

Bewertungsmaßstäbe für den Klimazustand in Fahrerkabinen

Von Jan Janssen, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

DK 631.372:628.8:628.86

Da landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen in zunehmendem Maße mit geschlossenen klimatisierbaren Fahrerkabinen ausgerüstet werden, wächst auch das Interesse an einer verlässlichen Klimabewertung. Zur Bewertung der klimatischen Bedingungen an industriellen Arbeitsplätzen sind von der International Standard Organisation (ISO) vor kurzem zwei Kriterien vorgeschlagen worden, die im wesentlichen aus den objektiv meßbaren Klimaeinflußgrößen bestimmt werden können. Die Anwendbarkeit dieser beiden Bewertungsmaßstäbe für das Klima am Arbeitsplatz "Fahrerkabine" wird über den Vergleich mit subjektiven Angaben von Versuchspersonen untersucht. Beide Kriterien stimmen relativ gut mit der Bewertung aufgrund des subjektiven Empfindens überein und erlauben somit eine recht zuverlässige Aussage über die zu erwartende Klimabelastung in Kabinen.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Generelles Ziel der Klimatisierung von Wohn- oder Arbeitsräumen ist die Schaffung eines für den Menschen angenehmen Klimazustandes, unabhängig von den äußeren Klimabedingungen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen verlässliche Kriterien vorliegen, die nach Möglichkeit bereits im voraus, d.h. bevor der Mensch dem Klima ausgesetzt ist, zumindest angenähert exakte Aussagen über die Wirkung des zu erwartenden Klimas auf den Menschen erlauben.

National und international wird deshalb in jüngster Zeit intensiv über Richtlinien und Normen für die Bewertung des Klimas an Arbeitsplätzen beraten. Während diese Beratungen national ihren Niederschlag vor allem in der Norm DIN 33 403 "Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung" [1] fanden, sind international durch die ISO zwei Standards verabschiedet worden, mit denen die Bewertung eines gemäßigten Klimas durch den PMV-Index (Predicted Mean Vote) [2] sowie die eines Klimas mit der Gefahr von Hitzestress anhand des WBGT-Index (Wet Bulb Globe Temperature) [3] festgelegt wird.

Durch die zunehmende Ausrüstung landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen mit geschlossenen klimatisierbaren Fahrerkabinen wächst auch hier das Interesse an einer verlässlichen Bewertung der auftretenden Klimabedingungen. Während in der DIN-Norm vornehmlich für Hitzearbeiten an verschiedenen Arbeitsplätzen Angaben zu den einzelnen Klima-Einflußgrößen gemacht werden, definieren die ISO-Standards als Bewertungskriterien sogenannte Klimaausmaßmaße, die den gleichzeitigen Einfluß mehrerer Klimagrößen berücksichtigen. In dieser Arbeit wird nun untersucht, ob

die von der ISO vorgeschlagenen Klimaausmaßmaße, PMV- bzw. WBGT-Index, für die Klimabewertung in Fahrerkabinen anwendbar und geeignet sind. Dazu werden zunächst beide Indizes ausführlich beschrieben. Anschließend werden die aus den physikalischen Klimaeinflußgrößen berechneten Indizes mit dem subjektiven Urteil verschiedener Versuchspersonen über das jeweilige Klima verglichen. Dabei wird auch der Frage nachgegangen, ob noch eine relativ zuverlässige Bewertung der Klimabedingungen möglich ist, wenn die Anzahl der Meßorte für die Erfassung der Klima-Einflußgrößen eingeschränkt wird.

2. Klimabewertung mit Klimaausmaßmaßen

Die Bewertung klimatischer Bedingungen hat davon auszugehen, daß gleichzeitig zumindest die in **Tafel 1** genannten Einflußgrößen die thermischen Vorgänge im und um den menschlichen Körper bestimmen.

Die indirekte Klimabewertung beruht auf der Messung der klimatischen Einflußgrößen und der anschließenden Bewertung unter Berücksichtigung der sonstigen Einflußgrößen anhand eines Beurteilungsmaßstabes. Die in dieser Arbeit betrachteten Indizes sind sogenannte Klimaausmaßmaße, die die möglichen Kombinationen der Klimagrößen auf einer Skala abbilden, so daß mit einem einzigen Zahlenwert die physiologische Beanspruchung des Menschen wiedergegeben werden kann. Gegenüber einer direkten Klimabewertung über das subjektive Empfinden, die den Menschen selbst als "Meßinstrument" benutzt, hat die indirekte Beurteilung den Vorteil, daß sie objektiv meßbare physikalische Einflußgrößen verwendet und Voraussagen über die Klimawirkungen ermöglicht. Nachteilig ist jedoch vor allem, daß die indirekte Bewertung nicht in allen Fällen dem subjektiven Empfinden entspricht.

A Klimaeinflußgrößen

1. Lufttemperatur
2. Luftgeschwindigkeit
3. Luftfeuchtigkeit
4. Strahlungstemperatur der Umgebung

B Sonstige Einflußgrößen

5. Körperliche Tätigkeit (Wärmebildung im Körper)
6. Isolation der Bekleidung

*) Dipl.-Ing. J. Janssen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

Tafel 1. Wesentliche Einflußgrößen auf das thermische Empfinden des Menschen.

2.1 PMV-Index [2, 4, 5]

Der PMV-Index basiert auf der "allgemeinen Behaglichkeitsgleichung" von Fanger [4]. Die Behaglichkeitsgleichung beschreibt Kombinationen der vier in Tafel 1 aufgeführten klimatischen Einflußgrößen, bei denen die von der Bekleidung abhängige Wärmeabgabe des Körpers genauso groß ist wie die von der körperlichen Tätigkeit abhängige Wärmebildung und keine wesentliche Änderung der Körper-Kerntemperatur eintritt. Sind die vier Klimagrößen sowie Tätigkeit und Bekleidung bekannt, kann daher mit der Behaglichkeitsgleichung ([8], dort Abschn. 2.2) geprüft werden, ob der vorliegende Klimazustand von einer großen Gruppe von Personen im Mittel als behaglich empfunden wird. Bei Abweichen der thermischen Umgebungsbedingungen vom behaglichen Zustand läßt sich der Grad an Unbehagen mit Hilfe des PMV-Index quantifizieren.

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & (0,303 e^{-0,036M} + 0,028) \left\{ (M - W) - \right. \\ & - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99 (M - W) - p_a] - \\ & - 0,42 [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - \\ & - 0,0014 M (34 - \vartheta_L) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{Kl} \cdot \\ & \cdot [(\vartheta_{Kl} + 273)^4 - (\vartheta_{mS} + 273)^4] - \\ & \left. - f_{Kl} a_K (\vartheta_{Kl} - \vartheta_L) \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned} \vartheta_{Kl} = & 35,7 - 0,028 (M - W) - I_{Kl} \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} f_{Kl} \right. \\ & \left. (\vartheta_{Kl} + 273)^4 - (\vartheta_{mS} + 273)^4 + f_{Kl} a_K (\vartheta_{Kl} - \vartheta_L) \right\} \\ a_{Kl} = & 2,38 (\vartheta_{Kl} - \vartheta_L)^{0,25} \text{ für } 2,38 (\vartheta_{Kl} - \vartheta_L)^{0,25} \geq 12,1 \sqrt{w_L} \\ a_{Kl} = & 12,1 \sqrt{w_L} \quad \text{für } 2,38 (\vartheta_{Kl} - \vartheta_L)^{0,25} < 12,1 \sqrt{w_L} \\ f_{Kl} = & 1,00 + 1,290 I_{Kl} \quad \text{für } I_{Kl} \leq 0,078 \text{ m}^2\text{K/W} \\ f_{Kl} = & 1,05 + 0,645 I_{Kl} \quad \text{für } I_{Kl} > 0,078 \text{ m}^2\text{K/W} \end{aligned}$$

Darin bedeutet

- f_{Kl} Verhältnis der Oberfläche der Kleidung und Oberfläche des Körpers (Vergrößerungsfaktor)
- I_{Kl} Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung ($\text{m}^2\text{K/W}$)
- M Wärmebildung im Körper (W/m^2)
- p_a Wasserdampfdruck der Luft (Pa)
- W Mechanische Leistung des Menschen (W/m^2)
- w_L Luftgeschwindigkeit (m/s)
- a_K konvektiver Wärmeübergangskoeffizient ($\text{W/m}^2\text{K}$)
- ϑ_{Kl} Oberflächentemperatur der Kleidung ($^{\circ}\text{C}$)
- ϑ_L Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- ϑ_{mS} mittlere Strahlungstemperatur ($^{\circ}\text{C}$).

Durch Einsetzen der Werte für die sechs Einflußgrößen nach Tafel 1 erhält man Zahlenwerte zwischen -3 und +3, wobei "0" die neutralen, behaglichen Bedingungen charakterisiert. Die Zuordnung von PMV-Index-Werten und dem subjektiven thermischen Empfinden gibt Tafel 2. Ein positiver Wert beschreibt die Abweichungen vom Behaglichen zur warmen Seite und ein negativer die zur kalten Seite hin.

Im ISO-Standard 7730 [2] wird empfohlen, den PMV-Index nur bei Skalenwerten zwischen -2 und +2 zur Bewertung der Klimabedingungen heranzuziehen. Außerdem sollen die unabhängigen Variablen folgende Werte haben

PMV-Index	subjektives thermisches Empfinden
+ 3	heiß (+ 3)
+ 2	warm (+ 2)
+ 1	etwas warm (+ 1)
0	neutral (0)
- 1	etwas kühl (- 1)
- 2	kühl (- 2)
- 3	kalt (- 3)

Tafel 2. Werte des PMV-Index und subjektives thermisches Empfinden.

$$M = 46 - 232 \text{ W/m}^2 \quad (0,8 - 4 \text{ MET})$$

$$I_{Kl} = 0 - 0,31 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (0 - 2 \text{ clo})$$

$$\vartheta_L = 10 - 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\vartheta_{mS} = 10 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$w_L = 0 - 1 \text{ m/s}$$

2.2 WBGT-Index [3, 6, 7]

Klimazustände, die zu einer Wärmebelastung des Menschen führen, sollen nach Vorschlag der ISO mit dem WBGT-Index bewertet werden. Dieser in den sechziger Jahren ursprünglich für die Streitkräfte der USA entwickelte Index geht von folgender Überlegung aus: Mit zunehmender Wärmebelastung wird die Schweißabgabe des Menschen zum wichtigsten Regulativ für die Erhaltung der Körpertemperatur. Es liegt deshalb nahe, die Verdunstung von Schweiß mit einem geeigneten Meßgeber nachzuahmen. Im einfachsten Fall wird ein normales Glasthermometer mit einem nasen Baumwollstrumpf überzogen, in der Annahme, daß die Abkühlung des Thermometers infolge der Wasserverdunstung der Kühlung der Hautoberfläche des menschlichen Körpers durch die Schweißverdunstung entspricht.

Die Wärmeabgabe des Körpers durch Strahlung wird mit einem Globethermometer berücksichtigt. Das Globethermometer ist eine außen matt geschwärzte Kupferhohlkugel mit einem Standardinnendurchmesser von etwa 15 cm, in deren Mittelpunkt sich die Spitze eines Quecksilberthermometers befindet. Die damit gemessene Globetemperatur wird sowohl von der Lufttemperatur als auch von der Luftgeschwindigkeit beeinflusst.

Zur Bestimmung des WBGT-Index wird nun die "natürliche" Feuchttemperatur ϑ_{nF} eines nicht zwangsbelüfteten, der Strahlung ausgesetzten "nassen" Thermometers und die Globetemperatur ϑ_G verknüpft nach der Beziehung:

$$\text{WBGT} = 0,7 \vartheta_{nF} + 0,3 \vartheta_G \quad (2)$$

Bei direkter Sonneneinstrahlung wird mit Gl. (2) der Strahlungseinfluß durch die Globetemperatur leicht überbewertet. Für diesen Fall ist daher eine Korrektur mit der Lufttemperatur ϑ_L vorgesehen:

$$\text{WBGT} = 0,7 \vartheta_{nF} + 0,2 \vartheta_G + 0,1 \vartheta_L \quad (3)$$

Die Einfachheit dieses Klimasummenmaßes (beispielsweise kein Messen der Luftgeschwindigkeit) und seine erfolgreiche Anwendung haben dazu geführt, daß es in den USA bereits seit vielen Jahren als Index für die Wärmebelastung angewendet wird. Infolgedessen liegen dort inzwischen auch relativ genaue Angaben über zulässige Grenzwerte des WBGT-Index in Abhängigkeit vom Energieumsatz des Menschen vor, die z.T. von der ISO übernommen wurden, **Tafel 3**. Wie aus **Tafel 3** und den Gln. (2) bzw. (3) ersichtlich ist, hat der WBGT-Index die Dimension einer Temperatur.

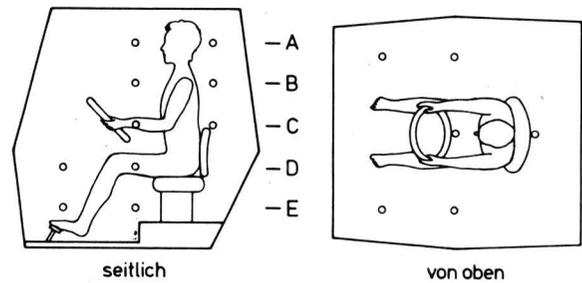


Bild 1. Lage der Meßorte in den Meßebenen A bis E zur Erfassung von Klimadaten im Aufenthaltsbereich des Fahrers.

Der ungleichförmige Klimazustand in der Kabine führt natürlich auch zu örtlich unterschiedlichen Globetemperaturen [11]. Wegen der großen Zeitkonstanten des Meßgerätes mußte jedoch davon abgesehen werden, parallel zur Lufttemperatur und -geschwindigkeit an jedem Meßort auch die Globetemperatur zu ermitteln. Deshalb wurde als repräsentative Größe die Globetemperatur etwa in Kopfposition gemessen. Die mittlere Strahlungstemperatur zur Ermittlung des PMV-Index wird aus der Globetemperatur errechnet, wie in Anhang A erläutert. Bei der Luftfeuchtigkeit lagen die örtlichen Unterschiede innerhalb der Meßgenauigkeit, so daß hierfür eine Messung an einem Ort ausreichte.

Als Zuluftöffnungen wurden außer den serienmäßigen Zuluftzuführungen der Kabine noch der Schlitzauslaß und die Lochdecke eingesetzt, **Bild 2**. Beim Schlitzauslaß waren zwei Varianten einbezogen. Im ersten Fall bilden die vier Schlitzlöcher in der Decke, wie in **Bild 2** dargestellt, gleichsam die vier Seiten eines Quadrates parallel zu den Kabinenwänden. Im zweiten Fall wurde die Zuluft nur über die beiden Schlitzlöcher oberhalb der Vorder- bzw. Rückwand der Kabine zugeführt.

Kategorie und Art der körperlichen Tätigkeit	Wärmebildung im Körper M		WBGT-Grenzwert nicht			
	oberflächenbezogen W/m ²	für 1,8 m ² Oberfläche W	hitzeaklimat. Personen °C	hitzeaklimat. Personen °C	Luftbewegung spürb. nicht spürb.	Luftbewegung spürb. nicht spürb.
0 Ruhe	<65	<117	33	32		
1 z.B. leichte Holzbearbeitung	65–130	117–234	30	29		
2 z.B. Arm- und Beinarbeit	130–200	234–360	28	26		
3 intensive Arm- und Rumpfarbeit	200–260	360–468	26	25	23	22
4 sehr schwere Tätigkeit	>260	>468	25	23	20	18

Tafel 3. Grenzwerte für den WBGT-Index bei unterschiedlicher Schwere der körperlichen Tätigkeit; nach ISO 7243 [3].

3. Ausgangsdaten für die Klimabewertung

Der in diesem Bericht vorgenommene Vergleich zwischen der direkten und indirekten Klimabewertung basiert auf Untersuchungen, die im Arbeitsplatzbelastungssimulator der FAL mit handelsüblichen Fahrerkabinen durchgeführt wurden. In der ersten Versuchsreihe wurden für verschiedene Zuluftzuführungen und Zuluftbedingungen die physikalischen Einflußgrößen im Aufenthaltsbereich des Fahrers gemessen und ein mittlerer PMV-Index in der Kabine ermittelt [8]. In einer zweiten Versuchsreihe erfolgte dann für einige anhand der ersten Versuchsreihe ausgewählte Versuche eine subjektive Bewertung des Klimazustandes durch mehrere Versuchspersonen [9]. Da eine ausführliche Versuchsbeschreibung sowohl in [8] als auch in [9] gegeben ist, dürfte hier ein kurzer Abriss der Versuchsdurchführung, soweit er zum Verständnis notwendig ist, genügen.

Aufgrund des geringen Raumvolumens, aber großer Zuluftvolumenströme differieren Lufttemperatur und -geschwindigkeit in Kabinen normalerweise örtlich sehr stark. *Hosler* [10] schlägt deshalb für die Klimabewertung die Ermittlung der Lufttemperatur an 10 Meßorten in drei verschiedenen Meßebenen vor.

In Erweiterung dieses Vorschlages wurden bei der ersten Versuchsreihe Luftgeschwindigkeit und -temperatur an jeweils mehreren Meßorten in fünf verschiedenen Meßebenen ermittelt. **Bild 1** gibt Hinweise auf die Lage der Meßebenen: A in Kopf-, B in Schulter- und C in Hüfthöhe, Meßebene D liegt in Knie- und E etwa in Knöchelhöhe. Die zur Berechnung des mittleren PMV-Index herangezogenen Meßorte befinden sich dabei gleichsam auf einer Hüllfläche um den Aufenthaltsbereich des Fahrers.

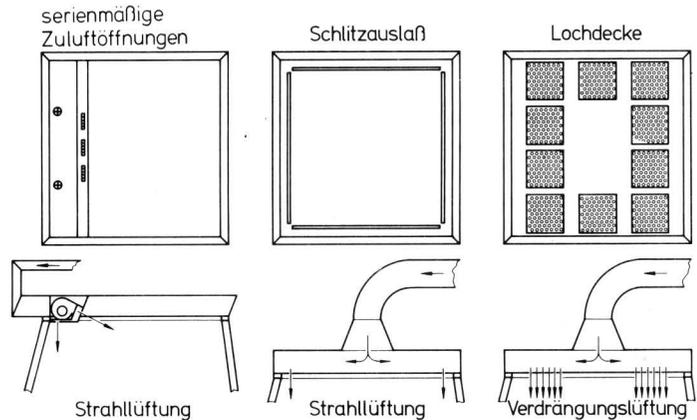


Bild 2. Schematische Darstellung der untersuchten Zuluftzuführungen.

Bei sonst gleichen Randbedingungen erfolgte in der zweiten Versuchsreihe eine subjektive Bewertung des Klimazustandes durch insgesamt 6 Versuchspersonen, die sich 30 Minuten lang in der Kabine aufhielten und dabei mit einer vorgegebenen Bekleidung eine mechanische Leistung von ca. 170 W erbrachten [9]. Um den Umfang dieser Versuchsreihe in Grenzen zu halten, mußte von vornherein auf jene Versuche verzichtet werden, bei denen aufgrund der ersten Versuchsreihe "unangenehme" bis "unerträgliche" Klimazustände vorherzusehen waren. Während des Versuches war das subjektive thermische Empfinden mehrmals auf einer 7 Stufen umfassenden Bewertungsskala (siehe rechts in **Tafel 2**) anzugeben. Für den Vergleich wurde die aus den physikalischen Größen ermittelte indirekte Klimabewertung und das mittlere subjektive thermische Empfinden für das Versuchsende herangezogen.

4. Ergebnisse

4.1 Vergleich zwischen PMV-Index und subjektiver Bewertung

Aus den in Versuchsreihe 1 gemessenen Klima-Einflußgrößen und den nichtklimatischen Einflußgrößen der Versuchsreihe 2 wurde für jeden Meßort der PMV-Index berechnet und aus diesen örtlich unterschiedlichen Werten der arithmetische Mittelwert als mittlerer PMV-Index für den Aufenthaltsbereich des Fahrers bestimmt. Dabei wird jeder örtliche PMV-Index als gleichgewichtig angesehen.

In Bild 3 ist für die Versuche mit verschiedenen Zuluftzuführungen die mittlere subjektive Bewertung der Versuchspersonen als Zahlenwert entsprechend Tafel 2 über dem dazugehörigen PMV-Index aufgetragen. In dem nach der ISO-Norm [2] für eine Bewertung mit dem PMV-Index vorgesehenen Bereich bis + 2 ist eine sehr gute bis befriedigende Übereinstimmung zwischen der subjektiven Bewertung und der über das Klimasummenmaß festzustellen.

Wird eine Differenz von einem halben Bewertungspunkt zwischen den beiden Arten der Bewertung zugelassen, dann liegt die Hälfte der Bewertungen in diesem Toleranzbereich. Nur in wenigen Fällen weichen die direkte und die indirekte Bewertung um einen Bewertungspunkt oder mehr voneinander ab.

Unterschiedlich ist der Einfluß der einzelnen Zuluftzuführungen. Eine besonders gute Übereinstimmung ergibt sich für den vierfachen Schlitzauslaß. Beim zweifachen Schlitzauslaß werden jedoch Klimazustände die nach dem PMV-Index noch "etwas warm (+ 1)" bis "warm (+ 2)" bewertet werden, von den Versuchspersonen bereits als "warm (+ 2)" bis "heiß (+ 3)" empfunden. Bei den serienmäßigen Zuluftzuführungen und der Lochdecke ist es generell umgekehrt: Die Versuchspersonen empfinden den Klimazustand in der Kabine kühler, als er mit dem mittleren PMV-Index bewertet wird.

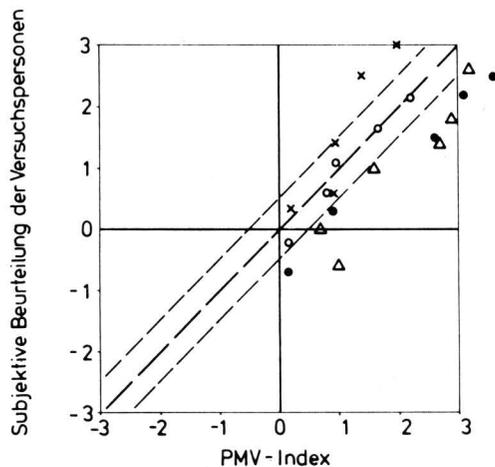


Bild 3. Mittleres subjektives thermisches Empfinden der Versuchspersonen (s. Tafel 2) in Abhängigkeit vom PMV-Index für alle Meßorte.

Art der Zuluftzuführung
 ● serienmäßig, gerade ○ Schlitz, vierfach
 △ Lochdecke x Schlitz, zweifach

Wie Bild 4 zeigt, stellt sich in der Kabine ein Temperaturfeld ein, in dem die Temperaturen von der Zuluftzuführung an der Decke zum Boden hin stetig zunehmen. Der Temperaturgradient hängt dabei wesentlich von der Zuluftzuführung ab. Beispielsweise ergibt sich für die Lochdecke im Bereich zwischen Kopf- und Kniehöhe ein besonders großer Temperaturgradient. Bei so ausgeprägten Temperatur- und Klimaunterschieden im Bereich der Körperoberfläche ist zu fragen, ob für die indirekte Klimabewertung Daten für den gesamten Bereich herangezogen werden müssen, oder ob eine Auswahl von Daten im Bereich bestimmter Körperteile eine hinreichende, vielleicht sogar bessere Übereinstimmung zwischen direkter und indirekter Klimabewertung herbeiführt.

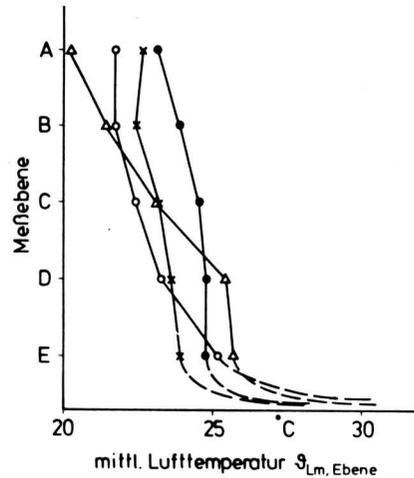


Bild 4. Mittlere Lufttemperatur in den Meßebenen A bis E in Abhängigkeit von der Höhe über dem Kabinenboden.

Art der Zuluftzuführung
 ● serienmäßig, gerade ○ Schlitz, vierfach
 △ Lochdecke x Schlitz, zweifach

Für Bild 5 wurden bei der Ermittlung des PMV-Index nur die Meßwerte für den Kopfbereich herangezogen. Dadurch wird für die serienmäßige Zuluftzuführung und die Lochdecke die Übereinstimmung zwischen der direkten subjektiven Bewertung und der indirekten Bewertung mit dem PMV-Index besser. Hingegen wird beim zwei- bzw. vierfachen Schlitzauslaß die Differenz größer. Insgesamt aber weichen jetzt nur noch 30 % der vergleichbaren direkten und indirekten Bewertungen um mehr als einen halben Bewertungspunkt voneinander ab, und lediglich bei 2 Versuchen ist die Abweichung größer als ein Bewertungspunkt.

Zur Bewertung von Klimabedingungen in Fahrerkabine mit dem PMV-Index reicht es demnach aus, wenn die physikalischen Einflußgrößen an vier verschiedenen Meßorten im Kopfbereich gemessen werden und dann aus den örtlich unterschiedlichen PMV-Indizes der arithmetische Mittelwert gebildet wird. Bei neutralen bis warmen Klimazuständen läßt sich damit der Aufwand für eine zuverlässige Klimabewertung in Fahrerkabine auf ein vertretbares Maß reduzieren. Eine noch kleinere Zahl von Meßorten sollte jedoch nicht angestrebt werden, da dann die örtlichen Einflüsse und Zufallsergebnisse zu sehr ins Gewicht fallen.

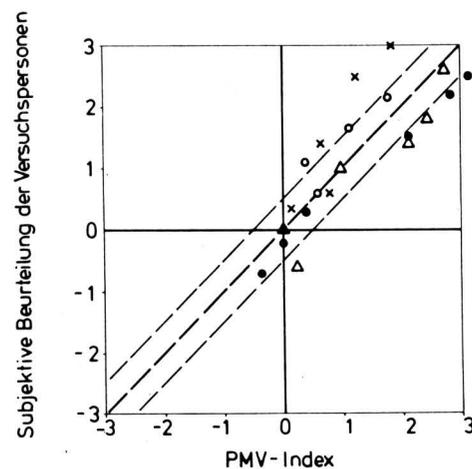


Bild 5. Mittleres subjektives thermisches Empfinden der Versuchspersonen (s. Tafel 2) in Abhängigkeit vom PMV-Index für die Meßorte im Kopfbereich.

Art der Zuluftzuführung
 ● serienmäßig, gerade ○ Schlitz, vierfach
 △ Lochdecke x Schlitz, zweifach

4.2 Vergleich zwischen WBGT-Index und subjektiver Bewertung

Die Schweißabgabe ist ein verlässlicher Parameter für die Bewertung der thermischen Umgebung in Kabinen. So ergibt sich eine enge funktionale Beziehung zwischen dem physiologischen Parameter "Schweißabgabe" und dem thermischen Empfinden der Versuchspersonen [9], Bild 6. Bei der theoretischen Begründung des WBGT-Index auf Wärmeaustausch durch Strahlung und Verdunstung ist deshalb auch ein enger Zusammenhang zwischen dem WBGT-Index und dem subjektiven thermischen Empfinden zu erwarten.

Die Messungen der ersten Versuchsreihe waren auf die Bestimmung des PMV-Index abgestellt. Demgemäß wurden Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -geschwindigkeit sowie die Globetemperatur, nicht aber die "natürliche" Feuchttemperatur gemessen. Für die Ermittlung des WBGT-Index wird hier daher die "natürliche" Feuchttemperatur aus den vier gemessenen physikalischen Einflußgrößen bestimmt, wozu ein von Sullivan u. Gorton [12] vorgeschlagenes Verfahren (siehe Anhang B) verwendet wird.

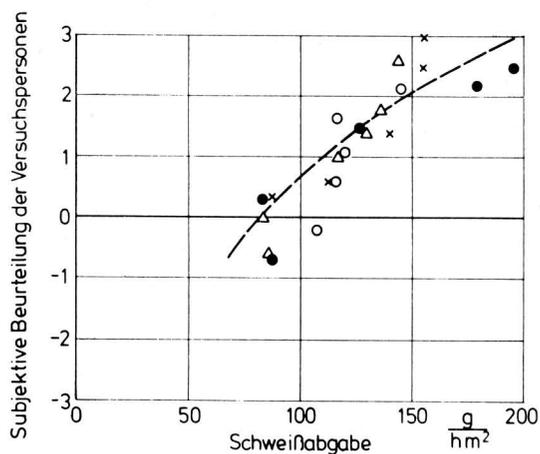


Bild 6. Mittleres subjektives thermisches Empfinden der Versuchspersonen (s. Tafel 2) in Abhängigkeit von der mittleren auf die Körperoberfläche bezogenen stündlichen Schweißabgabe.

Art der Zuluftzuführung
 ● serienmäßig, gerade ○ Schlitz, vierfach
 △ Lochdecke x Schlitz, zweifach

Wie beim PMV-Index werden zunächst die örtlichen WBGT-Indizes berechnet und dann aus diesen Werten der arithmetische Mittelwert gebildet. Bei gleicher Wichtung der einzelnen Indizes ergibt sich der in Bild 7 dargestellte Zusammenhang. Aufgetragen ist die mittlere subjektive Beurteilung der Versuchspersonen über dem arithmetischen Mittelwert des WBGT-Index für alle Meßorte. Eine Abhängigkeit zwischen den beiden Arten der Bewertung läßt sich durchaus erkennen. Allerdings ist auch hier ein Einfluß der unterschiedlichen Zuluftzuführung festzustellen. So liegt für die serienmäßige Zuluftzuführung und die Lochdecke die subjektive Bewertung im allgemeinen unterhalb der durch Regression gefundenen Ausgleichskurve, d.h. bei gleicher subjektiver Bewertung durch die Versuchspersonen ergeben sich für diese Zuluftzuführungen höhere Werte des WBGT-Index als beispielsweise beim Schlitzauslaß. Wird bei gleichem WBGT-Index ein Toleranzbereich von einem halben Bewertungspunkt ober- und unterhalb der Ausgleichskurve für die subjektive Bewertung zugelassen, dann liegen etwa zwei Drittel der Bewertungen in diesem Toleranzbereich. Von der Ausgleichskurve ausgehend, kann somit angenommen werden, daß bei einem mittleren WBGT-Index über 24 °C der Klimazustand in der Kabine zu warm und damit unbehaglich sein wird. Bei einer Extrapolation der Ausgleichskurve zu höheren Index-Werten ergibt sich im übrigen für die subjektive Beurteilung "heiß (+ 3)" ein WBGT-Index von 30 °C, ein Wert, der auch als Grenzwert in Tafel 3 auftaucht.

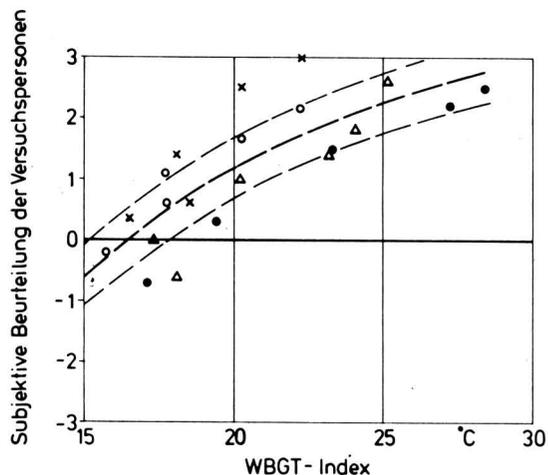


Bild 7. Mittleres subjektives thermisches Empfinden der Versuchspersonen (s. Tafel 2) in Abhängigkeit vom WBGT-Index für alle Meßorte.

Art der Zuluftzuführung
 ● serienmäßig, gerade ○ Schlitz, vierfach
 △ Lochdecke x Schlitz, zweifach

Die Beschränkung auf die vier Meßorte im Kopfbereich bringt keine wesentlichen Änderungen, Bild 8, abgesehen davon, daß sich allgemein niedrigere Werte des WBGT-Index ergeben. Die von den Zuluftzuführungen herrührenden Unterschiede bleiben jedoch weiterhin bestehen. Der Zusammenhang zwischen dem WBGT-Index und dem mittleren thermischen Empfinden der Versuchspersonen ist ähnlich wie bei der Berücksichtigung aller Meßstellen. Doch ist nach dieser Darstellung schon oberhalb eines WBGT-Index von etwa 22 °C mit "warmen" bis "heißen" Klimazuständen zu rechnen.

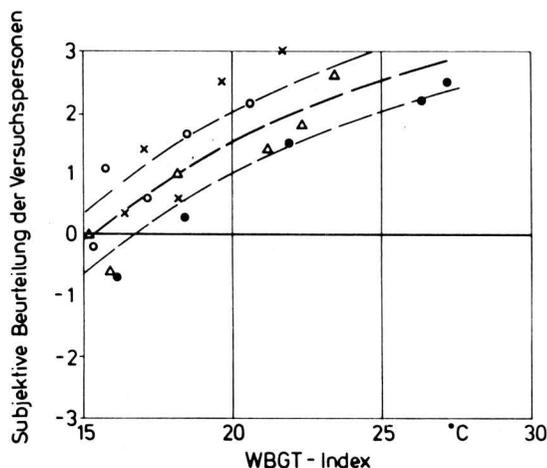


Bild 8. Mittleres subjektives thermisches Empfinden der Versuchspersonen (s. Tafel 2) in Abhängigkeit vom WBGT-Index für die Meßorte im Kopfbereich.

Art der Zuluftzuführung
 ● serienmäßig, gerade ○ Schlitz, vierfach
 △ Lochdecke x Schlitz, zweifach

Auch bei der Bewertung von Klimazuständen mit dem WBGT-Index genügt es folglich, nur an vier Meßorten im Kopfbereich die örtlichen Indizes zu bestimmen und den daraus errechneten arithmetischen Mittelwert als Bewertungskriterium heranzuziehen. Bei diesem Vorgehen sollte der WBGT-Index nach Möglichkeit nicht über 20 °C liegen. Hinsichtlich einer weiteren Verringerung der Zahl der Meßorte gilt das gleiche, wie für die Ermittlung des PMV-Index ausgeführt wurde.

5. Zusammenfassung

Bei landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen mit geschlossenen Fahrer- und Kabinen kann das Klima am Fahrerplatz ein belastender oder gar belastender Faktor sein. Mit zunehmender Verwendung von Kabinen wächst daher die Nachfrage nach zuverlässigen und einfachen Kriterien zur Bewertung des Klimas. Für industrielle Arbeitsplätze sind vor kurzem von der ISO zwei Standards verabschiedet worden, die die Bewertung eines gemäßigten Klimas durch den PMV-Index und die Bewertung von Klimazuständen mit der Gefahr von Hitzestress durch den WBGT-Index vorschlagen.

Um die mit diesen beiden Indizes gegebenen Möglichkeiten der indirekten Klimabewertung in Kabinen zu überprüfen, wurde ein Vergleich mit der direkten subjektiven Bewertung durch Versuchspersonen vorgenommen. Beide Indizes sind aus verschiedenen physikalischen Einflußgrößen zu errechnen. Wegen des ungleichförmigen Klimazustandes in der Kabine wird oftmals vorgeschlagen, diese Einflußgrößen nicht an einem einzigen Ort, sondern an mehreren Stellen im gesamten Aufenthaltsbereich des Fahrers zu messen. Aus den jeweiligen örtlichen Index-Werten ist dann der arithmetische Mittelwert als Bewertungskriterium zu bilden. Sowohl für den PMV-Index wie auch für den WBGT-Index ergibt sich ein guter bis befriedigender Zusammenhang mit der direkten subjektiven Bewertung des Klimas aufgrund des thermischen Empfindens von Versuchspersonen. Damit besteht die Möglichkeit, bereits im voraus aus den objektiv meßbaren physikalischen Einflußgrößen die zu erwartende Klimabelastung in Kabinen festzustellen. Allerdings ist bei der großen Zahl von Meßstellen der Aufwand zur Bestimmung des mittleren Index-Wertes beträchtlich.

Wie der Vergleich mit der direkten Klimabewertung durch die Versuchspersonen jedoch zeigt, ist eine Verringerung der Zahl von Meßorten auf lediglich vier im Kopfbereich möglich, ohne daß dadurch die Aussagegenauigkeit verloren geht. Von einer weiteren Verringerung der Zahl der Meßorte ist allerdings abzuraten, da dann örtliche und zufällige Einflüsse zu sehr ins Gewicht fallen können.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] DIN 33403: Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung. Teil 1: Grundlagen zur Klimaermittlung.
- [2] ISO 7730: Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Organisation for Standardization, Genf 1984.
- [3] ISO 7243: Hot environments – Estimation of the heat stress on a working man, based on the WBGT-Index (wet bulb globe temperature). International Organisation for Standardization, Genf 1982.
- [4] •Fanger, P.O.: Thermal Comfort. New York: McGraw-Hill Book Co., 1973.
- [5] Fanger, P.O.: Thermische Behaglichkeit am Arbeitsplatz. In: Hettinger, T., B. Müller u. G. Eissing (Hrsg.): Symposium Klima, Behaglichkeit – Erträglichkeit – Zumutbarkeit. Dokumentation Arbeitswissenschaft Bd. 3 (1980) S. 3/26.
- [6] Yaglou, C.P. u. D. Minard: Control of heat casualties at military training centers. Am. Med. Ass. Arch. Indust. Health Bd. 16 (1957) S. 302/16.
- [7] Johnson, A.T. u. G.D. Kirk: Heat transfer study of the WBGT and bobsball sensors. Trans. ASAE Bd. 24 (1981) Nr. 2, S. 410/17 und 420.
- [8] Janssen, J.: Luftführung in Fahrer- und Kabinen unter dem Gesichtspunkt der thermischen Behaglichkeit. Grundle. Landtechnik Bd. 34 (1984) Nr. 5, S. 198/205.
- [9] Janssen, J.: Bewertung von Luftführungssystemen in Fahrer- und Kabinen durch Versuchspersonen. Grundle. Landtechnik Bd. 35 (1985) Nr. 5, S. 141/50.
- [10] Hosler, T.W.: Guidelines for evaluation of cab temperature. SAE-Paper 730696, 1973.
- [11] Browén, A.: Värmeavlastning i förarhytter – Studier av avvikelser från optimal klimakomfort. JTI-rapport Nr. 25; Ultuna/Uppsala: Jordbrukstekniska institutet, 1978.
- [12] Sullivan, C.D. u. R. Gorton: A method of calculation of WBGT from environmental factors. ASHRAE Trans. Bd. 82 (1976) Teil II, S. 279/92.

Anhang A

Die Ermittlung der mittleren Strahlungstemperatur über die Globe-temperatur geht davon aus, daß die Kupferkugel im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung steht:

$$q_S + q_K = 0 \quad (\text{A.1.})$$

q_S ist der flächenbezogene Wärmestrom, den die Kugel infolge Strahlung mit der Umgebung austauscht, während mit q_K der flächenbezogene Wärmestrom durch Konvektion bezeichnet wird.

Der durch Strahlung zwischen den umschließenden Wänden mit einer mittleren Strahlungstemperatur (ϑ_{mS} in °C bzw. T_{mS} in K) und der Kugel (Index G) bewirkte Wärmestrom ist gegeben durch:

$$q_S = a_S (T_{mS}^4 - T_G^4) \quad (\text{A.2.})$$

Der Wärmeübergangskoeffizient für die Strahlung kann berechnet werden über:

$$a_S \approx \sigma \epsilon \quad (\text{A.3.})$$

ϵ ist der Emissionskoeffizient der Kugel und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, deren Wert mit $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ angegeben wird.

Die durch Konvektion zwischen der Raumluft und der Kugel ausgelöste Wärmestromdichte ergibt sich zu:

$$q_K = a_K (\vartheta_L - \vartheta_G) \quad (\text{A.4.})$$

Im Falle der erzwungenen Konvektion ist der Wärmeübergangskoeffizient a_K abhängig von der Luftgeschwindigkeit w in der Nähe der Kugel und deren Durchmesser [1]:

$$a_K = 6,3 w^{0,6} / D^{0,4} \quad (\text{A.5.})$$

Aus der Gleichgewichtsbeziehung (A.1) für die Kugel

$$a_S (T_{mS}^4 - T_G^4) + a_K (\vartheta_L - \vartheta_G) = 0 \quad (\text{A.6.})$$

folgt für die mittlere Strahlungstemperatur:

$$T_{mS} = \sqrt[4]{T_G^4 + (a_K/a_S) (\vartheta_G - \vartheta_L)} \quad (\text{A.7.})$$

Für eine Standardkugel mit $D = 0,15 \text{ m}$ und $\epsilon = 0,95$ kann sie mit den oben angeführten Beziehungen für a_K und a_S berechnet werden aus:

$$T_{mS} = \sqrt[4]{T_G^4 + 2,5 \cdot 10^8 w^{0,6} (\vartheta_G - \vartheta_L)} \quad [\text{K}]$$

bzw.

$$\vartheta_{mS} = \sqrt[4]{(\vartheta_G + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 w^{0,6} (\vartheta_G - \vartheta_L)} - 273 \quad [\text{°C}] \quad (\text{A.8.})$$

- [1] ISO 7726: Thermal environments – Specifications relating to appliances and methods for measuring physical characteristics of the environment. International Organisation for Standardization, Genf 1982.

Anhang B

Für den in Bild 1A gezeigten nassen Strumpf eines "natürlichen" Feuchtthermometers gilt, daß im thermischen Gleichgewicht die durch Konvektion bzw. Strahlung aufgenommene Wärmemenge durch Wasserverdunstung wieder ausgeglichen wird:

$$q_K + q_S - q_V = 0 \quad (\text{B.1})$$

Für die durch Konvektion verursachte Wärmestromdichte gilt:

$$q_K = a_K (\vartheta_L - \vartheta_{nF}) \quad (\text{B.2})$$

Dabei bedeutet a_K den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, dessen Größe im wesentlichen von der Anströmgeschwindigkeit abhängt, ϑ_L die Lufttemperatur und ϑ_{nF} die Temperatur des nassen Strumpfes.

Die Wärmestromdichte infolge Strahlung q_S ist von der mittleren Strahlungstemperatur T_{mS} der umgebenden Wände und der Temperatur des nassen Strumpfes abhängig:

$$q_S = a_S (T_{mS}^4 - T_{nF}^4) = a_S [(\vartheta_{mS} + 273)^4 - (\vartheta_{nF} + 273)^4] \quad (\text{B.3})$$

Der Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung a_S läßt sich aus dem Emissionskoeffizienten des nassen Strumpfes ϵ_{nF} und der Stefan-Boltzmann-Konstanten σ berechnen:

$$a_S \approx \epsilon_{nF} \sigma \quad (\text{B.4})$$

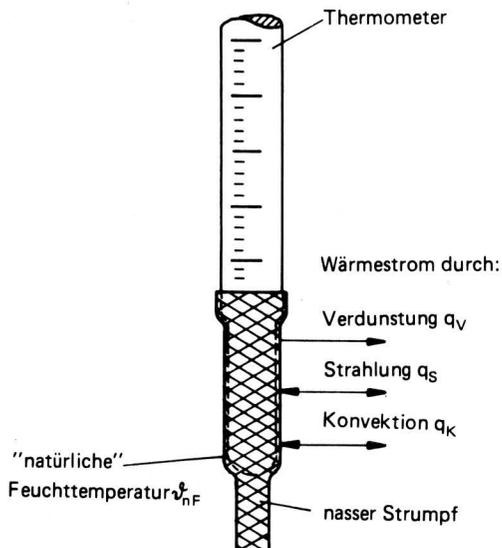


Bild 1A. Wärmeaustausch am "natürlichen" Feuchtthermometer.

Die durch Verdunstung bedingte Wärmestromdichte ergibt sich zu:

$$q_V = r \beta_V (x_{nF}'' - x_L) \quad (\text{B.5})$$

Dabei ist r die Verdampfungsenthalpie des Wassers, β_V der Verdunstungskoeffizient, dessen Größe ebenfalls von der Anströmgeschwindigkeit abhängt, x_{nF}'' der Feuchtegehalt der Luft, die bei der Temperatur des nassen Strumpfes ϑ_{nF} gesättigt ist, und x_L der Feuchtegehalt der Luft in genügender Entfernung vom Thermometer bei der Lufttemperatur ϑ_L .

Im Gleichgewicht Gl. (B.1) muß damit folgende Beziehung erfüllt sein:

$$a_K (\vartheta_L - \vartheta_{nF}) + \epsilon_{nF} \sigma [(\vartheta_{mS} + 273)^4 - (\vartheta_{nF} + 273)^4] - r \beta_V (x_{nF}'' - x_L) = 0 \quad (\text{B.6})$$

Bei der Verdunstung von Wasserdampf in Luft kann im vorliegenden Fall mit hinreichender Genauigkeit das Lewissche Gesetz angewendet werden. Danach besteht folgender Zusammenhang zwischen dem Verdunstungs- und dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten:

$$\beta_V c_{pm} / a_K \approx 1 \quad (\text{B.7})$$

Darin ist c_{pm} die mittlere spezifische Wärmekapazität feuchter Luft. Sie kann näherungsweise mit $c_{pm} \approx 1,0 \text{ kJ/kg K}$ angesetzt werden, so daß

$$\beta_V \approx a_K \quad (\text{B.8})$$

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient a_K läßt sich beispielsweise über folgende Beziehung berechnen [2]:

$$\text{Nu} = 0,644 \sqrt[3]{\text{Pr}} \sqrt{\text{Re}}$$

bzw.

$$a_K L / \lambda_L = 0,644 (\nu_L / a_L)^{1/3} (w L / \nu_L)^{1/2} \quad (\text{B.9})$$

Nu, Pr und Re sind die Nusselt-, Prandtl- bzw. Reynolds-Zahl der feuchten Luft. L ist die Überströmlänge des zylinderförmigen nassen Strumpfes und a_L , ν_L , λ_L und w sind die Temperaturleitfähigkeit, kinematische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und Anströmgeschwindigkeit der Luft. Wird eine mittlere Überströmlänge von 2,5 cm gewählt und werden die Luftzustandsgrößen bei einer mittleren Lufttemperatur von 25 °C eingesetzt, erhält man folgende Beziehung für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten:

$$a_K = 24,1725 w^{0,5} \quad (\text{B.10})$$

Der Emissionskoeffizient des nassen Strumpfes kann näherungsweise mit 1 angesetzt werden und die Stefan-Boltzmann-Konstante beträgt: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Sofern die mittlere Strahlungstemperatur bekannt ist (s. Anhang A), kann dann mit den oben abgeleiteten Beziehungen iterativ die "natürliche" Feuchttemperatur berechnet werden.

[2] • Schlünder, E.U.: Einführung in die Wärme- und Stoffübertragung.
uni-Text: Skripten, Braunschweig: Vieweg-Verlag 1972.