

Untersuchungsmethodik zur operatorbezogenen Auslegung der Klimabedingungen in Leitwarten

Der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und
Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen
Universität Cottbus vorgelegte Dissertation zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs

von
Dipl.-Ing. Sven Binkowski
geboren am 22. August 1977 in Cottbus

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Bernd Viehweger
Gutachterin: PD Dr. paed. Dr.-Ing. habil. Annette Hoppe
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger

Eröffnung des Promotionsverfahrens: 17.11.2010
Mündliche Prüfung: 07.12.2010

Cottbus, Februar 2011



Forschungsberichte

Arbeitswissenschaft/ Arbeitspsychologie

Herausgeberin: PD Dr. paed. Dr.-Ing. habil. Annette Hoppe

Sven Binkowski

***Untersuchungsmethodik zur
operatorbezogenen Auslegung
der Klimabedingungen in Leitwarten***

**Shaker Verlag
Aachen 2011**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Cottbus, BTU, Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9959-0

ISSN 1869-1501

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Mit dieser Arbeit liegt ein zweiter Band der Schriftenreihe Forschungsberichte Arbeitswissenschaft/ Arbeitspsychologie vor. Ein erklärtes Ziel dieser Veröffentlichungen ist es, interessante wissenschaftliche Arbeiten mit ihren Ergebnissen für Lehre und Forschung zugänglich zu machen und breite Diskussionen zu wichtigen Themen, bis in die Praxis hinein, anzustoßen. Wobei es nicht allein um die Darstellung neuer theoretischer Erkenntnisse aus Arbeiten von universitärer Forschung gehen soll, vielmehr werden in dieser Reihe praxisbezogen wissenschaftliche Arbeiten mit nachhaltigen Gestaltungsmöglichkeiten für verschiedene Arbeits- und Lebensbereiche vorgestellt.

Die rasante Entwicklung moderner Technologien und die Bereitschaft zum schnellen Einsatz in allen Lebensbereichen eröffnen nicht nur neue Perspektiven für Produktionsprozesse, sondern schaffen auch neue Möglichkeiten für Anwender und Nutzer zum vermehrten Einsatz von Technik. Dies geschieht in der Freizeit, der Arbeitswelt und in der öffentlichen gesellschaftlichen Lebensumwelt. Es entstehen neue, hochwertig technisch eingerichtete Wohnbereiche, technisch ausgestattete öffentliche Einrichtungen und hochkomplexe technische Arbeitsplätze. So verändern neue Technologien nicht nur Arbeitsinhalte, Arbeitsorganisationsabläufe und Arbeitsprozesse, auch die Kommunikation, die Interaktion und die Verantwortung für Handlungen sind ständiger Veränderung unterworfen. Diese Entwicklung nimmt atemberaubendes Tempo an. Neben vielen positiven Effekten, wie z.B. Arbeitserleichterung, globale Kommunikation, schnelle Ausführung von Handlungen und Multifunktionalität, werden Entscheidungs- und Lernvorgänge vom Bediener und Nutzer moderner Technik in neuer Qualität abverlangt und führen nicht selten zu Anpassungsproblemen und Unzufriedenheit. Das äußert sich oft in Überforderungssymptomen, Gereiztheit, nervösen Fehlhandlungen bis hin zu Verweigerungshaltungen oder körperlichem Unwohlsein und führt deshalb zur Leistungsminderung oder krankheitsbedingtem Arbeitsausfall. Viele dieser Reaktionen sind Symptome für Beanspruchungen im Zusammenhang mit der Arbeit und der Arbeitsumgebung. Die Aufgabe der Arbeitswissenschaft ist es, nicht nur Technik und die dazugehörigen Arbeitsbedingungen weiter zu entwickeln, sondern in Verantwortung für die Gesellschaft auch Fragen zu Risiken zu stellen, um prospektiv sinnvolle Hinweise zu Gestaltungsprozessen zu geben. Deshalb beschäftigen sich schon seit Jahren weltweit Untersuchungen aus unterschiedlichen Fachrichtungen und unter Einsatz

differenzierter Methoden mit Projekten, die die optimale Gestaltung von Arbeits- und Lebensräumen in das Zentrum von Forschung stellen. An der BTU Cottbus arbeitet ein leistungsfähiges Team eng mit Praxispartnern zusammen, die gewonnene Erkenntnisse mit nationalen und internationalen Wissenschaftlern fachübergreifend diskutieren.

Die Arbeit Untersuchungsmethodik zur operatorbezogenen Auslegung der Klimabedingungen in Leitwarten ist ein ausgezeichnetes Beispiel für den Erkenntnisgewinn durch die enge Verknüpfung von arbeitswissenschaftlichen Untersuchungsmethoden zur Beantwortung praxisrelevanter Forschungsfragen. Der Autor untersucht gezielt messtechnisch die thermische Gestaltung von Operatorarbeitsplätzen in Leitwarten von Kraftwerken. Dabei diskutiert er wissenschaftlich den Zusammenhang zwischen dem thermischen Empfinden und der Arbeitszufriedenheit. Diese Betrachtung macht eine Prüfung der aktuellen gesetzlichen Vorgaben und technischen Normen zur ergonomischen Gestaltung von Leitzentralen und der Bewertung der thermischen Behaglichkeit für den Autor möglich. Aus der Auswertung einer eigenen Praxisstudie und des aktuellen Standes der Wissenschaft zieht er Schlussfolgerungen zur Eignung der Vorgaben und vergleicht Behaglichkeitsmodelle zur Vorhersage. Die Arbeit schließt mit einem Fazit, in dem der Autor einige mögliche Gestaltungsempfehlungen aufzeigt und auf weiteren notwendigen Forschungsbedarf hinweist.

„Je mehr wir lernen, desto mehr neue Dinge entdecken wir immer wieder.
Es bedeutet auch, dass es keine Grenze für Entdeckungen und
Erkenntnisse gibt.“

Paul M. Romer, amerikanischer Wirtschaftswissenschaftler geb. 1957

Dem Buch als Geleit und dem Autor zur Anerkennung.

Annette Hoppe

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis	17
Formelverzeichnis	19
1 Einleitung	21
1.1 Die Bedeutung der klimatischen Arbeitsgestaltung	21
1.2 Eingrenzung des Themas	23
1.3 Zielstellung und Vorgehensweise	26
2 Stand der Wissenschaft	29
2.1 Der Operator im Arbeitssystem Leitwarte	29
2.1.1 Die Tätigkeit des Operators	31
2.1.2 Kategorien zur Bewertung von Arbeitsbedingungen	33
2.1.3 Die Abbildung der Belastungsfaktoren auf die Zufriedenheit des arbeitenden Menschen	37
2.1.3.1 Der Begriff der Arbeitszufriedenheit und Erklärungsmodelle	37
2.1.3.2 Bedürfnisse und Regulationsüberforderungen	41
2.1.3.3 Die Zufriedenheit aus Sicht der Wirtschaftswissenschaften	46
2.2 Klimatische Bedingungen an normaltemperierten Arbeitsplätzen	49
2.2.1 Grundlegende Klimafaktoren und Wärmeübertragungsarten	49
2.2.2 Bedeutung der thermischen Umgebung für den Menschen	51
2.2.3 Die Regulation des menschlichen Wärmehaushalts	55
2.2.3.1 Metabolische Aktivität	59

2.2.3.2	Bekleidungsisolaton	61
2.2.3.3	Temperatur	62
2.2.3.4	Luftgeschwindigkeit	66
2.2.3.5	Luftfeuchte	70
2.2.4	Thermoregulationsmodelle	72
2.2.5	Klimabewertung für Personengruppen	75
2.2.6	Gebäudespezifische Analyseansätze und klimatische Vorgaben	84
2.3	Bildung von Arbeitshypothesen	87
3	Methodische Konzeption	91
3.1	Ableitung von Teilhypothesen	92
3.2	Methodisches Vorgehen für Messungen	95
3.2.1	Messgeräte und -verfahren	95
3.2.2	Messaufbau	97
3.2.3	Systematische Beobachtungen während der Messungen	100
3.2.4	Prinzip der Auswertung	102
3.3	Methodisches Vorgehen zur Befragung	103
3.3.1	Entwicklung von Items	104
3.3.2	Festlegung von Bewertungsskalen	107
3.3.3	Prinzip der Auswertung	112
3.4	Überblick zur Methodik	114
4	Auswertung der Ergebnisse	115
4.1	Auswertung der Messdaten	115
4.1.1	Ergebnisse aus Beobachtungen	115
4.1.2	Auswertung von Einzelmessungen	118
4.1.3	Auswertung von Langzeitmessungen	121
4.2	Auswertung der Befragung	123
4.2.1	Datenauswertung zur Prüfung der Hypothese 1 - Zu- sammenhänge zwischen Probandenbewertung und Zu- friedenheit	125
4.2.2	Datenauswertung zur Prüfung der Hypothese 2 - Ana- lyse der Befragungsdaten hinsichtlich der Abhängigkeit von individuellen Merkmalen	131
4.2.3	Datenauswertung zur Prüfung der Hypothese 3 - Ver- gleich von Probanden- und Expertenbewertung	132
4.2.4	Datenauswertung zur Prüfung der Hypothese 4 - Ver- gleich von Probandenzufriedenheit und Expertenbewer- tung	136

4.2.5 Datenauswertung zur Prüfung der Hypothese 5 - Gegenüberstellung der Vorhersagemodelle zur Klimazufriedenheit	138
4.3 Methodenreflektion	143
4.4 Schlussfolgerungen und Ausblicke auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse	148
4.4.1 Allgemeine Anforderungen bei der Klimagestaltung . . .	148
4.4.2 Zufriedenheit und Unzufriedenheit mit der Klimasituation	149
4.4.3 Wahrnehmbarkeit der Klimasituation	151
4.4.4 Regulationsmöglichkeiten zur Bedürfnisbefriedigung . . .	153
4.4.5 Empfehlungen zur Parametrisierung des physikalischen Klimas in Leitwarten	155
5 Zusammenfassung und Fazit	159
Literaturverzeichnis	164
6 Anhang	183
6.1 Klimatische Vorgaben für normaltemperierte Arbeitsplätze . . .	183
6.2 Klassen der thermischen Behaglichkeit und weitere relevante Normen	185
6.3 Beobachtungsbogen	186
6.4 Metabolische Aktivität und Bekleidungsisololation	189
6.5 Übersicht der gemessenen Werte von Standorten, Messplätzen und Messdurchläufen	191
6.6 Übersicht über die Messwerte und berechneten PMVs	196
6.7 Bewertungskategorien für die Klimafaktoren und -summenmaße	198
6.8 Gegenüberstellung der Klimafaktoren und Befragungssiteme . .	199

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vorgehensweise bei der Gestaltung von Arbeitssystemen . . .	25
2.1	Trichtermodell des Belastungs- und Beanspruchungskonzeptes für eine Auswahl relevanter Belastungsfaktoren im Arbeitssystem 'Leitwarte'	30
2.2	Die zeitliche Entwicklung der Automatisierung von Überwachungs- und Steuerungstätigkeiten	31
2.3	Kombinierte Darstellung des Modells von BRUGGEMANN mit den Ansätzen von NEUBERGER	39
2.4	Darstellung der Belastungswirkung erweitert um den Betrachtungsbereich der Umgebungsfaktoren denen der Bediener exponiert ist	42
2.5	Einteilung der Regulationsbehinderungen nach LEITNER . . .	43
2.6	Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung von Einflussmöglichkeiten auf das Innenraumklima in Abhängigkeit der Personenzahl im Arbeitsraum	45
2.7	Modifiziertes Modell der Dienstleistungsqualität	47
2.8	Modell der grundlegenden Thermoregulation im menschlichen Körper	56
2.9	Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe durch die Ausgleichsmechanismen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur beim unbedeckten ruhenden Menschen	59
2.10	Behaglichkeitsbereich in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Lufttemperatur und relativer Feuchte	65
2.11	Verteilung der Kaltrezeptoren in der Haut	67
2.12	Der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Entstehung biologischer und chemischer Einflussfaktoren in Innenräumen . .	73
2.13	Anpassungsmöglichkeiten an das Innenraumklima	74
2.14	Darstellung der beiden Funktionen zur Vorhersage der thermisch unzufriedenen Personen anhand der PMV-Skala	83
2.15	Anpassungsmöglichkeiten an das Innenraumklima	84

2.16	Bestimmung des Gebäudetyps in Abhängigkeit der Nutzerkontrolle	85
2.17	Zusammenhänge der Forschungen zur thermischen Behaglichkeit	88
3.1	Schematische Darstellung zum Ablauf einer korrektiven Analyse von Leitwarten	91
3.2	Gründe für thermische Unzufriedenheit aus der CBE IEQ Erhebung	101
3.3	Aufbau der Methodik zur Hypothesenprüfung	114
4.1	Vergleich der vier Langzeitmessungen einschließlich der Außenklimaangaben	122
4.2	Korrelationsanalyse der Langzeit-Temperaturaufnahmen . . .	122
4.3	Korrelationsanalyse der Langzeit-Feuchtheitsaufnahmen . .	122
4.4	Korrelationsanalyse der Items zur Bewertung der wahrgenommenen Höhe der einzelnen Klimafaktoren mit den angegebenen Zufriedenheitsvoten	126
4.5	Prinzip der Umformung von einer sechsstufigen zu einer dreistufigen Bewertungsskala	127
4.6	Korrelationsanalyse der Items zur Bewertung der wahrgenommenen Höhe der einzelnen Klimafaktoren (umkodiert) mit den angegebenen Zufriedenheitsvoten	128
4.7	Die Streuung der Zufriedenheitsangaben in Abhängigkeit von der Bewertung der Luftgeschwindigkeit	129
4.8	Korrelationsanalyse der Ausprägungen der Klimafaktoren untereinander	130
4.9	Korrelationsanalyse der Zufriedenheit mit den Klimafaktoren untereinander	131
4.10	Korrelationsanalyse der tatsächlichen Temperaturbedingungen mit den Angaben aus dem Fragebogen	134
4.11	Darstellung der Streuung der Fragebogenantworten im Vergleich mit den jeweiligen mittleren Raumtemperaturen	135
4.12	Vergleich der Zufriedenheitsangaben mit den mittleren Temperaturen	137
4.13	Vergleich der Zufriedenheitsangaben mit der mittleren relativen Feuchte	137
4.14	Verteilung der PPD-Werte für leichte und mittlere Bekleidung anhand der PPD-Kurven in den Leitwarten A bis K	141

4.15	Gegenüberstellung der berechneten Zufriedenheitswerte nach den Modellen von FANGER und von MAYER im Vergleich mit den Zufriedenheitsaussagen aus der Befragung	142
6.1	Gegenüberstellung der Mittelwerte der Klimafaktoren und Mediane der Befragungssitems	200

Tabellenverzeichnis

2.1	Metabolische und tätigkeitsabhängige Aktivität	61
2.2	Minimale und maximale PMV-Werte nach ISO 11064-6	89
3.1	Angaben zu den Messfühlern, deren Messbereiche und Genauigkeiten	96
3.2	Übersicht der formulierten Items für die Befragung zur Arbeitsumgebung	106
4.1	Typische Bekleidungskombinationen in Leitwarten mit den zugeordneten Isolationswerten	117
4.2	Übersicht der Gesamtpopulationen und statistisch verwertbaren Stichprobenrückläufe der untersuchten Arbeitssysteme	123
4.3	Übersicht der soziografischen Struktur der Befragung	124
4.4	Verteilung der Unzufriedenheitsklassen in den einzelnen Leitwarten (in Prozent)	138
4.5	Bestimmung der optimalen Temperatur anhand der PPD von FANGER und MAYER (Annahme: die Strahlungstemperatur entspricht der Lufttemperatur)	139
6.1	Überblick der Klimavorgaben mit Wertevorgaben für Bewertungen von Klimasituationen im Behaglichkeitsbereich	183
6.2	Klassenzuordnung für Anforderungen an die thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730:2005	185
6.3	Überblick über weitere relevante Normen für Bewertungen von Klimasituationen im Behaglichkeitsbereich	185
6.4	Übersicht über die Messwerte und berechneten PMVs für die untersuchten Arbeitssysteme	197
6.5	Bildung von qualitativen Bewertungskategorien für die Klimafaktoren und -summenmaße	198

Abkürzungsverzeichnis

ArbSchG	Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit
ASHRAE	The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASR	Arbeitsstätten-Richtlinien
ATG	adaptive Temperaturgrenze
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CBE	Center for the Built Environment
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DR	Draught Risk
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
GTO	Weighted Temperature Exceeding Hours
IEQ	Indoor Environmental Quality
ISO	International Organization for Standardization/ Internationale Organisation für Normung
PD	Vorhersage der Unzufriedenheit aufgrund von Zugluft
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
prEN	europäischer Norm-Entwurf
SPSS	Statistik- und Analyse-Software der SPSS Inc.
UTCI	Universal Thermal Climate Index
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WBGT	Wet Bulb Globe Temperature

Formelverzeichnis

A_{sk}	... (skin) Hautoberfläche
α_K	... konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
C	... Energieaustausch durch Konvektion
e	... Wasserdampfdruck
e_W	... Wasserdampfsättigungsdruck
E	... evaporativer Energieaustausch
f_{cl}	... (cloth) Oberflächenverhältnis bekleideter/ unbekleideter Körper
h	... Körperhöhe
H	... erzeugte Wärmeenergie des Körpers
I_{cl}	... (cloth) Bekleidungsisolationswert
K	... Energieaustausch durch Wärmeleitung
L	... Wärmebelastung des Körpers
m	... Gewicht
M	... Metabolische Energieumsatz des Körpers
M_{shiv}	... (shivering) Wärmeproduktion durch Kältezittern
met	... metabolisches Äquivalent
p_a	... Dampfpartialdruck
PD_{resp}	... (respiration) Unzufriedenheit aufgrund verringerter Atemwegskühlung
rF	... relative Feuchte
R	... Energieaustausch durch Wärmestrahlung

S	...	Wärmekapazität
SW	...	Schweißrate
T_a	...	(air) Umgebungstemperatur
T_c	...	(core) Körperkerntemperatur
T_{cl}	...	(cloth) Oberflächentemperatur der Bekleidung
T_d	...	(dry) Trockentemperatur
T_{op}	...	Operativtemperatur
T_{out}	...	Außentemperatur
T_r	...	(radiation) mittlere Strahlungstemperatur
T_{sk}	...	(skin) Mittlere Hauttemperatur
T_w	...	(wet-bulb) Feuchttemperatur
T_u	...	Turbulenzintensität
v_a	...	(air) Luftgeschwindigkeit
W	...	leistungsabhängiger mechanischer Energieumsatz