

**Zeitschrift:** Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

**Herausgeber:** Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

**Band:** 45 (1967)

**Heft:** 5

**Artikel:** Simulation von Fahrzeugvibrationen auf einer Schwingprüfanlage

**Autor:** Wiedmer, Paul-Martin

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-874878>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Simulation von Fahrzeugvibrationen auf einer Schwingprüfanlage

Paul-Martin WIEDMER, Bern

534.647.: 656.1  
620.178.531.15: 656.1

**Zusammenfassung.** *Es wird anhand von Versuchen das approximative Verhalten von Fahrerschütterungen in einem geländegängigen Stationswagen auf Strassen verschiedener Güte ermittelt. Demnach können diese Bewegungen auf einer Vibrationsanlage simuliert werden mit Schmalbandrauschen ohne Frequenzwobbelung, womit man einen sehr einfachen Erschütterungstest für mobile Geräte erhält.*

## **Simulation de vibrations de véhicules sur une installation d'essai**

**Résumé.** *Les caractéristiques approximatives des vibrations d'un station-wagon tout terrain, sur des routes de qualité différente, sont déterminées à l'aide d'essais. Ces mouvements peuvent être simulés avec un bruit à bande étroite sans wobblution de la fréquence, sur une table vibrante électrodynamique; on obtient ainsi un test de vibration très simple pour des appareils mobiles.*

## **Simulazione delle vibrazioni dei veicoli con uno speciale impianto di prova**

**Riassunto.** *Si determina il comportamento approssimativo di uno speciale furgone tutto terreno, in funzione delle vibrazioni cui è sottoposto circolando su strade di tipo diverso. In seguito, queste vibrazioni, possono essere riprodotte, con fruscio a banda stretta senza wobbluzione di frequenza, da un impianto vibratore, realizzando così un semplice dispositivo per l'esame di apparecchi mobili.*

Dieser Beitrag behandelt die beim Transport von Geräten auftretenden Fahrzeugschütterungen, deren komplexer, stochastischer Verlauf durch Angabe einiger weniger charakteristischer Grössen zu erfassen versucht wird. Das Interesse konzentriert sich ferner darauf, ob und wie wirklichkeitstreu sich derartige Vibrationen mit einer Schwingprüfanlage erzeugen lassen. Es werden einige brauchbare Resultate ermittelt, die jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Nach ihrer Massgabe haben wir schon einige zu Reportagezwecken gebrauchte Geräte, wie Tonbandrecorder, auf ihre Erschütterungsfestigkeit geprüft.

## **Experimentelle Ermittlung von Fahrzeugvibrationen**

Die zu erfassenden Vibrationen weisen zum Teil sehr tiefe Frequenzen von nur einigen Hertz auf. Da ausser der Beschleunigung auch die Amplitude interessiert, wäre die Verwendung von geschwindigkeitsempfindlichen Aufnehmern günstig, deren Messwert nach einmaliger Integration die Amplitude liefern würde. Die uns zur Verfügung stehenden Geophone mit einer unteren Grenzfrequenz von 4 Hz wären dazu geeignet, jedoch weisen sie mit einer Auslenkung von  $\pm 1$  mm zu wenig Spielraum auf, so dass die Messungen durch das Aufschlagen der Tauchspule verfälscht werden. Wir haben deshalb beschleunigungsempfindliche piezoelektrische Aufnehmer verwendet, die Frequenzen bis zu Bruchteilen eines Hertz aufnehmen können. Die Begrenzung ist hier durch den nachgeschalteten Verstärker gegeben und liegt bei 3 Hz. Aufgezeichnet wurde mit einem Papierschreiber (*Philips Oscilloscript*), wobei ausser dem Beschleunigungsdiagramm über ein Integrierglied gleichzeitig noch das Geschwindigkeitsdiagramm festgehalten wurde. Die Bestimmung der Auslenkung erfolgte rechnerisch nach Aufsuchen der tiefsten Teilschwingung mit möglichst grosser Amplitude auf dem Geschwindigkeitsdiagramm. Bei einem ersten Versuch wurden die Piezogeber direkt auf dem Boden eines geländegängigen Laborwagens (*Willys*) montiert. Die hochfrequenten Vibrationen des Motors und eines auf dem Dach montierten *Fichtel & Sachs*-Zweitaktmotors zur Stromversorgung der Messgeräte überdeckten jedoch in den Diagrammen die eigentlichen Fahrerschütterungen zu stark. Diese Motorfrequenzen konnten einigermaßen unterdrückt werden, indem die Geber auf einer mit Sand gefüllten und auf Wolldecken gelagerten Kiste angebracht wurden. Die ganz tiefen Frequenzen werden infolge der Begrenzung im Vorverstärker nicht registriert. Jedoch zeigen diese Frequenzen, die von den Nick- und Schlingerbewegungen des Fahrzeuges herrühren, selten hohe und für transportierte Geräte gefährliche Beschleunigungen, obwohl sie ab und zu seitliches Rutschen auslösen. Gleiten setzt aber schon

bei Horizontalbeschleunigungen ein, die dem durch den Reibungskoeffizienten angegebenen Bruchteil der Schwerebeschleunigung entsprechen, sowie bei noch kleineren Werten und gleichzeitiger Vertikalbeschleunigung, also bei einem Richtwert von 0,3 g. Wie sich zeigte, liegen die höchsten gemessenen Beschleunigungen auf derselben Höhe. Die nicht registrierten Tiefstfrequenzen verhalten sich also etwa gleich wie die höheren Frequenzen. Die Begrenzung der Messeinrichtung bei 3 Hz bedeutet also kaum einen grossen Informationsverlust.

Mit dem für die Messungen ausgerüsteten Wagen wurde eine sehr holprige und ziemlich steile Naturstrasse befahren; ausserdem wurden die Vibrationen auch für eine gute Asphaltstrasse und für Pflasterstrassen ermittelt. Für die Naturstrasse sind alle drei Komponenten der Schwingungen von Belang, jedoch nicht für Pflasterstrassen und erst recht nicht für eine gute Asphaltstrasse; hier sind die Vibrationen längs und quer zum Fahrzeug sehr gering.

Bei einer Geschwindigkeit von 50...60 km/h ergaben sich auf der Asphaltstrasse Beschleunigungsamplituden von 80 cm/s<sup>2</sup> im Maximum und etwa 30 cm/s<sup>2</sup> im Mittel, was ein Verhältnis von 2,7 ergibt. Bei den Geschwindigkeitsamplituden liegen die Höchstwerte bei 0,75 cm/s und die Mittelwerte bei 0,25 cm/s; das Verhältnis beträgt also ziemlich genau 3. Die Amplitudenhöchstwerte sind mit etwa 0,1 mm sehr klein. Die beobachteten Frequenzen liegen zwischen 10 und 20 Hz.

Auf Pflasterstrasse bei etwa 40...50 km/h Fahrgeschwindigkeit ergaben sich mit 170 cm/s<sup>2</sup> doppelt so hohe maximale Beschleunigungsamplituden wie auf Asphalt, bei einem Verhältnis von ungefähr 2 zur mittleren Beschleunigungsamplitude. Für die Geschwindigkeitsamplitude erhielten wir ein Maximum von 2 cm/s bei einem Verhältnis zu deren Mittelwert von 2,6. Die grössten Amplituden liegen bei 0,3 mm, sind also dreimal höher als auf Asphalt. Das Frequenzband ist ebenfalls etwas grösser und erstreckt sich von 6 bis 20 Hz.

Schliesslich wurden noch Messungen gemacht beim Befahren einer steilen, sehr holprigen Naturstrasse mit tiefen Längsrinnen. In vertikaler Richtung ergaben sich Beschleunigungen bis 270 cm/s<sup>2</sup> und mittlere Beschleunigungsamplituden bis 110 cm/s<sup>2</sup>, während das Verhältnis der beiden sich zwischen 3 und 3,7 bewegte. Die Geschwindigkeitsamplituden zeigten bis 3,6 cm/s im Maximum und im Mittel etwa 1,4 cm/s bei einem Verhältnis, das zwischen 2 und 4 schwankte. Amplitudenhöchstwerte bis 0,5 mm traten auf, und das Frequenzband erstreckte sich von 3 bis 30 Hz.

Quer zur Fahrtrichtung waren die Messwerte etwas grösser, nämlich bis 320 cm/s<sup>2</sup> maximale Beschleunigung und bis 110 cm/s<sup>2</sup> mittlere Beschleunigungsamplitude, mithin ein Verhältnis von

rund 3. Die Geschwindigkeitsamplituden waren mit 4,5 cm/s auch grösser, das Verhältnis zur mittleren Amplitude bewegte sich zwischen 2,5 und 3, und die Auslenkungen erreichten fast 2 mm.

In der Längsrichtung traten die grössten Beschleunigungen auf, auch die grössten Geschwindigkeiten und Amplituden (1230 cm/s<sup>2</sup>, 9,5 cm/s und 3,8 mm), während sonst die Verhältnisse gleich blieben.

Die vom Motor herrührenden Frequenzen, gemessen mit auf dem Wagenboden montierten Piezogebern lagen bei 200 Hz, die Beschleunigungsamplituden betragen im Mittel 60 cm/s<sup>2</sup> (bis 250 cm/s<sup>2</sup> beim Gasgeben) und die Auslenkungen bis 0,4 μ. Die Stromversorgung durch den Fichtel & Sachs-Zweitaktmotor gab Frequenzen von 60 Hz und gleiche Beschleunigungen wie der Antriebsmotor, während die Auslenkungen bis 4 μ betragen. Im weiteren werden jedoch diese Motorfrequenzen ausser Betracht gelassen.

Figur 1 zeigt einige der registrierten Diagramme.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich bei der Beschleunigung wie bei der Geschwindigkeit das Verhältnis von Maximalamplitude zu mittlerer Amplitude fast immer nahe bei 3 befindet. Die Frequenzen liegen zwischen 3 und 30 Hz, wobei sowohl die oberen als auch die unteren Frequenzen selten vertreten sind. Ausserdem sind die Pegel verhältnismässig klein. Der Verlauf der Beschleunigung, Geschwindigkeit und Amplitude im einzelnen ist regellos. Die Amplitudenverteilungen werden jedoch einer Gausschen Normalverteilung entsprechen, wie auch die Unebenheiten der Strasse, von denen sie herrühren. Aus demselben Grund kann man annehmen, dass die spektrale Amplitudendichte annähernd konstant ist, das heisst, dass die Leistung gleichmässig über den grössten Teil des festgestellten Frequenzbandes verteilt ist. Die Erschütterungen haben somit angenähert den Charakter eines sogenannten farbigen Rauschens. Um dies genau festzulegen, müsste man die relativen Häufigkeiten verschiedener Amplitudenwerte bestimmen und auch die Fourier-transformierte der Autokorrelationsfunktion des Amplitudenverlaufes.

Diese Werte können nur als Richtwerte gelten, da für jedes Fahrzeug gemäss seinen Abmessungen, Federungseigenschaften und seinem Gewicht andere Werte auftreten, die auch von der Fahrgeschwindigkeit und den Strassenverhältnissen abhängen.

Einen weiteren Hinweis darauf, dass wir es mit einem farbigen Rauschspektrum mit konstanter Amplitudendichte zu tun haben, liefert auch die folgende Rechnung. Auf der holprigen Naturstrasse haben wir aus sechs Einzelmessungen eine mittlere Beschleunigungsamplitude von 70 cm/s<sup>2</sup> in vertikaler Richtung ermittelt. Die sechs maximalen Amplituden ergaben einen Mittelwert von 0,3 mm. Hat man es mit einem farbigen Rauschspektrum konstanter Amplitudendichte  $a_0$  zu tun, so ist

$$a_{\text{eff}}^2 = a_0 B$$

Dabei ist B die Bandbreite, die man nach den obigen Resultaten zwischen 10 und 20 Hz setzen kann. Unter der Annahme, dass die Auslenkungen durch die Federungseigenschaften des Wagens auf  $a_{\text{max}} = 4_{\text{eff}}$  begrenzt sind, ergibt sich die spektrale Amplitudendichte zu

$$a_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Hz}.$$

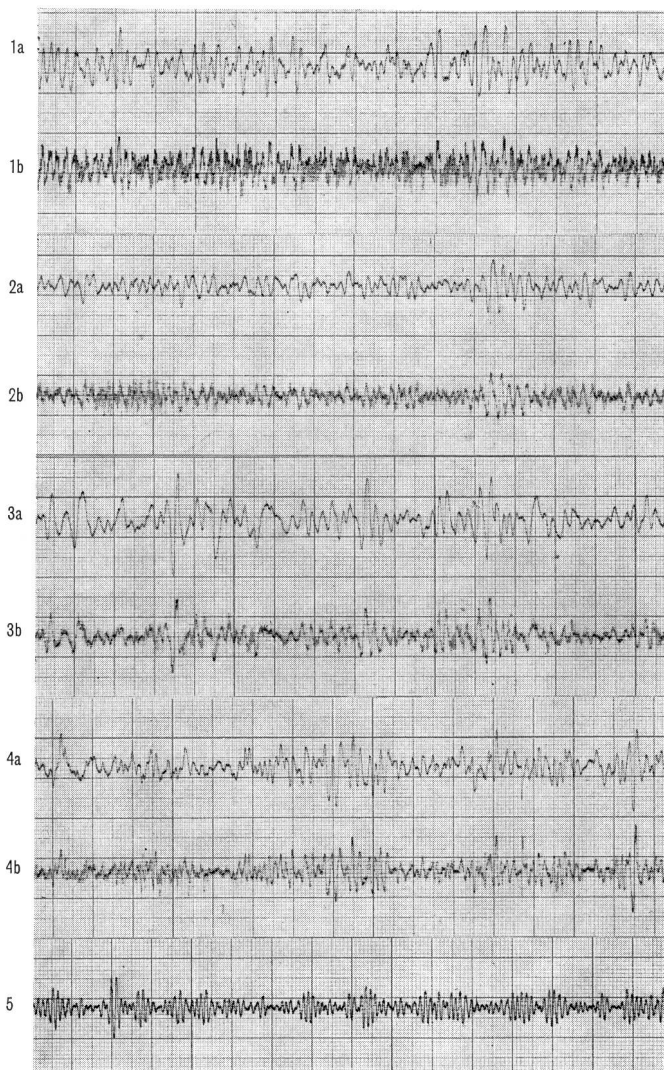


Fig. 1  
Diagramme von Fahrzeugerschütterungen auf Strassen verschiedener Qualität. Kurve a zeigt jeweils den Geschwindigkeitsverlauf, Kurve b den Beschleunigungsverlauf. Papiervorschub: 12 cm/s

- 1 Auf Asphalt  
a:  $v_{\text{max}} = 0,75 \text{ cm/s}$   
b:  $b_{\text{max}} = 70 \text{ cm/s}^2$   
Motorfrequenzen noch sichtbar
- 2 Auf Pflaster  
a:  $v_{\text{max}} = 2 \text{ cm/s}$   
b:  $b_{\text{max}} = 170 \text{ cm/s}^2$   
Motorfrequenzen noch sichtbar
- 3 Auf schlechter Naturstrasse, vertikal  
a:  $v_{\text{max}} = 3,6 \text{ cm/s}$   
b:  $b_{\text{max}} = 270 \text{ cm/s}^2$
- 4 Auf schlechter Naturstrasse, quer  
a:  $v_{\text{max}} = 2,8 \text{ cm/s}$   
b:  $b_{\text{max}} = 320 \text{ cm/s}^2$
- 5 Beschleunigungsdiagramm erzeugt auf der Vibrationsanlage mit Rauschband zwischen 10 und 20 Hz

Innerhalb eines Frequenzdifferentials beträgt die effektive Beschleunigung

$$b_{\text{eff}}^2 = a_{\text{eff}}^2 \omega^4 = a_0 df \omega^4$$

wobei  $\omega = 2\pi f = \text{Kreisfrequenz}$ .

Innerhalb des endlichen Bandes mit den Grenzfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  erhält man somit

$$b_{\text{eff}}^2 = \int_{f_1}^{f_2} a_0 \omega^4 df$$

was ausgewertet schliesslich

$$b_{\text{eff}} = 17,8 \sqrt{a_0 (f_2^5 - f_1^5)}$$

ergibt. Damit ergibt sich für die mittlere Beschleunigungsamplitude  $100 \text{ cm/s}^2$ , in nicht zu grosser Abweichung vom gemessenen Wert.

### Simulation von Fahrzeugschütterungen auf der Schwingprüfanlage

Moderne Steuergeneratoren für Schütteltische besitzen die Möglichkeit, ein schmalbandiges Rauschspektrum beliebiger Zentralfrequenz zu erzeugen. Das gewünschte Band wird dabei aus einem weissen Rauschsignal ausgefiltert. Das Schmalbandrauschsignal, auch farbiges Rauschen genannt, besitzt daher eine Gausssche Amplitudenverteilung, jedoch mit einer Begrenzung der Amplitude, die bei unserem Steuergenerator (*Brüel & Kjaer*, Modell 1040) auf den vierfachen Effektivwert eingestellt ist. Das Verhältnis von maximaler zu mittlerer Amplitude wird damit 2,8, was recht gut den im fahrenden Wagen gemessenen Verhältnissen entspricht. Dieses Signal wird als Spannung geliefert und im Verstärker in ein Stromsignal umgewandelt, das den Schütteltisch antreibt, dessen Schub also eine konstante spektrale Dichte erhält. Die Amplitudendichte der Auslenkung folgt dann der Beziehung

$$a_0 = \frac{\ddot{u}^2 i_0}{(S - m\omega^2)^2 - \omega^2 r^2}$$

Hierin bezeichnet  $i_0$  die spektrale Amplitudendichte des Stromes,  $\ddot{u}$  ist das elektromechanische Übersetzungsverhältnis des Schütteltisches, und  $S$ ,  $m$  und  $r$  sind die Steifigkeit, Masse und Reibung (hauptsächlich Wirbelstromverluste, die sich wie eine geschwindigkeitsproportionale Reibung verhalten) seines beweglichen Systems. Befindet man sich genügend weit unterhalb der Eigenfrequenz des Vibrators, so übersetzt sich also die konstante spektrale Dichte des Stromes in eine ebensolche der Auslenkung. Setzt man das Rauschband zwischen 10 und 20 Hz, entsprechend den Ergebnissen des vorangehenden Abschnittes, so unterscheiden sich die Amplitudendichten an den beiden Bandenden in unserem Fall um den Faktor 2,5 bei unbelastetem Tisch. Mit Hilfe von Bewertungsfiltern zwischen Steuergenerator

und Verstärker könnte man dies ausgleichen, was aber beim gegenwärtigen Stand der Arbeiten verfrüht wäre, da der spektrale Verlauf der zu simulierenden Erschütterungen vorerst einer genaueren Abklärung bedarf. Vorläufig begnügten wir uns damit, durch Regelung der Vibration auf konstante mittlere Beschleunigung eine Bewegung zu erhalten, die immerhin bezüglich Regellosigkeit, Frequenzumfang und Verhältnis von maximalen zu mittleren Amplituden den gemessenen Fahrerschütterungen recht gut entspricht. Die bis jetzt durchgeführten Prüfungen auf Erschütterungsfestigkeit haben wir allerdings bei ziemlich höherem als dem gemessenen Pegel vorgenommen, nämlich bei 1 g mittlerer Beschleunigungsamplitude, was etwa dem dreifachen gemessenen Höchstwert gleichkommt. In Figur 1 ist unten ein unter diesen Bedingungen registriertes Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsdiagramm zu sehen. Als Prüfdauer wählten wir 24 Stunden, was bei dem hohen Pegel eine erhebliche Beanspruchung darstellt.

Schon rein gefühlsmässig erhält man beim Befühlen der so hergestellten Vibrationen den Eindruck, sich in einem fahrenden Auto zu befinden, das auf sehr schlechter Strasse fährt.

Figur 2 zeigt die neu installierte Vibrationsanlage Derritron VP75 mit Verstärker 2,5 KWLF. Der Vibrator erzeugt einen Schub von 340 kp, was Beschleunigungen bis 68 g erlaubt. Er ist auf einem Kippgestell montiert, so dass die Richtung der Vibration frei wählbar ist. Der Verstärker leistet 2,5 kW und kann zudem über einen zusätzlichen Transformator als Netzsimulator variabler Frequenz benutzt werden.



Fig. 2  
Vibrationsanlage Derritron mit Steuerung Brüel & Kjaer. Von links nach rechts: Autotrafo für Netzsimulatorbetrieb, darüber Schiebewiderstand für die Feldkompensation (degaussing); Vibrator VP75 mit Kristall-Pick-ups, darüber Vorverstärker 2620; Verstärker 2,5 KWLF mit Ausgangstrafo dahinter; im Gestell: unten Felderreggerät, Schreiber Oscilloscript, Vibrationsmeter 2501, Steuergenerator 1040.