

Vorbereitung von Beanspruchungskollektiven bei Nutzfahrzeugen

P. Michelberger, S. Szeidl, A. Keresztes, S. Horváth

1. Einleitung

Von den Benutzern werden an die Hersteller von Nutzfahrzeugen sowohl bezüglich der Bestimmung als auch der Güte des Fahrzeugs sehr verschiedene technische Anforderungen gestellt. Wenn für inländischen oder für ausländischen Verkauf bestimmte Nutzfahrzeuge geprüft werden, werden diese im Betrieb bei verschiedenen Belastungen, auf Straßen verschiedener Güte und Geometrie eingesetzt, von Fahrern unterschiedlicher Mentalität und unter verschiedenen Verkehrsverhältnissen gefahren.

Im Gegensatz zu Personenkraftwagen ist es bei Nutzfahrzeugen aus Wirtschaftlichkeitsgründen in der Regel nicht zulässig, bei der Konstruktion eines neuen Fahrzeugtyps an einem Prototyp eine hinreichende Zahl von Messungen vorzunehmen und in Kenntnis dieser Messergebnisse den endgültigen Fahrzeugtyp auszugestalten. Ein solches Vorgehen wird teils durch den höheren Kostenaufwand, teils durch die verhältnismäßig kleinen Stückzahlen der Nutzfahrzeuge verboten. Auch die mit früher hergestellten Nutzfahrzeugen gemachten Betriebserfahrungen lassen sich bei einer neuen Konstruktion – wegen Abweichungen in der konstruktiven Gestaltung – nur beschränkt verwenden.

Die abwechslungsreichen Benutzeransprüche können nur erfüllt werden, wenn ein Bemessungsverfahren zur Verfügung steht, das die veränderlichen Parameter schon im Entwurfsstadium flexibel berücksichtigt und gleichzeitig für weniger veränderliche oder solche Parameter, die als konstant gelten dürfen, alle früheren Informationen ausnutzt.

Nutzfahrzeuge sind Konstruktionen, die im bestimmungsgemäßen Einsatz zeitlich und räumlich veränderlichen kinematisch-dynamischen Zwängen ausgesetzt sind [1]. Die absichtlichen bzw. unvermeidlichen elastischen konstruktiven Verbindungen der Fahrzeuge reagieren auf die infolge dieser Zwänge auftretenden Deformationen durch Kräfte und Momente, die auf die Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands ausgerichtet sind. Da die Massen und Trägheitsmomente von Fahrzeugen endlich sind, treten notwendigerweise Schwingungen auf. Solche Konstruktionen lassen sich sowohl hinsichtlich der Festigkeit als auch der Wirtschaftlichkeit nur unter Berücksichtigung der Schwingungskennwerte befriedigend ausgestalten [2] bis [5].

2. Mechanische Probleme der Lastmodellierung

Die statische Beanspruchung – als Zufallsgröße – wird in einem gegebenen Punkt mit der Koordinate s des

Fahrgestells durch folgende Einflussfaktoren bestimmt [6]:

$$M_{\text{stat}}(s) = F_1 \{ M(t), S(t, M), \epsilon(t), \alpha(t) \} \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

$M(t)$ die aus der Eigenmasse des Fahrzeugs und der Nutzlast aufgebaute Matrix, die wegen der veränderlichen Lastzustände von der Zeit „ t “ stochastisch abhängig ist.

$S(t, M)$ die Steifigkeitsmatrix, die die Steifigkeitsdaten der Fahrzeugkonstruktion und des Fördergutes enthält. Da während des bestimmungsmäßigen Fahrzeugeinsatzes Verschleiß, Lockerungen, Korrosion auftreten, können sich auch die Steifigkeitsdaten des Gestells zeitabhängig ändern.

$\epsilon(t)$ Beanspruchungen infolge des Fertigungs- und Zusammenbauverfahrens (die schon in der Konstruktion sind, wenn das Fahrzeug in Gebrauch genommen wird, und im allgemeinen keine wachsenden Funktionen der Zeit sind). Von diesen läßt sich z. B. die Verteilungsfunktion der infolge von Montageungenauigkeiten auftretenden statischen Beanspruchungen verhältnismäßig einfach berechnen [7].

$\alpha(t)$ die Wirkung der kinematischen Belastung, die sich beim Anhalten, bei längerem Warten des Fahrzeugs infolge der Unebenheiten der Straßenoberfläche ergibt (z. B. Torsion der Gestellkonstruktion).

Die in einem gegebenen Punkt der Gestellkonstruktion auftretende dynamische Beanspruchung ist ebenfalls eine Zufallsgröße, die von folgenden Einflussfaktoren entscheidend abhängig ist:

$$M_{\text{dyn}}(s) = F_2 \left\{ M(t), v(M, k, u, z), x(l), S(t, M), K(t, M), d \right\} \quad (2)$$

Dabei sind:

v die Geschwindigkeit, die von dem Belastungszustand „ M “, von der Straßenqualität „ k “, den Verkehrsverhältnissen „ u “ und der geometrischen Linienführung der Straße „ z “ abhängig ist.

$x(l)$ die an einer bestimmten Stelle l der Straße bemerkbare Ungleichmäßigkeit.

$K(t, M)$ die für das Fahrzeug kennzeichnende Dämpfungsmatrix, die sowohl von der Last als auch von der Zeit abhängig ist (Änderung der sich in der Last abzeichnenden Dämpfung, Änderung der Dämpfung der Gestellkonstruktion).

d zusätzliche Beanspruchung infolge von fahrdynamischen Wirkungen (Beschleunigung, Bremsen, Kurvenfahrt).

Für die Berechnung der dynamischen Beanspruchung muß man praktisch – mit Berücksichtigung des Zusammenhanges (2) – die folgende Bewegungsgleichung lösen:

$$M(t)\ddot{y} + K(t)\dot{y} + S(t)y - f(t), \quad (3)$$

wo $f(t)$ die Zeitfunktion des konkreten Erregungsvektors ist. In der Beziehung (3) sind die Koeffizienten zeitabhängig. Selbst die Differentialgleichung ist allgemein nichtlinear, darum ist die allgemeine Lösung der Aufgabe sehr verwickelt. Als dritte Schwierigkeit kommt noch dazu, daß der Erregungsvektor eigentlich eine stochastische Zeitfunktion ist.

Bei praktischen Berechnungen können wegen des großen Umfangs der Aufgabe sämtliche Einflußfaktoren nicht berücksichtigt werden. Um die Berechnung zu erleichtern, werden vereinfachende Annahmen gemacht:

- Berücksichtigt man die rechte und linke Seite des Fahrzeugs und das Vorder- und Hinterfahrwerk, kann ein Fahrzeug eigentlich vier Arten der eingehenden Erregung ausgesetzt sein. Es wird angenommen, daß das Hinterfahrwerk mit der Phasenverschiebung, die sich aus dem Achsenabstand und der Geschwindigkeit ergibt, dieselbe Erregung wie das Vorderfahrwerk erhält, und die Erregung auf der rechten und linken Fahrzeugseite gleich ist (Fall der orthotropisch realisierten Straße). In der Fachliteratur sind selbstverständlich auch andere Annahmen bezüglich des Erregereinflusses der Straße vorhanden [8];
- in erster Näherung wird das Fahrzeug als lineares System betrachtet. Diese Annahme ermöglicht die Anwendung des spektralen Verfahrens;
- anstatt $M(t)$ ist es möglich, $M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n$ als diskrete Realisationen in Betracht zu ziehen;
- anstatt $S(t)$ ist es möglich, ähnlicherweise $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n$ als diskrete, arbeitspunktlinearisierte Realisationen in Betracht zu ziehen;
- $K \neq K(t)$, d. h., die Dämpfung ist zeitinvariant;
- die fahrdynamischen Wirkungen bleiben bei dieser Untersuchung unberücksichtigt, weil deren Wirkung durch eine Zeitfunktionsstudie getrennt geklärt und zu der Beanspruchungsstatistik nachträglich hinzugesetzt werden kann;
- der in Wirklichkeit instationäre Betriebsprozeß wird als eine Gesamtheit stationärer, stochastischer Prozesse von der erforderlichen Länge betrachtet, die auch ergodisch sind;
- $\epsilon \neq \epsilon(t)$, d. h., daß ϵ keine Funktion der Betriebszeit ist, dementsprechend wird die dimetrische Verteilungsfunktion der Beanspruchung durch die sich aus Fertigung und Zusammenbau ergebenden, kinematischen Lasten der statischen Beanspruchung um einen konstanten Wert verschoben;
- es wird angenommen, daß bei festgelegter Geschwindigkeit, Straßenkategorie und festgelegtem Lastzustand die dynamische Beanspruchung einen Erwartungswert gleich Null hat und der Normalverteilung folgen wird [9];

- es wird angenommen, daß die Beanspruchung in einem beliebigen Punkte der Fahrzeugkonstruktion durch eine einzige Angabe eindeutig gekennzeichnet werden kann (z. B. bei selbsttragenden Autobussen die Diagonalstäbe durch Normal-, die Tür- und Fensterpfosten durch Biegebeanspruchung).

Unter Berücksichtigung dieser vereinfachenden Annahmen kann der Zusammenhang (1) in Form

$$M_{\text{stat}}(s) = F(M, \epsilon) \quad (4)$$

geschrieben werden.

Die Bewegungsgleichung (3) wird in eine einfachere, lineare Differentialgleichung übergehen (zeitweise mit konstanten Koeffizienten):

$$M_i \ddot{y} + K_i \dot{y} + S_i y = f(t) \quad (5)$$

wo $i = 1, \dots$, diskrete Realisationen sind.

In Kenntnis des Leistungsdichtespektrums $\Phi(\omega)$ des Erregungsvektors $f(t)$, ist es möglich – statt der Lösung der Differentialgleichung – eine äquivalente, einfache algebraische Aufgabe aufzustellen.

Den Zusammenhang (2) können wir auch in einfacherer Form aufschreiben:

$$M_{\text{dyn}}(s) = F_4 \{ M, v(M, k, u, z), \Phi_k(\omega), W(M, S, k, v) \} \quad (6)$$

Dabei bedeuten:

W die Übertragungsmatrix des Systems

$w_{i,j}(\omega)$ die bei der i -ten Geschwindigkeit und im j -ten Lastzustand auf ein gegebenes Bauteil bezogene Übertragungscharakteristik (die aus der Matrix W abgeleitet werden kann)

$\Phi_k(\omega)$ das zu der gegebenen Straßenkategorie gehörende Leistungsdichtespektrum.

Für praktische Berechnungen stehen weiterhin – von dem zu konstruierenden Fahrzeug unabhängig – zugängliche Daten zur Verfügung, die sich für weitere Berechnungen verwenden lassen.

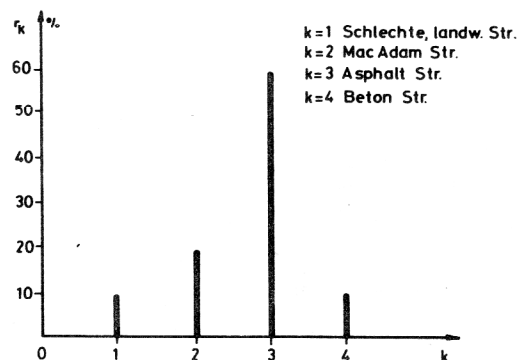


Bild 1 Häufigkeit der Straßenqualitäten in einem gegebenem Straßennetz

Solche sind:

- die relative Häufigkeit der einzelnen Straßenkategorien in einem gegebenen Verkehrsnetz, Daten, die von der zuständigen Stelle für Straßenwesen leicht zu erhalten sind; Bezeichnung: r_k (Bild 1);

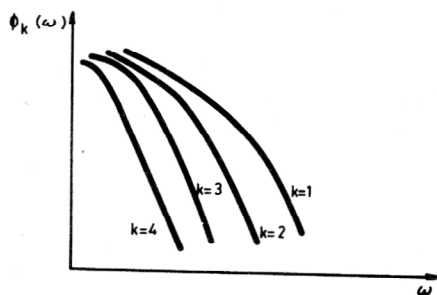


Bild 2
Charakter der zu verschiedenen Straßenqualitäten gehörenden Leistungsdichtespektren

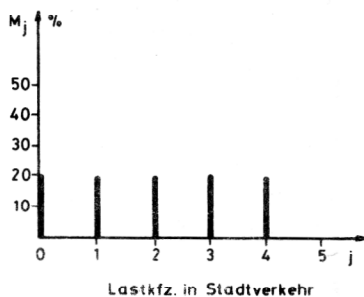
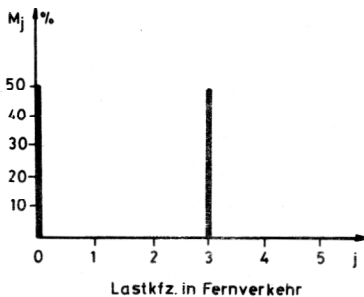
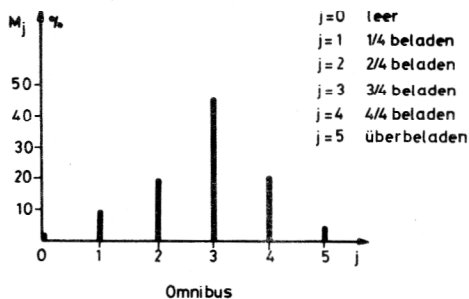


Bild 3
Häufigkeit des Lastzustands:
a) Autobus,
b) Langstrecken-Lkw für Gütertransport,
c) Lieferauto

- kennzeichnende Daten der einzelnen Straßenkategorien, und zwar entweder eine hinreichend lange Straßenprofilfunktion oder – im Falle einer spektralen Untersuchung – das Leistungsdichtespektrum $\Phi_k(\omega)$ der Straße. Statt des kontinuierlichen Spektrums der Straßenqualität werden nur Realisationen endlicher Zahl berücksichtigt [9] (Bild 2);

- die verteilungs- bzw. Dichtefunktion der Lastzustände wird mit Hilfe des Histogramms von Realisationen endlicher Zahl, das bereits mit der Länge des hinterlegten Weges gewichtet ist, berücksichtigt. Bezeichnung: M_j . (Die Statistik dieser Größe läßt sich z. B. aus Verkehrszählungen im Falle anderer Fahrzeuge mit dem gleichen Fassungsvermögen oder aus Frachtbriefen ermitteln.) (Bild 3a, b, c)

Um die Geschwindigkeitsverteilungsfunktion zu bestimmen, untersuchen wir die drei kennzeichnendsten Betriebsarten, welche die wichtigsten Betriebsarten von Nutzfahrzeugen umfassen. Bezeichnen wir die Betriebsarten durch m_1 , so bedeutet m_1 die zwischenstädtische Betriebsart, m_2 die städtische Betriebsart und m_3 die Betriebsart bei Bergfahrten. (Es lassen sich selbstverständlich auch andere Betriebsarten, wie z. B. Auf- und Abladung usw., vorstellen, diese werden jedoch in dieser Arbeit nicht behandelt.)

Die Geschwindigkeitsdichte in dem „l“-ten Betriebszustand sei ferner durch p_{jl} bezeichnet.

2.1. Zwischenstädtische Betriebsart

Im Überlandverkehr kann der durch das Fahrzeug zurückgelegte Weg größtenteils in lange Streckenabschnitte unterteilt werden, wo das Fahrzeug mit verschiedenen, jedoch konstanten Geschwindigkeiten fährt. Die transiente Wirkung einer etwaigen Geschwindigkeitsänderung klingt in sehr kurzer Zeit ab, so kann davon abgesehen werden. Die von dem Fahrer gewählte Geschwindigkeit wird in dieser Betriebsart

- dem momentanen Schwingungskomfort gemäß – entscheidend durch die Straßenkategorie bestimmt. (Diese Auffassung ist von den Überlegungen in bezug auf die Untersuchung in [10] grundsätzlich verschieden, da dort die Geschwindigkeitswahl von der kumulierten Ermüdung des Fahrers abhängig gemacht wird. Die beiden Überlegungen führen jedoch praktisch zu wenig abweichenden Folgen (in diesem Betriebszustand sei die Geschwindigkeitsverteilung p_{j1} für den Fall $l=1$ durch $p_{j1}(k)$ bezeichnet [Bild 4]).

2.2. Städtische Betriebsart

Im Stadtverkehr wird der Fahrer durch den Rhythmus des Verkehrs, im Falle von Autobussen durch die im Fahrplan festgelegten Haltestellen gezwungen, die in Vorschriften bestimmte oder eine diese unterschreitende Fahrgeschwindigkeit einzuhalten, und zwar von der Straßenqualität und -geometrie unabhängig. Die Geschwindigkeit wird von den subjektiven Empfindungen des Fahrers unabhängig gewählt, da wegen des Verkehrs

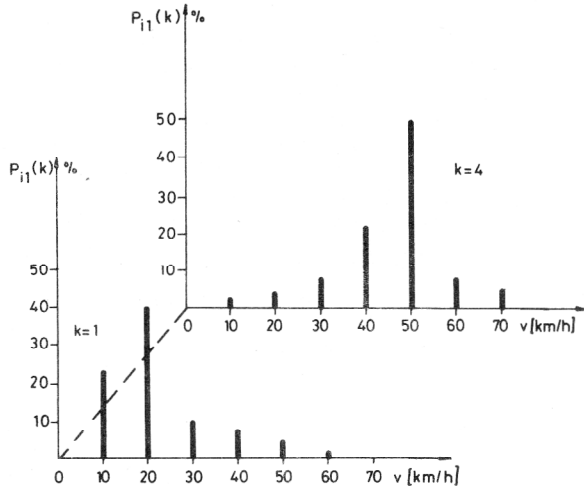


Bild 4
Histogramm der Geschwindigkeit in der zwischenstädtischen Betriebsart / Parameter: die Straßenkategorie /

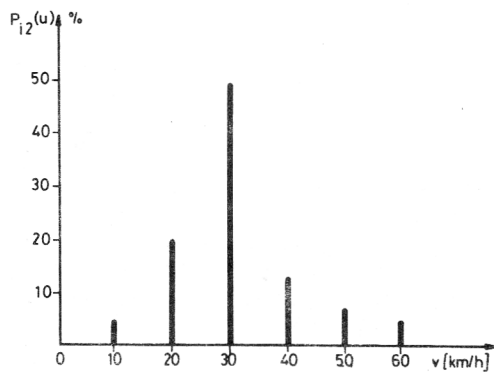


Bild 5
Histogramm der Geschwindigkeit in städtischer Betriebsart

das momentane Schwingungskomfortgefühl durch andere (biochemische usw.) Wirkungen in den Hintergrund gedrängt wird. Das bedeutet, daß festgestellt werden darf, daß in städtischer Betriebsart die Wahl der Geschwindigkeit entscheidend durch die Verkehrsverhältnisse bestimmt wird. In dieser Betriebsart sei durch $p_{i1} = p_{i2}(u)$ die relative Häufigkeit der Geschwindigkeit bezeichnet (Bild 5).

Im Stadtverkehr kann wegen der Signalregelung und anderer zwangsläufiger Halte die Geschwindigkeit nur auf verhältnismäßig kurzen Streckenabschnitten als konstant betrachtet werden. Unsere Untersuchungen zeigen, daß bei zufallsbestimmter Geschwindigkeit und zufallsbestimmtem Haltestellenabstand die Erregung durch die Straße auch weiterhin als schwach stationärer Prozeß betrachtet werden darf [11], und daß im Falle von mit konstanter Geschwindigkeit zurückgelegten Straßenabschnitten über 400 bis 500 m die dynamische Beanspruchung – trotz der anfänglichen Beschleunigung und des Bremsens am Ende des Streckenabschnitts – mit guter Näherung der Normalverteilung folgt [12].

2.3. Betriebsart bei Bergfahrt

Bei Bergfahrten ist der Fahrer durch aufeinanderfolgende Steigungen, Neigungen, Kurven gezwungen, mit einer viel geringeren Geschwindigkeit zu fahren, als es die Straßenkategorie und der Schwingungskomfort im Fahrzeug gestatten würden. Dazu kann noch eine zu beschränkte Motorleistung kommen, die in einem gewissen Lastzustand den Fahrer zwingen kann, mit geringerer Geschwindigkeit zu fahren. Angenommen, daß die zur Verfügung stehende Motorleistung hinreichend ist, wird die Wahl der Geschwindigkeit in diesem Betriebszustand entscheidend durch die geometrische Linienführung der Straße bestimmt. In diesem Betriebszustand sei die relative Häufigkeit durch $p_{i1} = p_{i3}(z)$ bezeichnet (Bild 6).

Es sei weiterhin:

D_{ijk} die Streuung der dynamischen Beanspruchung, die nach [9] mit dem Zusammenhang

$$D_{ijk}^2 = \int_0^{\infty} W_{ij}(\omega) \Phi_k(\omega) \cdot W_{ij}^*(\omega) d\omega \quad (7)$$

bestimmt wird, wo * das Zeichen der konjugierten Transponierten ist.

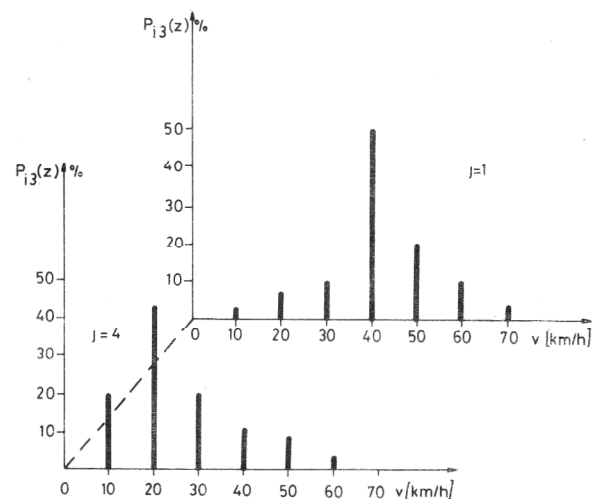


Bild 6
Histogramm der Geschwindigkeit bei Bergfahrt / Parameter: der Lastzustand /

Nach den obigen Ausführungen läßt sich die dimetrische Verteilungsfunktion der Beanspruchung in einem gegebenen Punkt des Fahrgestells mit der Koordinate s aus dem Zusammenhang

$$H(x, y) = \sum_{(y_j < y)} M_j \int_{-\infty}^x \sum_{i,k,l} \frac{m_l \cdot P_{il} \cdot r_k}{\sqrt{2\pi} D_{ijk}} \exp \cdot \left[\frac{-\xi^2}{2D_{ijk}^2} \right] d\xi \quad (8)$$

bestimmen.

Über die Beanspruchungsstatistik gibt auch die dimetrische (statische und dynamische) Verteilungsfunktion $\Pi(x, y)$ Aufschluß. Unter Anwendung derselben kann z. B. das Simulationsprogramm für Versuche an einem Bauteil zusammengestellt werden, man kann jedoch auch von der Beanspruchungsverteilungsfunktion auf eine andere kennzeichnende Statistik übergehen. Es ist bekannt, daß in den verschiedenen Schädigungstheorien (die in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt werden) die Durchschnittszahlen der verschiedenen Spannungsniveaus für die Bestimmung der – für uns wichtigen – Lebenserwartungen herangezogen werden.

Es seien durch

N_u der Erwartungswert der Durchschnittszahl je Straßeneinheit des Spannungsniveaus u bei gegebener Geschwindigkeit, Belastung und Straßenkategorie,

$\Phi_u(\omega)$ das Leistungsdichtespektrum der Beanspruchung, das aus $\Phi_k(\omega)$ eindeutig bestimmt werden kann,

bezeichnet.

Dann erhält man nach [13]:

$$N_u = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{\int_0^{\infty} \omega^2 \Phi_u(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} \Phi_u(\omega) d\omega} \right\}^{1/2} \cdot \exp \left\{ - \frac{u^2}{2 \int_0^{\infty} \Phi_u(\omega) d\omega} \right\} \quad (9)$$

In Kenntnis dieser Niveau-Durchschnittszahlen ist die prognostische Berechnung der Lebenserwartung bzw. die Zusammenstellung des Programms für Dauerversuche an Baugruppen durchführbar.

LITERATUR

- [1] Michelberger, P., Ferenczi, M.: Kocsiszekrenyek dinamikai modellezésének kérdesei. Jarművek, Mezőgazdasági Gepek, 11 (1976) S. 403.
- [2] Michelberger, P., Ferenczi, M., Agoston, A., Ujhelyi, Z.: Dynamische Berechnung von Wagenkästen. Periodica Polytechnica Transp. Eng. 4 (1976) S. 161.
- [3] Bosznai, A., Ferenczi, M., Michelberger, P.: Az utas mint csillapítóval rendelkező rugózott tömeg befolyása a karosszeria mozgasegyenletére. Jarművek, Mezőgazdasági Gepek, 9 (1977) S. 327.
- [4] Schmied, W.: Zur mechanischen Impedanz des Menschen. Automobilindustrie 3 (1976) S. 17.
- [5] Striffler, P.: Autoalkatrészek ellettartamanak számítása a varható üzemi igénybevetel alapján. VI. Autobusz szakértői Tanácskozás kiadványa. Budapest (1976) S. 188.
- [6] Michelberger, P., Keresztes, A.: Determination of the load distribution function of road vehicles in advance. FISITA XVII. Kongresszus. Budapest (1978) S. 1125.
- [7] Michelberger, P., Keresztes, A.: The estimation of stresses due to production inaccuracies by means of higher order moments. Acta Technica. 79 (1974) S. 63.
- [8] Robson, J.D.: Road surface description and vehicle response. Int. Journal of Vehicle Design. 1 (1979) S. 25.
- [9] Mitschke, M.: Fahrzeugschwingungen bei stochastischer Anregung. Archiv für Eisenbahntechnik. 26 (1971) S. 85.
- [10] Janosdeak, E., Michelberger, P., Keresztes, A.: Allgemeine Csetzmäßigkeiten der statistiken der Fahrzeugbeanspruchungen und deren Vorausberechnung während der Entwicklungsphase. FISITA XVIII. Kongresszus. Hamburg (1980) S. 171.
- [11] Farkas, M., Fritz, J., Michelberger, P.: On the effect of stochastic road profiles on vehicles traveling at varying speed. Acta Technica. Hung. 91 (1981) (im Druck).
- [12] Michelberger, P., Ilsvai, L., Peter, T., Keresztes, A.: Normality analysis of dynamic stresses in buses depending on stop lengths. Periodica Polytechnica (1981) (im Druck).
- [13] Rice, S.O.: Mathematical analysis of random noise. Bell System Journal 24 (1945) S. 46.

Anschrift der Verfasser:
Technische Universität
Budapest