

Untersuchung zur Belastung des Schlepperfahrers durch Lärm

Von Albert Weichenrieder, Bad Kreuznach *)

DK 631.372:534.83

Der Ackerschlepper stellt für einen wesentlichen Zeitraum den Arbeitsplatz des Landwirtes dar. Die Arbeit auf dem Schlepper ist verbunden mit der Einwirkung von Lärm, mechanischen Schwingungen, Motorabgasen, Staub und anderen Einflüssen, die nicht nur den Komfort vermindern und die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen, sondern sogar die Gesundheit des Fahrers unmittelbar gefährden können.

1. Wesentliche Begriffe der Schalltechnik

1.1 Schalldruckpegel

Schall ist für das menschliche Gehör wahrnehmbar, wenn die Dichteschwankungen der Luft in einer Frequenz zwischen 16 Hz und 20 000 Hz auftreten und der Effektivwert des Schalldruckes etwa dem 10^{-9} -fachen bis 10^{-3} -fachen des stationären Luftdruckes entspricht. Dabei vermittelt das menschliche Gehör zwei voneinander nicht unabhängige Grundempfindungen: die Frequenz der Schwingungen wird als Tonhöhe und die Größe der Druckschwankungen als Lautstärke wahrgenommen.

In analoger Weise kann ein Geräusch durch Meßwerte charakterisiert werden, wenn eine Frequenzmessung und eine Messung des Effektivwertes des Schalldruckes durchgeführt werden. (Im folgenden ist immer der Effektivwert des Druckes gemeint, wenn von Druck gesprochen wird.)

Auf der Suche nach einer gesetzmäßigen Relation zwischen den meßbaren Gegebenheiten der physikalischen Umwelt (hier meßbarer Schalldruck p) und der erlebbaren Empfindung des Menschen (z. B. Lautstärke) gelangte *Fechner* 1850 zu einer hypothetischen Formulierung, nach der die Reaktion R des Menschen dem Logarithmus des Reizes S proportional sein sollte:

$$R \sim \log S.$$

Aus dieser Beziehung entwickelte sich das Grundmaß der Schallmeßtechnik, der Schalldruckpegel

$$L = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}].$$

*) *Dipl.-Ing. Albert Weichenrieder ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Anthropotechnik am Max-Planck-Institut für Landarbeit und Landtechnik, Bad Kreuznach.*

Die vorliegende Untersuchung entstand im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Landmaschinen der Technischen Universität München (Prof. Dr.-Ing. Walter Söhne) und am Max-Planck-Institut Bad Kreuznach (Prof. Dr. Heinrich Dupuis).

Der Schalldruckpegel ist ein logarithmisches Verhältnismaß, dem man als Zählinheit das Dezibel zugeordnet hat. Als Bezugsgröße wurde eingeführt:

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \quad (1 \text{ Pascal} = 1 \text{ N} / 1 \text{ m}^2)$$

eine Größe, die etwa der Wahrnehmungsschwelle des Menschen bei 1 000 Hz entspricht.

Für $p = p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ ist der Schalldruckpegel:

$$L = 20 \cdot \lg (p_0 / p_0) = 20 \cdot \lg 1 = 20 \cdot 0 = 0 \text{ dB}$$

Der Hörbereich ist nach oben begrenzt durch die Schmerzschwelle $p = 10^6 p_0$. Hier ergibt sich ein Schalldruckpegel (meist nur "Schallpegel") von:

$$L = 20 \cdot \lg (10^6 p_0 / p_0) = 20 \cdot \lg 10^6 = 20 \cdot 6 \cdot \lg 10 = 120 \text{ dB}$$

Die bei der Berechnung des Schalldruckpegels benutzte logarithmische Beziehung gibt die Wahrnehmungen des Menschen beim Hören von Geräuschen unterschiedlicher Intensität nicht richtig wieder. Es müßte dann eine Verdoppelung des Schalldruckpegels – etwa von 20 dB auf 40 dB – einer Verdoppelung der Wahrnehmung entsprechen. Die Charakteristik des Gehörs im ganzen Bereich des wahrnehmbaren Schalles läßt sich durch eine so einfach aufgebaute Beziehung nicht beschreiben. Für Schallpegelwerte, die größer als 50 dB sind, gilt jedoch in guter Annäherung, daß ein Geräusch als doppelt so laut empfunden wird, wenn der Schallpegel um 10 dB erhöht wird.

Eine der menschlichen Empfindung proportionale Größe ist die Lautheit, gemessen in "sone". Für die Berechnung der Lautheit von Geräuschen aus den Schallpegelwerten bzw. aus dem Lautstärkepegel wird eine normierte Kurve benutzt.

1.2 Logarithmische Schallpegeladdition

Die von einer Schallquelle abgestrahlte Schalleistung P [W] oder die Schallintensität J [W/m²] ist proportional dem Quadrat des Schalldruckes:

$$P \sim p^2, \quad J \sim p^2.$$

Die Definitionsgleichung für den Schalldruckpegel ändert sich zu:

$$L = 20 \lg \frac{p}{p_0} = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \lg \frac{J}{J_0} \quad [\text{dB}].$$

Bei Verdoppeln der Schallintensität, wenn z. B. zwei gleiche Schallquellen wirken, wird die Pegeländerung:

$$\Delta L = 10 \cdot \lg 2 = 10 \cdot 0,30103 \dots = 3 \text{ dB},$$

unabhängig vom bereits vorhandenen Schallpegel, also beispielsweise $L = 13$ dB bei Einwirkung von zwei gleichen Schallquellen von je 10 dB und $L = 93$ dB bei zwei gleichen Schallquellen von je 90 dB. Bei dreifacher Schallintensität ergibt sich eine Pegelerhöhung von

$$\Delta L = 10 \cdot \lg 3 = 5 \text{ dB}$$

usw.

Entsprechend kann man aus der Definitionsgleichung für den Schalldruckpegel auch ableiten, welche Pegeländerungen sich ergeben, wenn mehrere Quellen mit verschiedenem Schallpegel sich überlagern. Der Zusammenhang ist in Bild 1 dargestellt für das Zusammenwirken von zwei Schallquellen.



Fast immer genügen die folgenden vereinfachten Beziehungen:

Schallpegeldifferenz	→ Pegelerhöhung
0 - 1 dB	3 dB
2 - 3 dB	2 dB
4 - 9 dB	1 dB
10 dB und mehr	0 dB

Bild 1. Beziehungen zur Ermittlung des Gesamtschallpegels bei Zusammenwirken von zwei Schallquellen mit unterschiedlichem Schallpegel.

1.3 Frequenzbewerteter Schallpegel

Auf den in Bild 2 gezeigten Kurven gleicher Lautstärkepegel, gemessen in phon, ist zu erkennen, daß für kleine Frequenzen höhere Schallpegel in dB erforderlich sind, um beim Menschen die gleiche Wahrnehmungsstärke hervorzurufen als bei mittleren und höheren Frequenzen. Um diese Erscheinung im Meßwert zu berücksichtigen, führt man eine Frequenzbewertung durch. Man vermindert (dämpft) den Meßwert bei den niederen Frequenzen, wodurch die mittel- und hochfrequenten Anteile eines Geräusches

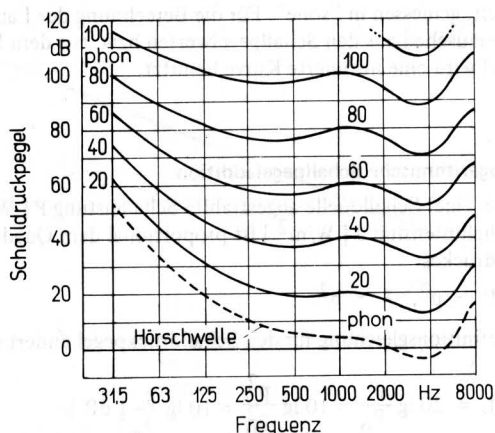


Bild 2. Kurven gleicher Lautstärkepegel, gültig für im frontal einfallenden Schallfeld beidohrig abgehörte reine Töne, (DIN 45630 – Robinson u. Dadson).

einen stärkeren Einfluß auf das Meßergebnis gewinnen, wie es der menschlichen Empfindung entspricht. Bei Anwendung der international genormten Frequenzbewertungskurve A, Bild 3, erhält der Meßwert die Bezeichnung "dB (A)".

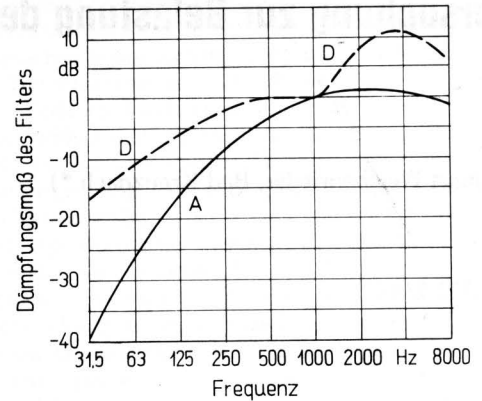


Bild 3. Normierte Kurven für die Frequenzbewertung, (Filterkurven A und D).

1.4 Impulsschallpegel

Das menschliche Ohr reagiert ebenso wie ein anzeigendes Meßgerät mit einer bestimmten Trägheit auf rasche Pegelschwankungen. Bei der genormten Meßgeräteinstellung IMPULS (Meßgröße z. B. dB (AI)) stimmen die Trägheiten von Meßwertanstieg und menschlicher Empfindung überein. Daneben sind für Schallmessungen die trägeren Anzeigeschwindigkeiten FAST und SLOW gebräuchlich (Meßgrößen dB (AF), dB (AS)).

1.5 Oktavbandpegel

Durch eine Oktavanalyse wird der hörbare Frequenzbereich in einzelne Tonhöhenbereiche aufgegliedert. Die Mittelfrequenzen benachbarter Oktavbereiche verhalten sich wie 2 : 1 (Oktave). Anstelle des Gesamtschallpegels (dB oder dB (A) ..) werden je nach dem interessierenden Bereich (einige oder mehrere) Oktavbandpegel (dB-okt, dB (A)-okt..) ermittelt. Da einzelne Schallschutzmaßnahmen meist über einen Bereich von ein bis zwei Oktaven optimal wirksam sind, erübrigen sich vielfach feinere Frequenzanalysen (Terz-, Schmalbandanalyse).

2. Beanspruchung des Menschen durch Schall

Die Einwirkung übermäßigen Lärmes auf den Menschen führt sowohl zu psychischen als auch zu physiologischen Reaktionen, die sich gegeneinander nicht klar abgrenzen lassen. Die Schallereignisse betreffen den ganzen Menschen und die lärmbedingten Veränderungen sind dementsprechend mit den Methoden aus der Physiologie, aus der Psychologie und der Ohrenheilkunde zu erfassen [1].

2.1 Vorwiegend psychische Lärmwirkungen

Die sogenannten psychischen Lärmwirkungen äußern sich vor allem als Mißempfinden und sind ein Hauptproblem der Lärmbekämpfung. Ein begrenzter Schutz ist durch die im psychischen Bereich mögliche Gewöhnung an Lärm gegeben. Sie bedeutet eine Abschwächung der Reaktion auf wiederholte Reize und unterdrückt damit permanente negative Emotionen. Die Gewöhnung kann allerdings jederzeit wieder aufgehoben werden [2]. Die zum Ausgleich der Störungen erforderliche größere Anstrengung und Willensanspannung führt zu vorzeitiger Ermüdung und nervösen Beschwerden [3].

2.2 Vorwiegend physiologische Lärmwirkungen

Die Wirkungen des Lärms auf das vegetative System (Herz, Kreislauf, Atmung usw.) verändern die Leistungsbereitschaft des menschlichen Organismus unmittelbar. Als besonders schwerwiegend wird die unter Lärm- und Schwingungseinwirkung zu beobachtende Herabsetzung der Hautdurchblutung betrachtet, die infolge peripherer Gefäßverengung eintritt. Vegetative Reaktionen als Reizantworten sind an sich nicht krankhaft. Es gehört aber zu den Charakteristiken unseres Organismus, daß das physiologische Erregungsniveau zwischen Leistungsanspannung und -entspannung pendelt [1], wogegen unter Lärmeinwirkung das vegetative System zu einer anhaltenden Anspannung neigt.

Jansen [1] konnte aufgrund zahlreicher Untersuchungen Grenzwerte aufstellen, "bei deren Überschreitung nicht mehr mit einer normalen Verarbeitung des Geräusches gerechnet werden darf". Demnach ist bei einem Gesamtschallpegel von 80 bis 85 dB eine Gefährdung gegeben.

Vegetative Reaktionen treten natürlich nicht bei allen Menschen bei den gleichen Grenzwerten auf. Doch zeigt sich, daß bei Menschen mit geringen vegetativen Reizantworten das Gehör besonders gefährdet ist. Überkritische Schallintensitäten führen entweder zu Lärmschwerhörigkeit oder zu Störungen der vegetativen Funktionen [1].

Die Lärmschwerhörigkeit ist die einzige im üblichen Sinn als Krankheit bezeichnete Schädigung durch Lärm. Nach einer Einwirkung von Lärm mit 90 dB (A) über acht Stunden eines Arbeitstages sinkt die Empfindlichkeit unseres Ohres für den Frequenzbereich 1 000 bis 4 000 Hz im Mittel um etwa 20 dB. Für dieselbe Wahrnehmungstärke nach Arbeitsende ist also eine Schallpegelerhöhung um 20 dB erforderlich. Da dieser Hörminderung eine vorübergehende Stoffwechsellerschöpfung der Sinneszellen zugrundeliegt, kann sich nach ausreichenden Lärmpausen die Hörfähigkeit voll zurückbilden.

Bild 4 zeigt ein Ergebnis japanischer Untersuchungen, bei denen 17 Versuchspersonen dem Lärm ausgesetzt waren, der über einen Tagesablauf von einem 20 kW-Schlepper aufgezeichnet worden war (≈ 92 dB (A)) [4]. Die Hörminderung während der Lärmzeiten wie auch die Erholung während der Pausen sind deutlich zu erkennen. Dabei ist die Bezugslinie (0 dB) durch die Hörfähigkeit von normalhörenden 20 bis 25jährigen Menschen festgelegt. Die Hörminderung ist die Differenz zwischen dem als Hörschwelle tatsächlich festgestellten Schalldruckpegel und dem Schalldruckpegel für die normierte Hörschwelle (4 phon-Kurve der Kurven gleicher Lautstärkepegel, Bild 2).

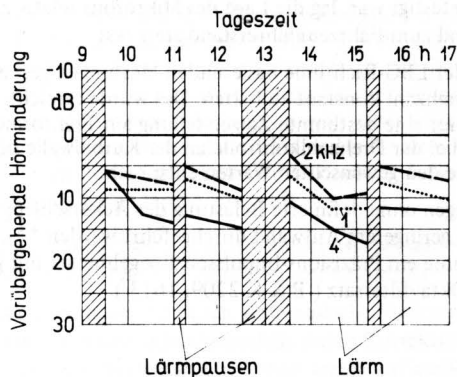


Bild 4. Vorübergehende Hörminderung für die Frequenzen 1, 2 und 4 kHz bei Einwirkung von Schlepperlärm mit 92 dB (A) – mit Erholungspausen, nach Sakai u.a. [4].

Ist eine Hörschwellenverschiebung nach Beendigung einer Lärmarbeit so groß, daß der Zeitraum bis zur nächsten Arbeitsschicht nicht ausreicht, die normale Hörfähigkeit wiederzuerlangen, so kommt es zu einer Anhäufung dieser Schwellenverschiebung. Bereits nach einigen Monaten verliert das Gehör die Fähigkeit, die volle Empfindlichkeit der Sinneszellen wiederherzustellen, die lärmbedingte Schwerhörigkeit nimmt ihren Anfang.

Es ist allgemein anerkannt, daß frequenzbewertete Schalldruckpegel unter 80 dB (A) nicht zu einer Gehörschädigung führen. Es gilt als nicht vertretbar, einen derart niedrigen Grenzwert zu setzen, der alle Menschen für beliebige Arbeitszeiten vor dem Risiko eines minimalen Hörverlustes bewahrt. Daher einigte man sich bisher auf den Grenzwert 90 dB (A), bei dem etwa 90 % der Lärmarbeiter vor bedenklichen Hörschäden verschont bleiben.

Unabhängig davon führt die permanente Geräuscheinstrahlung auf die Bewohner industrialisierter Länder zu einer Minderung der Hörfähigkeit Bild 5 [5]. Dabei ist anzumerken, daß der Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 2 000 Hz für das Verstehen der Umgangssprache entscheidend ist.

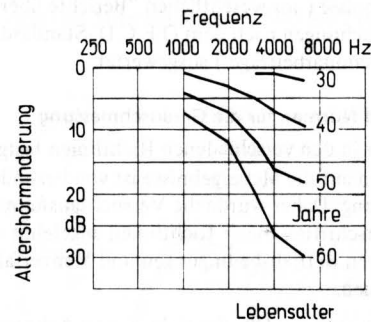


Bild 5. Bleibende, altersabhängige Hörminderung für die männliche Bevölkerung von Industriestaaten, nach Schmidt, VDI 2058 [5].

Bild 6 zeigt ein Ergebnis einer tonaudiometrischen Untersuchung an Ackerschlepperfahrern [6]. Da der Ackerschlepper neben den Baumaschinen zu den geräuschintensivsten Fahrzeugen zählt, ist beim gegenwärtigen Stand der Technik besonders bei Schlepperfahrern, die mehr als 500 bis 800 Stunden jährlich auf dem Fahrzeug verbringen, ein lärmbedingter Hörschaden zu erwarten. Die längeren, saisonbedingten Lärmpausen wirken sich positiv auf das Gehör aus. Die Forderung, das Schleppergeräusch zu senken,

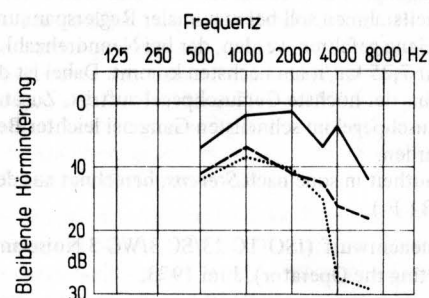


Bild 6. Bleibende Hörminderung. Ergebnis einer audiometrischen Untersuchung an Ackerschlepperfahrern nach verschieden langer Arbeitszeit, nach Tomlinson [6].

— 10 Jahre Arbeit (17 Personen)
 - - - 20 Jahre Arbeit (28 Personen)
 30 Jahre Arbeit (10 Personen)

sollte sich nicht nur auf die Vermeidung von Gehörschäden beziehen. Vielmehr muß der Geräuschpegel soweit gesenkt werden, daß die Hörbarkeit akustischer Signale im Straßenverkehr gesichert (85 dB (A)) und nicht zuletzt die psychische Belastung des Fahrers vermindert wird.

3. Untersuchungen über die Lärmentwicklung von Ackerschleppern

3.1 Aufgabenstellung

Es sollte aufgezeigt werden, welcher Lärmbelastung Schleppfahrer unter definierten Betriebsbedingungen des Schleppers ausgesetzt sind, wie Motordrehzahl, Motorleistung bzw. Zugkraft, die Geräuschemissionen des Ackerschleppers beeinflussen und welche Veränderungen der Aufbau von Sicherheitsrahmen, Verdecken und Kabinen hervorruft.

Hierzu standen als Versuchsobjekte zwölf Ackerschlepper im Leistungsbereich von 44 bis 74 kW (60 bis 100 PS) zur Verfügung, die fast ausschließlich dem Baujahr 1973 angehörten. Zur Vertiefung und Absicherung der eigenen Ergebnisse wurden weitere Untersuchungsergebnisse (im wesentlichen "Berichte über die technischen Untersuchungen nach dem O.E.C.D.-Standard-Code" [7] und einzelne Seminarbeiträge) ausgewertet.

3.2 Richtlinien und Normen für die Geräuschmessung

Die Auswirkung der in den verschiedenen Richtlinien festgelegten Meßbedingungen auf die Meßergebnisse ist von besonderer praktischer Bedeutung. Daher wurde die Versuchsausführung an die allgemeinen Vorschriften dieser Richtlinien angelehnt und die dort vorgeschriebenen Betriebsbedingungen und Meßverfahren zum Teil übernommen.

Mit der Geräuschmessung am Ohr des Fahrers von Ackerschleppern befassen sich:

- a) O.E.C.D.-Standard-Code für die offizielle Prüfung der Leistungsfähigkeit von Ackerschleppern [8].

Betriebsbedingungen: Der Schlepper fährt in allen Gängen bei voller Reglerspannung ("Vollgas"). Die aufzubringende Last (Zugkraft) wird soweit gesteigert, bis der maximale Schallpegel gefunden ist.

Meßwerte: Bewerteter Schalldruckpegel dB (AF) in jedem Gang und Lautheit in sone nach *Stevens*, berechnet aus der Oktavanalyse in dB (F) für denjenigen Gang, bei dem die Schleppergeschwindigkeit bei Nenndrehzahl der Geschwindigkeit 7,25 km/h am nächsten kommt, sowie für alle weiteren Fahrstufen, deren dB (AF)-Wert um mindestens 1 dB über dem bei vorgenanntem Gang gemessenen liegt.

- b) O.E.C.D.-Standard-Code für die offizielle Prüfung von Sicherheitsfahrerhäusern und Sicherheitsrahmen auf Ackerschleppern.

Betriebsbedingungen: Bei Meßfahrten mit und ohne Fahrerhaus bzw. Sicherheitsrahmen soll bei maximaler Reglerspannung in demjenigen Gang gefahren werden, der bei Nenndrehzahl der Geschwindigkeit 7,25 km/h am nächsten kommt. Dabei ist die Last zu erhöhen, bis der höchste Geräuschpegel auftritt. Zusätzlich soll der Geräuschpegel im schnellsten Gang bei leichter Belastung bestimmt werden.

Meßwert: Lautheit in sone nach *Stevens*, berechnet aus der Oktavanalyse in dB (F).

- c) ISO-Normenentwurf (ISO/TC 23/SC 3/WG 3 Noise and Vibration affecting the Operator), Juni 1973.

Der Normenentwurf übernimmt die Betriebsbedingungen nach OECD mit dem Meßwert dB (AF). Erweiternd werden Angaben von Oktavpegelwerten, Messungen in der Praxis und die Ermittlung eines Durchschnittpegels vorgeschlagen.

- d) DIN 45 639, Innengeräuschmessungen in Kraftfahrzeugen.

Diese Norm gilt für Ackerschlepper nur dann, "wenn sie einen geschlossenen Aufbau aufweisen".

Betriebsbedingungen: Das unbelastete Fahrzeug fährt bei der höchstzulässigen Geschwindigkeit im größten Gang. Zusätzliche Messungen werden empfohlen (andere Fahrzustände, Standgeräusch, Rollgeräusch, ggf. Geräusche von Hilfsaggregaten usw.).

Meßwerte: A-bewerteter Schallpegel in der Anzeigart FAST, also dB (AF). Es wird auf den Übergang in die Anzeigart IMPULS hingewiesen, sobald genügend Meßgeräte mit der hierfür notwendigen Ausstattung in der Praxis eingeführt sind. Ferner wird empfohlen, Oktav- oder Terzbandanalysen in dB (F) oder dB (AF), bzw. dB (I), dB (AI) durchzuführen.

- e) VDI-Richtlinie 2058, Blatt 2, Beurteilung von Arbeitslärm am Arbeitsplatz hinsichtlich Gehörschäden.

Die Messungen sollen bei Arbeitszuständen der Praxis erfolgen.

Meßwert: A-bewerteter Schalldruckpegel möglichst in der Einstellung IMPULS, also dB (AI). Bei unregelmäßigen Pegelverläufen und bei unterbrochenen Einwirkungen ist über ein besonderes Auswerteverfahren (DIN 45461) der Beurteilungspegel (< 90 dB (AI) gefordert) zu ermitteln.

- f) LBG-Richtlinie: Besondere Grundsätze für die Beurteilung des Lärms am Ohr des Fahrers von Ackerschleppern (Unfallverhütungsvorschriften der Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften, Entwurf der LAV).

Betriebsbedingungen: Der Schlepper wird ohne Last bei 75 % der Nenndrehzahl gefahren (nach einigen Jahren bei 100 %), und zwar in demjenigen Gang, der bei Nenndrehzahl der Geschwindigkeit 7,25 km/h am nächsten kommt.

Meßwert: A-bewerteter Schallpegel in der Einstellung SLOW, also dB (AS). Unter den angegebenen Betriebsbedingungen muß der Schallpegel den Wert 90 dB (AS) unterschreiten.

3.3 Durchführung der Schallmessungen

Die Grundlage der Messungen bildeten der O.E.C.D.-Standard-Code für die Messungen bei definierter Belastung und die Richtlinie der Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaft für die Messungen bei Leerfahrt der Schlepper. *)

Vor Beginn der Messungen wurde der Schlepper ca. 1/4 Stunde bei halber maximaler Zugkraft warmgefahren. Anschließend stellte man während der Fahrt die Drehzahl des Schleppers bei einer geringen Zugkraft von etwa 2940 N (300 kp) auf einen bestimmten Wert ein (1100, 1300 ... U/min) und erhöhte dann in den gewünschten Stufen den Zugwiderstand. Die Meßwerte von Zugkraft und Drehzahl wurden 10 Sekunden lang verfolgt und elektronisch gemittelt. Von der Schallmeßeinheit (Brüel & Kjaer 2607, 1614) führte ein 13 m langes Mikrofonkabel längs des Zugseiles zum Schlepperführerstand. Da das Meßmikrofon an einem Helm bzw. Helmband befestigt war, lag die Lage des Mikrofons relativ zum Fahrerohr und zum Fahrzeugführerstand stets fest.

Für die auf der LBG-Richtlinie basierenden Messungen galt es, lediglich die Drehzahl konstant zu halten. Das wurde erreicht, indem der Fahrer eine bestimmte Zeigerstellung am Traktormeter einhielt, die bei der Drehzahlkontrolle an der Kurbelwelle oder der Zapfwelle den gewünschten Werten entsprach.

Lärmmessungen ohne definierte Belastung des Ackerschleppers konnten mit geringerem Aufwand durchgeführt werden **, als Meßgerät diente ein Präzisions-Impulsschallpegelmessgerät mit gekoppeltem Oktavfiltersatz (B & K 2209, 1613).

*) Die Messungen unter definierter Belastung des Schleppers erfolgten auf dem Gelände der Prüfstelle für Landmaschinen der DLG in Groß-Umstadt unterstützt von den Herren Dipl.-Ing. *Freidank, Kiene und Schäfer*.

***) Die Messungen wurden freundlicherweise von Herrn Dr. *Foltin* von der Firma Fritzsche und von verschiedenen Ackerschlepperfirmen unterstützt.

4. Meßergebnisse und Diskussion

4.1 Einfluß von Nebenbedingungen bei Schallmessungen

Die Richtlinien zur Messung des Lärms am Ohr des Fahrers von Ackerschleppern enthalten zahlreiche Nebenbedingungen, deren Einhaltung dazu dienen soll, vergleichbare, reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Hier werden z.B. genannt: windarmes Wetter, waagerechte Teer- oder Betonbahn, keine Bauten innerhalb 15 m (20 m), Nachweis der Motornennleistung mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ ($\pm 10\%$), vorgeschriebener Reifenluftdruck, voll aufgetankt, Schlepper nur mit Fahrer von mittlerer Gestalt und üblich bekleidet besetzt.

Für die Durchführung der Schallmessungen ohne Zugbelastung war es erwünscht, die Bedienung des Meßgerätes als Beifahrer auf dem Schlepper vorzunehmen. Andernfalls müßte der Fahrer nebeneinander sechs verschiedene Tätigkeiten ausüben: Beobachten der Straße, des Drehzahlmessers und des Meßgerätes, Lenken, Bedienen des Meßgerätes und Notieren des Meßwertes. Dies ist zwar tatsächlich möglich, schien aber für die zahlreichen Versuche schon aus Sicherheitsgründen nicht angebracht. Um den Einfluß eines Beifahrers auf die Höhe des Meßwertes zu bestimmen, wurden zehn Messungen zum Vergleich so durchgeführt, daß die Meßperson (sonst Beifahrer) das Schallmeßgerät hinter dem Schlepper gehend bediente. Dies war bei einer Geschwindigkeit von 5 km/h (75 % der Nenn Drehzahl) gerade noch möglich. Unter diesen Bedingungen zeigte sich übereinstimmend eine Gesamtpegelerhöhung von 0,5 dB bis 1 dB, wenn die Meßperson die Kabine verlassen hatte. Das ist vor allem auf die Schallabsorption durch die Kleidung des Beifahrers zurückzuführen.

Bei Schleppern ohne Aufbau oder nur mit Sicherheitsrahmen war eine Differenz nicht meßbar. Bei den später dargestellten Meßergebnissen ist der Einfluß durch die zusätzlich in der Kabine vorhandene Meßperson nicht pauschal korrigiert worden, um den Zusammenhang der Gesamtpegelwerte mit den Oktavbandpegelwerten nicht zu verfälschen.

Einige Messungen erfolgten mit einer von der üblichen Helmbefestigung abweichenden Mikrofonanordnung. Dabei wurde die Lage des Mikrofons am Meßpunkt nach DIN 45 639 (Innengeräuschmessungen in Kraftfahrzeugen) (entspricht LBG-Richtlinie) durch ein Stativ festgelegt. Die Bedienung des Meßgerätes durch den Fahrer führte hier dazu, daß der normierte Meßpunkt und die Lage des Fahrerohres 15 bis 20 cm voneinander abweichen. Trotz Verwendung anderer Meßgeräte und einer völlig abweichenden Meßanordnung durch zusätzliche Variation der Mikrofonrichtung waren aber die Differenzen der Gesamtpegel bei den verschiedenen Versuchen gleich Null zu setzen.

Üblicherweise wird den Reflexionseigenschaften der Fahrbahn ein großer Einfluß auf die Lautstärke am Fahrerohr zugeschrieben. Da sich aber der Schlepperfahrer sehr hoch über dem Boden befindet, kann der Einfluß der Reflexion wegen des dreimal längeren Schallweges vom Motor zum Fahrerohr nur von untergeordneter Wirkung sein. So zeigte eine als schallabsorbierend geltende Grasnarbe einen gegenteiligen Einfluß auf. Erst eine 10 cm hohe Pulverschneeschicht ergab eine Pegelminderung von 1 dB.

Zusammenfassend kann man die Fehler, die bei den Schallmessungen auftreten können, in zwei Gruppen einordnen:

Die Abweichungen, die durch systematische Fehler auftreten, sind erfaßbar und lassen sich nötigenfalls durch Korrektur des Meßwertes eliminieren. Systematische Fehler treten auf am Meßgerät, z. B. durch falsche Eichung ($\pm 0,2$ dB), ungünstige Meßbedingungen ($\pm 0,5$ dB), veränderte Meßausrüstung ($\pm 0,5$ dB). Systematische Fehler treten ferner auf am Meßobjekt, z. B. durch bewußte Veränderung des Schallfeldes (Anwesenheit von Personen) (± 1 dB) und erfaßbare Abweichungen vom Soll-Betriebszustand (± 1 dB).

Zufällige Fehler können nicht korrigiert werden. Bei Wiederholung einer Messung oder bei Messung durch verschiedene Personen ergeben sich unterschiedliche Meßwerte aufgrund der zufälligen Fehler (Gauss-Verteilung). Solche zufälligen Fehler können sein: Nicht erfaßbare Schwankungen von Motordrehzahl und Betriebstemperatur, Veränderungen der konstruktiven Toleranz, Rundung bei Ablese der Meßwerte (± 1 dB). Bei Messungen an verschiedenen Schleppern desselben Typs und derselben Serie können sich die Abweichungen durch konstruktiv bedingte Toleranzen und unterschiedliche Montage addieren, so daß Unterschiede im Meßergebnis von ± 2 dB möglich sind.

4.2 Drehzahl- und Lastabhängigkeit des Schlepperlärms

Bild 7 zeigt die Oktavbandpegel für einen stehenden Ackerschlepper bei verschiedenen Motordrehzahlen. Die Meßwerte sind bereits nach Kurve A frequenzbewertet. Dadurch treten die für den Gesamtschallpegel wie auch die menschliche Empfindung entscheidenden Tonhöhenbereiche deutlich hervor. Wie das Bild zeigt, gehören hierzu vorwiegend die Frequenzen, die von den Bändern mit den Mittelfrequenzen 500 bis 2 000 Hz erfaßt werden.

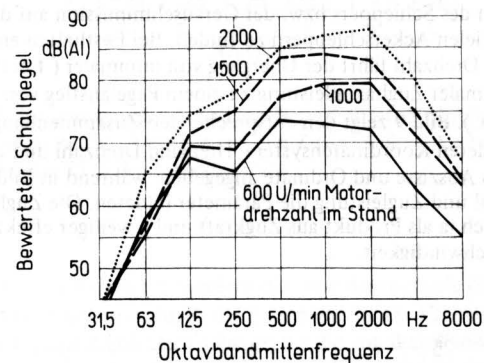


Bild 7. Oktavbandpegel am Ohr des Fahrers, ermittelt im Stand bei verschiedenen Motordrehzahlen, 50 kW-Schlepper (Kennbuchstabe B) mit rückseitig offenem Verdeck.

Bei der Zusammenfassung der Oktavbandpegel zum Gesamtschallpegel wird die vorn behandelte Art der Addition, Bild 1, angewendet. Daraus folgt, daß Oktavpegel ohne Einfluß auf den Gesamtpegel sind, falls ihr Pegel mehr als 10 dB unter dem jeweiligen Maximalwert liegt. Dies gilt in Bild 7 in allen Fällen für die Frequenzbereiche unterhalb 125 Hz und oberhalb 4 000 Hz.

Auffallend ist, daß bei steigender Motordrehzahl die Schallpegelzunahme nahezu proportional den gesamten Frequenzbereich erfaßt. Eine Analyse mit wesentlich schmaleren Frequenzbändern würde zeigen, daß die Schallpegel bis zur Frequenz von etwa 250 Hz durch hervortretende Spitzenwerte geprägt sind (Vielfache der drehzahlbedingten Frequenz), während sich darüber hinaus der Pegelverlauf zunehmend glättet.

Eine sehr umfassende Aussage über die Schallabstrahlung von Ackerschleppern erlauben Geräuschkennfelder. Hierbei ist allerdings die Beschränkung auf Gesamtschallpegel erforderlich. Bild 8 zeigt anschaulich, wie Motordrehzahl und Zugleistung den Schallpegel beeinflussen. Wenn auch dieses Geräuschkennfeld nur für einen ganz bestimmten Schlepper gültig ist, so zeigt es doch Elemente, die für den überwiegenden Teil der Ackerschlepper charakteristisch sind. Dazu gehört die relativ starke Drehzahlabhängigkeit der Geräuschentwicklung. Überschlägig läßt sich sagen, daß eine Drehzahlzunahme von 10 % eine Pegelerhöhung von 1 dB (A) bedingt.

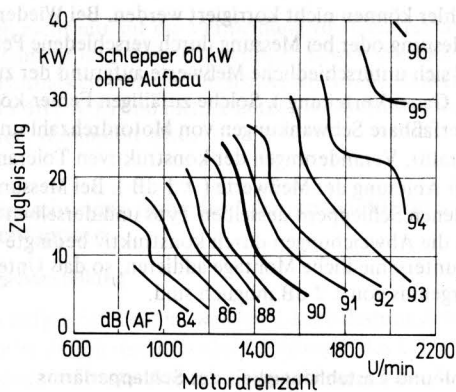


Bild 8. Geräuschkennfeld. Linien gleichen bewerteten Schalldruckpegels in Abhängigkeit von der Motordrehzahl und der Zugleistung (Zugkraft mal effektive Geschwindigkeit) des Ackerschleppers (A). Fahrt in dem Gang, der bei Nenndrehzahl der Geschwindigkeit 7,25 km/h am nächsten kommt.

Andererseits ist die relativ geringe Lastabhängigkeit der Geräuschemission des Schleppers bzw. der Geräuschimmission auf den Fahrer bei vielen Ackerschleppern zu finden. Bei Festhalten einer beliebigen Drehzahl führt der Übergang von minimaler (Leerfahrt) zu maximaler Zughakenleistung zu einem Pegelanstieg von 3 bis 5 dB (A). **Bild 9** zeigt den entsprechenden Zusammenhang in einem anderen Koordinatensystem. Hier sind Drehzahl und Zugkraft als Abszisse und Ordinate angegeben, während in Bild 8 Drehzahl und Zugleistung die Parameter bildeten. Die Zugleistung ergibt sich ja als Produkt aus Zugkraft und jeweiliger effektiver Fahrgeschwindigkeit.

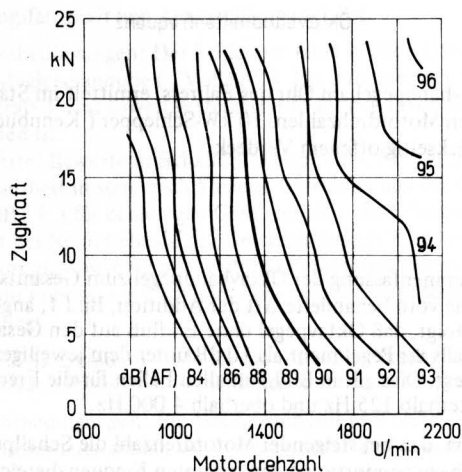


Bild 9. Geräuschkennfeld. Linien gleichen bewerteten Schalldruckpegels in Abhängigkeit von der Motordrehzahl und der Zugkraft des Ackerschleppers (A). Schlepper 60 kW, ohne Aufbau.

Ein völlig anderes, „uncharakteristisches“ Verhalten hinsichtlich der Lastabhängigkeit des Geräusches zeigte ein Schlepper (E), dessen Geräuschkennfeld in **Bild 10** wiedergegeben ist. Während sich Drehzahländerungen in gleicher Weise auf die Geräuschentwicklung auswirken, wie bei der Mehrzahl der anderen Schlepper, nimmt hier bei Steigerung der Last der Schallpegel mit 8 bis 10 dB (A) außergewöhnlich stark zu. Das ist besonders ungünstig, da der Schallpegel bereits bei geringer Last beträchtlich ist.

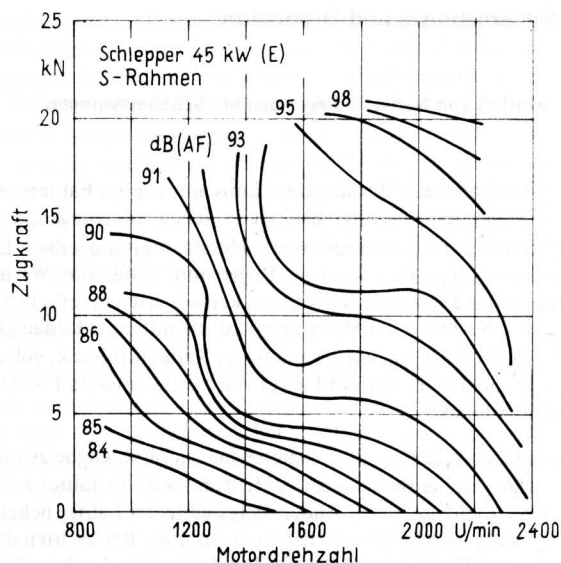


Bild 10. Geräuschkennfeld für den Ackerschlepper (E) mit Sicherheitsrahmen.

Die beiden Geräuschkennfelder zeigen aber auch, wie kritisch es ist, die Geräuschemission nach einem Meßwert zu beurteilen. Bei Leerfahrt mit 75 % der Nenndrehzahl fanden sich für Schlepper (A) 87 dB (AS), (E) 85 dB (AS) (LBG-Richtlinie), bei Leerfahrt mit 100 % der Nenndrehzahl für (A) 91 dB (AS), (E) 90 dB (AS), bei Fahrt mit maximaler Last und Drehzahl für (A) 95 dB (AF), (E) 98 dB (AF) (OECD-Test). Obwohl also Schlepper (E) unter Last zu starker Geräuschentwicklung neigt, überschreiten im Gegensatz zu Schlepper (A) bei Leerfahrtmessung die Werte nicht die zulässige Grenze von 90 dB (AS).

Bild 11 zeigt weitere Meßergebnisse unter den genannten Bedingungen. Von 21 geprüften Schleppern bzw. Schleppervarianten blieben 19 unter dem Schallpegelwert 90 dB (AS) am Fahrerohr bei Leerfahrt mit 75 % der Nenndrehzahl, aber nur noch 6 Schlepper bei Leerfahrt mit 100 % der Nenndrehzahl. Für die Fahrt bei Vollast lagen für die betreffenden Schlepper nur die in Bild 11 eingearbeiteten Vergleichswerte vor, die z. T. OECD-Berichten entnommen sind.

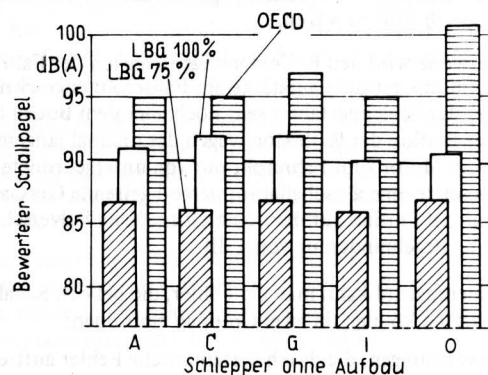


Bild 11. Frequenzbewerteter Gesamtschallpegel dB (A) am Ohr des Fahrers, für fünf Ackerschlepper bei verschiedenen Betriebsbedingungen: Leerfahrt mit 75 % bzw. 100 % der Nenndrehzahl (LBG-Richtlinie) und Fahrt unter Last bei maximaler Regler-spannung (O.E.C.D.-Standard-Code).

4.3 Abhängigkeit des Lärms am Ohr des Fahrers von technischen Daten des Schleppers

Bei Messungen nach dem O.E.C.D.-Standard-Code werden die maximalen Schallpegel in allen Fahrstufen ermittelt, **Bild 12**. Da sowohl Motordrehzahl wie Motorleistung in allen Gängen annähernd gleich sind, ergeben sich die wechselnden Schallpegel überwiegend durch das sich ändernde Getriebegetöse.

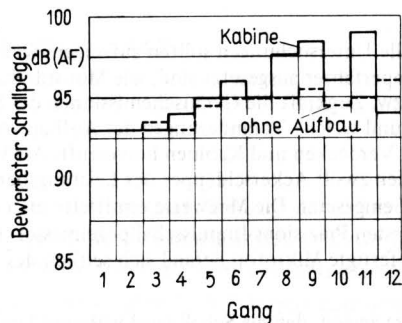


Bild 12. Maximale Schallpegel in den zwölf Fahrstufen des Ackerschleppers (A). Schlepper ohne Aufbauten und mit voll verschlossener, schallgedämpfter Kabine, Messung nach O.E.C.D.-Standard-Code.

Nachdem die starke Drehzahlabhängigkeit des Schlepperlärms festgestellt war, lag die Vermutung nahe, daß die Geräuschentwicklung auch mit zunehmender Nenndrehzahl ansteigt. Diese Vermutung konnte nicht bestätigt werden, ebensowenig wie eine Zunahme der Geräuschentwicklung mit steigender Motornennleistung.

Eindeutige Unterschiede zwischen wassergekühlten und luftgekühlten Schleppermotoren wurden nicht gefunden. Sowohl die lautesten wie auch die leisesten Ackerschlepper waren wassergekühlt.

Bei Schleppern ohne Aufbau oder mit Sicherheitsrahmen ist meist der Auspuffschall die stärkste Geräuschkomponente. Da die Entfernung der Auspuffmündung vom Fahrerohr die Geräuschintensität unmittelbar beeinflusst, ändert sich der Schallpegel mit der Auspuffanordnung, **Bild 13**.

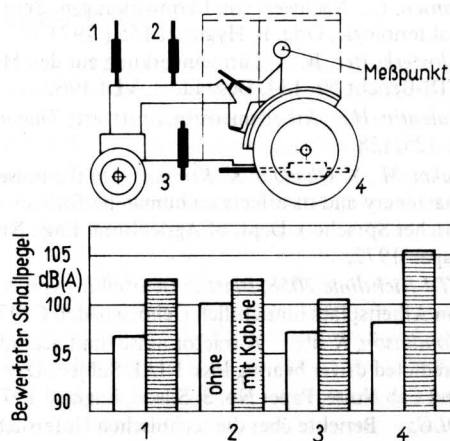


Bild 13. Einfluß der Auspuffanordnung auf den Schallpegel am Fahrerohr, nach NIAE.

4.4 Einfluß verschiedener Schlepperaufbauten

Bild 14 zeigt die Veränderungen des Schallpegels, die bei unterschiedlichen Aufbauten auf sechs Ackerschleppern gemessen wurden.

Sicherheitsrahmen führen in der Regel zu keiner Veränderung des Gesamtschallpegels. Hier dürfte sich die Versteifung der Kotflügel positiv auf die abgestrahlte Schallenergie auswirken. Da aber jede Versteifung die Eigenfrequenzen erhöht und damit mehr in den Bereich der störenden Frequenzen verschiebt, gleicht sich der Gewinn häufig wieder aus. Bei verschraubter Konstruktion ist anzunehmen, daß die innere Dämpfung in den Fügeflächen ausreicht, die Schallabstrahlung von den Rahmenprofilen so weit zu unterdrücken, daß kein Einfluß im Gesamtpegel zu erkennen ist. Die innere Dämpfung der Hohlprofile könnte nötigenfalls durch Sandfüllung verstärkt werden [9], der Gewinn von 1 dB rechtfertigt aber den großen Aufwand in keiner Weise.

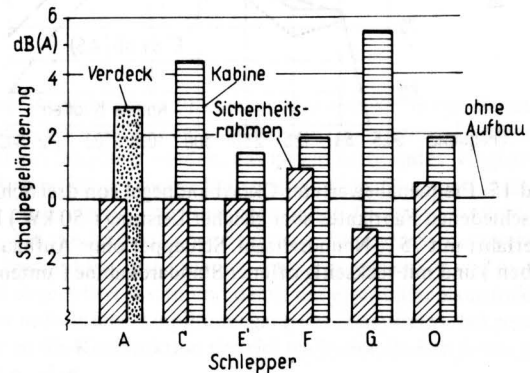


Bild 14. Änderungen des Schallpegels am Fahrerohr durch unterschiedlichen Aufbau bezogen auf den Zustand ohne Aufbau; Leerfahrt bei 75 % der Nenndrehzahl.

Verdecke und Kabinen behindern die freie Ausbreitung der Schallwellen und erhöhen dadurch die Energiedichte am Fahrerplatz. Der Schallpegel erhöht sich solange, bis die von den Wänden und vom Rauminneren absorbierte Schalleistung mit der in den Raum eingestrahlt Schalleistung im Gleichgewicht steht.

Zur genauen Beurteilung der Einflußgrößen sind die niederen und die hohen Frequenzen getrennt zu betrachten [10]. Für tiefe Frequenzen sind die Wellenlängen von der Größenordnung der Raumabmessungen. So beträgt die halbe Luftschall-Wellenlänge der Frequenz 100 Hz 1,7 m. Es bilden sich dann vorzugsweise stehende Wellen aus, der Raum wird zu einem Resonanzkörper. Positiv wirkt sich aus, daß die unmittelbare Luftschallabstrahlung der Auspuffmündung abgeschirmt wird. Ist der Aufbau rückseitig offen, so zeigen sich nur in geringem Maße stehende Wellen. Dadurch ergibt sich ein durch Verdeck oder Kabine bedingter Pegelanstieg von rund 5 dB im Oktavband mit der Mittenfrequenz 63 Hz, **Bild 15**. Bei geschlossenem Aufbau reicht die entsprechende Erhöhung bis 15 dB und beeinflusst damit auch den A-bewerteten Gesamtpegel, da die Differenz zum größten Oktavbandpegel dann geringer als 10 dB wird.

Oberhalb 500 Hz sind die Wellenlängen klein gegenüber den Raumabmessungen und keine Ausbreitungsrichtung wird bevorzugt. In diesem Bereich hängt der Schallpegel von der Absorption des Raumes ab.

Die vollständige Absorption ist identisch mit dem Fall, bei dem die Raumbegrenzungen fehlen, da ja die freie Luft den idealen Schallabsorptionsstoff darstellt. Es läßt sich formell ableiten, daß eine Verringerung des Absorptionsvermögens auf ein Drittel, z. B. durch den Aufbau einer Kabine, eine Schallpegelerhöhung von 5 dB verursacht (vgl. die Meßergebnisse von **Bild 15**). Um diesen Pegelanstieg wettzumachen, müßten die Kabinenwände mit idealen Absorptionsstoffen belegt sein (Schalldämpfung). Eine wirkliche Schallminderung ist demnach nur durch Maßnahmen zu erzielen, die die Einstrahlung des Lärms aus dem Motorraum und vom Getriebe unterbinden (Schalldämmung).

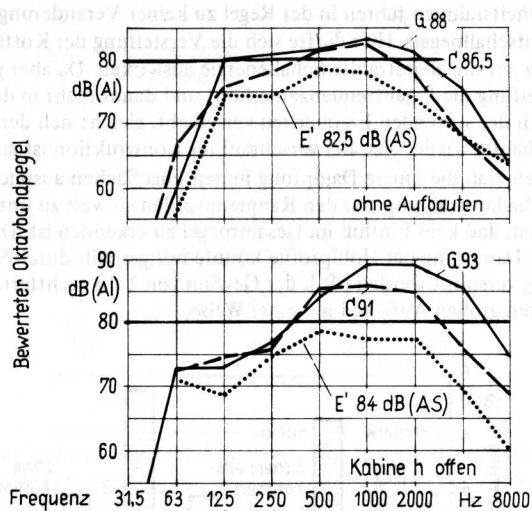


Bild 15. Frequenzbewerteter Oktavbandpegel von drei Schleppern verschiedenen Fabrikates aber gleicher Leistung (50 kW) bei Leerfahrt mit 75 % Nenn Drehzahl. Schlepper ohne Aufbauten (oben) und mit rückseitig offener Standardkabine (unten).

Da der Gesamtpegel immer von der stärksten Einzelschallquelle beherrscht wird, müssen Schallminderungsmaßnahmen stets an dieser Stelle einsetzen. **Bild 16** [11] vermittelt einen Überblick über den Einfluß wesentlicher Komponenten auf den Schallpegel am Ohr des Schlepperfahrers.

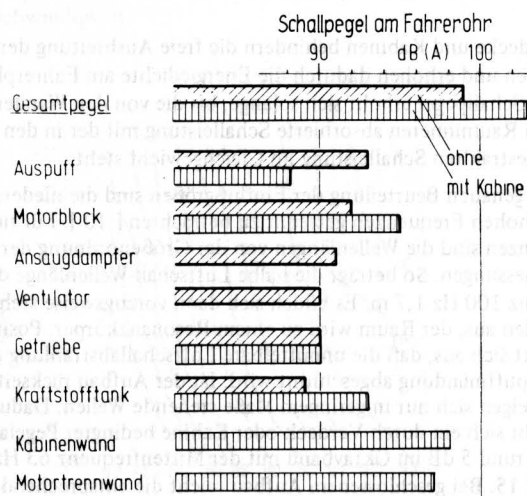


Bild 16. Geräuschkomponenten eines 38 kW-Ackerschleppers ohne Aufbau und mit Kabine, nach *Talamo* [11].

Die Richtlinie der Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften zeigt ihre Auswirkungen in den Entwicklungsarbeiten der Hersteller von Ackerschleppern und Kabinen. Methoden und Werkstoffe zur Minderung des Lärms von Ackerschleppern sind aus dem übrigen Fahrzeugbau hinreichend bekannt. Doch auch hier weisen finanzielle Gesichtspunkte die Fortentwicklung in Schranken. Der weitgehend einheitliche Schlepperführerstand ist die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Serienherstellung schallisierter Kabinen. Unter den Landwirten muß das Verlangen geweckt werden, Maßnahmen zum Schutz ihrer Gesundheit und zur Erhaltung ihrer Leistungsfähigkeit zu entwickeln.

5. Zusammenfassung

Die Arbeit auf dem Ackerschlepper – der für einen wesentlichen Zeitraum den Arbeitsplatz des Landwirtes darstellt – ist begleitet von der Einwirkung von Lärm, mechanischen Schwingungen und zahlreichen anderen Einflüssen, die nicht nur den Komfort vermindern, und die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen, sondern sogar die Gesundheit des Fahrers unmittelbar gefährden. Das Ziel von Lärmschutzvorschriften für die Fahrer von Ackerschleppern beschränkt sich darauf, bleibende Schäden des Gehörorgans zu vermeiden.

Experimentelle Untersuchungen sollten aufzeigen, welchen Lärmpegeln Schlepperfahrer ausgesetzt sind, wie Motordrehzahl, Motorleistung bzw. Zugkraft die Geräuschemissionen des Schleppers beeinflussen und welche Veränderungen der Aufbau von Sicherheitsrahmen, Verdecken und Kabinen hervorruft. Als Versuchsobjekte wurden zwölf Ackerschlepper des Leistungsbereiches 44 bis 74 kW eingesetzt. Die Meßwerte ermittelte man mit einem batteriegespeisten Präzisions-Impulsschallpegelmessers. Das an einem Helm befestigte Mikrofon befand sich seitlich des rechten Fahrerohres.

Die Ergebnisse zeigen, daß als Schallpegel während landwirtschaftlicher Arbeiten überwiegend 90 dB (A) zu erwarten sind, jener Wert also, der als Grenze zur Vermeidung bleibender Hörminderung angesehen wird.

Der Schallpegel am Ohr des Fahrers beträgt im Stand des Ackerschleppers bei unterer Leerlaufdrehzahl meist 80 dB (A). Die Erhöhung der Drehzahl des Schleppermotors um 10 % kann überschlägig einer Pegelzunahme von 1 dB (A) gleichgesetzt werden. Von geringerem Einfluß ist die Leistungsabgabe des Motors. Bei Vollast steigt der Pegel um 3 bis 5 dB (A), in seltenen Fällen aber bis 10 dB (A) gegenüber dem lastfreien Betrieb mit derselben Drehzahl.

Der Aufbau von Sicherheitsrahmen führt meist zu keiner Änderung des Schallpegels. Verdecke und Kabinen in Standardausführung erhöhen den Pegel bei entsprechenden Betriebsbedingungen um 4 bis 5 dB (A).

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Jansen, G.*: Nachweis von Lärmwirkungen. Zentralblatt für Bakteriologie, Orig. B, Hygiene, 155 (1971).
- [2] *Klosterkötter, W.*: Lärmeinwirkung auf den Menschen. VDI-Bericht Nr. 134, Düsseldorf: VDI 1969.
- [3] ● *Valentin, H.*: Arbeitsmedizin. Stuttgart: Thieme 1971, S. 125/128.
- [4] *Sakai, M., Y. Okada u. K. Kurata*: On the noise of farm machinery and its effects on human performance (in japanischer Sprache). Dept. of Agricultural Eng., Niigata Univ. Japan 1972.
- [5] *VDI-Richtlinie 2058, Blatt 2*: Beurteilung von Arbeitslärm am Arbeitsplatz hinsichtlich Gehörschäden (1970).
- [6] *Tomlinson, R.W.*: A tractor noise limit according to predicted driver hearing loss. NIAE-Subject-Day on Tractor and Cab Noise, Paper No. 3, Silsoe, England 1970.
- [7] *DLG*: Berichte über die technischen Untersuchungen nach dem O.E.C.D.-Standard-Code für die amtliche Prüfung von Ackerschleppern. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. 6 Frankfurt/Main 1, Zimmerweg 16.
- [8] *DLG*: Die O.E.C.D.-Standard-Codes für die offizielle Prüfung von Ackerschleppern. Frankfurt: DLG 1971.
- [9] *Manby, T.C.D.*: Display material to NIAE-Subject-Day. Silsoe, England, Juli 1970.
- [10] ● *Wintergerst, E.*: Die technische Physik des Kraftwagens. 2. Aufl. Berlin: Springer 1961, S. 153/175.
- [11] *Talamo, J.D.C.*: Sources of tractor and cab noise. NIAE-Subject-Day, Paper No. 4, Silsoe, England 1970.