

# Klimatisierung von Fahrerinnen landwirtschaftlicher Fahrzeuge

Von Gerhard Jahns und Jan Janssen,  
Braunschweig-Völkenrode\*)

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

Professor Dr.-Ing. Wilhelm Batel zum 60. Geburtstag

DK 631.372:628.8

In einer geschlossenen Fahrerkabine treten während der Haupteinsatzzeit der Fahrzeuge häufig Klimabedingungen auf, die zwar noch nicht zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen müssen, aber durchaus bereits zu Leistungsminderung und erhöhtem Unfallrisiko führen können. Bei der Klimatisierung von Fahrerinnen ist deshalb zum einen der Frage nachzugehen, wie der behagliche, thermisch neutrale Klimabereich von dem noch ertragbaren, aber bereits belastenden Bereich meßbar abgegrenzt werden kann. Andererseits gilt es, durch geeignete klimatische Maßnahmen einen behaglichen Klimazustand in der Kabine sicherzustellen. Konstruktive Maßnahmen zur Begrenzung der in die Kabine eindringenden Wärmeströme reichen dafür allein nicht aus, so daß für zufriedenstellende Klimabedingungen eine Zwangsbelüftung der Kabine mit relativ hohen Zuluftvolumenströmen hinreichend niedriger Temperatur nötig ist.

## 1. Einleitung

Aus dem ursprünglich nur als Wetterschutz gedachten Schlepperverdeck entstanden, haben die Kabinen der heutigen Schlepper und landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen mit Eigenantrieb weitere wichtige Schutzfunktionen übernommen. Diese Schutzfunktionen, beispielsweise gegen Lärm, Staub und andere luftgetragene Fremdstoffe, können sie jedoch nur erfüllen, wenn sie möglichst dicht schließen und während des Einsatzes auch geschlossen bleiben.

In geschlossenen Kabinen treten jedoch während der Haupteinsatzzeiten der Fahrzeuge häufig Temperaturen auf, die in Bereichen liegen, für die in der gewerblichen Wirtschaft bereits Arbeitspausen vorgeschrieben werden, um gesundheitlichen Schäden vorzubeugen [1 bis 6]. Hauptursache für diese hohen Temperaturen sind die für eine ungehinderte Sicht erforderlichen großen Glasflächen und die unmittelbare Nähe der Kabine zu wärmeabgebenden Fahrzeugteilen wie Motor, Auspuff und Getriebe.

Der Abbau der Klimabelastungen in Fahrerinnen ist daher dringend erforderlich, um unzumutbare Arbeitsbedingungen, die ihrerseits wiederum zu mangelhafter Arbeitsausführung und erhöhtem Unfallrisiko führen [7], zu vermeiden, vor allem aber um die Gefahr gesundheitlicher Schäden infolge übermäßiger Kreislaufbelastung auszuschließen.

Dementsprechend ist der Maßstab für die Beurteilung eines Klimazustandes oder des Erfolgs klimatischer Maßnahmen die sich für den Menschen ergebende Beanspruchung. Das bedeutet aber, daß die Verbesserung der Klimabedingungen in Fahrerinnen nicht allein anhand physikalischer Meßwerte beurteilt werden kann, daß vielmehr der Mensch mit seinen physiologischen Reaktionen letztlich der Maßstab einer abschließenden Bewertung sein sollte. Im folgenden wird daher als erstes auf physiologische Grundlagen der Körpertemperaturregulation des Menschen und die Möglichkeiten, die klimatischen Beanspruchungen des Menschen zu beurteilen, eingegangen. Daran anschließend wird die Ausgangssituation für die Klimatisierung von Fahrerinnen anhand der technischen Gegebenheiten auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen dargestellt. Dabei wird auf die Wirkungen der Zwangsbelüftung, ohne die eine Klimatisierung der Kabinen nicht möglich ist, näher eingegangen.

## 2. Physiologische Grundlagen

Der Mensch ist zur Aufrechterhaltung seiner normalen Körperfunktionen wie alle homöothermen Lebewesen auf die Einhaltung einer weitgehend konstanten Körperkerntemperatur angewiesen. Ein komplexes Regelsystem sorgt dafür, daß die bei den Stoffwechselfvorgängen entstehende Wärme nicht zu einer Erhöhung der Körperkerntemperatur führt. Im Rahmen dieser Temperaturregulation des menschlichen Körpers spielt neben der Atmung die Haut eine dominierende Rolle. Über sie erfolgt ganz überwiegend der Wärmeaustausch mit der Umwelt, und zwar durch Konvektion, durch Verdunstung, durch Wärmestrahlung und in geringem Umfang auch durch Wärmeleitung. **Bild 1** gibt eine einfache mathematische Beschreibung dieser Verhältnisse und führt die Haupteinflußgrößen dieser Bilanz auf.

Grundgleichung:	Haupteinflußgrößen
$\dot{Q}_p = \pm \dot{Q}_K - \dot{Q}_V \pm \dot{Q}_S \pm \dot{Q}_{SK}$	
Wärmeproduktion im Menschen	
$\dot{Q}_p = f$ (Stoffwechsel)	physische Leistung
Wärmeaustausch mit der Umgebung	
a) Konvektion: $\dot{Q}_K = \alpha A \Delta \vartheta_{H,L}$	Lufttemperatur Luftgeschwindigkeit
b) Verdunstung: $\dot{Q}_V = \beta_V A \Delta p_{H,L}$	Luftfeuchtigkeit
c) Strahlung: $\dot{Q}_S = k_S \Delta \vartheta_{H,S}$	mittl. Strahlungstemp. Kleidung
Wärmespeicherung im Körper	
$\dot{Q}_{SK} = c m \Delta \vartheta$	

**Bild 1.** Wärmebilanz des menschlichen Körpers.

\*) Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. G. Jahns und Dipl.-Ing. J. Janssen sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

Die aus dem Grundstoffwechsel zur Aufrechterhaltung der lebensnotwendigen Körperfunktionen resultierende Wärmemenge ist nahezu konstant. Sie beträgt für einen erwachsenen ruhenden Menschen etwa  $46 \text{ W/m}^2$ . Mit zunehmender Aktivität, vor allem körperlicher Art, erhöht sich dieser Wert auf ein Vielfaches. Für einen Schlepperfahrer beträgt er etwa das Zwei- bis Dreifache des angegebenen Wertes.

Art und Umfang der Wärmeabgabe an die Umgebung werden vor allem durch die im Bild aufgeführten vier thermischen Einflußgrößen des Raumklimas und die Kleidung, die als Isolierschicht anzusehen ist, bestimmt. Die Restgröße der Bilanzgleichung ist die im Körper speicherbare Wärmemenge  $Q_{SK}$ . Sie ist im Vergleich zu den anderen Größen der Bilanz sehr klein. Ihre Änderung ist zwangsläufig mit einer Änderung der mittleren Körpertemperatur verbunden.

Die thermischen Einflußgrößen des Raumklimas lassen sich relativ einfach für einzelne Raumpunkte messen. Ihre meßtechnische Erfassung im gesamten den Menschen umgebenden Raum ist aber bereits sehr aufwendig. Die Meßwerte der verschiedenen Einflußgrößen zu einem allgemein gültigen Behaglichkeitsmaß zusammenzufassen, ist bis heute nicht befriedigend gelungen. Von der Vielzahl der Vorschläge für derartige Klimaausmaße hat sich die Effektivtemperatur noch am besten bewährt. Es handelt sich dabei um ein empirisches Maß, das Messungen der Luft- und Feuchttemperatur sowie der Luftgeschwindigkeit erfordert. Mittels eines Nomogrammes, wie es in Bild 2 wiedergegeben ist, läßt sich dann aus diesen Werten die Effektivtemperatur ermitteln. Kleidung und Tätigkeit des Menschen bleiben dabei jedoch unberücksichtigt.

Solange es nicht gelungen ist, ein befriedigendes klimatisch-physiologisches Maß zu schaffen, mit dem es möglich ist, einen funktionalen Zusammenhang zwischen den physikalischen Größen des Klimas, der Bekleidung und der Tätigkeit einerseits und der daraus resultierenden Beanspruchung des Menschen und seiner Empfindung andererseits abzuleiten, solange wird es erforderlich sein, den Menschen als Maßstab in klimatische Untersuchungen mit einzubeziehen. Dabei wird man neben einer Befragung nach dem subjektiven Befinden versuchen, die klimatische Beanspruchung des Menschen auch anhand von meßbaren physiologischen Reaktionen wie Pulsfrequenz, Körperkerntemperatur, Hauttemperatur, Schweißrate und ähnliches zu erfassen.

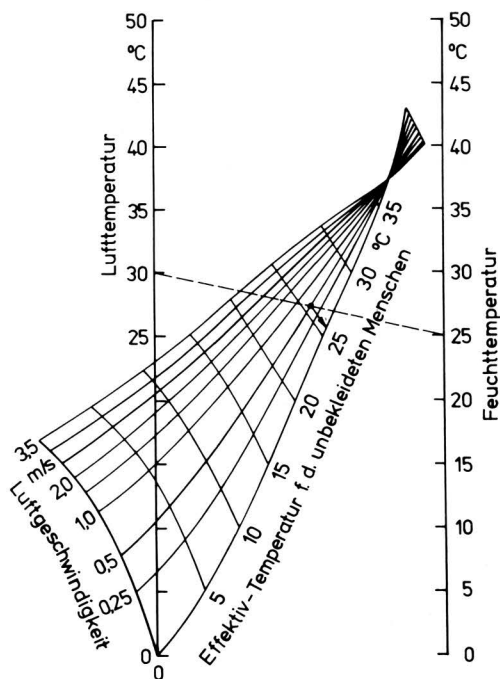


Bild 2. Nomogramm zur Ermittlung der Effektivtemperatur für den unbedeckten Menschen, nach Yaglou [8].

Derartige Messungen liefern aber unter praktischen Arbeitsverhältnissen, ganz abgesehen von dem erforderlichen technischen Aufwand, oft enttäuschende Ergebnisse. Der Grund hierfür ist die Komplexität realer Arbeitsplätze, die eine exakte Zuordnung von Ursache und Wirkung unmöglich oder sehr aufwendig macht. Hier bietet die Laborforschung beispielsweise mit Hilfe von Arbeitsplatzsimulatoren die Möglichkeit, unter definierten Bedingungen der Frage nachzugehen, welche meßbaren Größen für eine Abgrenzung des behaglichen, thermisch neutralen Bereichs von dem noch ertragbaren, aber bereits belastenden Klimabereich geeignet sind.

Behaglichkeit ist in diesem Zusammenhang nicht eine Frage des Komforts oder Luxus, ist doch aus anderen Untersuchungen bekannt, daß außerhalb des Behaglichkeitsbereiches klimatische Belastungen, schon lange bevor sie zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen, Ursache für Leistungsminderung, mangelnde Arbeitsausführung und erhöhtes Unfallrisiko sein können [7].

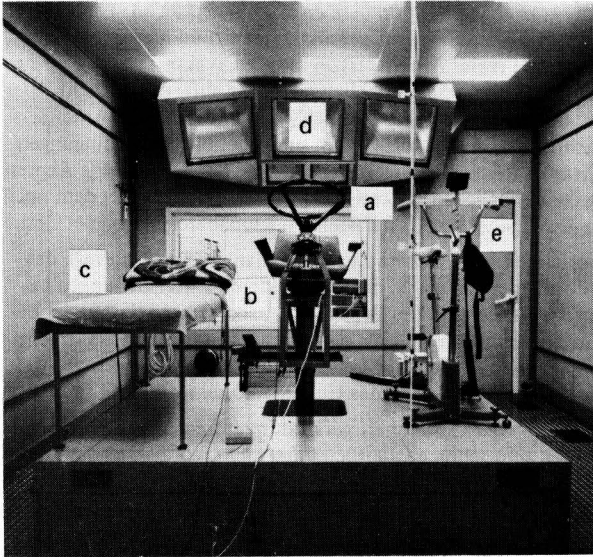
Die Grenzen der Gesundheitsgefährdung infolge klimatischer Belastungen sind schon ausführlich untersucht worden, so daß hierzu inzwischen hinreichende Kenntnisse vorliegen. Das trifft jedoch nicht in gleichem Maße auf die Abgrenzung des Behaglichkeitsbereiches zu. Daher wurden in dem Arbeitsplatzsimulator der FAL Versuche durchgeführt mit dem Ziel, Kriterien für diese Abgrenzung des thermisch neutralen Bereiches, des Behaglichkeitsbereiches, zu ermitteln. Die sensumotorischen und physischen Tätigkeiten der Versuchspersonen wurden dabei so gewählt, daß sie denen auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen vergleichbar sind.

Jeder Einzelversuch wird in zwei Versuchsabschnitten durchgeführt. Von diesen ist der erste eine Nachführungsaufgabe (Trackingaufgabe), also eine Tätigkeit, die z.B. dem Fahren entlang einer Pflanzenreihe vergleichbar ist. Die Versuchsperson hat dabei auf einem Bildschirm einer stochastisch bewegten Marke eine zweite durch entsprechende Bewegungen eines Lenkrades nachzuführen. Bild 3 zeigt den Versuchsraum mit dem Sitz für die Versuchsperson und dem Lenkrad zum Nachführen der zweiten Marke in der Bildmitte. Als Kriterium für die Beurteilung der sensumotorischen Leistung der Versuchsperson wurde der Lenkfehler und zusätzlich die Reaktionszeit zwischen einem akustischen Signal und dem Betätigen eines Pedals gewählt. Außerdem werden die Puls- zu Pulsfrequenz, die Körperkerntemperatur, die Hauttemperatur und die Schweißabgabe der Versuchsperson gemessen. Die Trackingaufgabe ist bewusst sehr abstrakt gewählt, um sicher zu sein, daß die gemessenen Fehler, die als Kriterium für die Leistung bzw. für die Klimabelastung herangezogen werden, nicht durch unkontrollierte Einflüsse hervorgerufen werden, sondern ausschließlich der Belastung zuzuordnen sind. Im zweiten Versuchsabschnitt erfolgt eine rein physische Belastung mittels Fahrradergometer. Beide Versuchsabschnitte haben eine Dauer von 60 Minuten. Vor und nach jedem Versuchsabschnitt ist eine Pause vorgesehen, um möglichst konstante Ausgangsbedingungen zu gewährleisten.

Elf Einzelversuche mit unterschiedlichen Klimabedingungen bilden eine Versuchsreihe, die unter jeweils gleichen Bedingungen mit verschiedenen Personen wiederholt wurde. Bild 4 zeigt die Luftzustandswerte der Versuchsreihe für diese 11 Einzelversuche. Dabei wurden die Luftzustände so gewählt, daß der Bereich der Effektivtemperatur von  $10\text{--}30^\circ\text{C}$  in äquidistanten Stufen erfaßt wurde. Als Kriterien für die Klimabelastung und die daraus resultierende Beanspruchung des Menschen wurden herangezogen:

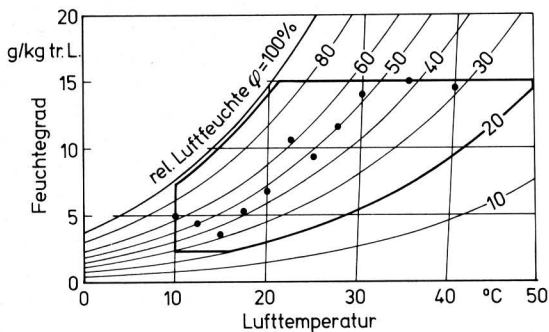
- das subjektive Empfinden,
- die Arbeitsleistung und
- die physiologischen Reaktionen.

Das Kriterium der Arbeitsleistung in Form des mittleren Fehlerquadrates bei der Nachführungsaufgabe wie auch in Form der Reaktionszeiten ließ keinen funktionalen Zusammenhang zwischen Klimabelastung und Arbeitsleistung erkennen. Damit war natürlich auch eine Bereichsabgrenzung zwischen behaglichem Klima und nicht mehr zumutbaren Klimabedingungen anhand dieses Kriteriums unmöglich. Daß bei diesen Versuchen mit höherer klimatischer Belastung und Beanspruchung sowohl Leistungssteigerungen als auch Leistungsminderungen festzustellen waren, daß also ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Klimabelastung und



**Bild 3.** Blick in den Arbeitsplatzbelastungssimulator, hier ausgerüstet für physiologische Messungen ohne Fahrerkabine.

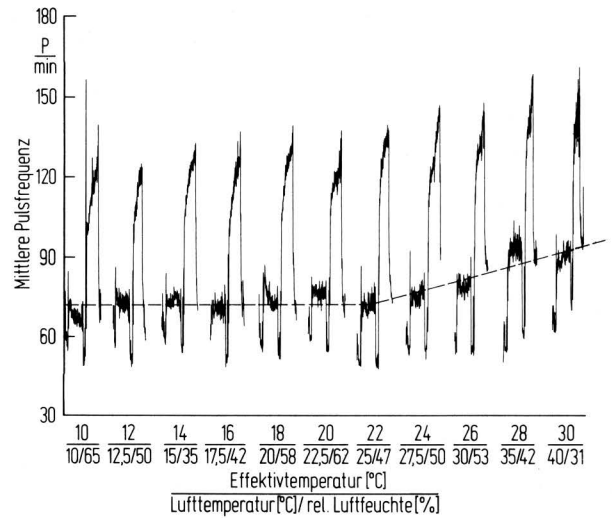
- a Sitz mit Lenkrad für Nachführungsaufgabe
- b Fenster zum Kontroll- und Meßraum
- c Liege für Pausenzeiten
- d Lampen zur Simulation der Sonnenstrahlung
- e Fahrradergometer



**Bild 4.** Übersicht über die bei den Klimaversuchen verwendeten Werte von Lufttemperatur und Luftfeuchte.

der Arbeitsleistung nicht nachzuweisen war, läßt den Schluß zu, daß während psychomotorischer Tätigkeiten die zu erwartende Leistungsminderung durch Motivation kompensiert oder in Einzelfällen sogar überkompensiert wird.

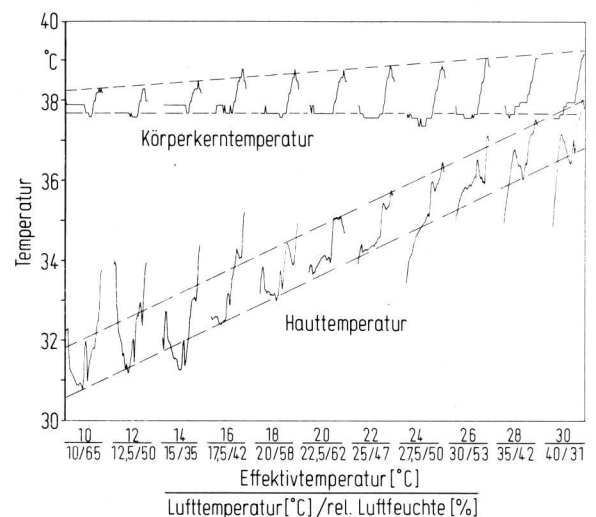
Von den physiologischen Reaktionen ist in **Bild 5** die Pulsfrequenz einer Versuchsperson während einer Versuchsreihe mit 11 Einzelversuchen dargestellt. Man erkennt im Verlauf des Einzelversuchs deutlich die Unterschiede der mittleren Pulsfrequenz in den einzelnen Abschnitten: Pause, Nachführungsaufgabe, Pause, Ergometerarbeit, Pause. Während sich die mittlere Pulsfrequenz bei den Nachführungsaufgaben bis zu einer Effektivtemperatur von etwa 20 °C stets auf dem gleichen Niveau bewegt, zeigt sie bei Versuchen über 20 °C eine ansteigende Tendenz. In **Bild 5** ist dies durch die gestrichelten Linien angedeutet. Dies Ergebnis ließ vermuten, daß die mittlere Pulsfrequenz für eine Abgrenzung des thermisch neutralen Klimabereiches zu dem nicht mehr zumutbaren geeignet sei. Weitere Versuche zeigten jedoch, daß diese Abgrenzung durchaus nicht immer so deutlich wie in dem hier dargestellten Beispiel ausfiel. Ursache hierfür ist, daß die Pulsfrequenz auch auf eine Vielzahl anderer Einflüsse empfindlich reagiert und diese Einflüsse dann den Einfluß des Klimas überdecken, so daß eine zweifelsfreie Zuordnung nicht immer möglich ist.



**Bild 5.** Mittlere Pulsfrequenz einer Versuchsperson in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur.

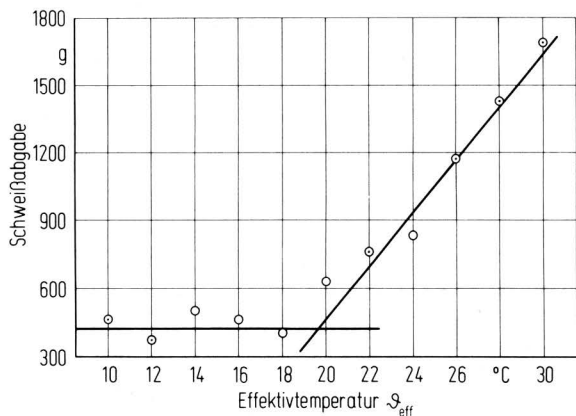
Auch über die Körperkern- und Hauttemperatur konnte eine Abgrenzung des behaglichen vom noch zumutbaren Klimabereich nicht ermittelt werden, obwohl ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Effektivtemperatur und der Körperkern- und Hauttemperatur zu erkennen ist, **Bild 6**. Während die Körperkerntemperatur während der Nachführungsaufgabe konstant bleibt, steigt sie bei der Ergometerarbeit in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur deutlich an. Die Hauttemperatur nimmt linear mit der Effektivtemperatur zu. Bei hohen Effektivtemperaturen kann sie sogar Werte erreichen, die gleich der Körperkerntemperatur zur Zeit der Trackingphase sind. In solchen Fällen, da die Hauttemperatur der Körperkerntemperatur bereits entspricht, ist das Wärmespeichervermögen des Körpers nahezu erschöpft, d.h. eine weitere Steigerung der Klimabelastung würde zu einer Erhöhung der Körperkerntemperatur und damit zu einer gesundheitlichen Gefährdung führen. Dieser Zustand liegt aber bereits weit außerhalb des Behaglichkeitsbereiches.

Die Schweißabgabe, die als Gewichtsverlust des Körpers gemessen wurde, weist für niedrige Effektivtemperaturen eine nahezu konstante Tendenz auf. Es handelt sich in diesen Fällen um Gewichtsverluste, die stets vorhanden sind, nämlich in Form der Wasser-



**Bild 6.** Körperkern- und Hauttemperatur einer Versuchsperson während der Klimaversuche in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur.

dampfabgabe über die Haut und Atmung. Ab 20 °C Effektivtemperatur setzt dann offensichtlich eine erhöhte zusätzliche Schweißabgabe ein, **Bild 7**. Diese dient unmittelbar dem Ausgleich der Wärmebilanz des Körpers. Mit der Schweißabgabe könnte damit ein erster Ansatzpunkt für die Abgrenzung des thermisch neutralen vom noch zumutbaren, aber bereits belastenden Klimabereich vorliegen. Bei weiteren Versuchen wird daher das Kriterium der Schweißabgabe hinsichtlich einer einwandfreien Zuordnung näher überprüft werden müssen, wobei jedoch vornehmlich die Besonderheiten des Arbeitsplatzes "Fahrerkabine" zu berücksichtigen sind.



**Bild 7.** Schweißabgabe während der Versuche in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur.

### 3. Rahmenbedingungen für die klimatechnische Gestaltung

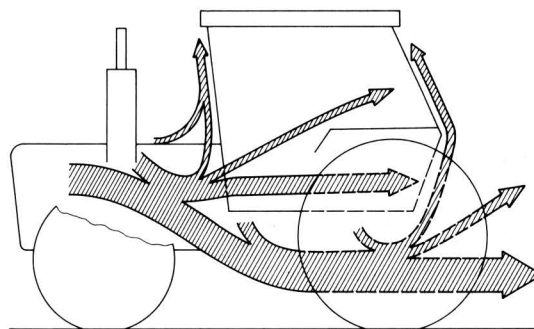
Die besonderen klimatischen Bedingungen in Fahrerkabinen liegen einerseits, wie bereits erwähnt, in den fahrzeugbedingten Wärmequellen, wie Motor und Getriebe, und der Sonneneinstrahlung durch die großen Glasflächen, zum anderen aber auch in der räumlichen Enge der Kabinen.

Leider sind deshalb die bei der Klimatisierung von Wohn- und Büroräumen gewonnenen Erkenntnisse, die in Form zahlreicher Untersuchungen vorliegen [u.a. 9, 10], nicht ohne weiteres auf Fahrerkabinen übertragbar, da eben die für große Räume geltenden Bedingungen – große Abstände der Personen zu den Wandflächen, vernachlässigbar kleine Unterschiede zwischen Wand- und Lufttemperatur – gerade in Kabinen nicht gegeben sind. Hinzu kommt die meist einseitige Strahlungsbelastung.

Da aufgrund physikalischer Gegebenheiten bei einem Verbrennungsmotor nur etwa ein Drittel der insgesamt im Brennstoff zugeführten Energie in mechanische Energie umgewandelt wird, muß die übrige Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben werden. Einen qualitativen Eindruck von den dadurch auftretenden Wärmeströmen, die die Luft in unmittelbarer Nähe des Fahrzeugs stark aufheizen, vermittelt **Bild 8** [11]. Aufgrund der höheren Lufttemperaturen im Nahbereich der Kabine und auch durch die vom Motor- und Getrieberaum direkt eingedrungene Wärmemenge erhöht sich die Temperatur in der Kabine recht beträchtlich. Bei einem stehenden Schlepper der Leistungsklasse um 100 kW kann allein hierdurch, d.h. bei Ausschalten der Sonneneinstrahlung, die Zunahme der Lufttemperatur bei Vollast in Kopfhöhe des Fahrers bis zu 9 °C betragen, wenn ein Außenluftstrom von etwa 160 m<sup>3</sup>/h in die Kabine eingeblasen wird.

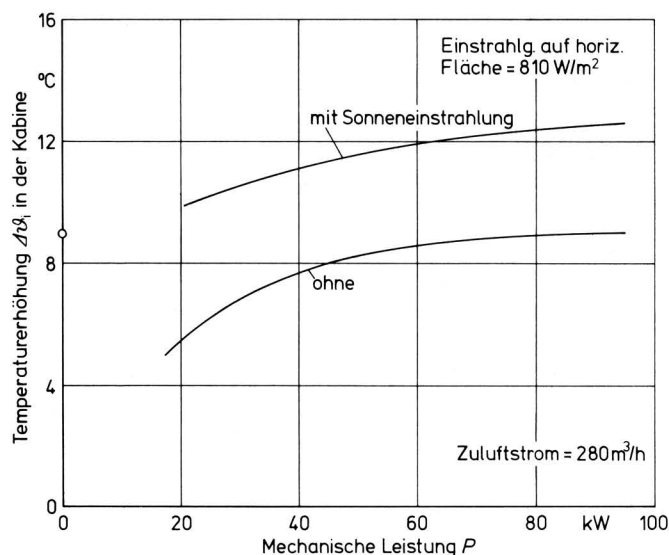
Infolge der Sonnenstrahlung werden die Kabinenwandungen außen erwärmt. Bei ungenügender Isolation führt dies zu einer Wärmeabgabe nach innen. Ausschlaggebend für die Temperaturerhöhung in Kabinen ist jedoch die durch die großen Glasflächen in die Kabine eindringende direkte und diffuse Sonnenstrahlung. Glasscheiben sind für die im Sonnenspektrum überwiegend enthaltenen kurzwelligeren Strahlen weitgehend durchlässig, während sie

nahezu undurchlässig sind für die langwellige Wärmestrahlung, die von den erwärmten Materialien im Kabineninneren ausgeht. Infolgedessen kommt es in der Kabine zu dem sogenannten "Treibhauseffekt", der in stehenden unbelüfteten Kabinen zu Temperaturerhöhungen gegenüber der Außenluft von 15 °C und mehr führen kann [2]. Als äußerst unangenehm wird bei diesen hohen Lufttemperaturen dann die die Körperoberfläche treffende Strahlung empfunden, eine Tatsache, die auch vom Pkw her bekannt ist. Nach vorsichtigen Schätzungen beläuft sich die durch Wärmestrahlung in der Kabine vom Körper aufzunehmende Wärmeleistung auf ungefähr 50 W.



**Bild 8.** Qualitative Darstellung der von Motor und Getriebe ausgehenden konvektiven Wärmeströme.

Im praktischen Einsatz überlagern sich oftmals die von Motor und Getriebe sowie die von der Sonne herrührenden Wärmeströme. Je nach Sonnenhöhe und Strahlungsintensität können sich dann, **Bild 9**, in einer Kabine Temperaturerhöhungen von 10 bis 13 °C gegenüber der Außenluft ergeben, obgleich die Kabine mit einem Außenluftstrom von etwa 280 m<sup>3</sup>/h belüftet wird. Geht man von einer Außenlufttemperatur von ca. 21 °C aus und beträgt die Luftgeschwindigkeit in der Kabine etwa 0,5 m/s, dann werden mit einer bei dieser Außenlufttemperatur am häufigsten auftretenden relativen Luftfeuchte von ca. 50 % (das entspricht einer Feuchtemperatur von fast 15 °C) nach Bild 2 in der Kabine Effektivtemperaturen zwischen 23 °C und 25 °C erreicht. Gemäß Bild 7 ist damit der Bereich erreicht, in dem eine vermehrte Schweißabgabe des Körpers notwendig ist, um die Wärmebilanz im Gleichgewicht zu halten.



**Bild 9.** Temperaturerhöhung (Übertemperatur der Luft gegenüber Umgebungsluft) in einer Schlepperkabine in Abhängigkeit von der abgegebenen mechanischen Leistung mit und ohne Sonneneinstrahlung.

Ein dauernder Aufenthalt in Kabinen ist damit kaum mehr vertretbar, wenn nicht geeignete klimatechnische Maßnahmen zur Reduzierung der Klimabelastung ergriffen werden. Zu diesen Maßnahmen gehören zunächst alle Möglichkeiten, die den Wärmestrom in die Kabine verringern, wie z.B. die Wärmeisolation der Kabinenwände, getönte Scheiben und Blenden. Andererseits wird man aber nicht umhin können, einen erheblichen Anteil der Wärmeenergie über die Zwangsbelüftung der Kabine mit gekühlter Luft abzuführen.

#### 4. Belüftung von Kabinen

Die zur Wärmeabfuhr aus der Kabine notwendigen – im Vergleich zum Kabinenvolumen – großen Zuluftströme mit den entsprechend niedrigen Zulufttemperaturen dürfen ihrerseits aber nicht wieder infolge zu großer Luftgeschwindigkeit oder Temperaturdifferenz unmittelbar an der Körperoberfläche zu nicht behaglichen Klimazuständen in der Kabine führen.

Derzeitige Untersuchungen an auf dem Markt erhältlichen Fahrer-kabinen haben deshalb zum Ziel, den Luftzustand in Kabinen in Abhängigkeit von verschiedenen Zuluftbedingungen festzustellen. Die Kabine befindet sich im Simulationsraum des Arbeitsplatzsimulators. Die Sonnenstrahlung in die Kabine wird mit der dort installierten Strahlungseinrichtung nachgebildet. Den Wärmestrom von Motor und Getriebe simulieren in der Kabine angebrachte Heizfolien. Eine ausführliche Beschreibung des Versuchs- und Meßaufbaus erfolgte in [12].

Ausgangspunkt dieser Untersuchungen ist der Istzustand in der Kabine, d.h. der Zustand bei Zufuhr von Außenluft über die in der Kabine befindlichen Zuluftöffnungen. Von diesen Versuchen sollen im folgenden Teilergebnisse mitgeteilt werden, die den Luftzustand in der Kabine bei der kleinsten und größten Lüfterstufe des kabineneigenen Gebläses sowie bei Simulation beider Wärmeströme beschreiben.

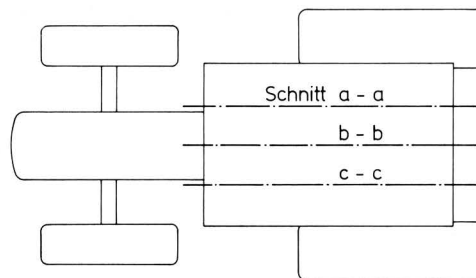
Abweichend vom ersten Teil dieses Aufsatzes wird im folgenden der Luftzustand nicht durch das Klimasummenmaß der Effektivtemperatur gekennzeichnet, sondern durch die Größen Lufttemperatur und -geschwindigkeit, also durch zwei der drei in der Effektivtemperatur zusammengefaßten und gewichteten physikalischen Größen. Nur so läßt sich die Luftbewegung in der Kabine deutlich darstellen. Außerdem kann aus diesen beiden Größen die Effektivtemperatur abgeschätzt werden, während umgekehrt der Rückschluß von der Effektivtemperatur auf die einzelnen Luftzustandsgrößen nicht möglich ist.

##### 4.1 Luftzustand in der Kabine

Die ebene bildliche Darstellung einer Raumströmung ist fast immer unvollkommen, da die Strömung dreidimensional und wirbelbehaftet ist. Für die Darstellung der Ergebnisse werden hier drei parallele Schnitte durch die Kabine gelegt, **Bild 10**. Der senkrechte Schnitt b-b verläuft durch die Mittelebene der Kabine (in Fahrtrichtung), während sich die Schnitte a-a und c-c jeweils um 350 mm versetzt in der rechten bzw. linken Kabinenhälfte befinden. Für die Darstellung der Ergebnisse wird die sogenannte Topographie verwendet [13], d.h. es werden bestimmte Bereiche der Lufttemperatur und -geschwindigkeit zusammengefaßt. Für die Geschwindigkeit entfällt damit die Richtungsangabe. Die Temperaturwerte geben die Differenz zur Umgebungstemperatur (Lufttemperatur im Simulationsraum) an. Bei beiden Werten handelt es sich um den 50 %-Wert aus einer umfangreichen Stichprobe [12].

##### 4.1.1 Verhältnismäßig geringe Luftwechselrate

Bei der kleinsten Stufe liefert das kabineneigene Gebläse einen Volumenstrom der Zuluft von ca.  $180 \text{ m}^3/\text{h}$ . Das entspricht für diese Kabine einer Luftwechselrate von  $n \approx 70 \text{ h}^{-1}$ , d.h. der Luftinhalt der Kabine würde im Idealfall 70mal in der Stunde vollständig ausgetauscht.



**Bild 10.** Anordnung der Schnitte in der Kabine.

Die Auswirkungen dieses für eine Fahrerkabine normalerweise noch verhältnismäßig kleinen Volumenstroms auf die Luftbewegung in der Kabine sind in **Bild 11** wiedergegeben.

Im unmittelbaren Bereich des Zuluftstrahles (Schnitt b-b) sind recht hohe örtliche Luftgeschwindigkeiten festzustellen. Im Kopfbereich des Fahrers liegen die Geschwindigkeiten mit über  $2 \text{ m/s}$  weit oberhalb des z.B. in der DIN 1946 [14] empfohlenen Grenzwertes von  $0,5 \text{ m/s}$ . Die Eindringtiefe des Zuluftstrahles ist länger als der Abstand der Kabinenrückwand vom Lufteintritt. Der Zuluftstrahl durchdringt somit die Kabine bis zur Rückwand und fließt dann fast als Wandstrahl weiter. Im direkten Aufenthaltsbereich des Fahrers liegen die Luftgeschwindigkeiten um etwa  $0,5 \text{ m/s}$ , also bei dem oben genannten Grenzwert für die Luftgeschwindigkeit in Räumen.

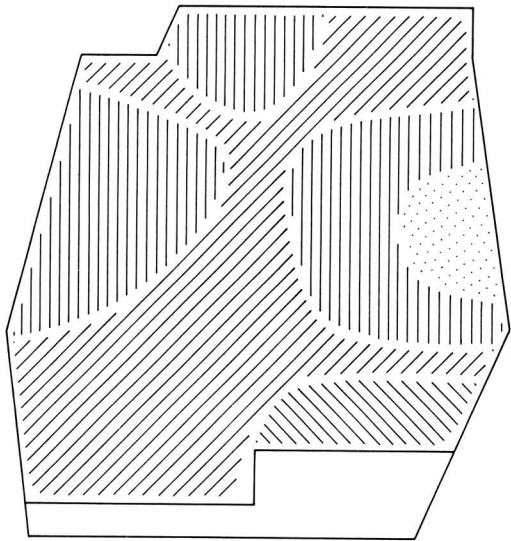
Wenn aber die Luftgeschwindigkeit wenigstens in Teilbereichen noch als erträglich anzusehen ist, dann trifft das keineswegs auch für die Lufttemperaturen in der Kabine zu, **Bild 12**. Abgesehen vom Anfangsabschnitt des Strahles hinter dem Lufteintritt, ist an keinem Ort der Kabine die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur kleiner als  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Im Kern des Zuluftstrahles liegen die Temperaturdifferenzen unter  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , ansonsten werden im gesamten Kabineninneren  $\Delta\theta = 24 \text{ }^\circ\text{C}$  kaum unterschritten.

Für die unterschiedliche Höhe der Temperaturdifferenzen in **Bild 9** und in **Bild 12** gibt es eine Reihe von Gründen. Anzuführen ist vor allem, daß die durch Simulation in die Kabine eingebrachten Wärmeströme im oberen Bereich der in der Praxis auftretenden Werte liegen. Daneben ist die im Simulator aufgestellte Kabine größer und hat eine andere Scheibenanordnung und -größe. Durch die Erwärmung des Daches, der Kabinenvorderseite usw. infolge der Strahlung liegt die Zulufttemperatur an der Ansaugstelle bereits bis  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  über der Lufttemperatur im Simulationsraum. Auch der teilweise Umluftbetrieb – ein Teil der Innenluft wird der Zuluft wieder beigemischt – trägt mit zu den hohen Übertemperaturen bei.

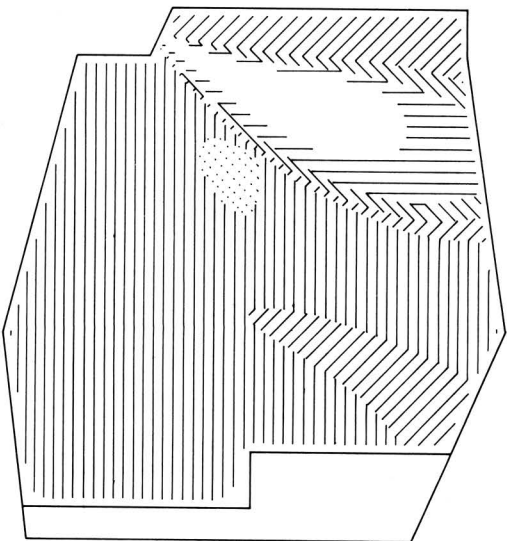
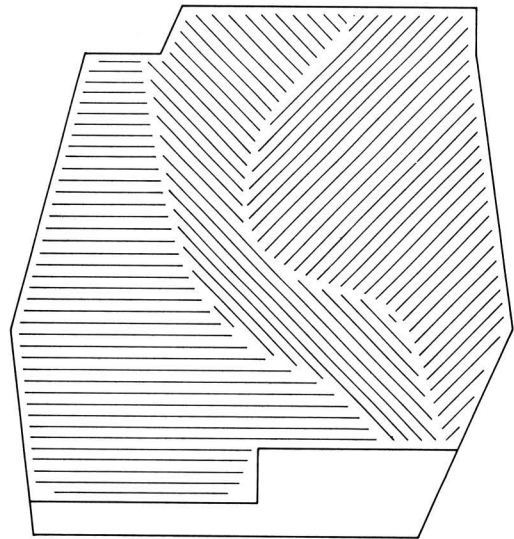
##### 4.1.2 Hohe Luftwechselrate

Eine Steigerung des Zuluftvolumenstroms auf etwa  $380 \text{ m}^3/\text{h}$  und damit etwa eine Verdoppelung der Luftwechselrate auf  $n \approx 150 \text{ h}^{-1}$  hat natürlich auch wesentliche Auswirkungen auf die Luftbewegung in der Kabine, **Bild 13**. Abgesehen von kleineren Bereichen im vorderen Teil der Kabinenmitte sowie in der hinteren rechten Kabinenecke, treten Luftgeschwindigkeiten unter  $0,5 \text{ m/s}$  nicht mehr auf. Im Kopfbereich des Fahrers ist die Luftgeschwindigkeit sogar höher als  $5 \text{ m/s}$ , und an der Kabinenrückwand ist sie im Kern des Zuluftstrahles immer noch nicht unter  $2 \text{ m/s}$  abgesunken. Im übrigen Aufenthaltsbereich des Fahrers erreichen die Luftgeschwindigkeiten fast überall ca.  $1 \text{ m/s}$ .

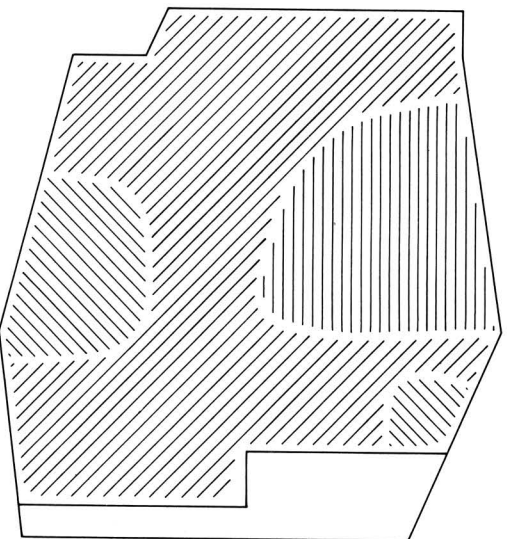
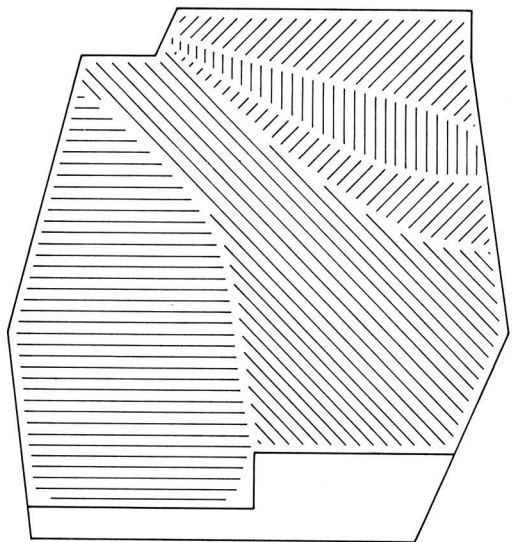
Die beträchtliche Steigerung des Luftdurchsatzes bringt aber insgesamt nur geringfügige Temperaturänderungen in der Kabine, **Bild 14**. Generell sinken die Lufttemperaturen durch den mehr als verdoppelten Luftdurchsatz nur um etwa  $3\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nur im Bereich des Zuluftstrahles und im Schnitt a-a in der rechten Kabinenhälfte treten Temperaturdifferenzen unter  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  auf. Im übrigen stellen sich im Aufenthaltsbereich des Fahrers um  $20\text{--}22 \text{ }^\circ\text{C}$  höhere Lufttemperaturen als in der Umgebung ein.



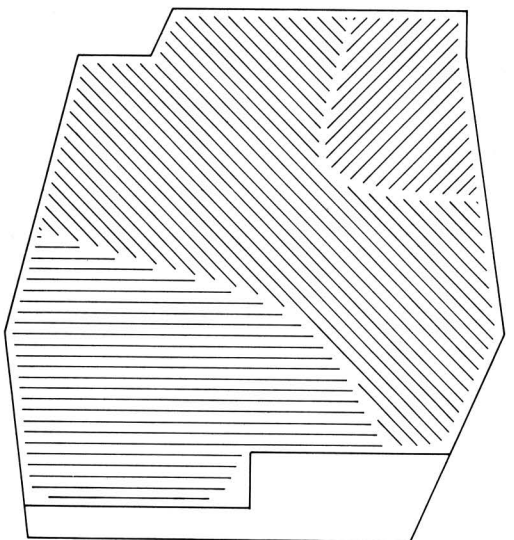
Schnitt a-a



Schnitt b-b



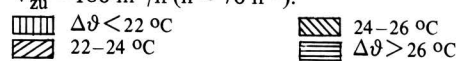
Schnitt c-c

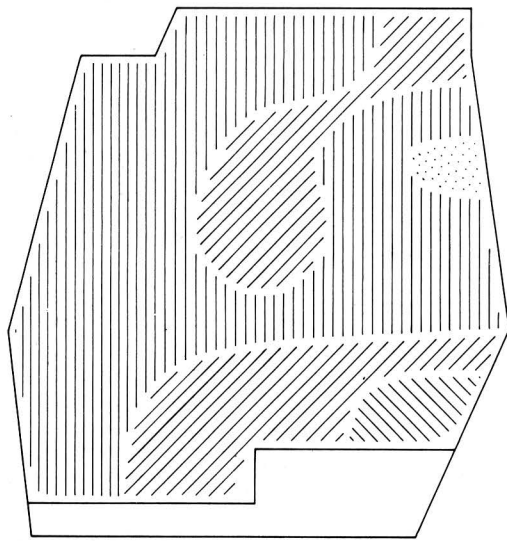


**Bild 11.** Luftgeschwindigkeitsverteilung in der Kabine bei  $\dot{V}_{zu} = 180 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $n \approx 70 \text{ h}^{-1}$ ).

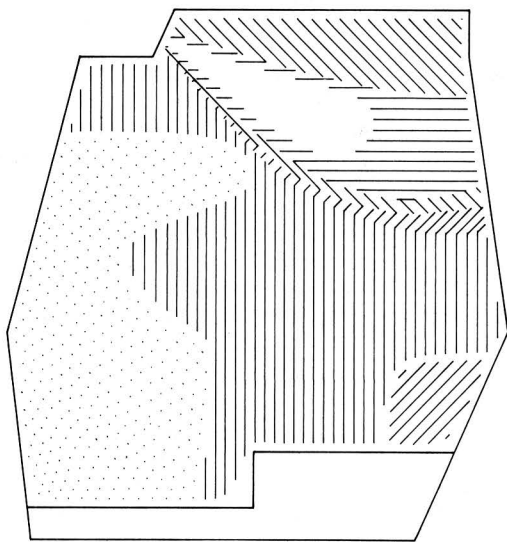
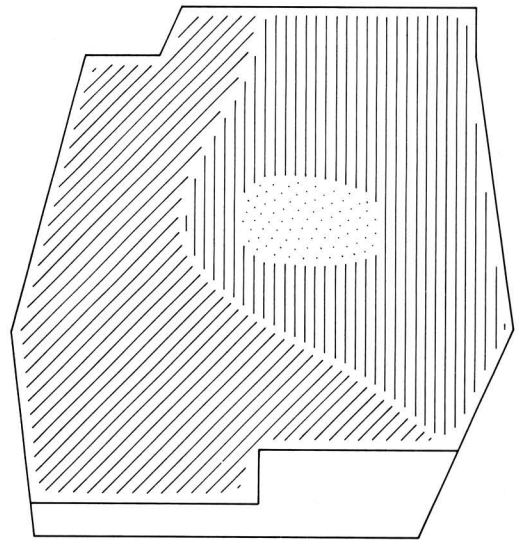


**Bild 12.** Verteilung der Lufttemperatur in der Kabine bei  $\dot{V}_{zu} = 180 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $n \approx 70 \text{ h}^{-1}$ ).

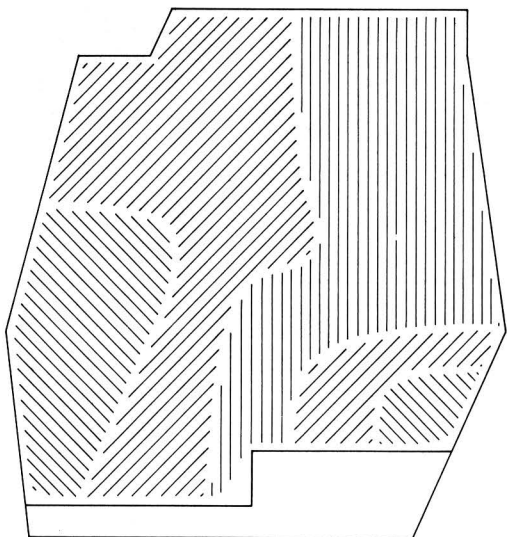
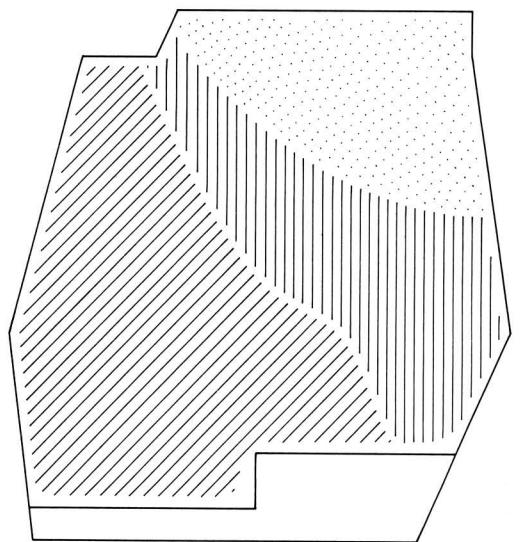




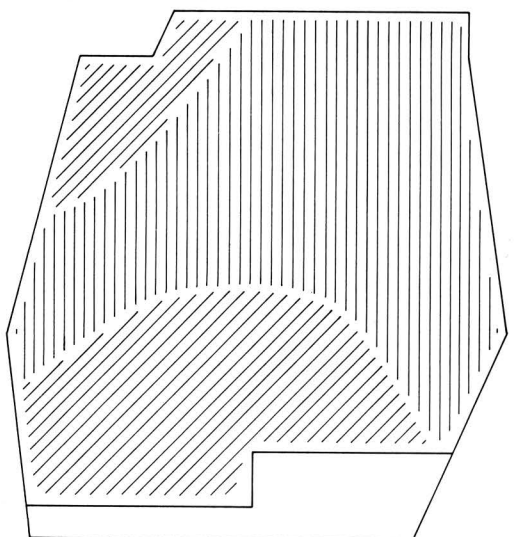
Schnitt a-a



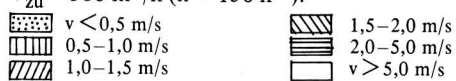
Schnitt b-b



Schnitt c-c



**Bild 13.** Luftgeschwindigkeitsverteilung in der Kabine bei  $\dot{V}_{\text{zu}} = 380 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $n \approx 150 \text{ h}^{-1}$ ).



**Bild 14.** Verteilung der Lufttemperatur in der Kabine bei  $\dot{V}_{\text{zu}} = 380 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $n \approx 150 \text{ h}^{-1}$ ).



Die Versuche im Arbeitsplatzsimulator bestätigen damit, daß sich unter den geprüften Voraussetzungen durch eine Belüftung der Fahrerkabine mit nicht behandelter Außenluft keine befriedigenden Klimabedingungen erreichen lassen. Abgesehen von den schon bekannten sehr hohen Lufttemperaturen, stellen sich aufgrund der intensiven Belüftung im gesamten Kabineninnenraum Luftgeschwindigkeiten ein, die nicht mehr akzeptabel sind. Weitere Versuche im Arbeitsplatzsimulator haben deshalb zum Ziel, Kriterien für eine zweckmäßige Zwangsbelüftung der Kabine mit gekühlter Zuluft zu finden.

## 5. Zusammenfassung

Fahrerkabine haben heute vielfältige Schutzfunktionen übernommen und müssen deshalb möglichst dicht sein. Während der Haupteinsatzzeit der Fahrzeuge treten unter diesen Bedingungen in der Kabine häufig Klimabedingungen auf, die zwar noch nicht gesundheitsgefährdend sein müssen, aber nicht mehr ohne weiteres erträglich sind und zu einer Leistungsminderung führen können.

Für eine Reduzierung klimatischer Belastungen muß daher die Möglichkeit gegeben sein, den thermisch neutralen oder behaglichen Klimabereich von dem noch zumutbaren, aber schon belastenden Bereich durch meßbare Größen abzugrenzen. Neben der Befragung des Menschen nach dem subjektiven Befinden kommen dafür vor allem meßbare physiologische Einflußgrößen wie z.B. Pulsfrequenz, Körperkern-, Hauttemperatur oder Schweißabgabe in Frage. Versuche mit dem Ziel, Kriterien für diese Abgrenzung zu finden, ergeben, daß von den genannten physiologischen Größen lediglich die Schweißabgabe einen erfolgversprechenden Ansatz bietet. Oberhalb einer Effektivtemperatur von ca. 20 °C setzt eine eindeutig erhöhte Schweißabsonderung ein. Bei den anderen Größen ist eine zweifelsfreie Zuordnung nicht immer möglich.

Die Reduzierung belastender Klimabedingungen in Fahrerkabine geschieht vor allem über eine Zwangsbelüftung. Sowohl Messungen im Freien als auch im Arbeitsplatzsimulator der FAL zeigen aber, daß behagliche Klimabedingungen allein über die Zufuhr von Außenluft nicht geschaffen werden können. Trotz intensiver Belüftung wird bei den Versuchen im Arbeitsplatzsimulator an fast keinem Ort innerhalb der Kabine eine Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft von 20 °C unterschritten, obwohl – bezogen auf behagliche Bedingungen – sehr hohe Luftgeschwindigkeiten auftreten. Diese betragen z.B. im Kopfbereich mehr als 5 m/s bei der höchsten Einschaltstufe des kabineneigenen Gebläses.

## Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] *Batel, W.*: Messungen zur Staub-, Lärm- und Geruchsbelastung an Arbeitsplätzen in der landwirtschaftlichen Produktion und Wege zur Entlastung – Erster Bericht. *Grundl. Landtechnik* Bd. 25 (1975) Nr. 5, S. 136/57.
- [ 2 ] *Batel, W., J. Janssen u. R. Möller*: Klimabelastung auf Schleppern und Mähreschern und Maßnahmen zur Klimagestaltung. *Landbauforschung Völkenrode*, Sh. 52 (1980) S. 157/70.
- [ 3 ] *Domier, K.W.*: A review of research relating to thermal comfort of cab operators. *Ultuna/Uppsala: Jordbrukstekniska institutet* (1975), JTI-rapport Nr. 15.
- [ 4 ] *Henry, G.M. u. G.C. Zoerb*: Environmental control of cabs for operator comfort. *Can. Agr. Eng.* Bd. 9 (1967) Nr. 1, S. 1/6.
- [ 5 ] *Brown, A.*: Värmeavlastning i förarhytter – Studier av avvikelser från optimal klimatkomfort. *Ultuna/Uppsala: Jordbrukstekniska institutet* (1978), JTI-rapport Nr. 25.
- [ 6 ] *Gustafsson, A.*: Värmeavlastning i förarhytter – Klimatupplevelser under fälltforhållanden. *Ultuna/Uppsala: Jordbrukstekniska institutet* (1979), JTI-rapport Nr. 30.
- [ 7 ] ● *Haider, E.*: Ergonomische Ermittlung, Beurteilung und Gestaltung von superponierten Anforderungen. Exemplarische Analyse: Informatrische Arbeit und Klima. *Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 17, Nr. 13, Düsseldorf: VDI-Verlag* 1982.
- [ 8 ] *Yaglou, C.P.*: Temperature, humidity and air movement in industries: The effective temperature index. *J. Industr. Hyg.* Bd. 9 (1927) S. 297/309.
- [ 9 ] ● *Grandjean, E.*: Physiologische Arbeitsgestaltung. *Thun: Ott Verlag* 1979.
- [ 10 ] ● *Fanger, P.Q.*: Thermal comfort. *New York: McGraw-Hill* 1973.
- [ 11 ] *Batel, W. u. R. Möller*: Klimabelastung der Fahrer von Schleppern und Arbeitsmaschinen mit Eigenantrieb. *Grundl. Landtechnik* Bd. 30 (1980) Nr. 5, S. 155/61.
- [ 12 ] *Janssen, J. u. R. Möller*: Versuchseinrichtung zum Messen des Temperaturfeldes und der Luftgeschwindigkeit in Fahrerkabine. *Institutsbericht Nr. Jn 03* (1982).
- [ 13 ] ● *Moog, W.*: Dimensionierung von Luftführungssystemen. *Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 6, Nr. 49, Düsseldorf: VDI-Verlag* 1978.
- [ 14 ] *DIN 1946: Lüftungstechnische Anlagen T1/T3.* *Berlin/Köln: Beuth-Vertrieb* 1960/1962.