Einzelwerte als ungeeignet erweisen.

Einschätzung des Eigenzustandes

LAN et al. (2011) fanden die Bereitschaft, Anstrengung zur Aufgabenerfüllung aufzubringen, mit der Versuchszeit abnehmend und am Ende der Exposition bei einer Temperatur von 30 °C geringer ausgeprägt als bei einer Temperatur von 22 °C. Dies ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen zur Anstrengungsbereitschaft in dieser Studie. Aufgrund unterschiedlicher methodischer Ansätze kann nur die Wirkungsrichtung nicht jedoch die Ausprägung verglichen werden. Dies gilt auch für die folgenden Ausführungen.

NISHIHARA, YAMAMOTO und TANABE (2002) untersuchten bei mit dieser Studie vergleichbaren Temperaturen von 25, 28 und 33 °C Anzeichen von Erschöpfung und verwendeten dazu ein Bewertungssystem von Yoshitake, das mit jeweils 10 Einzelitems zwischen drei Gruppen von Erschöpfung – Schläfrigkeit und Mattheit, Schwierigkeiten beim Konzentrieren sowie körperliche Beschwerden – unterscheidet. Bei den Experimenten waren die Anzeichen der Erschöpfung vor den Tests niedriger als nach den Tests und nahmen mit der Temperatur zu. Vor dem Test zeigten sich typische Muster mentaler Erschöpfung nur bei 33 °C, nach dem Test zeigten sich diese Muster bei Männern unabhängig von der Temperatur generell, bei Frauen nur bei 33 °C. Vergleichbare Ergebnisse berichten auch HANEDA et al. (2009) und LAN et al. (2011).

Auch in der vorliegenden Studie nahmen die Schläfrigkeit mit der Versuchszeit zu und die Erholtheit mit der Versuchszeit ab. Bei höheren Temperaturen war eine geringere Erholtheit zu verzeichnen, die Schläfrigkeit nahm mit der Temperatur tendenziell zu, die Spannungslage, die Items wie Gelassenheit und Ausgeglichenheit umfasst, nahm tendenziell mit der Temperatur ab. Wenn auch mit verschiedenen Methoden ermittelt, so weisen die Ergebnisse der verschiedenen Studien doch in eine ähnliche Richtung.

Erlebte Belastung und Beanspruchung

Ebenso wie in der vorliegenden Studie verwendeten LAN et al. (2011) den NASA TLX Fragebogen zur erlebten Belastung und Beanspruchung und fanden der vorliegenden Studie vergleichbare Ergebnisse. Die Probanden berichten von höheren geistigen und körperlichen Anforderungen bei 30 °C im Vergleich zu 22 °C; sie empfanden die Aufgabenerfüllung bei 30 °C schlechter als bei 22 °C und waren am Ende des Versuches frustrierter. Die Einschätzung der zeitlichen Anforderungen und die empfundene Anstrengung wurden nicht von der Temperatur modifiziert.

Abgleich der Ergebnisse mit den Hypothesen

Hypothese 1

Eine thermische Belastung durch eine hohe Raumtemperatur (Lufttemperatur) verändert physiologische Parameter. Diese Hypothese kann bestätigt werden. Hauttemperatur, Hautfeuchte und Herzfrequenz nehmen mit höherer Raumlufttemperatur zu. Der Konsum an Getränken ist bei hohen Temperaturen größer als bei Referenztemperaturbedingungen. Die Bekleidungsämmung wird bereits bei etwas erhöhter Raumtemperatur von 29-32 °C reduziert.

Eine thermische Belastung durch eine hohe Raumtemperatur (Lufttemperatur) verschlechtert die subjektive Einschätzung des Eigenzustandes und der eigenen Leistung. Diese Hypothese kann grundsätzlich bestätigt werden, es muss jedoch eine differenzierte Betrachtung durchgeführt werden. Anstrengungsbereitschaft und Erholtheit nehmen mit steigender Temperatur ab, Schläfrigkeit nimmt tendenziell eher zu. Die Spannungslage nimmt tendenziell eher mit der Temperatur ab. Das momentane Leistungsempfinden nimmt tendenziell mit höherer Temperatur ab. Die empfundenen geistigen Anforderungen sind bei stark erhöhter Raumlufttemperatur ebenfalls höher als unter Referenzbedingungen. Die empfundenen körperlichen Beanspruchungen steigen mit der Temperatur an. Die empfundenen zeitlichen Anforderungen sind nicht von der Temperatur beeinflusst. Das Empfinden, die Aufgaben erfüllt zu haben, nimmt bei steigender Temperatur ab, allerdings nur zum ersten Messzeitpunkt. Eine höhere Temperatur erhöht, teilweise nur tendenziell, die empfundene Anstrengung und die empfundene Frustration.

Eine thermische Belastung durch eine hohe Raumtemperatur (Lufttemperatur) beeinträchtigt die thermische Behaglichkeit. Diese Hypothese wird bestätigt. Das entspricht der Erwartung und den allgemein bekannten Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der thermischen Behaglichkeit.

Eine thermische Belastung durch eine hohe Raumtemperatur (Lufttemperatur) verringert die Leistungsfähigkeit. Diese Hypothese kann bis zu einer Raumlufttemperatur von 33 °C und bei einer Expositionsdauer von 4,3 h nicht bestätigt werden. Nach dem Adjustieren auf den beim d2 Aufmerksamkeits-Belastungstest auftretenden Übungseffekt und nach Analyse der anderen durch Übungseffekte unbeeinflussten Tests kann ein Effekt einer höheren Raumlufttemperatur auf die Ergebnisse der Leistungstests als Maß für die Leistungsfähigkeit nicht gezeigt werden.

Hypothese 2

Veränderungen werden vom Zeitpunkt im Versuchsablauf (Messzeitpunkt) modifiziert. Diese Hypothese kann für folgende Zielgrößen bestätigt werden:

- Die Hautfeuchte nimmt mit der Versuchszeit zu.
- Anstrengungsbereitschaft, Erholtheit nehmen ab, wogegen die Schläfrigkeit zunimmt.
- Die Unbehaglichkeit aufgrund von Wärme steigt über den Tag an.
- Das momentane Leistungsempfinden nimmt im Tagesverlauf ab.
- Die empfundenen geistigen Anforderungen und die empfundenen körperlichen Anforderungen nehmen tendenziell zu, die empfundene Anstrengung nimmt im Tagesverlauf zu.
- Die empfundene Aufgabenerfüllung nimmt im Tagesverlauf ab.

Die Hypothese kann für die Ergebnisse der Leistungstests als Maß für die Leistungsfähigkeit nicht bestätigt werden: Die Leistungsfähigkeit ändert sich nicht mit der Versuchszeit.

Diskussion der Ergebnisse insgesamt

Auch in dieser Studie zeigt sich wie in vielen Untersuchungen vorher (Abschnitt 3.1) kein Einfluss erhöhter Raumtemperaturen auf die objektiv messbare Leistung bei der Ausführung verschiedenen Testaufgaben. Gegenüber diesen Untersuchungen wurden einige Randbedingungen im Studiendesign verbessert wie der saisonale Kontext, der realitätsnahe Büroraum mit Außenbezug, der nicht wie eine Klimakammer wirkt, und eine realitätsnahe Alterklasse.

Es gibt aber auch Studien, in denen Effekte gefunden wurden, wie in LAN et al. (2011). Bei Untersuchungen von vergleichbarer Versuchsdauer, höherer Bekleidungs-dämmung dafür aber etwas geringerer Referenztemperatur bzw. Maximaltemperatur verringerte sich die Leistung bei einem Additionstest und bei vier von sieben Tests einer neuropsychologischen Testbatterie bei 30 °C im Vergleich zu 22 °C.

Wird das Versuchsdesign betrachtet, so können wenige Gründe als mögliche Ursachen dafür vermutet werden, dass keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die objektiv gemessene Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Raumtemperatur gefunden wurden.

Es sei hier die Versuchsdauer von 4,3 h genannt, die zu kurz gewesen sein könnte. Aufgrund der von den Probanden berichteten erhöhten Anstrengung, gesteigerten Schläfrigkeit und verringerten Ausgeglichenheit unter erhöhten Temperaturen könnte bei längerer Versuchsdauer die insgesamt spürbare Anstrengung auch auf Ergebnisse der Leistungstests durchschlagen. HANEDA et al. (2008) fanden jedoch in ihrem 5,8 Stunden Experiment keine Leistungsunterschiede beim Multiplizieren bei erhöhter und mittlerer Temperatur aber eine Zunahme der Ermüdungserscheinungen. Ähnliche Ermüdungserscheinungen und ebenfalls keine Veränderung der Leistung beim Addieren einstelliger Zahlen während erhöhter und mittlerer Temperaturen berichten UEKI et al. (2007) bei gleicher Versuchsdauer. In beiden Fällen wurden zur Erhöhung der Motivation Boni für gute Leistungen gezahlt.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Hitze am Arbeitsplatz ist ein Umwelteinfluss, der den betroffenen Personen durchaus bewusst ist und als belastend empfunden wird. Sie schätzen Ihre Umgebung als weniger behaglich ein. Sie fühlen sich weniger leistungsfähig, angestregter, schläfriger und weniger ausgeglichen als unter normalen Temperaturen. Auch die physiologischen Reaktionen werden durch Hitze verändert. Die Herzfrequenz steigt. Der Körper ist gezwungen, mehr Wärme und Feuchtigkeit über die Haut abzugeben. Trotzdem ist keine erhebliche Leistungseinbuße im Vergleich zu angenehmeren Umgebungstemperaturen zu verzeichnen. Es liegt der Schluss nahe, dass der Mensch in der Lage ist, Hitzebeanspruchung im Interesse einer mentalen Leistung zu kompensieren. Da aber die Hitze erwiesenermaßen Psyche und Körper des Menschen beeinflusst, ist damit zu rechnen, dass diese Möglichkeiten zur Kompensation sich mit zunehmender Expositionszeit erschöpfen. Die vorliegenden Ergebnisse ermöglichen keine Aussagen, die über die Versuchsdauer von 4,3 h hinausgehen. Sie ermöglichen auch keine Erkenntnisse dazu, welche individuellen, den Arbeitsinhalt betreffende und betriebsorganisatorische Faktoren diese Fähigkeit zur Kompensation unterstützen. Als sicher kann aber angenommen werden, dass die im Experiment genutzten Maßnahmen (Bekleidung reduzieren, Getränke reichen, Pausen) zu der ausgeglichenen Leistung beigetragen haben. Alle weiteren Punkte bedürfen einer weiterführenden Forschung unter einem erweiterten Studiendesign.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Handlungshilfe „Sommerhitze im Büro – Hinweise und Tipps, wenn es heiß wird“ erstellt, die als Faltblatt bei der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin erscheint.

Literaturverzeichnis

Amelang, M.; Schmidt-Atzert, L. (2006): Psychologische Diagnostik und Intervention. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Medizin Verlag Heidelberg, Springer-11776 /Dig. Serial.

Apenburg, E. (1986): Befindlichkeitsbeschreibung als Methode der Beanspruchungsmessung – Untersuchungen zur Entwicklung und Validierung einer modifizierten Fassung der Eigenzustandsskala von NITSCH, Psychologie und Praxis – Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie 30, S. 3-14.

Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) (2010): Verordnung über Arbeitsstätten vom 12. August 2004 (BGBl. I S. 2179), letzte Änderung vom 19. Juli 2010 (BGBl. I S. 960).

ASR 6 (2001): Arbeitsstätten-Richtlinie ASR 6 Raumtemperaturen. BarBl.6-7/2001 S. 94.

ASR A3.5 (2010): Arbeitsstättenregel Raumtemperatur ASR A3.5. GMBI Nr. 35 vom 23. Juni 2010, S. 751.

BGI 579: 2007-10: Hitzearbeit. Erkennen – beurteilen – schützen. Berufsgenossenschaftliche Information der BG (Hrsg.), Köln, Carl Heymanns Verlag.

BGI 7002: 2007-06: Beurteilung von Hitzearbeit – eine Handlungshilfe für kleine und mittlere Unternehmen. Berufsgenossenschaftliche Information der HVBG (Hrsg.) Köln, Carl Heymanns Verlag.

Bischof, W.; Bánhidi, M. (1990): Szimultán börhömérsékleti mérések emberrel és Thermal.

Bischof, W.; Bullinger-Naber, M.; Kruppa, B.; Schwab, R.; Müller, B. H. (Hrsg.) (2003): Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden – Ergebnisse des ProKlimA-Projektes. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Brähler, E.; Holling, H.; Leutner, D.; Petermann, F. (Hrsg.) (2002): Brickenkamp Handbuch psychologischer und pädagogischer Tests, Band 1, 3. Auflage, Hogrefe, Göttingen.

Brickenkamp, R. (1972): Test d2-Aufmerksamkeitstest, Göttingen: Hogrefe.

Bühner, M.; Ziegler, M.; Bohnes, B.; Lauterbach, K. (2006): Übungeffekte in den TAP Untertests Test Go/Nogo und Geteilte Aufmerksamkeit sowie dem Aufmerksamkeits-Belastungstest (d2). Neuropsychologie, 17, 3, S. 191-199.

Bux, K. (2006): Klima am Arbeitsplatz. Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschungen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung Projekt F 1987.

Courage und Khazaka Electronic GmbH (2010): Information and operating instructions for the corneometer CM 825® and Studies list 2010.

DIN EN ISO 7730:2006-05: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV – und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.

DIN EN 15251:2007-08: Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.

Fay, E. (1992): Über die Übbarkeit der Leistung in einem Durchstreichverfahren zur Messung der Konzentrationsfähigkeit; *Diagnostica*; 38, 4, S. 301-311.

Fisseni, H.-J. (2004): Lehrbuch der psychologischen Diagnostik. Mit Hinweisen zur Intervention. 3. überarb. und erw. Aufl., Hogrefe, Göttingen.

Gagge, A. P. (1937): A new physiological variable associated with sensible and insensible perspiration. *Am. J. Physiol.* 120, pp 277-87.

Handbook on Clothing (2007): Biomedical Effects of Military Clothing and Equipment Systems. 2nd Edition. TNO, Institute of Perception, Soesterberg.

Haneda, M.; Tanabe, S.; Nishihara, N.; Nakamura, S. (2008): The combined effects of thermal environment and ventilation rate on productivity. *Proceedings Indoor Air 2008*, 17-22 August 2008, Copenhagen, Denmark - Paper 108.

Haneda, M.; Wargocki, P.; Dalewski, M.; Tanabe, S. (2009): The effects of thermal discomfort on task performance, fatigue and mental work load examined in a subjective experiment. *Proceedings of Healthy Buildings Syracuse 2009*, paper 233.

Hardy, J. D.; DuBois, E. F. (1938): Basal metabolism, radiation, convection and vaporization at temperatures of 22 to 35 C. *Canad. J. Nutrition* 15, pp 477-97.

Hart, S. G., Staveland, L. E. (1988): Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: P. A. Hancock and N. Meshkati (Eds.) *Human Mental Workload*. Amsterdam: North Holland Press.

Houdas, Y.; Ring, E. F. J. (1982): Human body temperature. Plenum Press, New York.

Iwashita; Tanabe, (2007): Effect of work motivation on the task performance under the different thermal conditions. *Proceedings of Clima Helsinki 2007*, Vol.1, S. 105-112.

Jankisz, E.; Moosbrugger, H. (2008): Planung und Entwicklung von psychologischen Tests und Fragebogen. In: Moosbrugger, H.; Kelava, A. (Hrsg.): *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Springer, Berlin, S. 27–72.

- König, E. (2007):** Aufmerksamkeit und Belastung von Notärzten während des Dienstes. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
Urn:nbn:de:gbv:3-000012094
[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000012094>],
Heruntergeladen 06.08.2011.
- Krumm, S.; Schmidt-Atzert, L. (2009):** Leistungstests im Personalmanagement. Praxis der Personalpsychologie, 19, Hogrefe, Göttingen.
- Lan, L.; Lian, Z.; Pan, L.; Ye, Q. (2009):** Neurobehavioral approach for evaluation of office workers' productivity: The effects of room temperature. Building and Environment 44, 8, pp 1578–1588.
- Lan, L.; Lian, Z. (2009):** Use of neurobehavioral tests to evaluate the effects of indoor environment quality on productivity. Building and Environment 44, 2208-2217.
- Lan, L.; Wargocki, P.; Wyon, D.P.; Lian, Z. (2011):** Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses and human performance. Indoor Air, Article first published online: 18 APR 2011.
- Langkilde, G.; Alexandersen, K.; Wyon, D. P.; Fanger, P. O. (1973):** Mental performance during slight cool or warm discomfort. Archives des Sciences Physiologiques 27 , A511-A518.
- Langkilde, G. (1978):** The influence of the thermal environment on office work. In: Fanger, P. O., Valbjörn, O. (Hrsg.): Indoor Climate. Kopenhagen: Byggeforskningsinstitut.
- Mauderer, V. (1977):** Die Wärmeabgabe des Menschen aus Rechnung und Versuch. Dissertation, Technische Universität München.
- Mochida, T. (1977):** Mean skin temperature weighted with both ratios of heat transfer coefficient and body surface area. Bull. Fac. Engineering, Hokkaido, pp 15-26.
- Merten, T.; Hänsgen, K.-D. (1994):** Konzeption zur Entwicklung einer Computer-version des Aufmerksamkeits-Belastungstest (d2) von R. Brickenkamp für das Leistungsdiagnostische Labor (LEILA), Berlin.
- Nishihara, N.; Yamamoto, Y.; Tanabe, S. (2002):** Effect of thermal environment on productivity evaluated by task performances, fatigue feelings and cerebral blood oxygenation changes. Proceedings of Indoor Air 2002., pp. 828-833.
- Olesen, B. W.; Fanger, P.O. (1973):** The skin temperature distribution for resting man in comfort. Arch. Sci. Physiol. 27, A385-A393.
- Pepler, R. D.; Warner, R. E. (1968):** Temperature and learning: an experimental study. ASHRAE Transactions 74, 211-219.

Prechtl, A. (2004): Moderner Brandschutz: Einfluss von normobarer Hypoxie auf arbeitsmedizinisch relevante Aspekte der kognitiven und psychomotorischen Leistungsfähigkeit. Dissertation, München, Ludwig-Maximilians-Universität, Medizinische Fakultät.

Schädlich, S.; Röttger, I.; Lüttgens, S. (2006): Menschliche Behaglichkeit in Innenräumen und deren Einfluss auf die Produktivität am Arbeitsplatz. FIA News, Forschungsbericht des FGK, FGK Nr. 127 11/06.

Schmidt-Atzert, L.; Krumm, S.; Bühner, M. (2008): Aufmerksamkeitsdiagnostik - Ableitung eines Strukturmodells und systematische Einordnung von Tests; in: Zeitschrift für Neuropsychologie, 19 (2), Huber, Bern, S. 59 – 82.

Schwarzl, I.; Lang, E.; Mursch-Radlgruber, E. (2009): Hängen Hitze und Leistungsfähigkeit zusammen? Ein Projekt an der Schnittstelle Wissenschaft und Bildung. (Endbericht zum Projekt StartClim2004.G, Januar 2005). BOKU-Met Report 6, ISSN 1994-4179 (Print), ISSN 1994-4187 (Online), http://www.boku.ac.at/met/report/BOKU-Met_Report_06_online.pdf, 06.08.2011, Heruntergeladen 06.08.2011.

Schweizer (2006): Leistung und Leistungsdiagnostik. Heidelberg: Springer Medizin.

Tamura T.; Nemoto T.; Togawa T. (1980): Estimation of regional blood flow by deep tissue temperature. Proc. 28.Conf.Physiol Sciences, Budapest.

Ueki M.; Tanabe S.; Nishihara N.; Haneda M.; Kawamura A.; Nishikawa M. (2007): Effect of moderately hot environment on productivity and fatigue evaluated by subjective experiment of long time exposure, Proceedings of Clima Helsinki 2007, Vol.1, pp. 207-214.

Urlaub, S. (2009): Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit bei Büroarbeit. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik/Fraunhofer-Institute für Bauphysik Holzkirchen.

Urlaub, S.; Hellwig, R. T.; Treeck, C. van; Sedlbauer, K. (2010): Möglichkeiten und Grenzen bei der Modellierung von Einflussfaktoren auf die menschliche Leistungsfähigkeit. Bauphysik 32, Nr. 6, S. 373-379.

Wargocki, P. (1998): Human Perception, Productivity and Symptoms Related to Indoor Air Quality. PhD thesis, Technical University of Denmark.

Wargocki, P.; Dalewski, M.; Haneda, M. (2009): Physiological effects of thermal environment on office work. Proceedings of Healthy Buildings Syracuse 2009, paper 104.

Werner, J. (1981): Control aspects of human temperature regulation. Automatica 17, pp 351-62.

Westhoff K. (1989): Übungsabhängigkeit von Leistungen in Konzentrationstests. Diagnostica; 35, 2, S. 122- 130.

Westhoff K.; Dewald D. (1990): Effekte der Übung in der Bearbeitung von Konzentrationstests; Diagnostica; 36, 1, S. 1-15.

Willem, H. C.; Tham, K. W. (2005): Some effects of air temperature on skin temperature, thermal sensation and mental performance of tropically acclimatized subjects. Proceedings Indoor Air Beijing 2005, 1, S. 383-388.

Winslow, C. E. A.; Herrington, L. P. (1949): Temperature and human life. Princeton University Press, Princeton.