Grundlagen der Landtechnik

Grundl, Landtechn. Bd. 15 (1965) Nr. 2 Seite 33 bis 64

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

DK 625.03:631.3

Die Unebenheiten landwirtschaftlicher Fahrbahnen als Schwingungserreger landwirtschaftlicher Fahrzeuge

Von J. O. Wendeborn, Braunschweig-Völkenrode¹)

Mitteilung aus dem Institut für Schlepperforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

Die Fahrbahnunebenheiten sind die Ursache von mechanischen Fahrzeugschwingungen, die Mensch und Fahrzeug beanspruchen. Um die Schwingungseigenschaften eines Fahrzeuges beurteilen zu können, muß man die Eigenschaften der verschiedenen Fahrbahnen kennen. Diese werden durch die spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten beschrieben. Es werden mittels eines einfachen Verfahrens die Unebenheiten verschiedener landwirtschaftlicher Fahrbahnen aufgenommen und die spektralen Dichten errechnet und dargestellt. Die Dichtespektren ländlicher Fahrbahnen werden mit bereits vorhandenen Spektren anderer Fahrbahnen (Betonpisten, Querfeldeinfahrbahnen usw.) in Vergleich gesetzt. Ihre Wirkung auf Fahrzeuge wird an einem Beispiel gezeigt.

Auf Fahrer und Insassen von Fahrzeugen wirken mechanische Schwingungen, die von den Fahrbahnunebenheiten angeregt und über Räder und Fahrgestell auf die Sitze übertragen werden. Die Benutzer von landwirtschaftlichen Fahrzeugen haben besonders hohe Beanspruchungen auf sehr unterschiedlichen Fahrbahnen — Landstraße, Feldweg, Acker — zu ertragen.

Die Fahrbahnunebenheiten erregen verschiedenartige Fahrzeugschwingungen. Es werden durch sie Drehschwingungen in den Antriebsaggregaten angefacht, aber auch die sogenannten äußeren Schwingungen erregt, insbesondere die Hub- und Nickbewegungen, die den Fahrer hauptsächlich physisch beanspruchen.

Wenn von der theoretischen Seite her beurteilt werden soll, ob ein ausgeführtes Fahrzeug günstige Schwingungseigenschaften besitzt, oder den Konstrukteur die Frage interessiert, welche schwingungstechnischen Eigenschaften ein projektiertes Fahrzeug oder eine projektierte Landmaschine hat, dann müssen zwei sehr komplexe Einflüsse bewertet werden: die Fahrbahneigenarten und die schwingungstechnischen Fahrzeugkennwerte. Hinsichtlich der gegenseitigen Abhängigkeit dieser Kennwerte haben Lehr und in letzter Zeit besonders Mitschke [1 bis 4] eine Theorie entwickelt, so daß der Schwingkomfort bewertet werden kann. Die Zusammenhänge zeigen Bild 1 bis 7.

Die Eigenschaften der Fahrbahnen werden durch die spektrale Dichte $\Phi(\Omega)$ der Fahrbahnunebenheiten dargestellt. In Bild 1 sind über der Wegfrequenz Ω die Mittelwerte der Quadrate der Unebenheitshöhen — bezogen auf eine Mittellinie — aufgetragen.

Vorgetragen auf der 22. Tagung der Landmaschinen-Konstrukteure in Braunschweig-Völkenrode am 7. 4. 1964.

Dipl.-Ing. Jürgen Otto Wendeborn ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Schlepperforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

Es liegt demnach eine Frequenzanalyse der Fahrbahnunebenheiten vor. Die Ausgangswerte können z.B. mit einem geodätischen Vermessungsverfahren (Bild 2) gewonnen werden, wobei diese mit Hilfe der nachstehend entwickelten Beziehungen in elektronischen Rechenanlagen verarbeitet werden.

Bei einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit v entspricht eine gewisse Wellenlänge $1/\Omega$ der Unebenheiten einer gewissen zeitabhängigen Anregungsfrequenz ω .

Diese ergibt sich über die Formel:

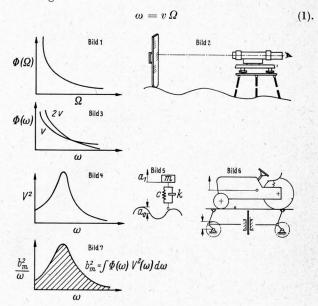


Bild 1 bis 7. Einflußfaktoren der Schwingbeanspruchung der Fahrzeuge beim Befahren unebener Fahrbahnen.

Bild 1. Spektrale Dichte $\Phi\left(\Omega\right)$ der Fahrbahnunebenheiten in Abhängigkeit von der Wegfrequenz Ω .

Bild 2. Verfahren zum Messen der Fahrbahnunebenheiten.

Bild 3. Anregungsintensität $\Phi(\omega)$ in Abhängigkeit von der Zeitfrequenz ω . Bild 4. Vergrößerungsfaktor V^2 in Abhängigkeit von der Zeitfrequenz ω .

Bild 5. Schwingungsersatzsystem für den Schlepper.

Bild 6. Schwingtischversuche.

Bild 7. Spektrale mittlere Beschleunigung $b_{\rm m}^2/\omega$ in Abhängigkeit von der Zeitfrequenz ω.

Jede Fahrbahn wird nun für eine bestimmte Geschwindigkeit durch eine entsprechende Kurve dargestellt. Bild 3 zeigt die Anregungsintensitäten $\Phi(\omega)$ bei den verschiedenen Frequenzen; es spiegelt die Einflüsse der Fahrbahn wider. Berechnet werden sie mit Hilfe von Gl. (1) nach folgender Bedingung:

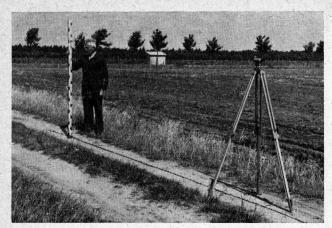


Bild 8. Das geodätische Meßverfahren zur Ermittlung der Fahrbahnunebenheiten.

$$\Phi\left(\omega\right) = \frac{1}{v}\Phi\left(\Omega\right) \tag{2}.$$

Die Fahrzeugkennwerte und -eigenschaften werden in den Vergrößerungsfaktoren V zusammengefaßt. Diese geben an, das Wievielfache der Amplitude der Anregung, beispielsweise der Beschleunigung, bei der jeweiligen Frequenz am Fahrzeug festzustellen ist. Dieses Spektrum — wie es z. B. Bild 4 zeigt — kann rechnerisch aus einem Schwingungsersatzsystem (Bild 5) ermittelt werden oder aus Versuchen, bei denen das Fahrzeug auf einem Schwingtisch (Bild 6) zu Schwingungen mit bestimmten definierten Frequenzen angeregt wird.

Einen Bewertungsmaßstab für das Gesamtsystem Fahrbahn-Fahrzeug bietet die Kurve der spektralen mittleren Beschleunigung (Bild 7), die punktweise aus dem Produkt der Anregungsintensität und dem Vergrößerungsfaktor (Bild 3 und 4) gebildet wird. Als Bewertungsgrößen seien genannt:

- 1. die absolute Größe der Beschleunigungen,
- 2. das Integral unter der Kurve, das physikalisch z. B. als eine mittlere Schwingungsamplitude bzw. mittlere Beschleunigung des Fahrzeuges zu deuten ist, und
- 3. die Charakteristik des Kurvenzuges, die sagt, welche Frequenzen mehr oder minder stark vertreten sind.

Im folgenden wird über Messungen von Fahrbahnunebenheiten und über die Ermittlung der dazugehörigen spektralen Dichten berichtet. Die Fahrt eines Schleppers, der als erster

Bilder 9 bis 12. Längsprofile der vermessenen Fahrbahnen. Die relative Höhe der Fahrbahnen ist stark überhöht dargestellt.

Bild 9. Landstraßen

Fahrbahn ${\bf schlechte}\,\,{\bf Betonstraße}$

Landstraße mit sehr guter Schwarzdecke Landstraße mit schlechter Schwarzdecke 10

14 Feldweg mit Schwarzdecke

Bild 10. Feldwege

Fahrbahn 1 Knüppeldamm in schlechtem Zustand

mittelguter Feldweg schlechter Feldweg

mittelguter Feldweg

mittelguter Feldweg mit starker Steigung

sehr guter Feldweg 11.12 schlechter Feldwei

sehr schlechter Feldweg 15

Abfahrweg auf gerodetem Kartoffelacker - quer zur Reihe

Bild 11. Äcker

abgeernteter Erbsenacker (in Richtung der Reihen) Fahrbahn 25

26 Pflugfurchensohle

abgeernteter Erbsenacker (in Richtung der Reihen) 27

Getreidestoppelfeld in Drillrichtung 29 Stoppelfeld in Drillrichtung

30 Weide auf gerodetem Waldstück

31 Wiese

gefrorener Sturzacker

Bild 12. Äcker mit periodischen Unebenheiten

abgeernteter Kartoffelacker quer zur Reihe gemessen Fahrbahn 16

abgeernteter Kartoffelacker quer zur Reihe

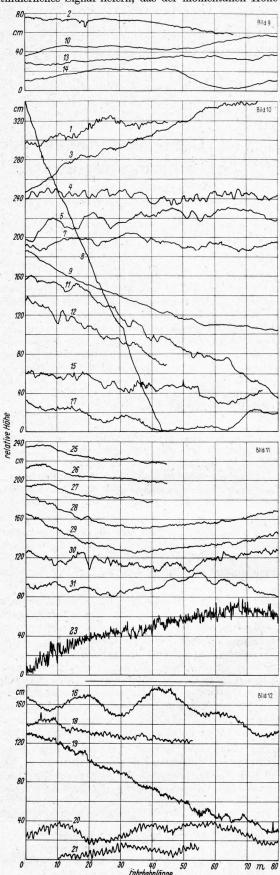
abgeernteter Rübenacker quer zur Reihe

20,21 abgeernteter Kartoffelacker quer zur Reihe

Ansatz sehr vereinfacht im Schwingungsersatzsystem nachgebildet wurde, wird dann auf verschiedenen typischen Fahrbahnen

Meßverfahren zur Erfassung der Fahrbahnunebenheiten

Zur Erfassung von Fahrbahnunebenheiten sind verschiedene Verfahren bekanntgeworden [2; 5 bis 8], die meist alle ein kontinuierliches Signal liefern, das der momentanen Höhe der



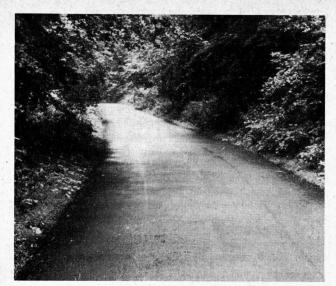


Bild 13. Sehr gute Landstraße (Nr. 10) mit Schwarzdecke.

Fahrbahn an der Meßstelle proportional ist. Die spektrale Dichte der Unebenheiten wird mit Hilfe eines Frequenzanalysators gewonnen.

Alle diese Verfahren bedingen einen sehr hohen apparativen Aufwand sowohl für die Meßwertaufnahmen als auch für die Auswertung. Die Gefahr, daß sich dadurch Meßfehler und Auswerteungenauigkeiten einstellen, ist recht groß, da sie mit Ausnahme von [7] alle auf hohe Geschwindigkeiten und große Strecken ausgerichtet sind.

Darum wurde in der vorliegenden Arbeit ein Verfahren angewendet, das schrittweise arbeitet. Die Meßwerte können direkt, d. h. ohne Umformungen, in einer digitalen elektronischen Rechenmaschine verarbeitet werden [8], da sie bereits als Zahlenwerte vorliegen. Bild 8 zeigt anschaulich, wie die Fahrbahnprofile aufgenommen worden sind. Die Meßstrecke und die Meßpunkte sind durch eine Meßleine festgelegt, die in der zu vermessenden Fahrspur ausgelegt ist. Die Leine hat in Abständen von $\Delta x = 15$ cm Merkmale, an denen die relative Höhe der Fahrbahn gemessen wird. Eine Meßlatte mit einer Teilung von 2 mm hat einen kugelförmigen Fuß mit einem Kugeldurchmesser von 10 cm. Diese wird neben das Merkmal an der Leine in die Fahrspur gestellt. Der Abstand des jeweiligen Fahrbahnpunktes zur optischen Achse (Fadenkreuz) des Fernrohres, die horizontal ausgerichtet ist, wird durch das Fernrohr an der Latte abgelesen und notiert. Dieser Vorgang wird von Merkmal zu Merkmal wiederholt, so daß nach dem Protokoll das Fahrbahnlängsprofil recht gut wiedergegeben werden kann.

Nach diesem Verfahren sind nun die verschiedensten landwirtschaftlichen Fahrbahnen aufgenommen worden. Die vermessenen Längsprofile in der Fahrspur aller Fahrbahnen zeigen die Bilder 9 bis 12. In stark überhöhtem Maßstab ist hier die relative Höhe der Fahrbahnen über ihrer Länge aufgetragen. Die Bilder 13 bis 16 zeigen vier typische landwirtschaftliche "Wege"; eine Landstraße mit Schwarzdecke, einen Feldweg, einen gefrorenen Sturzacker und einen Rübenacker quer zur Furche.

In den Bildern 9 bis 12 zeigt sich deutlich, daß die Unebenheitshöhen dieser Fahrbahnen in der oben genannten Reihenfolge zunehmen. Auf weitere Einzelheiten der dargestellten Längsprofile wird an Hand der ermittelten Energiedichtespektren noch eingegangen.

Errechnung der spektralen Dichten Der Rechengang

Für die weitere Bewertung und Klassierung der Fahrbahnen — wie bereits erwähnt — ist die Ermittlung des Energiedichtespektrums, d. h. eine Frequenzanalyse nach [8 bis 10] erforderlich. Für ein kontinuierliches Spektrum ist die Energiedichte definiert mit:

t mit: $\Phi(\Omega) = \lim_{X \to \infty} \frac{1}{2\pi X} \left| \int_{-X}^{X} y(x) e^{-i\Omega x} dx \right|^{2}$ (3).



Bild 14. Guter Feldweg (Nr. 3).

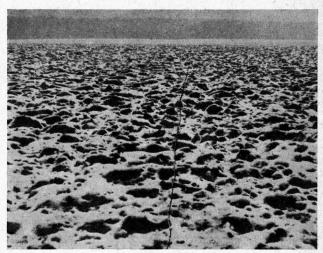


Bild 15. Gefrorener Sturzacker (Nr. 23) quer zur Furche.



Bild 16. Abgeernteter Rübenacker (Nr. 19) quer zur Furche.

An jeder Stelle x wird der Funktionswert y(x) festgestellt und der betrachteten Frequenz Ω zugeordnet. Alle für eine Frequenz ermittelten Werte werden aufaddiert und aus dem Quadrat ergibt sich die Energiedichte der betrachteten unendlichen Funktion bei jener bestimmten Wegfrequenz Ω .

Nach dieser mathematisch einwandfreien Definition läßt sich die rechnerische Ermittlung mit den erreichbaren Mitteln praktisch nicht durchführen. Darum wird in dieser Arbeit auf ein rechnerisches Verfahren zurückgegriffen [8], das den technischen Erfordernissen Rechnung trägt. Dabei wird das kontinuierliche Spektrum schrittweise über ein diskontinuierliches errechnet, wobei auch die endliche Fahrbahnlänge berücksichtigt wird. Außerdem wird eine gewisse Frequenzauswahl vorgenommen. Im folgenden sollen die einzelnen Schritte kurz dargelegt und erläutert werden.

Ausgangspunkt der Rechnung sind die in den Bildern 9 bis 12 dargestellten Meßwerte, d. h. die Profile der verschiedenen Fahrbahnen. In deren Verlauf sind niederfrequente Anteile enthalten, z. B. Wellenlängen von 30 m, die auf die Schwingungen landwirtschaftlicher Fahrzeuge keinen Einfluß mehr haben, sondern sich als Steigungen oder Gefälle bemerkbar machen. Infolge der beschränkten Fahrbahnlänge treten diese Frequenzen nicht mit genügender Häufigkeit darin auf. Ein hierfür errechneter Wert der Energiedichte wäre statistisch nicht gesichert. Zur Eliminierung dieser niedrigen Frequenzen wird ein gleitender Mittelwert gebildet:

$$y_{\overline{m}}(x) = \frac{1}{l+1} \sum_{k=-l/2}^{k=l/2} y(x+k\Delta x)$$
 (4).

Der weiteren Rechnung liegt als Unebenheitshöhe die momentane Abweichung von $y_{\overline{m}}(x)$ zugrunde:

$$\overline{y}(x) = y(x) - y_{\overline{m}}(x) \tag{5}$$

Die jetzt vorliegende Funktion hat eine statistische Streuung der Unebenheitshöhen und -frequenzen. Sie muß in eine periodische Funktion umgewandelt werden, in der die Periode etwa der niedrigsten zu berücksichtigenden Frequenz entspricht (siehe weiter unten). Durch die Korrelationsfaktoren R_r wird außerdem die Quadrierung der Funktion vorgenommen:

$$R_{r} = \frac{1}{n-r} \sum_{p=1}^{n-r} \overline{y} (x=p) \overline{y} (x=p+r)$$

$$r = 0, 1, 2, \dots, m$$
(6).

Für den Wert R_0 ergibt sich aus Gl. (6) die mittlere quadratische Abweichung der Fahrbahnfunktion von der gleitenden Mittellinie:

$$R_0 = \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^{n} \overline{y}_{p}^2 \tag{7}.$$

Die Folge dieser Korrelationsfaktoren stellt die erforderliche periodische Funktion dar, auf die die Fourieroperation angewendet werden kann:

$$\Phi_{r'} = \frac{\Delta x}{\pi} \left(R_0 + 2 \sum_{q=1}^{m-1} R_q \cos \frac{q r \pi}{m} + R_m \cos r \pi \right) \quad (8)$$

Diese Φ_r '-Werte geben schon die spektrale Dichte für gewisse Frequenzbereiche an, sie enthalten jedoch noch Seitenbänder. Durch den nächsten Schritt werden diese eliminiert, außerdem wird die Funktion geglättet:

$$\Phi_0 = 0.54 \, \Phi'_0 + 0.46 \, \Phi'_1
\Phi_r = 0.23 \, \Phi'_{r-1} + 0.54 \, \Phi'_r + 0.23 \, \Phi'_{r+1}
\Phi_m = 0.46 \, \Phi'_{m-1} + 0.54 \, \Phi'_m$$
(9).

Jeder Φ_r -Wert wird einer bestimmten mittleren Frequenz zugeordnet:

$$\Omega_r = \frac{r \,\pi}{m \,\pi \,\alpha} \tag{10}$$

und gilt als Mittelwert für einen bestimmten Frequenzbereich:

$$\frac{(r-1)\pi}{m\,\Delta x} \le \Omega_r \le \frac{(r+1)\,\pi}{m\,\Delta x} \tag{11}.$$

An Hand des vorstehenden Formelgerüsts kann jetzt die spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten für die in den Bildern 9 bis 12 gezeigten Fahrbahnprofile errechnet werden. Diese Rechnung ist sehr umfangreich und wurde daher auf einem elektronischen Digitalrechner durchgeführt.²)

In der grundlegenden Arbeit von Mitschke [1] ist neben dem vorstehenden noch ein zweites experimentell-rechnerisches Verfahren erwähnt, um Mittelwerte für Beschleunigungen und dynamische Radlasten zu berechnen. Die Fahrbahnunebenheiten werden im Amplitudenspektrum berücksichtigt. Die Ergebnisse der beiden Methoden lassen sich nicht direkt miteinander vergleichen. Da das Amplitudenspektrum durch lineare Mittelung und die spektrale Dichte durch quadratische Mittelwertbildung gewonnen werden, ist der Vergleich nur mit einer zusätzlichen Angabe über die Streubereiche der Unebenheiten möglich.

Abgesehen von der Fahrbahn in [1], die auch nur indirekt berechnet wurde, sind die Ergebnisse anderer Verfasser alle in der Form der spektralen Dichte bekanntgeworden. Darum soll hier auf das Amplitudenspektrum nicht näher eingegangen werden.

Die verschiedenen Koeffizienten der Rechnung

In den vorstehenden Gleichungen sind einige Größen enthalten, die nach den speziellen Bedingungen und Forderungen dieser Arbeit gewählt und bestimmt werden müssen. Insbesondere müssen die Schrittweite Δx , die Anzahl m der Korrelationsfaktoren, der Mittelungsbereich L für den gleitenden Mittelwert $y_{\overline{m}}$ und die Länge der Meßstrecke, d. h. die Anzahl n der Meßpunkte festgelegt werden.

Schrittweite

Durch die Größe der Schrittweite Δx wird die höchste bestimmbare Wegfrequenz festgelegt (siehe Gl. 10). Es ist nicht sinnvoll, die Schrittweite möglichst klein zu wählen, um den Frequenz-

²⁾ Für die Aufstellung des Programms und die Durchführung der Rechnungen sei Herrn Dipl.-Math. Weißbach von der mathematisch-statistischen Auswertungsstelle der FAL bestens gedankt.

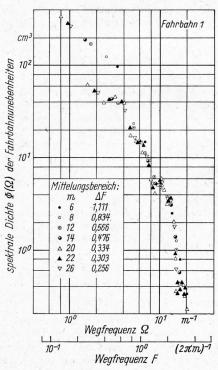


Bild 17. Variation des Mittelungsbereiches und der größten Wellenlänge an der spektralen Dichte der Unebenheiten bei Fahrhahn 1

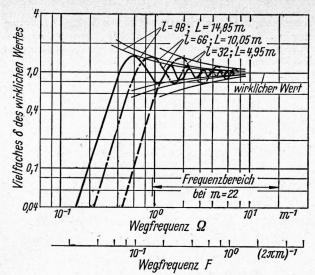


Bild 18. Siebwirkung durch Anwendung des gleitenden Mittelwertes.

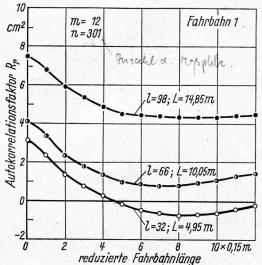


Bild 19. Autokorrelationsfaktoren der Fahrbahn 1 bei unterschiedlichem Mittelungsbereich L.

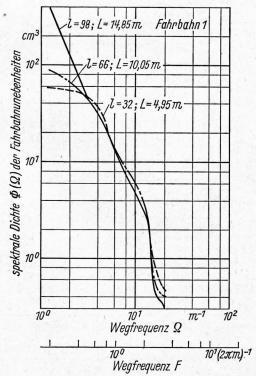


Bild 20. Einfluß des Mittelungsbereiches L auf die spektrale Dichte einer Fahrbahn.

bereich sehr weit nach oben zu erweitern, denn dam wird der Zeitaufwand für die Vermessung zu hoch und der relative Fehler beim Einhalten der Meßpunkte immer größer. Wenn bei den üblichen Fahrgeschwindigkeiten der Schlepper die Anregungen in den Eigenfrequenzbereichen erfaßt werden, so erfüllt die Vermessung ihren Zweck.

Bei der gewählten Schrittweite $\Delta x=15~\mathrm{cm}$ ist die höchste erfaßte Frequenz f bei Fahrgeschwindigkeiten von

$$v = 2 \text{ m/s}$$
 $f_{\text{max}} = 6.67 \text{ Hz}$ $f_{\text{max}} = \frac{2.7}{2\pi} = \frac{2.7}{2\pi}$ $f_{\text{max}} = \frac{2.6}{2\pi}$ $f_{\text{max}} = \frac{2.6}{2\pi}$

Da die Hub- und Nickresonanzstellen bei Schleppern bekanntlich in der Größenordnung von $f_0 \approx 4$ Hz liegen, werden sie im betrachteten Geschwindigkeitsbereich mit erfaßt. Bei Fahrgeschwindigkeiten unter etwa 1,5 m/s wird das Frequenzband so weit nach unten verlagert, daß wesentliche Teile nicht mehr betrachtet und berechnet werden können. Hier treten jedoch kaum noch kritische und interessante Fahrzustände auf.

Anzahl der Korrelationsfaktoren

Durch die Anzahl m der Korrelationsfaktoren wird die Rechnung in zwei Punkten eingeengt: die Breite des Mittelungsbereiches wird festgelegt (siehe Gl. 11) und die niedrigste Wegfrequenz, für die ein Wert errechnet wird, ist damit ebenfalls vorgegeben.

In Bild 17 ist die spektrale Dichte für die Fahrbahn 1 (Knüppeldamm) unter Berücksichtigung verschiedener m-Werte errechnet worden. Jeder Meßpunkt stellt in diesem Bild den Kurvenmittelwert zwischen den Nachbarpunkten dar. Darauf ist der erkennbare Streubereich zurückzuführen, der also nicht mit irgendwelchen Fehlern zu erklären ist. Bei kleinen m-Werten, d. h. großen Mittelungsbereichen, wird die Kurve, besonders im niederfrequenten Bereich, zu ungenau nachgebildet ($m=6,8,12\ldots$); manch wesentliches Maximum könnte übergangen werden. Bei großen m-Werten wird die gedachte wahre Kurve zu genau nachgefahren. Es werden im hochfrequenten Bereich ($m \ge 26$) relative Maxima ermittelt, die nicht der Fahrbahn entsprechen und auf Zufälligkeiten infolge der endlichen Länge der Fahrbahn zurückzuführen sind; diese Zufälligkeiten werden durch die Rechnung zu sehr betont.

Für die folgenden Berechnungen wird m=22 gewählt. Das ist ein Kompromiß, der über das ganze Spektrum eine optimale Nachbildung der wahren kontinuierlichen Funktion verspricht.

Durch diese Festlegung ist der Frequenzbereich nach unten abgegrenzt. Die Bereichsmitte der niedrigsten Frequenzen ergibt sich aus Gl. (10) zu $F_{\min}=0.1515~(2~\pi~\mathrm{m})^{-1}$. Bei den auch im vorhergehenden Abschnitt betrachteten Geschwindigkeiten ergibt sich:

$$v = 2 \text{ m/s}$$
 $f_{\text{min}} = 0.303 \text{ Hz}$ $v = 8 \text{ m/s}$ $f_{\text{min}} = 1.21 \text{ Hz}$

Bei diesen beiden extremen Fahrgeschwindigkeiten, für die unter landwirtschaftlichen Verhältnissen ungünstige Schwingbedingungen auftreten, werden mit Sicherheit die Resonanzstellen der Fahrer, Sitze und Schlepper erfaßt, bei den größeren Geschwindigkeiten erweitert sich der Bereich noch wesentlich nach oben.

Festlegung des gleitenden Mittelwertes

Bei der Erläuterung des mathematischen Rechenganges wurde als erster Schritt die Bildung eines gleitenden Mittelwertes (siehe Gl. 4) genannt. Hier ist noch offen, über welche Länge l gemittelt werden soll. Mit Kürzung der Mittelungslänge werden immer mehr niedrige Frequenzen abgeschnitten. Die wichtigen Frequenzen, das sind diejenigen, die mit dem oben festgesetzten Wert m=22 erfaßt werden, dürfen nicht durch diese Mittelung verstümmelt werden. Nach [8] ergibt sich folgende Fehlerfunktion, die durch einige Integrationsumformungen gewonnen wird:

$$\delta \left(\Omega \right) = \left(1 - \frac{2 \sin \left(\Omega \, D / 2 \right)}{\Omega \, D} \right)^2 \tag{12}$$

$$D = (l+1) \Delta x \tag{12a}.$$

In Bild 18 sind für drei verschiedene Mittelungslängen l=98, 66 und 32 die Abweichungen $\delta\left(\Omega\right)$ vom wirklichen Wert aufgetragen. Es wird deutlich, daß bei den kleineren Mittelungslängen auch die niedrigen Frequenzen, die im betrachteten Bereich liegen, herausgesiebt werden. Es treten mehr als 50% Abweichung vom wirklichen Wert auf. Bei der gewählten Mittelungslänge l=98 fällt der letzte Nulldurchgang mit der Grenze des Frequenzbereiches zusammen, der letzte Wert F_{\min} wird also noch richtig abgebildet.

Zur besseren Untermauerung sind die ersten Korrelationsfaktoren und die spektrale Dichte der Fahrbahn 1 (Bild 10) nach vorheriger unterschiedlicher Mittelung in Bild 19 und 20 gezeigt. Aus dem Verlauf der Autokorrelationsfaktoren zeigt sich, daß die gedachten Kurvenzüge etwa parallel verschoben sind. Mit kleinerem l werden die absoluten Werte kleiner, die niedrigen Frequenzen, also die großen Wellenlängen, werden abgebaut. Das entspricht dem Ergebnis aus Bild 18. Die Auswertung auf die spektrale Dichte (Bild 20) zeigt sehr deutlich ein Abknicken im unteren Frequenzbereich bei l=66 bzw. l=32. Bei der Mittelungslänge l=98 knickt die Kurve jedoch nicht mehr ab, wie schon nach der Fehlerbetrachtung $\delta(\Omega)$ zu erwarten war. Die Festlegung mit l=98 hat sich damit als richtig herausgestellt. Die Abweichungen der einzelnen Kurven bei höheren Frequenzen sind auf die endliche Fahrbahnlänge zurückzuführen, die hier mit n = 301 bzw. 45 m reichlich kurz bemessen ist, so daß sich unterschiedliche Verluste am Anfang und Ende bemerkbar machen, wie auch die folgende Betrachtung zeigt.

Festlegung der Länge der Meßstrecke

Um völlig gesicherte Meßwerte und Ergebnisse zu erhalten, müßte die vermessene Strecke sehr lang sein. Die Praxis der Vermessung verlangt jedoch eine Beschränkung auf endliche Längen; auch zeigen die meisten Fahrbahnen ihre charakteristischen Merkmale nur über begrenzte Abschnitte, da eine Kurve oder Kreuzung oder auch eine Änderung der Wegrandverhältnisse (Graben, Wall, Baumbestand oder Hecke) den Fahrbahnzustand unterbrechen oder ändern.

Andererseits muß aber eine gewisse Meßlänge vorliegen, um den Einfluß des Zufalls in Grenzen zu halten. Der vorherige Abschnitt zeigte bereits, daß eine Länge von 45 m zu kurz ist. In Bild 21 ist eine ähnliche Untersuchung dargestellt. Die spektrale Dichte der Fahrbahn 3 (Bild 10 und 14) wurde einmal für die gesamte Meßlänge errechnet, zum anderen für die erste und zweite Hälfte, wobei sich für die drei Kurven nicht genau der gleiche Verlauf ergibt. Das kann auch nicht erwartet werden, da auch das Profil nicht genau das gleiche Bild in den beiden Hälften zeigt. Bei allen drei Kurven sind jedoch, außer Tendenz und Größenordnung, die hervorragenden Frequenzen übereinstimmend. Die spektrale Dichte für die Gesamtfahrbahn zeigt deutlich den Mittelungseffekt. Sie stellt jedoch nicht exakt den Mittelwert dar, weil bei den Hälften eine andere nutzbare Länge zur Verfügung steht (in der Mitte fehlen jeweils etwa 7,50 m).

Im folgenden wird die hier vorliegende Meßlänge von 75 m als Mindestlänge betrachtet. Soweit möglich, wurden größere Strecken vermessen.

Untersuchung eines Fahrbahnprofils mit definierten diskreten Amplituden

Im Normalfall wird von einer Fahrbahn, deren Unebenheiten nach Amplitude und Frequenz statistisch verteilt, jedoch insgesamt unbekannt sind, die spektrale Dichte ermittelt. Im folgenden soll umgekehrt vorgegangen werden, um die Vorstellungen bildhafter werden zu lassen und die unterschiedliche Wirkung von diskreten und kontinuierlichen Spektren zu zeigen.

Es wird eine Fahrbahn 22 konstruiert, deren Unebenheiten sich aus drei diskreten Frequenzen mit jeweils bestimmten konstanten Amplituden zusammensetzen. Bild 22 zeigt diese drei Frequenzen mit den zugeordneten Amplituden und eine Periode der Summenfunktion, Bild 23 das Ergebnis der Rechnung. Bei den gegebenen Frequenzen zeigen sich in der spektralen

Dichte eindeutige Maxima. Die geringeren Werte daneben ergeben sich aus dem Mittelungseffekt der Rechnung, die kein diskretes, sondern nur ein kontinuierliches Spektrum behandeln kann. Bei einem groben Überblick ist im Ergebnis das Verhältnis der Amplituden erhalten geblieben:

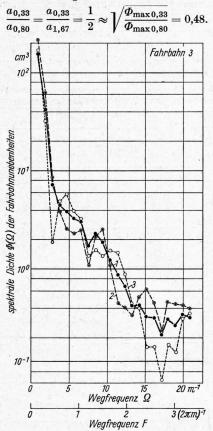


Bild 21. Einfluß der endlichen Fahrbahnlänge auf die Meßergebnisse (Fahrbahn 3).

Die spektrale Dichte wurde für die ganze Meßlänge (Kurve 1), für die erste Hälfte der Meßlänge (Kurve 2) und für die zweite Hälfte der Meßlänge (Kurve 3) ermittelt. Ganze Länge 75 m

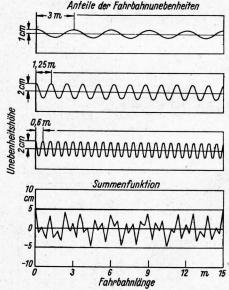
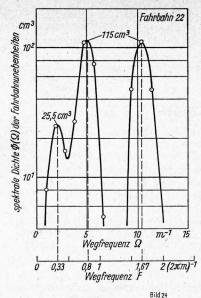
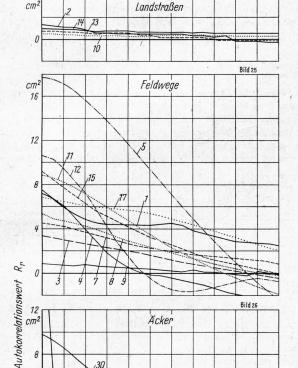


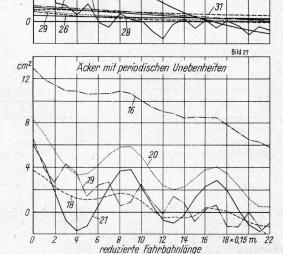
Bild 22. Konstruktion des Längsprofils der Fahrbahn 22 mit Unebenheiten dreier diskreter Frequenzen:

Amplitude	Wellenlänge	Wegfrequenz		
a cm	$1/F$ 2π m	$(2 \pi \text{ m})^{-1}$	Ω m ⁻¹	
1	3,00	0,33	2,08	
2	1,25	0,80	5,02	
2	0,60	1,67	10,50	

Bild 23. Spektrale Dichte der Unebenheiten der nach Bild 22 konstruierten Fahrbahn 22.







Die Reproduzierung der Amplituden gelingt aber auch, wenn die Eigenarten der Rechnung berücksichtigt werden:

$$a = \sqrt{\Sigma \Phi (\Omega) \Delta \Omega}$$
 (13).

Es sei unter $\varSigma \Phi (\Omega)$ die Summe aller Werte verstanden, die aus der jeweiligen Amplitude hervorgegangen sind (also auch die dem Maximum benachbarten Werte); $\Delta\Omega$ ist der Mittelungsbereich, für den der Φ-Wert gilt (siehe Gl. 11):

$$\Delta\Omega = \frac{2\pi}{m \Delta \varkappa} = 1,90 \text{ m}^{-1}$$

Für die Frequenzen F = 0.8 und 1.67 ergeben sich nicht exakt die gleichen Werte, weil der erstgenannte von der Frequenz F=0.33 beeinflußt wird. Aus diesen Zahlen errechnen sich folgende Amplituden:

$$a_{0,33} = 0.96 \approx 1.0 \text{ cm}$$

$$a_{0.80} = 1.99 \approx 2.0 \text{ cm}$$

$$a_{1.67} = 1.98 \approx 2.0$$
 cm.

Somit hat die Rechnung gezeigt, daß sich rückwärts aus der spektralen Dichte wieder die Amplituden ermitteln lassen. Ein kontinuierliches Spektrum läßt sich also in ein diskretes Spektrum mit Ersatzamplituden beliebiger Frequenzen auflösen. Die zeitliche bzw. räumliche Aufeinanderfolge der einzelnen Amplituden läßt sich jedoch nicht rückwärts ermitteln.

Die gemessenen spektralen Dichten

Die Profile der verschiedenen vermessenen Fahrbahnen sind in den Bildern 9 bis 12 zusammengetragen. Von der Art der Fahrbahn lassen sich diese in vier verschiedene Gruppen aufteilen, von denen die Bilder 13 bis 16 jeweils ein Beispiel zeigen: Landstraßen, Feldwege, Äcker und Äcker mit periodischen Unebenheiten. Diese Gruppen sollen nacheinander besprochen und einander dann gegenübergestellt werden.

Die Bilder 24 bis 27 zeigen die Autokorrelationsfaktoren R_r (siehe Gl. 6); der Übersichtlichkeit halber sind die Werte nicht markiert, sondern durch Geraden verbunden. An den Endpunkten des entstehenden Polygonzuges liegen die errechneten Werte. Nur mit großer Übung lassen sich aus diesen Darstellungen Schlüsse ziehen; das Gemisch der Frequenzen ist unübersichtlich. Lediglich eine starke hervortretende Frequenz wird schon hier erkennbar, z. B. in Bild 27 die periodischen Unebenheiten, die durch die ehemaligen Kartoffeldämme bzw. Rübenreihen bedingt sind.

Der erste Wert R₀ dieser Korrelationsfaktoren gibt eine einfache, rohe Möglichkeit, die Fahrbahnen nach ihren Unebenheiten zu bewerten. Die Standardabweichung σ ist ein Maß für die mittlere Abweichung von der gleitenden Mittellinie (siehe

Auf diese Art werden die Fahrbahnen in ihrer Gesamtheit beurteilt. Es wird nicht nach auftretenden Frequenzen unterschieden; auf das Schwingverhalten eines darüber fahrenden Fahrzeuges kann nicht geschlossen werden. Voraussetzung für eine Bewertung oder einen Vergleich nach dieser Methode ist außerdem, daß die gleitende Mittellinie, auf die bezogen wird, über den gleichen Bereich ermittelt wurde.

Die spektralen Dichten der Unebenheiten aller aufgenommenen und gerechneten Fahrbahnen sind in den Bilder 28 bis 31 in Form von Polygonzügen dargestellt. Die Knickpunkte geben jeweils den Mittelwert für den Bereich zwischen zwei Nachbarpunkten an. Die wirkliche Kurve wird demnach unter Einhaltung dieser Werte einen mehr oder minder geschwungenen

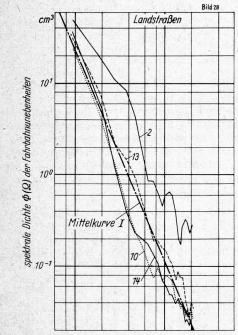
Bild 24 bis 27. Die Autokorrelationsfaktoren von Landstraßen, Feldwegen und Äckern ohne und mit periodischen Unebenheiten in Ab-

hängigkeit von der reduzierten Fahrbahnlänge. Alle Werte wurden für l=98, d. h. für die Mittelungslänge $L=14,85~\mathrm{m}$ und die Schrittweite $\Delta x=0,15~\mathrm{m}$ ermittelt.

30

Verlauf nehmen, der nur vage vermutet werden kann. Um dieser Unsicherheit zu begegnen, wurden die genauen Werte lediglich durch Geraden verbunden. Dadurch kann sich in kleinsten Bereichen eine Ungenauigkeit ergeben. Über größere Frequenzbereiche wird der Verlauf so besser erkannt. Eine Auswirkung auf Ergebnisse ist nicht zu befürchten, da der Mittelungsbereich klein genug gewählt wurde.

Die verschiedenen Fahrbahnen bestreichen ein sehr breites Feld. Bei niedrigen Frequenzen zeigen alle Kurven relativ große Werte, die zu höheren Frequenzen hin exponentiell abnehmen. Langwellige Unebenheiten haben demnach große Amplituden, während die kurzwelligen nur relativ klein sind. Bei natürlich



entstandenen Fahrbahnen konnten keine ausgeprägten Periodizitäten festgestellt werden. Bei Kartoffel- und Rübenäckern, deren Profil durch die Bodenbearbeitung entstanden ist, hat der Reihenabstand der Pflanzen einen sehr großen Einfluß. Im folgenden werden die verschiedenen Fahrbahntypen eingehend besprochen und ihnen Näherungsfunktionen zugeordnet.

Landstraßen

Von den vermessenen Landstraßen (Bild 28) fällt die schlechte Betonstraße 2 nach oben aus dem Streubereich heraus. In ihr waren einige tiefe Schlaglöcher, so daß diese Fahrbahn im Gesamtergebnis schon in den Bereich guter Feldwege kommt. Die Kurven der übrigen drei Straßen mit Schwarzdecke liegen tiefer und sehr dicht zusammen. Obwohl die Fahrbahn 13 als verhältnismäßig schlecht angesprochen werden muß (sie war sehr oft ausgebessert worden), liegt sie nur geringfügig höher als die beiden guten Schwarzdecken. Alle vier Ergebnisse lassen sich in dieser doppelt-logarithmischen Darstellung grob angenähert durch Geraden wiedergeben. Im Bereich hoher Frequenzen tritt besonders bei den Straßen 10 und 14 eine Abweichung zu größeren spektralen Dichten ein. Als mittlere Fahrbahn kann jedoch diese Vereinfachung sehr gut durchgeführt werden, die für allgemeine Betrachtungen zugrunde gelegt werden kann (siehe auch Tafel 1):

$$\log \Phi = -2.33 \log F - 0.48$$
 cm³; $(2 \pi \text{ m})^{-1}$. ³)

Feldwege

Diese Fahrbahnen liegen über einen sehr breiten Bereich von etwa $\Phi=10^2~{\rm cm}^3$ verstreut (Bild 29), wodurch der subjektive Eindruck bestätigt wird, daß die Unebenheiten auf guten und schlechten Feldwegen sehr unterschiedlich sind. Die Fahrbahn 9 ist ein guter Feldweg, der immer wieder ausgebessert und befestigt worden ist. Über den ganzen betrachteten Frequenz-

³) Diese und die folgenden Zahlengleichungen gelten für Φ in cm³ und F in $(2 \pi \text{ m})^{-1}$.

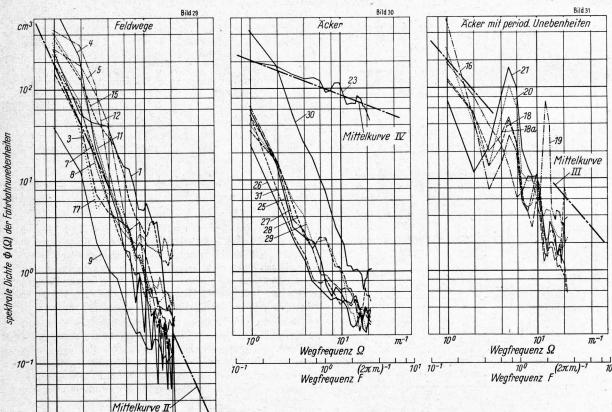


Bild 28 bis 31. Die spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten von Landstraßen, Feldwegen und Äckern ohne und mit periodischen Unebenheiten in Abhängigkeit von der Wegfrequenz.

10

 $(2\pi m)^{-1}$

Weafrequenz \O

bereich liegt das Dichtespektrum dieser Fahrbahn sehr nahe am Streubereich der Landstraßen. Ein schlechter Feldweg, beispielsweise die Fahrbahnen 15 oder 5, weist dagegen sehr viel höhere spektrale Dichten auf.

Für alle vermessenen Feldwege läßt sich eine Mittelkurve, eine Gerade, angeben, die zwar nicht die Feinheiten eines bestimmten Weges wiedergibt, insgesamt aber als ein allgemeiner Feldweg "mittlerer Güte" angesprochen werden kann (siehe auch Tafel 1):

$$\log \Phi = -2.25 \log F + 0.46$$
 cm³; $(2 \pi \text{ m})^{-1}$.

Nur bedingt zutreffend ist diese Gleichung für Fahrbahn 17, die deshalb mit den Feldwegen zusammen besprochen wird, weil ihre Intensität in der gleichen Größenordnung liegt. Hier macht sich bei Frequenzen um $F=0,7\ldots0,8,$ d. h. bei Wellenlängen von etwa 1,25 m, noch die doppelte Reihenweite der Kartoffeln bemerkbar (wie bei der Fahrbahn 18). Die Fahrbahn 17 ist ein Abfuhrweg quer zu den ehemaligen Kartoffelreihen, deren Dämme derart zusammengefahren sind, daß sie dem Auge kaum erkennbar sind; die Vermessung zeigt aber die Periode deutlich (Bild 10).

Der subjektive Eindruck von den Fahrbahnen deckt sich recht gut mit den Ergebnissen der Rechnung. Der Weg 9 wurde als "gut" bezeichnet und liegt auch — wie bereits erwähnt — an der unteren Grenze des Streubereichs. Die Wege 3, 7, 8 und 17 waren, subjektiv gesehen, "mittelgut" und bilden auch im

Tafel 1. Die spektrale Dichte idealisierter landwirtschaftlicher Fahrbahnen und ihre Bereichsgrenzen.

$$egin{aligned} \log arPhi &= a \log F + b & & \mathrm{cm^3; (2\,\pi\,m)^{-1}} \ arPhi &= 10^b\,F^a \end{aligned}$$

Fahrbahnarten	mittlere Fahrbahn		untere Grenze		obere Grenze (je nach Frequenzbereich	
	a	b	a	b	a	b
Landstraße	-2,33	-0,48	-2,53	-0,93	X5.22	116
Feldweg	-2,25	0,46	1 1 1 1 m		-2,15	1,41
Sturzacker	-0,38	2,00			-0,27	2,11
period. Acker	(-1,15)	1,37)			-0.87	2,11

Diagramm der spektralen Dichte die Mittelgruppe. Sie haben allerdings im unteren Frequenzbereich, vom Gesamtkollektiv der Feldwege aus gesehen, eine geringere Energiedichte als bei den höheren Frequenzen. Die Wege 1, 4, 5, 11, 12 und 15 wurden subjektiv als "schlecht" empfunden, sie liegen auch im oberen Teil des Streubereichs. Lediglich bei Weg 1 fehlt eine hohe spektrale Dichte der größeren Frequenzen; das läßt sich aus der Art des Weges erklären: Der "Knüppeldamm" ruft durch seine "Knüppel" Unebenheiten hauptsächlich im oberen Frequenzbereich hervor.

Im Bereich der höheren Frequenzen sind die Fahrbahnen 4 und 5 wesentlich besser, als das Gesamturteil vermuten läßt. Es handelt sich hier um ausgesprochen langwellige Fahrbahnen, wie auch das Bild 10 zeigt.

Verschiedene Äcker

Die Aufzählung landwirtschaftlicher Fahrbahnen wäre unvollständig, wenn nicht Sturzäcker, Weiden, Wiesen und Stoppelfelder erwähnt würden (Bild 30). Als oberer Grenzwert in Bezug auf das Dichtespektrum der Unebenheiten müssen bei hohen Frequenzen die Ergebnisse eines gefrorenen Sturzackers 23 angesehen werden, der quer zur Furche vermessen wird. Insbesondere bei den höheren Frequenzen ergeben sich hier Größtwerte. Idealisiert hat der Sturzacker folgende Funktion:

$$\log \Phi = -0.38 \log F + 2.00$$
 cm³; $(2 \pi \text{ m})^{-1}$.

Ebenfalls hohe spektrale Dichten sind bei Dauerweiden zu erwarten. Die Fahrbahn 30 (Bild 30) wurde willkürlich auf einem gerodeten Waldstück ausgesucht, das seit mehreren Jahren als Weide genutzt wird. Das Ergebnis zeigt recht hohe

Werte bei niedrigen Frequenzen, was aus dem Profil zu erkennen war. Die idealisierte Gerade hat daher eine starke Steigung:

$$\log \Phi = -2.34 \log F + 0.86$$
 cm³; $(2 \pi \text{ m})^{-1}$.

Sehr günstige Werte ergeben sich für Fahrbahnen auf einer Wiese 31, die etwa denen einer Fahrspur auf Erbsenstoppel 26 gleichzusetzen sind. Eine Gerade bilden diese Fahrbahnen nicht sehr gut nach, da bei hohen Frequenzen gegenüber dem mittleren Bereich recht große Energiedichten vorliegen. Eine Mittelgerade wäre:

$$\log \Phi = -1.75 \log F + 0.87$$
 cm³; $(2 \pi \text{ m})^{-1}$.

Die Fahrbahnen 25, 27, 28 und 29 sind Getreide- bzw. Erbsenstoppelfelder in Särichtung. Sie zeigen keine allzu hohen Werte und liegen nur geringfügig höher als die vorgenannte Wiese bei gleicher Steigung der Ersatzgeraden. Der Streubereich ist nicht sehr groß, und eine Gerade bildet sie recht gut nach:

$$\log \Phi = -1.72 \log F + 0.23$$
 cm³; $(2 \pi \text{ m})^{-1}$.

Bei den Getreidestoppeln macht sich bei $F=10^{\circ}$, also einer Wellenlänge von 1 m, eine unbedeutende Periodizität bemerkbar. Diese dürfte auf bestimmte Bearbeitungsgeräte zurückzuführen sein, die aber nicht näher bekannt sind.

Äcker mit periodischen Unebenheiten

In Bild 31 sind die spektralen Dichten der Unebenheiten von Fahrbahnen aufgetragen, die vorliegen, wenn ein abgeernteter Kartoffel- oder Rübenacker quer zur ehemaligen Reihe befahren werden muß. Hier fallen sofort starke Periodizitäten auf.

Der Rübenacker 19 hat eine sehr starke Spitze bei F=2 $(2 \pi \text{ m})^{-1}$ oder L = 0.50 m. Das ist genau die Reihenweite des Rübenbestandes, der auch nach der Ernte eine ausgeprägte periodische Unebenheit erzeugt. Die Kartoffeläcker zeigen gleich mehrere relative Maxima von, je nach Erntemethode und Frequenz, verschiedener Intensität. Die Entstehung der Spitzen wird in Bild 32 am Beispiel des zweireihigen Rodeverfahrens (Fahrbahn 18, 20 und 21) erklärt. Das Rodeschar greift zwei nebeneinanderliegende Kartoffeldämme auf und legt den Mutterboden mehr oder minder breit gestreut wieder ab. Hieraus lassen sich die Wellenlängen von $L=1,25\,\mathrm{m},~0,625\,\mathrm{m}$ und 0,31 m ableiten, die dem Reihenabstand der Kartoffeln bzw. dem doppelten und dem halben entsprechen. Die letztgenannte Wellenlänge schwankt je nach Einstellung des Rodeschares. Die gleichen Periodizitäten, wenn auch mit anderer Intensität, treten beim einreihigen Rodeverfahren auf. Hier sind, im Gegensatz zu oben, die Wellenlängen L=0.625 und $0.31~\mathrm{m}$ betont, während bei $L=1,25\,\mathrm{m}$ nur ein unbedeutendes Maximum vorliegt, das z. B. durch die Schlepperspur verursacht sein kann.

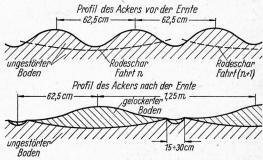


Bild 32. Erklärung der Periodizitäten am Beispiel eines zweireihig abgeernteten Kartoffelackers.

Für diese Fahrbahnen eine Gerade als Mittelkurve anzugeben, ist problematisch, da dann die Resonanzstellen verlorengehen. Eine Mittelgerade gibt nur die mittlere Intensität wieder:

$$\log \Phi = -1.15 \log F + 1.37$$
 cm³; $(2 \pi \text{ m})^{-1}$.

Gegenüberstellung der verschiedenen Fahrbahngruppen

In den vorstehenden Abschnitten sind die verschiedensten Fahrbahnen besprochen worden. Es wurden jeweils Mittelkurven errechnet, deren wichtigste in Tafel 1 zusammengestellt sind; Bild 33 zeigt außerdem die Streubereiche. Wie erwartet, liegen die Landstraßen mit der geringsten spektralen Dichte am günstigsten. In ihren Streubereich fallen jedoch im oberen Teil schon gute Feldwege. Diese selbst haben einen sehr breiten Streubereich, so daß die Mittelgerade bei allen Frequenzen etwa eine Dekade höher liegt.

Bei den großen Wellenlängen hat die Mittelkurve der Hackfruchtäcker mit ihren periodischen Unebenheiten die gleiche Intensität wie die Feldwege. Zu den höheren Frequenzen hin werden die Amplituden wesentlich größer. Dieses gilt in verstärktem Maße für den Sturzacker, der im oberen Frequenzbereich die absolut größten Werte aufweist.

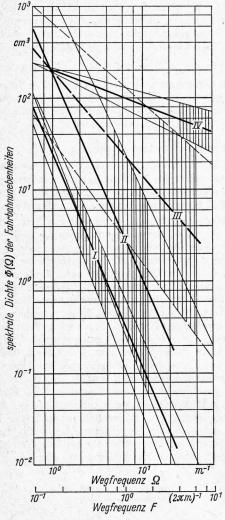


Bild 33. Mittelwerte und Streubereiche der spektralen Dichte der Unebenheiten der verschiedenen Fahrbahnarten.

I Landstraßen III Äcker mit periodischen Unebenheiten II Feldwege IV Sturzacker

Die übrigen Äcker sind nicht in Bild 33 aufgenommen worden, weil sonst die Übersichtlichkeit leidet. Wie leicht zu erkennen ist, liegen Weiden im Bereich schlechter Feldwege, während Wiesen, Stoppelfelder und Furchensohlen bei guten bis mittelguten Feldwegen einzuordnen sind. Bei den niedrigen Frequenzen sind nicht so hohe Intensitäten zu finden, als daß diese Fahrbahnen den schlechten Hackfruchtäckern zugeordnet werden müßten.

Im Bereich der höheren Frequenzen kann auf Grund ganz grober Schätzung gesagt werden, daß die Dichtespektren der eben besprochenen Gruppen jeweils um den Faktor 10 auseinanderliegen. Da hierin die Höhen der Fahrbahnunebenheiten quadratisch enthalten sind, ergibt sich für diese das Verhältnis:

Landstraße: Feldweg: Acker = $1:\sqrt{10}:10$.

Der gesamte Bereich der landwirtschaftlichen Fahrbahnen wird (nach Bild 33) begrenzt nach unten von den Landstraßen und nach oben, je nach Frequenz, von den Feldwegen bzw. den Äckern. Der Streubereich umfaßt bei niedrigen Frequenzen einen Amplitudenbereich von 1 bis 10 und bei hohen Frequenzen einen Bereich von 1 bis 150.

Das Dichtespektrum der landwirtschaftlichen Fahrbahnen im Gesamtrahmen der bekannten Spektren

Aus dem Schrifttum sind bisher einige wenige Berechnungen und Vermessungen von Fahrbahnen bekanntgeworden. Wenn auch keine Ergebnisse von direkt vergleichbaren Unebenheiten vorhanden sind, so läßt sich doch über die Ergebnisse dieser Arbeit hinaus das Gesamtbild der Fahrbahnunebenheiten erweitern, Bild 34.

Nach einer amerikanischen Veröffentlichung von Walls, Houbolt und Press [8] ergaben sich spektrale Dichten von zwei Flugzeuglandebahnen für einen niedrigen Frequenzbereich (Kurve 7 und 8). Diese Fahrbahnen werden von den Flugzeugen wesentlich schneller befahren als die landwirtschaftlichen Wege von den ländlichen Fahrzeugen. Da auch die Eigenfrequenzen von Flugzeugen andere sind, so ist ein anderes Frequenzband interessant: $F=0.02-0.82~(2~\pi~\mathrm{m})^{-1}$.

Die eine der beiden Betonfahrbahnen wird als relativ gut, die andere als schlecht bezeichnet. Die schlechte Strecke ist nur unwesentlich besser als der oben gezeigte Streubereich für Landstraßen mit Schwarzdecke. Die gute Landepiste weist etwa die halben Dichtewerte auf. In der Gesamttendenz sind die Spektren der beiden Fahrbahnen parallel zueinander verschoben; sie lassen sich durch Näherungsgeraden darstellen:

gute Landepiste:
$$\log \varPhi = -2{,}33 \log F - 1{,}62 \\ \mathrm{cm^3}; (2\,\pi\,\mathrm{m})^{-1}$$

schlechte Landepiste:
$$\log \Phi = -$$
 2,33 $\log F -$ 1,09 $\mathrm{cm^3}$; $(2\,\pi\,\mathrm{m})^{-1}$

Weiterhin wurde für eine Fahrbahn von Kozin und Bogdanoff [11] die spektrale Dichte nach einem ähnlichen Verfahren ermittelt. Diese Bahn, wahrscheinlich eine Weide, wurde in verschiedenen Richtungen, von einem zentralen Punkt ausgehend, vermessen. Von den fünf Kurven, die jeweils um 72° versetzte Spuren darstellen, wurde das Ergebnis der besten und der schlechtesten Spur in Bild 34 eingetragen (Kurve 9 und 10). In der schlechten Fahrbahn zeigt sich eine ausgeprägte Periodizität, die auf eine frühere Bodenbearbeitung schließen läßt, zumal das relative Maximum in den anderen Richtungen nicht so stark in Erscheinung tritt. Die beiden herausgezeichneten Kurven bestätigen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit; der schlechte Acker fällt in den Bereich der Kartoffel- und Rübenäcker (siehe Mittellinie der Äcker mit periodischen Unebenheiten), die gute Fahrspur stimmt etwa mit der vermessenen Weide (in Bild 34 nicht eingezeichnet) überein.

In einer neueren Veröffentlichung [12] der gleichen Autoren werden Ergebnisse über vier Fahrbahnen mit z. T. mehreren Meßstrecken bekanntgegeben (Bild 34, Kurve 11 bis 15). Es handelt sich offenbar um Strecken, die querfeldein verlaufen, wie sie etwa von geländegängigen Militärfahrzeugen befahren werden müssen. Hier liegt die Intensität in der spektralen Dichte wesentlich höher als beim schlechtesten landwirtschaftlichen Acker (Bild 34), abgesehen von einer Teilstrecke der Fahrbahn 15, die in den Bereich der Äcker mit periodischen Unebenheiten hineinragt. Gerade bei niedrigen Frequenzen, d. h. großen Wellenlängen, liegen hohe spektrale Dichten vor, die bei den landwirtschaftlichen Wegen und Äckern fehlen, da diese Hindernisse durch die Kultivierung eingeebnet worden sind.

Der generelle Verlauf der Kurven kann im doppelt-logarithmischen Maßstab wieder durch Geraden angenähert werden. Der Abfall der Funktion, d. h. die Steigung der Geraden, stimmt etwa mit denen der oben erwähnten Schwarzdecken- und Betonfahrbahnen überein. Die den Streubereich begrenzenden Geraden werden durch folgende Funktionen wiedergegeben:

obere Grenze:
$$\log \Phi = -2{,}33 \log F + 3{,}26$$
 cm³; $(2 \pi \text{ m})^{-1}$ untere Grenze: $\log \Phi = -2{,}33 \log F + 1{,}84$ cm³; $(2 \pi \text{ m})^{-1}$

Aus einer russischen Veröffentlichung [13] wurden die Funktionen der spektralen Dichte von Landstraßen unterschiedlicher

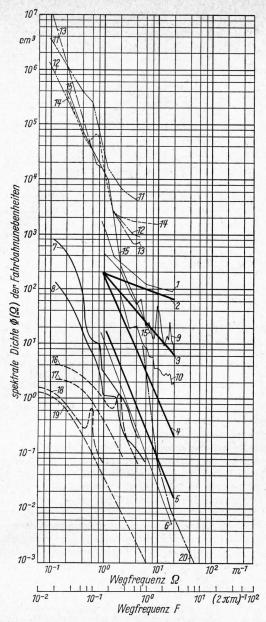


Bild 34. Die ermittelte spektrale Dichte der landwirtschaftlichen Fahrbahnen im Gesamtrahmen der anderwärts bekanntgewordenen Spektren von Fahrbahnunebenheiten. Hier zeigen die Kurven 1 und 6 noch einmal die Grenzen des Bereiches land-wirtschaftlicher Fahrbahnen. Die Geraden 2 bis 5 stellen die wichtigsten Mittelkurven nach Bild 33 dar.

Fahrbahn 1 bis 6 nach Verfasser (siehe Bild 33)

Kurve 1 obere Grenze landwirtschaftlicher Fahrbahnen

Kurve 2 mittlerer Sturzacker (IV) Kurve 3 mittlerer Acker mit periodischen Unebenheiten (III)

Kurve 4 mittlerer Feldweg (II)

Kurve 5 mittlere Landstraße mit Schwarzdecke (I)

Kurve 6 untere Grenze landwirtschaftlicher Fahrbahnen

Fahrbahn 7 und 8 nach Walls, Houbolt und Press [8]

Kurve 7 schlechte Flugzeuglandebahn

Kurve 8 gute Flugzeuglandebahn

Fahrbahn 9 und 10 nach Kozin und Bogdanoff [11]

Kurve 9 schlechte Fahrbahn

Kurve 10 gute Fahrbahn

Fahrbahn 11 bis 15 (U.S. Versuchsgelände) nach Kozin, Cote und Bogdanoff [12]

Fahrbahn 16 bis 19 nach Pevzner und Tichonov [13]

Kurve 16 schlechtes Kopfsteinpflaster

Kurve 17 gutes Kopfsteinpflaster Kurve 18 Asphaltstraße Kurve 19 Betonstraße

Fahrbahn 20 nach Albat [14]

Landstraße 1. Ordnung mit Schwarzdecke

Bauart bekannt: gutes und schlechtes Kopfsteinpflaster, Schwarzdecke und Beton. Über die Korrelationsfaktoren (siehe Abschnitt "Rechengang"), die durch eine Näherungsfunktion dargestellt und normiert sind, werden spektrale Dichten in Abhängigkeit von der Zeitfrequenz ermittelt. Die allgemeine Form dieser Gleichungen ist:

$$\Phi\left(\omega
ight)=rac{c_1\,v}{\omega^2+c_2\,v^2}+rac{c_3\,v\,(\omega^2+c_4\,v^2)}{(\omega^2-c_5\,v^2)^2+c_6\,v^4}\,,$$
worin $c_1\ldots c_6$ charakterisierende Konstanten und v die Fahr-

geschwindigkeit sind.

Mit dem zweiten Summanden wird eine Periodizität nachgebildet, die bei schlechtem Kopfsteinpflaster bei 3,2 m und auf einer Schwarzdecke bei etwa 10 m Wellenlänge liegen. Messungen anderer Autoren bestätigen diese ausgeprägten Periodizitäten für diese Fahrbahntypen nicht. Für Betonstraßen und gute Kopfsteinpflasterstrecken wurden monoton fallende Funktionen festgestellt, d. h., der zweite Summand ist Null.

Für den numerischen Vergleich mit anderen Arbeiten muß das wegfrequenzabhängige Spektrum $\Phi(\Omega)$ nach Gl. (1) und (2) ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Bild 34 eingetragen (Kurve 16 bis 19). Die Kurven haben etwa die gleiche Steigung wie die bisher besprochenen Fahrbahnen. Die spektrale Dichte liegt jedoch wesentlich günstiger als auf vergleichbaren Fahrstrecken, wie beispielsweise den amerikanischen Flugzeuglandebahnen. Es ist nicht anzunehmen, daß diese Fahrbahnen in Rußland ein so viel besseres Mikroprofil aufweisen; jedoch läßt sich die Abweichung nicht erklären.

Im betrachteten Bereich ergeben die Funktionen etwa Geraden, abgesehen von den Periodizitäten. Für niedrige Frequenzen streben die Fahrbahnen, entgegen der allgemeinen Beobachtung, endlichen, relativ kleinen Grenzwerten zu.

Die spektrale Dichte einer Landstraße mit Schwarzdecke ist in [14] angegeben (Bild 34, Kurve 20). Es ergeben sich gegenüber den anderen vergleichbaren Ergebnissen etwas andere Werte, die vom Autor selbst als nicht statistisch gesichert bezeichnet werden.

In einer weiteren russischen Arbeit [15] werden aus den gemessenen Beschleunigungen in Kraftfahrzeugen auf verschiedenen Straßen rückwärts die spektralen Dichten ermittelt, etwa nach dem im ersten Abschnitt dargelegten Schema. Die Ergebnisse lassen nur Tendenzen erkennen, da durch viele Zwischenschritte mit den notwendigen Vereinfachungen (einfaches Schwingungsersatzsystem usw.) genauere Werte nicht mehr zu entnehmen sind.

Aus einigen weiteren Quellen [1; 16; 17] wurden Formeln für charakteristische Dichtespektren bekannt. Die Formel von Kozin und Bogdanoff [16]

$$\Phi\left(\Omega
ight)=c_{1}\,\mathrm{e}^{-rac{\Omega^{2}}{c_{2}}}$$
n Ergebnisse nicht

bildet die vorliegenden Ergebnisse nicht sehr gut nach, da die Krümmung gegensinnig ist. Sie mag jedoch für theoretische Rechenansätze Vorteile haben. Die von Mitschke [1] bzw. Coenenberg [17] ebenfalls aus theoretischen Überlegungen gewonnene Gleichung

$$\Phi\left(\Omega
ight)=rac{c_{1}}{c_{2}+\Omega^{2}}$$

bildet die Fahrbahnen teilweise recht gut nach. Das Abknicken der Geraden bei niedrigen Frequenzen (bewirkt durch den Summanden c2) entspricht aber nicht den Ergebnissen aus praktischen Messungen und Rechnungen, wie sie in dieser vorliegenden Arbeit zusammengetragen sind.

Aus sämtlichen Vermessungen kann eine allgemeine Gleichung für natürlich gewachsene Fahrbahnen aufgestellt werden:

$$\log \Phi = -2.3 \log F + b$$
 bzw. $\Phi = \frac{b'}{F^{2.3}} \text{ cm}^3; (2 \pi \text{ m})^{-1}.$

Diese Formel wird von allen Fahrbahnen erfüllt, deren Profile sich unter Einwirkung eines beliebigen Fahrzeugverkehrs herausgebildet haben. Mit dieser Gleichung werden jedoch nicht Äcker erfaßt, bei denen die Oberfläche, beispielsweise durch Bodenbearbeitung, in den kurzen Wellen künstlich verändert

In der Darstellung a = f(b), die im **Bild 35** gezeigt wird, erweist sich die obige Behauptung als richtig. Die natürlich entstandenen Fahrbahnen liegen alle auf einer Parallelen zur b-Achse; diese Fahrbahnen lassen sich mit der genannten Gleichung und jeweils einem Wert für "b" eindeutig beschreiben. Dieser berücksichtigt die Intensitäten und kann als vergleichendes Maß angewandt werden.

Eine andere Steigung der Ersatzgeraden weisen verschiedene Äcker und Felder auf. Zu ihrer Beschreibung sind zwei Parameter notwendig.

Die in das Bild 35 eingezeichneten Geraden ermöglichen Vergleiche oder das Aufstellen von Relationen zwischen verschiedenen Fahrbahnen. Für jede Wegfrequenz F ergibt sich eine Schar paralleler Geraden, von der jeweils nur die angegeben ist, für die die Bedingung $\Phi(F) = 0$ erfüllt ist. Alle Punkte einer solchen Geraden geben gleiche Intensitäten der spektralen Dichte an. Demnach gibt die Steigung der Verbindungsgeraden zwischen zwei beliebigen Punkten den Schnittpunkt ihrer Funktionen der spektralen Dichte an. Je kürzer diese Verbindungsgerade, desto kleiner ist der Winkel, unter dem die Kurven sich schneiden.

Daraus kann gefolgert werden, daß zwei Fahrbahnen bei gleichen Fahrgeschwindigkeiten die gleichen oder ähnliche Wirkungen an einem Fahrzeug hervorrufen, wenn ihr Schnittpunkt im Eigenfrequenzbereich des Fahrzeuges liegt. Durch Schrumpfen des Abstandes der Punkte in Bild 35 wird die Ähnlichkeit der Fahrbahnen noch vergrößert.

Die Vertikalbeschleunigungen eines einfachen Fahrzeuges auf verschiedenen Fahrbahnen

Einleitend wurde erläutert, wie aus den Fahrbahn- und Fahrzeugeigenarten auf die Schwingbeanspruchungen (Beschleunigungen bzw. dynamische Kräfte und Momente) geschlossen werden kann. Im folgenden sollen die Vertikalbeschleunigungen von Fahrzeugen betrachtet werden, die über die vermessenen Fahrbahnen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit fahren.

Allgemein soll vorerst die Ersatzfahrbahn $\Phi\left(F\right)=10^{b}\,F^{a}$ behandelt werden. Über die Gl. (1) und (2) ergibt sich das Anregungsdichte-Spektrum

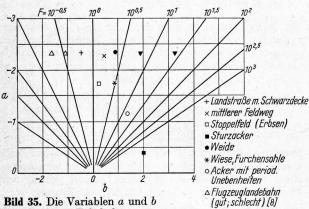
$$\Phi(f) = \frac{1}{v^{(1+a)}} 10^b f^a.$$

Aus Bild 7 ist ersichtlich, daß in die spektrale mittlere Beschleunigung für ein bestimmtes Fahrzeug die Wurzel aus der Anregungsdichte eingeht, es besteht die Proportionalität:

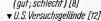
$$b_{
m m} \sim rac{1}{v^{\left(rac{1+a}{2}
ight)}}$$

Für a = -1 ist die mittlere Beschleunigung von der Fahrgeschwindigkeit unabhängig; für a=-3 beispielsweise ändert sich die mittlere Beschleunigung direkt proportional der Geschwindigkeit.

Ein spezielles Fahrzeug wird in einem ersten Schritt sehr vereinfacht durch ein gedämpftes Ein-Feder-Masse-System



verschiedener Fahrbahntypen.



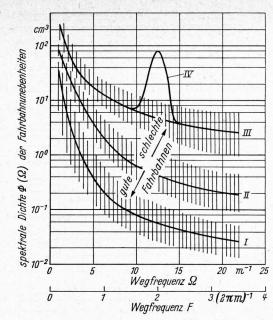


Bild 36. Spektrale Dichte von vier repräsentativen Fahrbahnen (halblogarithmisch) in Abhängigkeit von der Wegfrequenz.

Fahrbahn I mittlere Landstraße Fahrbahn II mittlerer Feldweg

Fahrbahn III mittlerer Acker

Fahrbahn IV mittlerer Acker mit periodischen Unebenheiten

(Bild 5) dargestellt. Dadurch ist recht gut ein Zweiradkarren nachgebildet, dessen einzige Federung im Luftgummireifen besteht, sofern der Wagen so gut ausgetrimmt ist, daß die Stützkräfte auf das ziehende Fahrzeug vernachlässigt werden können. Für die Schwingbewegungen eines Schleppers stellen die obigen Annahmen eine Vereinfachung dar, die nur dann in Kauf zu nehmen wäre, wenn u.a. die Koppelmasse klein ist, d. h. Vorder- und Hinterachsschwingungen entkoppelt würden. Unter gewissen Voraussetzungen lassen sich jedoch auch für kompliziertere Fahrzeuge hieraus Folgerungen ableiten. Eine Verfeinerung des Schwingersatzsystems ist im Augenblick noch nicht möglich, soll jedoch im weiteren Verlauf der Arbeit durchgeführt werden.

Im einzelnen wird die Fahrt des Einachsers auf vier Fahrbahnen untersucht: Landstraße mit Schwarzdecke, Feldweg, Acker, Acker mit Periodizität. Dabei werden Geschwindigkeiten angenommen mit: 1,5; 2; 4; 6 und 8 m/s. Die Bilder 36 bis 39 zeigen die Entwicklung der spektralen Beschleunigungen, wie sie im ersten Abschnitt an Hand der Bilder 1 bis 7 bereits erläutert wurde.

Bild 39 läßt erkennen, daß die Amplitude der Beschleunigung von der Fahrbahnart wesentlich stärker beeinflußt wird als von der Fahrgeschwindigkeit.

Die Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit ist nicht einheitlich, wie Bild 40 zeigt. Über der Fahrgeschwindigkeit sind hier die mittleren statistischen Beschleunigungen, die Integralwerte unter den Kurven von Bild 39 aufgetragen. Die ausgezogenen Kurven berücksichtigen den Frequenzbereich von 0 bis 10 Hz, die gestrichelten den von 0 bis 18 Hz. Hierbei dürfte der erstgenannte Bereich besser den wirklichen Beanspruchungsverhältnissen für den Fahrer entsprechen, da die höheren Frequenzen schon durch die Sitzpolsterung herausgefiltert werden.

Während die Beschleunigung auf den Fahrbahnen I bis III mit der Geschwindigkeit zunimmt, fällt sie bei der Fahrbahn IV, dem Acker mit den periodischen Unebenheiten, oberhalb 2,5 m/s bzw. 9.0 km/h wieder ab. Bei dieser Fahrbahn hat die Resonanzspitze, die durch den Reihenabstand der Rüben verursacht ist, entscheidenden Einfluß auf die Beanspruchung. Über 9,0 km/h wird sie wieder kleiner, die Fahrbahn wird überkritisch befahren, und das Fahrzeug vergrößert die Schwingungen nicht mehr so

Diese Betrachtungsweise ist exakt nur richtig für mittlere Fahrgeschwindigkeiten. Bei zu langsamer Fahrt führt das Fahr-

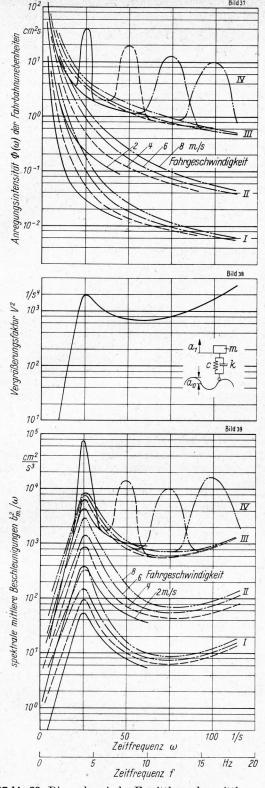


Bild 37 bis 39. Die rechnerische Ermittlung der mittleren spektralen Vertikalbeschleunigungen eines Fahrzeuges auf verschiedenen typischen Fahrbahnen.

Bild 37 zeigt die Anregungsintensitäten der vier Fahrbahnen in Bild 36 bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten v=2, 4, 6 und 8 m/s. In Bild 38 sind die Vergrößerungsfaktoren des Schwingungsersatzsystems für das vereinfachte Fahrzeug dargestellt. Dessen Daten sind:

Eigenfrequenz
$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} = 4 \text{ Hz}$$

Dämpfung $D = \frac{k}{2 \sqrt{c m}} = 0,2$

Bild 39 endlich zeigt die mittleren spektralen Beschleunigungen für die verschiedenen Fahrzustände, die aus Bild 37 und 38 durch punktweises Multiplizieren entstanden sind.

zeug außerdem einmal angeregte Eigenschwingungen aus, bei zu schnellem Fahren geht der Kontakt zwischen Fahrzeug und Fahrbahn oft verloren. In beiden Extremfällen werden sich in der Praxis höhere Beschleunigungen zeigen als die nach dieser Theorie ermittelten. Für welchen Geschwindigkeitsbereich die Theorie genügend genaue Ergebnisse liefert, muß ein Vergleich mit Fahrversuchen erbringen.

Zusammenfassung

Mit einem einfachen Verfahren wurden Profile von Fahrspuren auf den verschiedensten landwirtschaftlichen Fahrbahnen aufgenommen. Das Verfahren, mit dem die spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten ermittelt wurde, wird beschrieben.

Es ergibt sich für alle natürlichen, nur durch Verkehrseinwirkungen geformten Fahrbahnen eine allgemeine Formel:

$$\Phi = rac{b'}{F^{\,2},3} \quad {
m em}^3; (2\,\pi\,{
m m})^{-1}.$$

Der einzige freie Parameter b' gibt die Größe der Unebenheiten an. Landwirtschaftliche Fahrbahnen liegen in dem Bereich von

$$b' = 0.1$$
 bis 100,

wobei der unteren Grenze Landstraßen, der oberen Grenze sehr rauhe Äcker zugeordnet werden müssen.

In einem ersten Schritt wurde für ein stark vereinfachtes landwirtschaftliches Fahrzeug die mittlere Schwingbeanspruchung ermittelt; dabei zeigt sich, daß die Fahrbahn die Beanspruchung wesentlich stärker beeinflußt als die Fahrgeschwindigkeit.

Im weiteren soll die Rechnung für kompliziertere Schwingersatzsysteme durchgeführt werden, die besser den wirklichen Verhältnissen entsprechen. Hierzu sollen zuerst die Kenndaten (Massen, Massenverteilungen, Federungen, Dämpfungen, Sitzlage usw.) bei gebräuchlichen Schleppern und Sitzen ermittelt werden. Mit diesen Daten soll dann die Schlepperfahrt auf dem Analogrechner nachgeahmt werden, wobei die ermittelten Fahrbahnunebenheiten als Anregungen Verwendung finden sollen. Die Ergebnisse sollen durch Messungen an wirklichen Schleppern und Sitzen überprüft werden.

Es ist möglich, daß sich nach einer Optimierung dieser Art herausstellen wird, daß die Schwingbeanspruchung für den Fahrer noch immer zu hoch ist. Dann müßte versucht werden, aufwendigere Kombinationen zu untersuchen, unabhängig davon, ob sie mit wirtschaftlichem Aufwand realisiert werden können oder nicht.

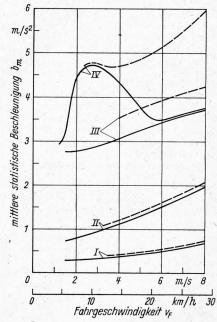


Bild 40. Einfluß von Fahrbahn und Fahrgeschwindigkeit auf die Vertikalbeschleunigung eines einfachen Fahrzeuges.

ausgezogene Kurven f = 0 bis 10 Hz gestrichelte Kurven f = 0 bis 18 Hz.

Verwendete Formelzeichen

a	Amplitude
$b_{\rm m}$	mittlere Beschleunigung
c	Federsteifigkeit
D	Dämpfung
k	Dämpfungsfaktor
k, p, q, r	lfd. Nummer der Reihe
1	Anzahl der Summanden zur Mittelungslänge
$L = \Delta x l$	Mittelungsbereich oder Wellenlänge
m	Masse
m	Anzahl der Korrelationsfaktoren
n	Anzahl der Meßpunkte
$R_{\rm r}$	Autokorrelationsfaktor
v	Fahrgeschwindigkeit
V	Vergrößerungsfaktor
x	Fahrbahnlänge
Δx	Schrittweite
X	Integrationsgrenzen
y	relative Fahrbahnhöhe
$\frac{\partial}{\partial y}$	korrigierte relative Fahrbahnhöhe
$y_{\overline{m}}$	gleitender Mittelwert
v	Eigenfrequenz
σ	Standardabweichung oder mittlere quadratische Abweichung
Φ	geglättete spektrale Dichte (auch "Energiedichte-Spektrum" oder
	"power spectral density")
	"Post of Parties of Pa

Schrifttum

 $\Phi\left(\Omega\right)$

 $\Phi(\omega)$

 Ω . F

 $\Delta\Omega$

w. f

[1] Mitschke, M.: Beitrag zur Untersuchung der Fahrzeugschwingungen (Theorie und Versuch). Dt. Kraftfahrtforsch. u. Straßenverkehrstechn. Heft 157. Düsseldorf: VDI-Verlag 1962 (mit 119 Schrifttumshinweisen).

spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten (auf die Wegfrequenz

Anregungsintensität (spektrale Dichte, auf Zeitfrequenz bezogen)

[2] Mitschke, M.: Messung von Straßenunebenheiten und deren Einfluß auf Fahrzeug und Fahrbahn. Diss. TH Braun-

schweig 1957.

bezogen)

[3] Mitschke, M.: Theoretische und experimentelle Schwingungsuntersuchungen am Kraftfahrzeug. Automob.-techn. Z. 65 (1963) S. 197/205 [4] Mitschke, M.: Schwingungsverhalten und Sicherheit eines Kraftfahrzeuges. Automob.-techn. Z. 60 (1958) S. 168/74.

[5] Blackman, R. B. und J. W. Tukey: The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering. Techn. J. 37 (1958) S. 185/282 und S. 485/569. Gallwitz, K.: Die Dräntechnik heute. Z. f. Kulturtechn. 3

(1962) S. 271/90.

[7] Rifai, M.: Beitrag zur technischen Prüfung von landwirtschaftlichen Einachsanhängern. Diss. TH Darmstadt 1964.

[8] Walls, J. H., J. C. Houbolt und H. Press: Some measurements and power spectra of runway roughness. NACA Technical Note 3305, November 1954.

[9] Press, H. und J. C. Houbolt: Some applications of generalized harmonic analysis to gust loads on airplanes. J. of the aeron. Sci. Jan. 1955, S. 17/26, 60.

[10] Tsien, H. S.: Engineering cybernetics. Dt. Übersetzung von H. Kaltenecker: Technische Kybernetik. Stuttgart: Berliner

[11] Kozin, F. und J. L. Bogdanoff: On the statistical properties of the ground contour and its relation to the study of land locomotion. Rep. No. 7823, März 1962. US Army Tank Automotive Center, Detroit Arsenal, Center Line, Michigan.

[12] Kozin, F., L. J. Cote and J. L. Bogdanoff: Statistical studies of stable ground roughness. Rep. No. 8391, Nov. 1963. Land Locomotion Laboratory US Army Tank Automotive Center, Warren, Michigan.

[13] Pevzner, J. M. und A. A. Tichonov: Untersuchungen statistischer Eigenschaften des Mikroprofils wesentlicher Typen von Autostraßen. Automobilnaja promyslennost 1964, No. 1, S. 15/18.

[14] Albat, E.: Über Straßenschonung und Fahrsicherheit bei Schwerlastfahrzeugen mit Doppelachsen. Diss. TH Braunschweig 1964.

[15] Parchilowskij, J. G.: Die Spektraldichte der Verteilung der Unebenheiten der Mikroprofile der Wege und der Schwingungen der Automobile. Automobilnaja promyslennost. 1961, Nr. 10, S. 25/28.

[16] Kozin, F. und J. L. Bogdanoff: On the statistical analysis of linear vehicle dynamics. Rep. No. 7824, März 1962. US Army Tank Automotive Center, Detroit Arsenal, Center Line, Michigan.

[17] Coenenberg, H. H.: Das "äußere" Schwingungsverhalten von Ackerschleppern, insbesondere ihre dynamischen Radlasten. Landtechn. Forsch. 12 (1962) S. 157/65 und 13 (1963) S. 1/10.

DK 620.17:631.3.02

Werkstoffprüfung von Gänsefußscharen

ungeglättete spektrale Dichte

Zeitfrequenz in 1/s bzw. Hz

Wegfrequenz in m⁻¹ bzw. $(2 \pi \text{ m})^{-1}$

Mittelungsbereich der Wegfrequenz

Die Werkstoffeigenschaften der Gänsefußschare sind in zwei deutschen Normblättern genormt: in DIN 11112 über die Gänsefußmesser und in dem für die Güte- und Werkstoffeigenschaften der Bodenbearbeitungswerkzeuge allgemein gültigen Normblatt DIN 11100. Gänsefußschare sollen nach DIN 11112 aus Federstahl 51 Si 7 hergestellt, in Öl gehärtet und auf eine Vickershärte von mindestens 410 und höchstens 490 kp/mm² angelassen sein; die Befestigungstülle soll nicht mitgehärtet werden. Im Normblatt DIN 11100 ist dagegen für Bodenbearbeitungswerkzeuge eine größere Mindesthärte von 500 kp/mm² vorgeschrieben. Aufgrund von Feldversuchen 1) ist bei Härten, die wesentlich unter 500 kp/mm² liegen, keine Steigerung der Verschleißfestigkeit gegenüber ungehärteten Werkzeugen zu erwarten. Man muß also feststellen, daß die Härtevorschrift von DIN 11112 den heutigen Erkenntnissen nicht mehr entspricht. In DIN 11100 ist außer der Härte eine Mindestzähigkeit von 15 kpm/cm² vorgeschrieben, die an ungekerbten Schlagbiegeproben, die aus der Härtezone der Werkzeuge herausgearbeitet werden, festgestellt wird. Durch diese Vorschrift soll die Bruchsicherheit der gehärteten Werkzeuge gewährleistet werden.

Als Stichprobe wurden aus einem fabrikneuen Grubber zwei Schare entnommen und nach DIN 11100 geprüft. Die Schare hatten kein Markenzeichen. Die Vickershärte wurde im Anlieferungszustand längs der Schneide und der Tülle gemessen (s. Bild):

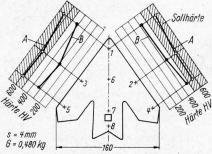
Meßpunkte 240 HV 30 = 640 580 580 570 580 460 530 Schar A: 370 330 320 410 410 420 300 470

Die Schare waren an den Schneiden partiell gehärtet; die Tüllen (Punkt 7 und 8) hatten mit einer Ausnahme niedrigere

Wert von 19 kpm/cm². Schar B wurde wegen ungenügender Härte nicht auf Zähigkeit geprüft. Die chemische Analyse ergab, daß die Schare aus dem Federstahl 38 Si 6 hergestellt sind: Schar A: % 0,42 1,53 0,65 0,032 0,019

Normalgeglüht hatten die Schare eine Härte HV = 240 kp/mm², was einer Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials von $\sigma=82$ kp/ mm² entspricht.

Härtewerte. Die Prüfung der Zähigkeit ergab bei Schar A einen



Ergebnis der Prüfung: Die Schare sind aus dem in Deutschland für Bodenbearbeitungswerkzeuge meist verwendeten Federstahl 38 Si 6 hergestellt2) und nach der relativ hohen Härte des Schares A wahrscheinlich wassergehärtet. Schar A genügt sowohl in der Härte als auch in der Zähigkeit den Vorschriften nach DIN 11100, während Schar B in der Härte weit unter dem geforderten Mindestwert liegt. Deshalb und wegen des großen Qualitätsunterschiedes zwischen Schar A und B kann diese Scharlieferung gütemäßig nicht anerkannt werden.

Braunschweig-Völkenrode

Th. Stroppel

¹⁾ Grundl. Landtechn. Heft 17 (1963) S. 67 und 2) Heft 20 (1964) S. 9/10.