

Klimatechnische Gesichtspunkte bei der Konstruktion von Fahrerinnen.

Von Jan Janssen, Braunschweig-Völkenrode*)

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

DK 631.372:62-784:331.827:628.8

Fahrerinnen auf fahrenden Arbeitsmaschinen dienen bisher vor allem zum Schutz des Fahrers vor Niederschlägen und Kälte. Die Übernahme weiterer Aufgaben, wie der Schutz vor Lärm und Staub, erfordert eine dichte, geschlossene Kabine. Notwendig ist dann eine wirksame "Klimatisierung" dieser Kabine.

Aus der Wärmebilanz für eine Fahrerinnen wird der Einfluß der verschiedenen Wärmeströme auf den Luftzustand in der Kabine abgeleitet und die Veränderung dieses Luftzustandes durch Einflußnahme auf die Wärmeströme untersucht mit dem Ziel, bestimmte Behaglichkeitswerte im Kabineninneren zu erreichen und aufrechtzuerhalten. Daraus ergeben sich gewisse Forderungen an die Gestaltung von Fahrerinnen und die Leistungsfähigkeit von Heiz- und Kühlanlagen.

Inhalt

1. Klima und Fahrerinnen
 - 1.1 Bauarten von Fahrerinnen
 - 1.2 Raumklima und Behaglichkeit
2. Aufgabenstellung
3. Wärmebilanz und Grundgleichung
 - 3.1 Wärmebedarf im Winter
 - 3.1.1 Verringern des Abluftstromes
 - 3.1.2 Verkleinern des Transmissionswärmestromes
 - 3.2 Kühlbedarf im Sommer
 - 3.2.1 Wärmeeinfall durch Transmission und Sonneneinstrahlung
 - 3.2.2 Wärmestrom von Motor- und Getrieberaum
 - 3.2.3 Konstruktive Maßnahmen zum Senken der Wärmebelastung
4. Luftführung in der Kabine
5. Folgerungen für die klimatechnische Gestaltung
6. Benutzte Formelzeichen

Vorgetragen auf der Jahrestagung der VDI-Fachgruppe < Landtechnik > am 23. Okt. 1975 in Braunschweig.

*) Dipl.-Ing. Jan Janssen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

1. Klima und Fahrerinnen

Als Klima im meteorologischen Sinne wird die Gesamtheit der durchschnittlichen Witterungserscheinungen für einen bestimmten Ort oder ein bestimmtes Gebiet bezeichnet. Lufttemperatur, -feuchtigkeit, -geschwindigkeit, Sonnenstrahlung sowie Luftdruck, Bewölkung und Niederschläge sind die zur Kennzeichnung des Klimas wichtigen Größen. Solange sich der Mensch im Freien aufhält, wirken die Witterungseinflüsse unmittelbar auf ihn ein. Eine nur mittelbare Wirkung üben sie dagegen auf den als "Raum- oder Innenklima" bezeichneten Luftzustand in Wohn- oder Arbeitsräumen wie Fahrerinnen aus.

1.1 Bauarten von Fahrerinnen

Die Bauarten von Fahrerinnen lassen sich aus klimatechnischer Sicht danach einstufen, wie weit die unmittelbaren Einwirkungen der Witterungseinflüsse ausgeschaltet werden sollen. Im einfachsten Fall schützt beim Schlepper ein in den zum Unfallschutz vorgeschriebenen Sicherheitsrahmen eingehängtes Dach gegen Niederschlag. Wie die Schutzdächer beim Mähdrescher bringt es gleichzeitig auch einen Schutz gegen Sonnenstrahlung. Zum weiteren Schutz gegen Regen und Wind werden eine meist aufklappbare Frontscheibe und textile Seiten- und Rückwände angebracht.

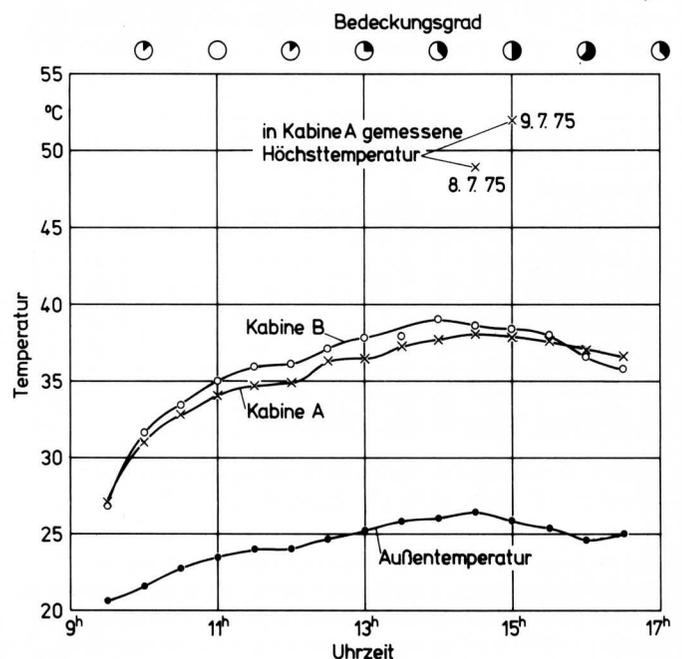


Bild 1. Temperaturverlauf in Kopfhöhe des Fahrers in zwei stehenden, geschlossenen Kabinen verschiedener Bauart infolge Sonneneinstrahlung (nach Batel [1]).

Eine Entwicklung, die die Forderungen nach Umsturzsicherheit und Wetterschutz gleichermaßen berücksichtigt, führt zur Kabine in Rahmenbauweise und eröffnet die Möglichkeit, bei tiefen Außentemperaturen die Kabine wirksam zu beheizen. Dazu benötigt man aber eine möglichst geschlossene Kabine, die auch aus Gründen des Lärmschutzes (Geräuschpegel am Fahrerohr kleiner als 90 dB (A)) und des Staubschutzes angestrebt wird.

Solche auch nach schall- und staubtechnischen Gesichtspunkten gestalteten Fahrerkabinen bringen für den Fahrer einen weitgehenden Schutz gegen Witterungseinflüsse, Luftverschmutzung und einen zu hohen Geräuschpegel, aber durch die Sonneneinstrahlung und den Wärmestrom von den Wärmequellen der Maschine, wie Motor und Getriebe, kann es im Sommer zu einer beträchtlichen Aufheizung in der Kabine kommen. Nach Bild 1 kann allein die Sonneneinstrahlung schon zu unerträglich hohen Temperaturen führen. Da diesem Temperaturanstieg in der Kabine wegen der Forderung nach wirksamem Lärm- und Staubschutz nicht mehr durch Öffnen der Türen und Fenster begegnet werden kann, andererseits aber ein derartiger Luftzustand die Leistungsfähigkeit des Menschen beeinträchtigt und in Extremfällen die Gesundheit gefährdet, ergibt sich die Notwendigkeit, mit klimatechnischen Mitteln in der Kabine ein angenehmes "Raumklima" zu schaffen.

1.2 Raumklima und Behaglichkeit

Das Raum- oder Innenklima wird gekennzeichnet durch eine Vielzahl von Einflußgrößen. Die Frischluftzufuhr, die Temperatur der Luft und der Umschließungsflächen, die Luftfeuchtigkeit und -geschwindigkeit sind insofern die wichtigsten, als sie den maßgeblichen Einfluß auf den Wärmehaushalt des Menschen ausüben. Die Kenntnis dieser Größen genügt deshalb im allgemeinen zur Bewertung des Raumklimas.

Ziel der klimatechnischen Maßnahmen ist es, in Räumen möglichst behagliche Klimabedingungen herzustellen und konstant zu halten, einen Luftzustand also, der den Organismus des Menschen am wenigsten belastet und seine Leistungsfähigkeit langfristig erhält.

In Tafel 1 sind allgemeingültige Behaglichkeitsbereiche für die einzelnen Einflußgrößen angegeben. Teilweise gelten für diese in Abhängigkeit von der Jahreszeit unterschiedliche Werte.

Für eine ausreichende Zufuhr von Atemluft in den Kabineninnenraum ist zu sorgen. In den VDI-Lüftungsregeln [2] wird pro Person eine Mindestfrischluftzufuhr von 30 m³/h genannt. Diese Frischluftzufuhr sollte nicht unterschritten werden, da sonst wegen Sauerstoffmangel Übelkeit und Kopfschmerzen auftreten [3].

Einflußgröße		behaglich	unbehaglich	unerträglich
Frischluftzufuhr \dot{V}	m ³ /h	30 - 90	10 - 30	< 10
Lufttemperatur in Kopfhöhe	°C	18 - 27	0 - 18 27 - 37	< 0 > 37
rel. Luftfeuchtigkeit φ	%	30 - 65	15 - 30 65 - 85	< 15 > 85
Luftgeschwindigkeit	m/s	0,1 - 0,5	0,5 - 1,0	> 1,0

Tafel 1. Zuordnung von Werten der Einflußgrößen des Raumklimas in verschiedene Behaglichkeitsbereiche.

Die Lufttemperatur, die den wesentlichsten Einfluß auf die Leistungsfähigkeit des Menschen ausübt [4, 5], sollte im Kabineninneren bei hohen Außentemperaturen in Kopfhöhe des Fahrers etwa 24 bis 27 °C und bei niedrigen Außentemperaturen etwa 18 bis 20 °C betragen [3, 6, 7]. Bei niedrigen Außentemperaturen können in Abhängigkeit von der Kleidung auch Temperaturen von 15 °C in Kopfhöhe des Fahrers durchaus noch als angenehm empfunden werden. Anzustreben ist eine Temperaturschichtung, bei der die

Temperatur in Kopfhöhe um 4 bis 6 °C niedriger ist als in Fußhöhe [8, 9, 10]. Die relative Luftfeuchtigkeit soll zwischen 30 und 65 % liegen [2, 11]. Bei niedrigerer relativer Luftfeuchtigkeit verträgt man höhere Temperaturen als die genannten.

Da neben der Temperatur die Feuchtigkeit die wichtigste das Klima kennzeichnende Größe ist, liegt die Darstellung von angestrebten und erreichten Klimawerten und -bereichen im Mollier-h,x-Diagramm nahe. Bild 2 zeigt ein h,x-Diagramm für feuchte Luft, das für den konstanten Luftdruck von $p = 1,013$ bar (Atmosphärendruck) entworfen wurde. Auf der Abszisse sind der Feuchtegrad x und der Wasserdampf-Partialdruck der feuchten Luft p_D aufgetragen. An der Ordinate sind die Enthalpie und die Lufttemperatur angegeben. Linien gleicher Temperatur verlaufen nahezu parallel zur Abszisse, während die nach rechts unten verlaufenden Geraden Linien gleicher Enthalpie sind. Außerdem sind Linien gleicher relativer Luftfeuchtigkeit eingetragen. Bild 2 enthält zusätzlich noch den Behaglichkeitsbereich nach DIN 1946 [2] und den Bereich der Außenluftbedingungen für Deutschland. Andere Einflußgrößen, so z.B. die Luftgeschwindigkeit, lassen sich im Diagramm als Parameter einzeichnen.

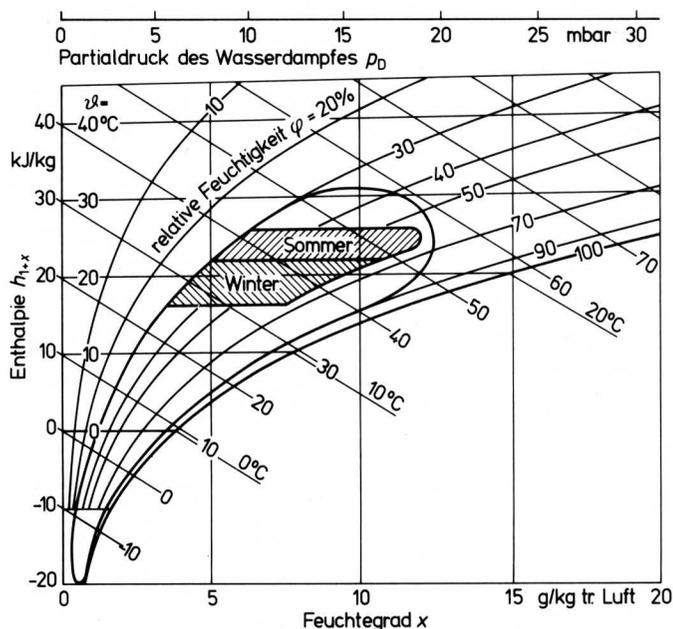


Bild 2. Mollier h,x-Diagramm für feuchte Luft mit dem Bereich der Außenluftbedingungen (äußere Kurve), der nach Steimle [12] 90 % aller in Deutschland auftretenden Zustände umfaßt, und (schraffiert) dem Behaglichkeitsbereich nach DIN 1946 [2] für Sommer und Winter.

Die durch das geringe Raumvolumen bedingte hohe Luftwechselrate führt dazu, daß der Fahrer in einer Kabine höheren Luftgeschwindigkeiten ausgesetzt ist als z.B. in Büro- oder Industrieräumen. Da durch höhere Luftgeschwindigkeiten auch höhere Temperaturen noch erträglich werden können, macht man sich diesen Effekt gelegentlich im Sommer zunutze. Doch sollte die Luftgeschwindigkeit in unmittelbarer Nähe des Fahrers 0,5 m/s nicht überschreiten.

Die Oberflächentemperaturen der den Menschen umgebenden Flächen haben ebenfalls einen bedeutenden Einfluß auf das Wohlbefinden. Kalte oder warme Wandflächen führen infolge der Wärmestrahlung zu dem unangenehmen Gefühl einer unterkühlten oder zu stark erwärmten Körperseite, selbst wenn die Lufttemperaturen im Behaglichkeitsbereich liegen. Abhilfe ist nur durch Senken oder Erhöhen der betreffenden Wandflächentemperatur möglich. Im betrachteten Temperaturbereich sollte die Differenz zwischen der Lufttemperatur in der Kabine und der Temperatur der Wandfläche nicht mehr als 5 °C betragen.

2. Aufgabenstellung

Die genannten, für die Behaglichkeitswerte der Einflußgrößen angestrebten Werte, werden je nach geographischer Lage in den seltensten Fällen in geschlossenen Fahrerkabine erreicht. So stellt sich die Frage, mit welchen technischen Mitteln ein angenehmes Raumklima im Kabineninneren geschaffen und langfristig erhalten werden kann. Aus mancherlei Gründen ist eine "Klimatisierung" einer Fahrerkabine schwierig. Der kleine Innenraum sowie der relativ große Glasanteil in den Außenwänden und deren geringes Speichervermögen bedingen, daß das Raumklima in einer Kabine von den äußeren Witterungsschwankungen sehr stark beeinflusst wird.

Für die klimatechnische Berechnung allgemeiner Art bietet das Fachschrifttum hinreichend Grundlagen [13 bis 17]. Mit Hilfe dieser Grundlagen wird im folgenden versucht, für die besonderen Erfordernisse einer Fahrerkabine die geeigneten Maßnahmen zu finden. Da die Temperaturverhältnisse maßgebend sind und oftmals zur Kennzeichnung des Raumklimas ausreichen, stehen sie im Vordergrund der Überlegungen.

3. Wärmebilanz und Grundgleichung

Die Forderung nach einem behaglichen Innenklima in der Kabine, d.h. vor allem nach einer behaglichen Lufttemperatur, läßt sich zurückführen auf die Forderung, die jeweils wirksamen Wärmeströme entsprechend zu beeinflussen.

Bild 3 zeigt schematisch eine Kabine mit einer Heiz- und Kühlanlage und den auftretenden Wärmeströmen. Für die Berechnung geht man von der Wärmebilanz für den stationären Fall aus:

$$\dot{Q}_{H/K} + \dot{Q}_{Str} + \dot{Q}_{MG} + \dot{Q}_P - \dot{Q}_T - \dot{Q}_{Ab} = 0 \quad (1)$$

Diese Wärmebilanz stellt die Grundgleichung für die zu treffenden Maßnahmen dar. Durch den Wärmestrom der Zuluft $\dot{Q}_{H/K}$, die am Wärmetauscher der Heizung erwärmt bzw. am Verdampfer der Kühlanlage gekühlt wird, ist die Summe der anderen Wärmeströme auszugleichen. Diese sind im einzelnen die Sonneneinstrahlung \dot{Q}_{Str} , der vom Motor- und Getrieberaum zugeführte Wärmestrom \dot{Q}_{MG} sowie der Transmissionswärmestrom durch die Kabinenwände \dot{Q}_T und der Abluftwärmestrom \dot{Q}_{Ab} . Zu berücksichtigen ist schließlich auch die Wärmeabgabe der sich in der Kabine befindenden Person \dot{Q}_P .

Je nach Größe der einzelnen Summanden kann der Wärmestrom $\dot{Q}_{H/K}$ ein positives oder negatives Vorzeichen haben. Bei positivem Vorzeichen muß der Kabine Wärme zugeführt werden, und es wird vom Wärmebedarf oder der Heizleistung \dot{Q}_H gesprochen. Im entgegengesetzten Fall handelt es sich um den Kühlbedarf oder die Kühlleistung \dot{Q}_K .

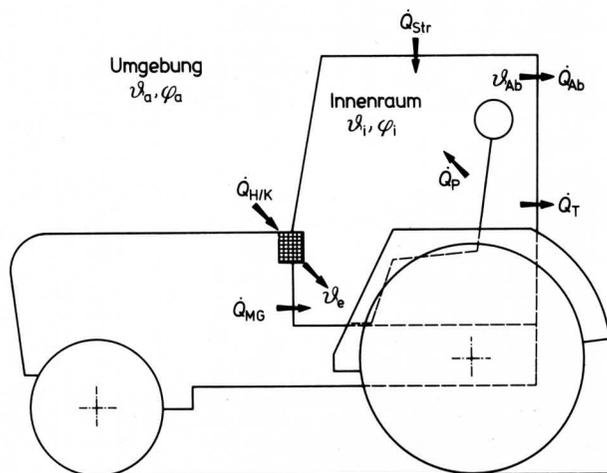


Bild 3. Wärmeströme für eine Schlepperkabine im stationären Zustand.

3.1 Wärmebedarf im Winter

Für die Heizung stehen als Energiequelle außer der Wärme motor-unabhängiger Heizgeräte die Abwärme des Motors im Kühlmedium, im Öl oder in den Auspuffgasen zur Verfügung. Bei den heutigen Verbrennungsmotoren werden etwa zwei Drittel der zugeführten Brennstoffenergie über die Kühlung bzw. mit dem Abgas abgeführt [18], so daß Heizenergie ausreichend zur Verfügung steht, die über einen Wärmetauscher an die Zuluft der Kabine abgegeben werden kann. Die Heizung soll die Wärmeverluste, die durch den Abluftstrom und den Transmissionswärmestrom durch die Kabinenwände entstehen, ausgleichen. Die Größe der Heizleistung ergibt sich dann zu:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_T + \dot{Q}_{Ab} - \dot{Q}_P \quad (2)$$

Der Wärmeverlust, der durch den Abluftwärmestrom \dot{Q}_{Ab} aus der Kabine verursacht wird, läßt sich errechnen aus der Abluftmenge und der Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebungsluft. Dazu muß die Temperatur bekannt sein, mit der die Luft die Kabine verläßt.

Mit einem in der Kraftfahrzeugtechnik empirisch gefundenen Verhältnis für diese Ablufttemperatur [3]:

$$\frac{\vartheta_{Ab}}{\vartheta_i} = \frac{\vartheta_i}{\vartheta_e} \quad (3)$$

erhält man für den Wärmeverlust mit dem Abluftstrom den Ausdruck:

$$\dot{Q}_{Ab} = \dot{m}_{Ab}(h_{Ab} - h_a) = \dot{V}_L \rho_L c_p \left(\frac{\vartheta_i^2}{\vartheta_e} - \vartheta_a \right) \quad (4)$$

Der Transmissionswärmestrom durch die Kabinenwände wird bestimmt aus dem Wärmedurchgang durch Wand- und Glasflächen der Kabine

$$\dot{Q}_T = (A_W k_W + A_G k_G) (\vartheta_i - \vartheta_a) \quad (5)$$

wobei der Wärmedurchgang sich aus dem Wärmeübergang an der Innen- und Außenseite und der Wärmeleitung durch Wände und Glasscheiben zusammensetzt. Er wird errechnet mit Hilfe des Wärmedurchgangskoeffizienten k , der für einen Wandaufbau mit n Schichten durch:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{n=1}^n \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad (6)$$

definiert ist. Die Wärmeübergangskoeffizienten können näherungsweise zu

$$\alpha_i \approx 9 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (7)$$

$$\alpha_a \approx 45 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

angenommen werden [19, 20], so daß man für normales, 4 mm dickes Sicherheitsglas beispielsweise einen Wärmedurchgangskoeffizienten von

$$k = 7,5 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (8)$$

erhält.

Die Wärmeabgabe von Personen in "Normalkleidung" und bei mittelschwerer Arbeit ist in **Bild 4** dargestellt; demnach beträgt \dot{Q}_P im betrachteten Temperaturbereich ungefähr 250 W. Der im Wärmetauscher der Zuluft zugeführte Wärmestrom errechnet sich aus dem Luftdurchsatz und der Luftaufwärmung

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{Zu}(h_e - h_a) = \dot{V}_{Zu} \rho_L c_p (\vartheta_e - \vartheta_a) \quad (9)$$

Die gleiche Heizleistung ist sowohl durch Erhöhen der Eintrittstemperatur der Zuluft in die Kabine ϑ_e bei gleichzeitiger Verminderung der Luftmenge \dot{m}_{Zu} als auch umgekehrt zu erzielen. Zu berücksichtigen ist aber, daß die Eintrittstemperatur unangenehm hoch wird, wenn der Luftdurchsatz zu klein ist.

Andererseits bestimmt die Heizleistung im wesentlichen über den Luftdurchsatz auch die Größe des Wärmetauschers. Um einen möglichst kleinen und billigen Wärmetauscher zu erhalten, muß die notwendige Heizleistung so klein wie möglich gehalten werden, auch wenn vom Motor her genügend Wärme im Kühlmittel anfällt. Aus Gründen der Behaglichkeit, um nämlich die Luftfeuchtigkeit anzuhäufen und die Wärmeabstrahlung des menschlichen Körpers in Grenzen zu halten, ist es ebenfalls erstrebenswert, den Abluftstrom zu verringern und die Wärmedämmung zu verbessern.

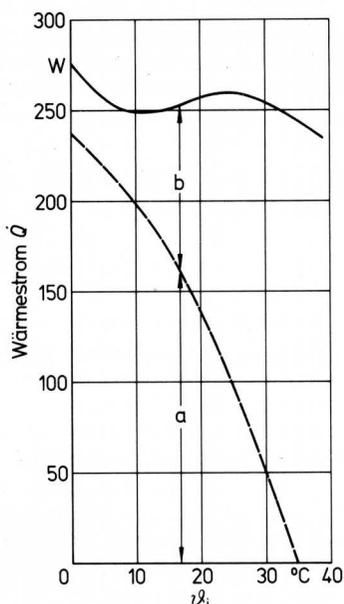


Bild 4. Wärmeabgabe von Personen in Normalkleidung (nach [11, 21]).

a trockene Wärmeabgabe b feuchte Wärmeabgabe

3.1.1 Verringern des Abluftstromes

In Abhängigkeit von der Temperatur kann die Luft verschiedene Wasserdampfmen gen aufnehmen, Bild 2. Dies führt dazu, daß die Luft nach starkem Aufheizen hinsichtlich der Behaglichkeit zu trocken ist. Der teilweise Betrieb mit Umluft bringt durch die Feuchtigkeitsabgabe des Menschen eine Befeuchtung der Luft und verkleinert den beträchtlichen Wärmeverlust durch den Abluftstrom. In diesem Fall ist das Trockenhalten des Kabineninnenraumes das eigentliche Problem. Alle mit der Raumluft in Berührung kommenden Teile müssen eine höhere Temperatur als die Taupunkttemperatur haben.

3.1.2 Verkleinern des Transmissionswärmestromes

Sowohl der k-Wert der Glasscheiben (siehe Gl. (8)) als auch der Kabinenwände liegt meistens so hoch, daß der Wärmeverlust durch Konvektion und Leitung beträchtlich ist. Dadurch stellen sich sehr niedrige Temperaturen der Umschließungsflächen ein, Tafel 2 oben, die zu einer unangenehm starken Wärmeabstrahlung des Körpers führen.

Die Wände sind deshalb so gut wie möglich zu isolieren. Isolierschichten aus Glasfaser- oder Schaumstoffmatten bewähren sich hier, da sie auch zur Schalldämpfung beitragen können [14, 15, 22]. Eine 20 mm dicke Schaumstoffmatte bringt schon eine wesentliche Erhöhung der Wandtemperatur, Tafel 2.

Ein nicht so einfach zu lösendes Problem bildet in diesem Zusammenhang die Verglasung, weil der Fahrer einerseits genug Sichtflächen nach allen Seiten braucht, andererseits aber auf die großen Glasflächen der überwiegende Teil der Wärmeverluste durch Transmission entfällt. Die Ausrüstung der Kabinen mit Verbund- oder Doppelscheiben erscheint deshalb zweckmäßig, wie Tafel 2 weiterhin zeigt.

3.2 Kühlbedarf im Sommer

Vornehmlich infolge der Sonneneinstrahlung und des Wärmestromes vom Motor- und Getrieberaum können im Kabineninneren erheblich höhere Temperaturen als außen auftreten. Die Bestrebungen müssen also dahin gehen, den Temperaturanstieg in der Kabine infolge der anfallenden Wärmeströme so klein wie möglich zu halten und durch eine Einrichtung zum Kühlen gegebenenfalls abzubauen:

Kabinenteil	Ausführung	Oberfläche A [m ²]	k-Wert [W/m ² K]	Wärmeverlust \dot{Q} [W]	Temperatur der Umschließungsfl. ϑ_U [°C]
Seitenwände abzgl. Scheiben	Blech, keine Isolierung	3,3	7,1	702,9	- 1,3
Dach	Blech, keine Isolierung	1,65	7,1	351,5	- 1,3
Glasscheiben	Normalglas	5,4	7,5	1215,0	- 2,5
		$A_{ges}=10,35$	$k_m=7,31$	$\dot{Q}_{ges}=2269,4$	$\vartheta_{U,m}=- 1,9$
Seitenwände, Dach	Blech, Isoliermatte aus Schaumk.stoff ($\lambda = 0,045\text{W/mK}$, $\delta = 0,02\text{ m}$)	4,95	1,7	252,5	14,9
Glasscheiben	Verbundglas	5,4	5,0	810,0	5,0
		$A_{ges}=10,35$	$k_m=3,42$	$\dot{Q}_{ges}=1062,5$	$\vartheta_{U,m}=9,7$
Seitenwände, Dach	Blech, Isoliermatte aus Schaumk.stoff (wie oben)	4,95	1,7	252,5	14,9
Glasscheiben	Doppelglas	5,4	3,7	599,4	8,9
		$A_{ges}=10,35$	$k_m=2,74$	$\dot{Q}_{ges}=851,9$	$\vartheta_{U,m}=11,8$

Tafel 2. Wärmeverlust und Temperatur der Umschließungsflächen bei unterschiedlicher Ausführung der Wände und Verglasung, Annahme: Außentemperatur $\vartheta_a = - 10$ °C, Innentemperatur $\vartheta_i = 20$ °C.

$$\dot{Q}_K = (\dot{Q}_{Str} \pm \dot{Q}_T) + \dot{Q}_{MG} + \dot{Q}_P \quad (10).$$

In dieser Gleichung werden bei der von außen in die Kabine eindringenden Wärmeenergie drei Teilströme unterschieden: Die Sonneneinstrahlung \dot{Q}_{Str} und der Transmissionswärmestrom \dot{Q}_T , die auf die Klimaverhältnisse der Umgebung zurückzuführen sind, sowie der Wärmestrom von den Wärmequellen der Maschine, wie Motor und Getriebe.

3.2.1 Wärmeeinfall durch Transmission und Sonneneinstrahlung

Der Transmissionswärmestrom \dot{Q}_T ergibt sich wie in Gl. (5) mit Hilfe der üblichen Wärmedurchgangsrechnungen. Er kann dabei positive oder negative Werte annehmen. Liegt die Innentemperatur über der Außentemperatur, so ist \dot{Q}_T von innen nach außen gerichtet und hat ein negatives Vorzeichen.

Bei der Berechnung von \dot{Q}_{Str} ist von den mit der Tages- und Jahreszeit veränderlichen Werten der Sonnenstrahlung I sowie einer Trübungskorrektur für atmosphärische Verunreinigungen f auszugehen.

Die infolge Transmission und Sonneneinstrahlung in die Kabine eindringende Wärmeenergie wird für Glas- und Wandflächen wegen der unterschiedlichen Eigenschaften der Baustoffe getrennt behandelt.

Fensterglas (Normalglas) ist für kurzwellige Strahlen, die im Sonnenspektrum überwiegen, weitgehend durchlässig, während es die langwelligen Wärmestrahlen absorbiert [23, 24]. Die Materialien des Kabineninneren absorbieren jedoch größtenteils diese kurzwelligeren Strahlen. Für die von den Materialoberflächen ausgehende Wärmestrahlung, deren Wellenlänge über $2,8 \mu\text{m}$ liegt, ist das Glas ein fast schwarzer, d.h. nahezu undurchlässiger Körper. Infolgedessen entsteht in der Kabine eine Wärmeakkumulation, die als "Treibhauseffekt" bekannt ist. Aus diesem Grund kann es im Kabineninneren bei Sonnenstrahlung zu Lufttemperaturen kommen, die diejenigen der Außenluft weit übertreffen.

Wird die Energiedurchlässigkeit der Glasscheiben durch den mittleren Durchlaßfaktor b gekennzeichnet, dann ergibt sich der Wärmestrom durch eine voll der Sonneneinstrahlung ausgesetzten Glasfläche zu [25, 26]:

$$\dot{Q}_G = \dot{Q}_{G,T} + \dot{Q}_{G,Str} = A_G [k_G (\vartheta_a - \vartheta_i) + I \cdot f \cdot b] \quad (11).$$

Blechwände und Dach sind für die Strahlung undurchlässig und nehmen nur teilweise und in Abhängigkeit vom Absorptionskoeffi-

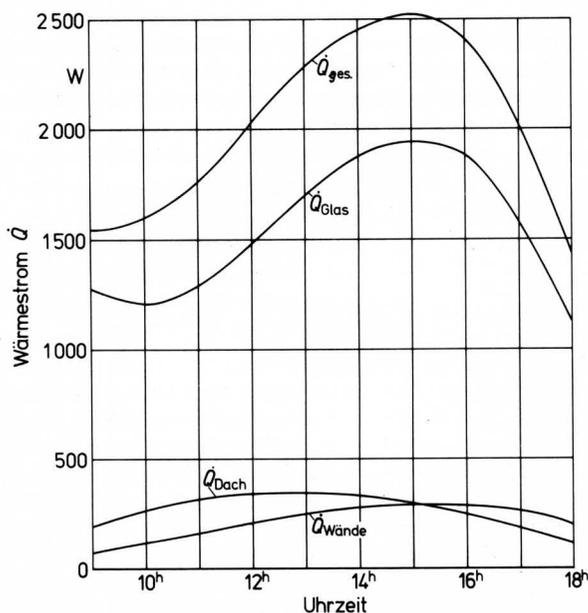


Bild 5. Wärmeströme in eine Modellkabine durch Sonneneinstrahlung und Transmission. (Werte gelten für den 21. Juni auf 50° nördl. Breite).

zienten a des entsprechenden Materials die Strahlungsenergie auf. Durch die starke Erwärmung der Oberfläche entsteht ein Temperaturgefälle sowohl zwischen Wand und Innenluft als auch zwischen Wand und Außenluft. Unter der Annahme, daß die von der Wand aufgenommene Wärmemenge der Summe der nach innen und außen abfließenden Beträge gleich sein muß, folgt für den nach innen durchgehenden Wärmestrom [5, 27]:

$$\dot{Q}_W = \dot{Q}_{W,T} + \dot{Q}_{W,Str} = A_W [k_W (\vartheta_a - \vartheta_i) + \frac{k_W}{a_a} f a I] \quad (12).$$

Die sich daraus ergebenden Wärmeströme in eine Kabine, die als 1,70 m hoch, 1,50 m lang und 1,10 m breit und deren Glasfläche zu insgesamt $5,4 \text{ m}^2$ angenommen wurde, zeigt **Bild 5**. Dabei wurden der Berechnung die in den VDI-Kühllastregeln [25] für den 21. Juni und 50° nördl. Breite angegebenen Werte zugrunde gelegt, wenn in der Kabine eine Temperatur von 24°C aufrechterhalten werden soll. Ferner wurde angenommen, daß eine Seitenwand nach Südwesten weist und zu 70 % aus Glasflächen besteht. Der Absorptionskoeffizient beträgt für einen farbigen Anstrich $a = 0,7$.

Bild 5 macht deutlich, welche Belastungen durch direkten Sonneneinfall durch die Glasflächen auftreten können. Drei Viertel der gesamten, dem Kabineninneren zugeführten Energie werden durch die Glasflächen eingeleitet.

Außerdem ist zu erkennen, daß eine Änderung des Absorptionskoeffizienten a , z.B. durch einen hellen Anstrich der Wandflächen ($a \approx 0,5$), nur einen geringen Einfluß auf die insgesamt dem Kabinenraum zugeführte Wärmeenergie hat.

3.2.2 Wärmestrom vom Motor- und Getrieberaum

Neben der Sonneneinstrahlung kann auch die Wärmezufuhr von den Wärmequellen der Maschine, die im Wärmestrom \dot{Q}_{MG} zusammengefaßt ist, außerordentlich hoch sein. Im einzelnen sind dies z.B. die vom Motor- und Getrieberaum, die von der Kühlerluft und die vom Auspuff zugeführte Wärmeenergie. Hinweise über den Einfluß dieses Wärmestroms auf die Innentemperatur gibt **Bild 6**. Nach Anlassen des Motors ist ein Anstieg der Innentemperatur in der Kabine A erkennbar. Auch nach Sonnenuntergang besteht noch eine große Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur.

Am Kabinenboden, z.B. über dem Getriebe, können unter diesen Umständen die Temperaturen bis zu 65°C ansteigen, wie verschiedentlich gemessen wurde.

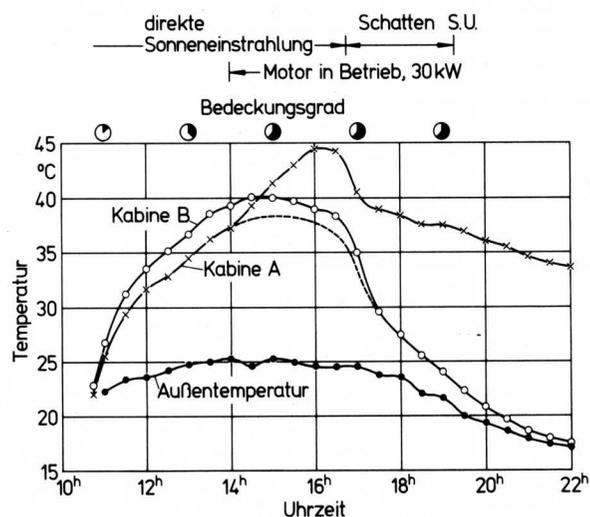


Bild 6. Temperaturverlauf in Kopfhöhe des Fahrers in zwei stehenden, geschlossenen Kabinen verschiedener Bauart. Kabine A: ab 14 Uhr zusätzlich zur Sonneneinstrahlung Wärmestrom vom Motor- und Getrieberaum (nach *Batel* [1]).

3.2.3 Konstruktive Maßnahmen zum Senken der Wärmebelastung
 Aus diesen Anhaltswerten über die Energiezufuhr in eine geschlossene Kabine geht klar hervor, daß entsprechende Einrichtungen wie Belüftungs- oder Kühlanlagen notwendig sind, um diese Wärmeenergie abzuführen und ein behagliches Raumklima herzustellen. Welche Einrichtung, auch in Verbindung mit anderen klimatechnischen Maßnahmen, erforderlich ist, hängt von den erreichbaren Behaglichkeitswerten ab.

Die einfachste und billigste Kühlung erfolgt durch einen intensiven Luftaustausch, wodurch einerseits die in der Kabine erwärmte Luft abgeführt wird und andererseits die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers verbessert wird. Unter Berücksichtigung des Treibhauseffektes ist schon eine wirksame Kühlung gegeben, wenn es gelänge, durch Belüften die Innentemperatur auf die Außentemperatur zu senken. Ein einfaches Beispiel verdeutlicht aber, daß dies nicht zu erreichen ist. Rechnet man mit einem Gesamtwärmestrom in die Kabine von 3000 W, von denen 450 W durch den Transmissionswärmestrom abgeführt werden, und legt man einen Luftdurchsatz von 300 m³/h zugrunde, dann beträgt der zur Wärmeabfuhr notwendige Temperaturanstieg der Luft vom Eintritt in die Kabine bis zum Austritt:

$$\Delta\vartheta_L = \frac{\dot{Q}_{\text{ges}} - \dot{Q}_T}{\dot{m}_L \cdot c_p} = 25,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

In Abwandlung des für die Ablufttemperatur angegebenen Verhältnisses (Gl. (4)) beträgt bei einer Außentemperatur von 30 °C die Temperatur in Kopfhöhe des Fahrers immer noch 40,8 °C. Eine Steigerung des Luftdurchsatzes auf 600 m³/h, was 200-fachem Luftwechsel in der Kabine entspricht, bringt nur eine Senkung auf 35,9 °C.

Mit der Belüftung kann im Kabineninneren nie die Außentemperatur erreicht werden. Die Innenraumtemperatur liegt stets um einige Grade höher. Auch eine gute Isolierung des Daches, der Wände usw. die Verwendung von Absorptions- oder Reflexionsglas schafft bei der Belüftung keine nennenswerte Temperatursenkung mehr in der Kabine, **Tafel 3**. Eine größere Temperaturabnahme ist nur noch durch Öffnen der Türen und Fenster möglich, aber ein behaglicher Zustand stellt sich dann nicht ein, denn die Temperaturabnahme wird erkaufte mit starker Staub- und Lärmbelästigung. Auch unter mitteleuropäischen Verhältnissen ist demnach eine als angenehm empfundene Raumtemperatur in einer geschlossenen Fahrerkabine nur mit einer Kühlanlage zu gewährleisten.

Durch eine Kühlanlage kann die Lufttemperatur in der Kabine auf den gewünschten Wert eingestellt werden, sie beeinflusst aber nicht die Wärmeeinstrahlung von den raumschließenden Flächen auf den menschlichen Körper.

Kabinenteil	Maßnahme	Wärmestrom \dot{Q} [W]	Temperatur ϑ_i [°C]	
			$\dot{V} = 300 \text{ m}^3/\text{h}$	$\dot{V} = 600 \text{ m}^3/\text{h}$
Kabine	keine	3000	40,8	35,9
Dach, Wände,	Isolierung (Glasfasern.)	3000	38,4	34,8
Boden	Isolierung + helle Lack.	2200	38,0	34,6
Glasflächen	Absorptionsgl. (einf.)	2500	38,5	35,0
	Absorptionsgl. (außen) Normalglas (innen)	2350	38,3	34,8
	Reflexionsgl. (einf.)	2350	37,9	34,7
	Blenden (Einfachvergl.)	2000	36,8	34,0
Kabine	Isolierung + helle Lack. Absorptionsgl. (dopp.) Wände 5° geneigt	1500	36,1	33,3

Tafel 3. Wärmeströme und Innentemperatur in einer Kabine bei verschiedenen Maßnahmen zur Wärmedämmung und unterschiedlichem Luftdurchsatz ($\vartheta_a = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Eine Verminderung der Strahlungsbelastung des Fahrers setzt eine ausreichende Isolierung der Wände und den Schutz vor Sonneneinstrahlung voraus. Die schon erwähnten hohen Temperaturen am Kabinenboden sind z.B. durch eine gute Abschirmung und Wärmeisolierung zu vermeiden. Eine Maßnahme zum Niedrighalten der Wandtemperaturen kann neben dem Isolieren auch in der Wahl heller, gut reflektierender Farben bestehen. Durch die intensive Sonneneinstrahlung können auch bei guter Isolierung bestimmte Oberflächen in der Kabine sehr stark aufgeheizt werden (bis zu 80 °C), die dann durch die Wärmestrahlung zu einer Belastung des Fahrers führen. Grundsätzlich sollten deshalb die Glasflächen auf das notwendige Maß eingeschränkt und Gläser verwendet werden, durch welche die Strahlung möglichst wenig eindringt, wie strahlungsabsorbierende und -reflektierende Gläser.

Strahlungsabsorbierende Gläser, die schon seit Jahren auf dem Markt sind, absorbieren durch ihren erhöhten Gehalt an Eisen (2) oxid die Wärmestrahlung stärker als Normalglas [28]. Ein weiterer Vorteil dieser Gläser für den Fahrer ist die verminderte Blendungsgefahr. Der größte Nachteil besteht darin, daß die hohe Absorption von Strahlungsenergie, die auch ohne direkte Sonneneinstrahlung auftritt, eine hohe Temperatur der Glasflächen zur Folge hat [29, 30]. Abhilfe ist dadurch möglich, daß auf der Innenseite eine zweite normale Glasscheibe angebracht wird.

Strahlungsreflektierende Gläser zeichnen sich durch ein besseres Reflexionsvermögen aus, das meist durch eine im Vakuum auf das Glas aufgedampfte metallische Schicht bewirkt wird [28]. Die Gläser erhalten dadurch ein gutes Reflexionsvermögen im ultraroten Strahlungsbereich, während der sichtbare Bereich nur geringfügig geschwächt wird. Obgleich strahlungsreflektierende Gläser wirkungsvoller sind als absorbierende Gläser, muß der Einsatz dieser Gläser in Fahrerkabine sorgfältig geprüft werden, da sie drei- bis viermal so teuer sind und die Abriebfestigkeit der Reflexionsschicht relativ gering ist; auch an die Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer ist zu denken.

Eine wirksame Methode kann auch die Anbringung von Blenden als Sonnenschutz sein. Diese müssen so eingestellt sein, daß die Sicht nicht beeinträchtigt wird. Deshalb sollen sie dem Blickwinkel entsprechend in Augenhöhe horizontal und in den unteren Teilen stärker geneigt sein. Bei hohem Sonnenstand wird dadurch die direkte Sonneneinstrahlung verhindert, bei niedrigem Sonnenstand können allerdings Blendungserscheinungen auftreten.

Eine weitere Möglichkeit zur Verminderung der Sonneneinstrahlung ergibt sich durch eine negative Neigung der Wandflächen, da dann der Einstrahlwinkel ungünstiger wird. Neben diesen Maßnahmen zur Verminderung der Einstrahlung sind die in der Kabine verwendeten Materialien bezüglich der Strahlungsabsorption sorgfältig auszuwählen. Soweit wie möglich sind deshalb dunkle Far-

ben in der Kabine ebenso wie an der äußeren Kabinenoberfläche zu vermeiden.

Da ein großer Anteil der Wärmeabgabe des Menschen auf Verdunstung beruht [11], ist die Verwendung von atmungsaktivem Material Voraussetzung für ein angenehmes Sitzen. Federkernsitze gelten als für die Wärme- und Feuchtigkeitsabfuhr weitaus günstiger als Schaumstoffsitze.

Begleitende konstruktive Maßnahmen zur Wärmedämmung sind aber nicht nur gerechtfertigt, um die Wärmebelastung für den Fahrer zu senken, sondern auch um möglichst kleine und billige Anlagenteile verwenden zu können und um die Kosten für den Betrieb der Kühlanlage klein zu halten. Für die Klimatisierung von Fahrerkabine benötigt man Kälteanlagen mit geringem Platz- und Raumbedarf, die möglichst schwingungs- und geräuscharm laufen. Obwohl die Absorptions-

Kältemaschine mit Abwärme vom Motor betrieben werden kann und somit den Treibstoffbedarf nicht erhöht, wird wegen der kleineren Verdampferfläche und dem durch den geringen apparativen Aufwand bedingten kleineren Bauvolumen allgemein die Kompressionskältemaschine vorgezogen werden [5, 6, 31, 32].

Bild 7 zeigt die schematische Darstellung einer Kompressionskältemaschine und im $h,lg p$ -Diagramm den Kreisprozeß, den das Kältemittel durchläuft. Das Kältemittel strömt in gasförmigem Zustand bei geringem Druck in den Kompressor (Punkt A). Es wird im Kompressor isentrop auf den Kondensatordruck p_k komprimiert. Im Punkt B ist damit ein unter hohem Druck stehendes heißes Gas vorhanden. Im Kondensator wird dem gasförmigen Kältemittel isobar Wärme entzogen, so daß es kondensiert und ggf. im Punkt C unterkühlt ist. Das unterkühlte flüssige Kältemittel durchströmt das Expansionsventil. Im Expansionsventil sinkt der Druck vom Kondensatordruck p_k auf den Verdampferdruck p_v . Im Verdampfer wird isobar Wärme zugeführt, die der Zuluft des zu kühlenden Raumes (Kabine) entzogen wurde. Dadurch verdampft das im Punkt D noch flüssige Kältemittel.

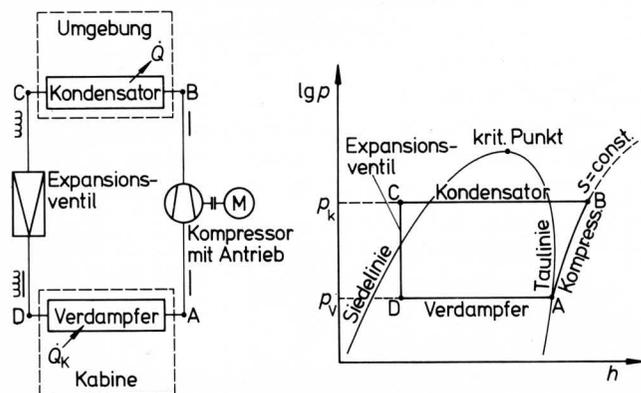


Bild 7. Schematische Darstellung einer Kompressionskältemaschine und des Kreisprozesses für das Kältemittel im $h,lg p$ -Diagramm. (Kältemittel: — dampfförmig; \llcorner flüssig)

Die für den Antrieb des Kompressors benötigte Leistung muß entweder vom Fahrzeugmotor oder von einem Elektromotor erbracht werden und erhöht dadurch die Betriebskosten. **Tafel 4** zeigt den Einfluß verschiedener Maßnahmen zur Wärmedämmung auf die für den Antrieb des Kältekompressors benötigte Leistung und damit gleichzeitig auch auf die Baugröße. Durch eine gute Isolierung, Absorptionsglas (außen) mit Normalglas (innen) und um 5° negativ geneigte Seitenwände läßt sich diese fast auf die Hälfte senken. Um die Antriebsleistung des Kompressors so klein wie möglich zu halten, kann auch teilweise mit Umluft gearbeitet werden, wobei der Mindestfrischluftanteil aber einzuhalten ist.

Der Umluftbetrieb erhöht zwar zunächst den Feuchtigkeitsgehalt der Luft, bei der Kühlung an den Verdampferflächen sinkt aber die Feuchtigkeit der Luft durch die Abscheidung von Kondenswasser. Dies ist ebenfalls ein erheblicher Vorteil der Kühlanlage, da ein Vermindern der relativen Luftfeuchtigkeit bei hohen Außentemperaturen eine beträchtliche Erleichterung für den Fahrer bringt. Nimmt man an, daß feuchte Luft von einem Zustand außerhalb des in Bild 2 eingezeichneten Behaglichkeitsbereiches, nämlich $\vartheta_a = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi = 40\%$ ($x \approx 10,8 \text{ g/kg tr. Luft}$), am Verdampfer auf $\vartheta_v = 8^\circ\text{C}$ abgekühlt wird und dadurch in der Luft ein Sättigungsgehalt von $x \approx 6,9 \text{ g/kg tr. Luft}$ verbleibt, so bedeutet dies, daß die Luft nach dem Eintritt in die Kabine und einer Erwärmung auf $\vartheta_i = 25^\circ\text{C}$ eine relative Luftfeuchtigkeit von ungefähr 34 % hat. Durch Verdunstung usw. steigt diese auf etwa 35 % an, womit der Luftzustand in der Kabine im Behaglichkeitsbereich liegt.

Kabinenteil	Maßnahme	Wärmestrom \dot{Q} [W]	Kompressorleistung L [kW]
Kabine	keine	3500	2,37
Dach, Wände,	Isolierung (Glasfaserm.)	2800	1,89
Boden	Isolierung + helle Lack.	2700	1,83
Glasflächen	Absorptionsgl. (einf.)	3000	2,03
	Absorptionsgl. (außen) Normalglas (innen)	2850	1,93
	Reflexionsgl. (einf.)	2850	1,93
	Blenden (Einfachvergl.)	2500	1,69
Kabine	Isolierung + helle Lack. Absorptionsgl. (dopp.) Wände 5° geneigt	2000	1,35

Tafel 4. Wärmestrom in eine Kabine und für den Antrieb der Kälteanlage benötigte Leistung (auch als Maß für die Baugröße) bei verschiedenen Maßnahmen zur Wärmedämmung ($\vartheta_i = 24^\circ\text{C}$).

4. Luftführung in der Kabine

Bei fahrenden Arbeitsmaschinen kann der Luftdurchsatz nicht wie beim Pkw über den Staudruck, sondern nur über ein Gebläse besorgt werden. Ein Vorteil der Förderung mittels Gebläse liegt in dem konstant bleibenden Luftdurchsatz und dem dadurch möglichen konstanten Überdruck in der Kabine, der zu jeder Jahreszeit angestrebt wird, da er das Eindringen von staubbelasteter Außenluft durch unvermeidbare Undichtigkeiten verhindert.

Eine weitere Aufgabe bei der Klimatisierung der Kabine besteht darin, die vom Gebläse geförderte, gefilterte Heiz- oder Kühlluft ohne Belästigung des Fahrers in die Kabine einzublasen und sie dann so zu führen, daß sie möglichst vollkommen ausgenutzt wird. Diese Ausnutzung besteht beispielsweise darin, den Luftaustritt nicht den konstruktionsbedingten Undichtigkeiten der Karosserie zu überlassen, sondern durch Austrittsöffnungen die Luft so zu lenken, daß die gesamte Kabine durchspült wird.

Bei tiefen Außentemperaturen soll die erwärmte Luft am oder in der Nähe des Fußbodens eingeleitet werden. Die aufsteigende Warmluft bringt dann eine gute Luftverteilung in der Kabine, und es wird die erwünschte Temperaturschichtung erreicht. Dabei ist ein direktes Anblasen des Fahrers zu vermeiden.

Ob für das Ansaugen der Frischluft dann eine eigene Ansaugöffnung mit Gebläse eingebaut wird, muß anhand der konstruktiven Gegebenheiten entschieden werden. Staubtechnisch sind dabei die Probleme nicht so gravierend, da normalerweise während der Heizperiode die Staubbelastung nicht sehr hoch ist. Schalltechnisch muß aber beachtet werden, daß dann die Öffnungen nahe an den Motor rücken und dessen Schallemission sich stärker auswirken kann.

Um die Erwärmung der Kühlluft auf dem Wege von den Verdampferflächen bis zum Eintritt in die Kabine in engen Grenzen zu halten, wird man den Verdampfer so einbauen, daß nur kurze Luftführungs Kanäle notwendig sind. Hierfür bietet sich die Installation des Verdampfers im Dachraum an. Das bringt zwei Vorteile mit sich: Einerseits ist in Dachhöhe die Luftverschmutzung relativ gering, andererseits erzeugt das Einbringen der Kühlluft über die Kabinendecke wiederum die geforderte Temperaturschichtung. Luftmengen, wie sie oft zur Kühlung einer Kabine erforderlich sind, können nur gleichmäßig über eine große Fläche verteilt der Kabine zugeführt werden. Deshalb — aber auch aus Geräuschgründen — sollte die Deckenfläche der Kabine mit einer perforierten Verkleidung ausgebildet sein [9, 33, 34]. Die kalte Luft tritt dann senkrecht durch die vielen Öffnungen in der Kabinendecke nach

unten aus und durchspült den gesamten Innenraum. Oberhalb des Fahrerplatzes sollte ein Teil der Decke von der Luftzufuhr ausgespart bleiben. Ein Teilluftstrom ist unmittelbar entlang der Kabinenwände und der Glasflächen zu führen.

5. Folgerungen für die klimatische Gestaltung

Die geschlossene Fahrerkabine wird als eine Lösung angesehen, um die Lärm- und Staubbelastung auf fahrenden Arbeitsmaschinen zu reduzieren. Wie zuvor dargelegt, stellt sich ohne klimatechnische Maßnahmen in diesen schall- und staubdichten Kabinen jedoch ein für den Fahrer unbehagliches Raumklima ein. Aus klimatechnischer Sicht sind deshalb folgende Forderungen für die Gestaltung von Fahrerkabinen zu stellen:

1. Im Winterbetrieb zwingen niedrige Außentemperaturen zum Einsatz einer Heizanlage. Obwohl für die Heizung Abwärme vom Motor ausreichend zur Verfügung steht, sollen dennoch durch teilweisen Betrieb mit Umluft und eine gute Isolierung der Wände die Wärmeverluste verkleinert werden, um eine angenehme relative Luftfeuchtigkeit in der Kabine zu erreichen und um die Temperaturen der Umschließungsflächen anzuheben. Ein Senken der notwendigen Heizleistung ist auch erstrebenswert, um einen möglichst kleinen und preiswerten Wärmetauscher zu erhalten.
2. Bei normaler Sonneneinstrahlung reicht auch unter mitteleuropäischen Verhältnissen eine Belüftung allein nicht aus, um in der Kabine erträgliche Temperaturen zu gewährleisten. Diese sind nur durch den Einsatz einer Kühlanlage zu erreichen. Um die Strahlungsbelastung für den Fahrer zu senken und um die Kosten für Anschaffung und Betrieb der Kühlanlage klein zu halten, soll auf begleitende konstruktive Maßnahmen nicht verzichtet werden. Dazu gehören eine gute Isolierung der Kabinenwände und, wenn möglich, die Verwendung von strahlungsabsorbierenden oder -reflektierenden Gläsern oder auch von Blenden, die aber die Sicht für den Fahrer nicht beeinträchtigen dürfen. Die äußeren Wandflächen sind nach Möglichkeit strahlungsreflektierend auszubilden (z.B. heller Anstrich).
3. Die Luftzufuhr in die Kabine geschieht über ein Gebläse. Der Frischluftanteil an der Gesamtluftmenge soll dabei pro Person 30 m³/h betragen. Die Art der Luftführung ergibt sich aus der Forderung nach der Temperaturschichtung. Deshalb ist die Kühlluft von oben, möglichst über eine perforierte Decke, und die Heizluft am Fußboden in die Kabine einzuleiten. Ein direktes Anblasen der Person ist zu vermeiden.

Verwendete Formelzeichen

a	Absorptionskoeffizient
b	Energiedurchlässigkeit von Glas
c _p	mittlere spezifische Wärmekapazität der Luft
f	Korrekturfaktor für atmosphärische Trübungen
h _a	spezifische Enthalpie der Außenluft
h _{Ab}	spezifische Enthalpie der Luft beim Austritt aus der Kabine
h _e	spezifische Enthalpie der Luft beim Eintritt in die Kabine
k	Wärmedurchgangskoeffizient
k _G	Wärmedurchgangskoeffizient des Glases
k _m	mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient
k _W	Wärmedurchgangskoeffizient der (Blech-) wände
ṁ _{Ab}	Mengenstrom der Abluft
ṁ _{Zu}	Mengenstrom der Zuluft
p	Druck
p _k	Druck des Kältemittels im Kondensator
p _v	Druck des Kältemittels im Verdampfer
x	Feuchtegrad der Luft

A _{ges}	Gesamtfläche
A _G	Fläche des Glases
A _W	Fläche der (Blech-) wände
I	Sonnenstrahlung
Q̇ _{Ab}	Wärmestrom, der durch die Abluft verursacht wird
Q̇ _{ges}	Gesamtwärmestrom
Q̇ _G	Wärmestrom durch die Glasflächen
Q̇ _H	Wärmebedarf
Q̇ _K	Kühlbedarf
Q̇ _{MG}	Wärmeströme von fahrzeugeigenen Wärmequellen außerhalb der Kabine (wie M = Motor, G = Getriebe)
Q̇ _P	Wärmestrom von Personen
Q̇ _{Str}	Wärmestrom durch Sonnenstrahlung
Q̇ _T	Transmissionswärmestrom (Wärmestrom, der auf Konvektion und Leitung durch Wände zurückzuführen ist)
Q̇ _W	Wärmestrom durch (Blech-) wände
V̇ _{Ab}	Volumenstrom der Abluft
V̇ _{Zu}	Volumenstrom der Zuluft
α _a	Wärmeübergangskoeffizient an der Außenseite
α _i	Wärmeübergangskoeffizient an der Innenseite
δ	Dicke der Wandschicht
θ _a	Temperatur der Außenluft
θ _{Ab}	Temperatur der Luft beim Austritt aus der Kabine
θ _e	Temperatur der Luft beim Eintritt in die Kabine
θ _i	Temperatur der Innenluft (in Kopfhöhe des Fahrers)
θ _U	Temperatur der Umschließungsflächen
θ _V	Temperatur der Luft am Verdampfer
λ	Wärmeleitfähigkeit der Wandschicht
ρ _L	Dichte der Luft
φ	relative Luftfeuchtigkeit

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Batel, W.:* Messungen zur Staub-, Lärm- und Geruchsbelastung an Arbeitsplätzen in der landwirtschaftlichen Produktion und Wege zur Entlastung. Grundl. Landtechnik Bd. 25 (1975) Nr. 5, S. 135/57.
- [2] *DIN 1946:* Lüftungstechnische Anlagen Bl. 1/3, Berlin/Köln: Beuth-Vertrieb 1962.
- [3] *Frank, W.:* Fragen der Beheizung und Belüftung von Kraftfahrzeugen. ATZ Bd. 73 (1971) Nr. 10, S. 369/76.
- [4] • *Veil, W.:* Lüften, Heizen und Kühlen in Personenfahrzeugen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1965.
- [5] *Nowotny, S.:* Probleme der Klimatisierung von Kabinen für das Bedienungspersonal motorgetriebener Straßenfahrzeuge, Baumaschinen, Landmaschinen usw. Luft- u. Kältetechnik Bd. 6 (1970) Nr. 5, S. 257/63.
- [6] *Fiala, E.:* Die Klimatisierung von Kraftfahrzeugen. VDI-Z. Bd. 100 (1958) Nr. 1, S. 5/15.
- [7] *Langen, H.:* Standheizungen für Fahrzeuge. ATZ Bd. 77 (1975) Nr. 10, S. 298/302.
- [8] *Frank, W.:* Die Bedienung von Klimaanlage in Kraftfahrzeugen. Vortrag beim VDI-Arbeitskreis Fahrzeugtechnik und Arbeitskreis Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik Braunschweig 1974.
- [9] *Sawitzki, P.:* Bemessungskriterien für Pkw-Kälteanlagen. Kältetechnik – Klimatisierung Bd. 22 (1970) Nr. 5, S. 149/53.

- [10] *Müllejans, H. u. M. Illg:* Probleme der Klimatisierung von Straßenfahrzeugen. Klima + Kälteingenieur Bd. 3 (1975) Nr. 3, S. 3/8.
- [11] *Spegele, H. u. F. Steimle:* Klima und Behaglichkeit. klima - kälte - technik Bd. 15 (1973) Nr. 4, S. 76/80; Nr. 5, S. 95/101.
- [12] *Steimle, F.:* Klimakursus. Karlsruhe: Müller 1970.
- [13] *Rietschel/Raiß:* Heiz- und Klimatechnik. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag Bd. 1, 15. Aufl. 1968; Bd. 2, 15. Aufl. 1970.
- [14] *Recknagel/Sprenger:* Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik. München - Wien: Oldenbourg-Verlag 1974.
- [15] *Arbeitskreis der Dozenten für Klimatisierung:* Lehrbuch der Klimatechnik. Karlsruhe: Müller-Verlag 1974.
- [16] *Gröber/Erk/Grigull:* Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1963.
- [17] *Eckert, E.:* Einführung in den Wärme- und Stoffaustausch. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1966.
- [18] *Barth, R.:* Fahrzeugheizungen. ATZ Bd. 64 (1962) Nr. 11, S. 325/31.
- [19] *Sperling, E.:* Wärmetechnische Berechnungsgrundlagen für die Heizung und Kühlung der Eisenbahnwagen. Archiv für Eisenbahntechnik Bd. 3 (1953) November, S. 13/23.
- [20] *Eriksson, H.-A.:* Värme och ventilation i traktorhytter (Heating and ventilating of tractor cabs) Uppsala: Jordbrukstekniska Institutet Nr. S 25 (1975).
- [21] *Reinders, H.:* Klimaphysiologie: Grundlage klimatechnischer Planung. Heiz.-Lüft.-Haustechnik Bd. 22 (1971) Nr. 10, S. 309/13.
- [22] *Witte, E.:* Schalltechnische Gesichtspunkte bei der Konstruktion von Fahrererkabinen. Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 2, S. 43/50.
- [23] *Gertis, K.:* Die Erwärmung von Räumen infolge Sonneneinstrahlung durch Fenster. Berichte aus der Bauforschung Heft 66, Berlin: W. Ernst-Verlag 1969.
- [24] *Schröder, H.:* Neue Sonnenschutzgläser zur Verglasung von Gebäuden und Fahrzeugen. Heiz.-Lüft.-Haustechnik Bd. 19 (1968) Nr. 2, S. 37/41.
- [25] VDI 2078: Regeln für die Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume, Entwurf 1970.
- [26] *Raiß, W.:* Die Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume nach der Richtlinie VDI 2078 (Entwurf). Wärme-, Klima- und Sanitärtechnik (1971) 1, S. 4/10.
- [27] *Bach, K.:* Planung von Klimaanlage für Eisenbahn-Reisezugwagen. Kältetechnik Bd. 5 (1953) Nr. 7, S. 189/94.
- [28] *Persson, R.:* Wärmeabsorbierende und wärmereflektierende Gläser. VDI-Z. Bd. 110 (1968) Nr. 1, S. 9/15.
- [29] *Grandjean, E. u. A. Rhiner:* Sonnenschutz und Raumklima-Ergebnisse wohnungsphysiologischer Untersuchungen. Ges.-Ing. Bd. 90 (1969) Nr. 7, S. 207/13.
- [30] *Legler, W.F.:* Heating, ventilating and air-conditioning of farm machine cabs. ASAE Paper No. 70-106.
- [31] *Eischen, F.D.:* Producing a quiet and comfortable cab. SAE Paper 68-0587.
- [32] *Jackson, W.H.:* The heating, ventilating and air-conditioning system of the automobile passenger compartment. Modern Refrigeration and Air Conditioning (1962) Nr. 12, S. 1130/32.
- [33] *Maljarenko, L.G. u. V.J. Prochorov:* Vorrichtung zur Verteilung der Zuluft in Schlepperkabinen. Traktory i Sel'chosmasiny Bd. 42 (1972) Nr. 2, S. 8/10.
- [34] *Vig, M.A. u. P.K. Turnquist:* Design and evaluation of air distribution systems in agricultural tractor cabs for summer environmental control. ASAE Paper No. 73-1554.

Schalltechnische Gesichtspunkte bei der Konstruktion von Fahrererkabinen.

Von Ernst Witte, Braunschweig-Völkenrode*)

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

DK 631.372:62-784:331.827:534.83

Die Fahrer und Bedienpersonen landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen sind einer hohen Lärmbelastung ausgesetzt, die zwischen 85 dB (AI) und 100 dB (AI) liegt. Zum passiven Schallschutz kann die auch aus anderen Gründen angestrebte Fahrererkabine herangezogen werden. Eine Zusammenstellung der verschiedenen anzuwendenden Lärmbekämpfungsmaßnahmen und die sich daraus ergebenden Folgerungen sollen vor allem dem Konstrukteur ohne spezielle akustische Kenntnisse Anregungen und Hinweise für die Entwicklung von in schalltechnischer Hinsicht befriedigenden Kabinen geben.

Vorgetragen auf der Jahrestagung der VDI-Fachgruppe <Landtechnik> am 23. Okt. 1975 in Braunschweig.

*) Dipl.-Ing. E. Witte ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor Prof. Dr.-Ing. W. Bate) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

1. Lärmbelastung und Möglichkeiten der Lärmbekämpfung

1.1 Lärmbelastung

Aus umfangreichen Untersuchungen ist bekannt, daß insbesondere die Fahrer und Bedienpersonen von Schleppern und Landmaschinen mit Eigenantrieb einer hohen Lärmbelastung ausgesetzt sind. Der am Ohr der betroffenen Personen gemessene Schalldruckpegel lag im Schnitt zwischen etwa 85 dB(AI) und 100 dB(AI) [1]. Ähnlich hohe Werte für die Lärmbelastung sind auch dem weiteren Schrifttum [2 bis 6] zu entnehmen.

Maßnahmen zur wirksamen Absenkung der Lärmbelastung sind daher als eine langfristige Aufgabe anzusehen.

Hauptlärmquellen an Schleppern und Landmaschinen mit Eigenantrieb sind neben dem Motor und dem Getriebe oszillierende oder hochtourig rotierende Arbeitswerkzeuge. Als Beispiel zeigt **Bild 1** die Geräuschspektren eines 110 kW-Schleppers bei zwei Motordrehzahlen. Besonders auffällig sind die hohen Pegelwerte, die sich für die Zündfrequenz des Sechszylinder-Viertakt Dieselmotors und deren erste Vielfache ergeben. Bei niedriger Drehzahl fallen die Pegelwerte mit zunehmender Frequenz schnell ab. Bei hoher Drehzahl wird der Pegel insgesamt angehoben und erstreckt sich über den hauptsächlich interessierenden Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 3150 Hz.