

Zur Grundlegende Wechselwirkung zwischen Straßenunebenheiten und Fahrzeugbewegungen*

Akira KAWAMURA**

Abstract

Road roughness is a very important consideration in evaluating the condition of a given roadway, as it affects vehicles or vehicle passengers, e. g. riding quality, safety, noise emission, and operating cost factors. Nevertheless, there are a number of unclarified points regarding a correlation between them. Under these circumstances, the fundamental evaluation method on interaction between road roughness and vehicle dynamics synthesizing the standards used in the related fields is proposed by use of the simulation of a vehicle model.

Vorwort

Die Bewertung von Straßenunebenheiten wird von verschiedenen Gesichtspunkten her untersucht: Fahrkomfort, Befahrbarkeit und Bemessung von Straßen. Deren Wechselbeziehung ist allerdings bisher noch nicht klar dargestellt worden. Hauptziel der Forschungsarbeit ist vor diesem Hintergrund, auf die Wechselwirkung zwischen Straßenunebenheiten und der Fahrzeugbewegung unter Berücksichtigung des Systems Fahrer-Fahrzeug-Fahrbahn zusammenfassend hinzuweisen. Als ein Hinweis zur Klärung dieser Wechselwirkung kann die Fahrzeugbewegungssimulationsmethode mit Computerprogrammen benutzt werden.

1. Einleitung

Von vielen Wissenschaftlern wurde vorgeschlagen das Verkehrssystem von heute in drei Nebensysteme zu gliedern: 1) Fahrer-Fahrzeugssystem, 2) Umweltsystem und 3) Informationssystem. Wenn man diese Nebensysteme auf den Straßenverkehr beschränkt, gleicht das Fahrzeug dem Auto und die Umwelt dem Zustand von Straßen.

Darüber hinaus ist das Verständnis der Wechselbeziehungen zwischen den Menschen, den Fahrzeugen und den Straßen nötig, um Verkehrsunfälle zu verhüten. Daher ist, für die Lösung der gegenwärtigen Straßenverkehrsprobleme, eine zusammenfassende Überlegung über diese verschiedenen Elemente wichtig. Die Beurteilungsstandards von Straßenunebenheiten sind jedoch mannigfaltig. Deshalb sind heute noch viele Probleme

* 1989~1990年にかけてハノーバー大学において実施した文部省在外研究報告に基づく。

** 北見工業大学土木開発工学科

hinsichtlich der Wechselbeziehungen und den Beurteilungsstandards ungelöst.

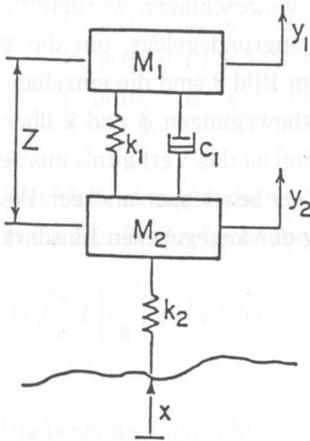
Ziel dieser Arbeit ist es, grundlegende Daten für die Lösung des Problems zu präsentieren. Für den Fortgang meiner Untersuchungen ist eine wichtige Quelle, Straßenunebenheiten zu vermessen. Für diese Vermessung gibt es viele verschiedene Methoden^{1),2)}. Die Vermessungsmethode hinsichtlich der Dynamik der Fahrzeuge durch die Straßenunebenheiten, die für das System Fahrer-Fahrzeug-Fahrbahn zu überlegen nützlich sind, soll in der vorliegenden Arbeit behandelt werden. Dieser Forschungsprozeß wird wie folgt dargestellt werden: 1) Wechselbeziehungsanalyse hinsichtlich des Zustand von Straßen (d. h. Befahrbarkeit und Fahrkomfort usw.), 2) Vorschlag für eine zusammenfassende Bewertungsmethode.

2. Grundlegende Fahrzeugdynamik

Die Fahrzeugmodelle, die für die Behandlung der Fahrzeugdynamik, also in diesem Fall der durch Straßenunebenheiten angeregten Schwingungen von Fahrzeugen gebraucht werden, sind seit langem genau erforscht. Die Modelle werden auf Fahrkomfort, die Fahrsicherheit und die Last der Fahrzeugbewegung angewandt. Die Modelle werden in der vorliegenden Arbeit unter Berücksichtigung folgender Punkte gewählt:

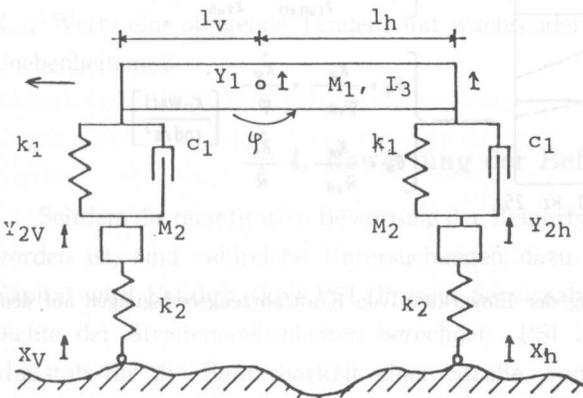
- Schwingungersatzsystem bestehend aus der Aufbaumasse, der Radmasse, der Feder, dem Dämpfer und der Reifenfeder,
- Behandlung der Beschleunigung im verhältnismäßig niedrigem Frequenzbereich (zwischen Null und etwa 25 Hz),
- Niedrige Freiheitsgradmodelle für das Verständnis fundamentaler Eigenschaften von Fahrzeugsschwingungen,
- Lineare Feder- und Dämpferkennungen,
- Brems-, Antriebs- und Seitenkräfte treten nicht auf.

Die auf die oben beschriebene Weise bestimmten, typischen Modelle (d. h. Viertelfahrzeugmodell³⁾ und Vierradfahrzeugmodell⁴⁾) sind in den Bilder 1 und 2 dargestellt. Zur Berechnung der Fahrzeugbewegung mit den Modellen muß man die Methoden der numerischen Berechnung über Computerprogramme verwenden. Aber die Rechnung ist mühevoll und die Programmbeschreibung lang und Kompliziert (vor allem über die höheren Freiheitsgradmodelle). In der vorliegenden Arbeit soll das ACSL (Advanced Continuous Simulation Language⁵⁾) Programmpaket im RRZN (Regionales Rechenzentrum für Niedersachsen) verwandt werden. ACSL ist ein Programmpaket für die Simulation kontinuierlicher Systeme, insbesondere für die automatische Integration von Differentialgleichungen. Die Integration erfolgt entlang einer Zeit oder einer Raumkoordinate, je nach Wahl des Anwenders. Der Benutzer kann seine Simulationsprobleme mit Funktionsunterprogramm einfacher lösen und ACSL für Frequenzanalysen anwenden. Außerdem gibt es graphische Darstellungsfunktionen.



M ₁	Aufbaumasse	303 kg
M ₂	Radmasse	41 kg
K ₁	Feder	45,4 kN/m
K ₂	Reifenfeder	228,2 kN/m
c ₁	Dämpfer	1,9 kNs/m
Y ₁	Aufbaubewegung	
Y ₂	Radbewegung	
X	Unebenheitshöhe	

Bild 1: Viertelfahrzeugmodell



I ₃	Trägheitsmoment um die Querachse von dem Aufbau	87,60 kg·m/s ²
l _v	Abstand Aufbauschwerpunkt-Vorderachse	1,4 m
l _h	Abstand Aufbauschwerpunkt-Hinterachse	1,5 m
X _v	Unebenheitshöhe am Vorderrad	
X _h	Unebenheitshöhe am Hinterrad	

Bild 2: Fahrzeugmodell der Nickschwingung

3. Bewertung des Fahrkomforts

Im weiteren Sinne beinhaltet der Fahrkomfort verschiedene Elemente (z. B. die Größe des Fahrzeugs, die Klimaanlage, das Licht, die Farbe usw.). Zur Bewertung des Fahrkomforts hinsichtlich der Auswirkungen von Straßenunebenheiten auf die Dynamik der Fahrzeug wird der Schwingungskomfort meistens rechnerisch beurteilt. Als Richtlinien für die Bewertung der Schwingstärke sind bisher schon mehrere vorgeschlagen worden^{6),7)}. In der vorliegenden Arbeit, wurde die VDI-Richtlinie 2057⁷⁾ zugrundegelegt, um die verschiedenen Fahrzeugschwingungen quantitativ zu beurteilen. Im Bild 3 sind die einzelnen Bewertungsfunktionen für Sitz-, Hand-, Fuß-, Nick- und Wankbewegungen ϕ und κ über der Erregerfrequenz dargestellt. Die einzelne Bewertungsfunktion ist das Verhältnis aus der bewerteten Schwingstärke, in der VDI-Richtlinie 2057 als K-Wert bezeichnet und der Beschleunigung. Zulässige Beschleunigungen werden unter Beachtung der angegebenen Einschränkungen und mit Hilfe von Bewertungsfunktionen.

$$B = K / \hat{z} \tag{1}$$

ermittelt⁷⁾.

worin

B Bewertungsfunktionen

K K-Wert

\hat{z} Amplitudenwert der Schwingbeschleunigung

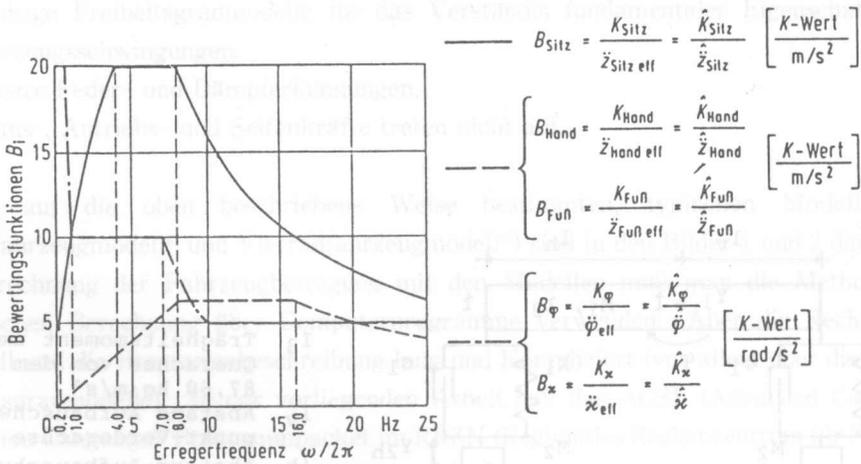


Bild 3: Bewertungsfunktionen zur Beurteilung der Einwirkung von Kraftfahrzeugschwingungen auf den Menschen⁷⁾

Diese Bewertungsfunktionen sind wie die bewertete Schwingstärke abhängig von der Erregerfrequenz. Für den hier betrachteten Frequenzbereich von $\omega/2\pi = 1$ bis 20 Hz gelten die in Tabelle 1 enthaltenen Angaben.

Tabelle 1: Hier verwendete frequenzabhängige Bewertungsfunktionen für Sitz- Mensch- sowie Hand-Arm bzw. Fuß-Bein-System im Frequenzbereich 1 bis 20 Hz

Frequenzbereich	Bewertungsfunktion	
	B_{Sitz}	$B_{\text{Hand}} - B_{\text{Fuß}}$
$1 \text{ Hz} < \omega/2\pi < 4 \text{ Hz}$	$4\sqrt{\omega}$	0.125 ω
$4 \text{ Hz} < \omega/2\pi < 5 \text{ Hz}$	20	
$5 \text{ Hz} < \omega/2\pi < 8 \text{ Hz}$	0	6.3
$8 \text{ Hz} < \omega/2\pi < 16 \text{ Hz}$	0	
$16 \text{ Hz} < \omega/2\pi < 20 \text{ Hz}$	0	628/ ω

Für die Wechselwirkung zwischen dem K-Wert und der Schwingbeschleunigung am Fahrzeug durch die Straßenunebenheiten besteht folgende wichtige Beziehung⁸⁾:

$$K^2 = \int_0^{\infty} B^2 \left[\frac{z}{\hat{h}} \right]^2 \phi_h(\omega) d\omega \quad (2)$$

worin

- \hat{h} Unebenheitsamplitude
- $\phi_h(\omega)$ Spektrale Dichte für Unebenheiten
- ω Erregerkreisfrequenz.

Das heißt, daß man die Wirkung von Straßenunebenheiten auf den Fahrkomfort lösen kann, wenn man die Vergrößerungsfunktion (d. h. \hat{z}/\hat{h}) mit den Fahrzeugmodellen berechnet. Die Bilder 4 und 5 zeigen Beispiele von Vergrößerungsfunktionen, die von den ACSL-Programmen für die Fahrzeugmodelle berechnet werden. Die Ergebnisse der Berechnung werden am Beispiel für die K_{Sitz} -Werte vom Viertelfahrzeugmodell im Bild 6 gezeigt (Für Einzelheiten des subjektivurteils über die Ebenheit (GUT, MITTEL und SCHLECHT) sei auf Tabelle 2 verwiesen). Wie man auf einen Blick aus diesem Bild ersehen kann, zeigen die K_{Sitz} -Werte eine steigende Tendenz mit wachsender Fahrgeschwindigkeit und wachsendem Unebenheitsmaß.

4. Bewertung der Befahrbarkeit

Seitdem die quantitative Bewertung der Befahrbarkeit von Carey und Irick⁹⁾ vorgeschlagen worden ist, sind zahlreiche Untersuchungen dazu veröffentlicht worden^{10),11)}. In diesem Kapitel wird Befahrbarkeit PSI (Present Serviceability Index⁷⁾ von der oberen spektralen Dichte der Straßenunebenheiten berechnet. PSI ist ein bekannter Index, den man als Maßstab für die Befahrbarkeit einer Straße, vom Standpunkt des Benutzers (d. h. des Fahrers) aus gesehen betrachten kann. Deshalb ist PSI zur Zeit ein praktischer Index im Vergleich mit anderen ähnlichen Indexen. Stenschke¹²⁾ hat die Streuung der Längsprofilneigung in der Fahrspur (d. h. Slope Variance SV) durch die Relation

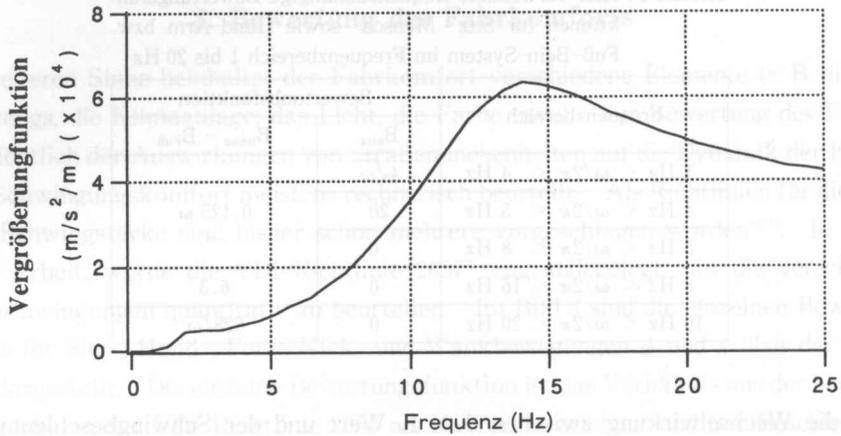


Bild 4: Vergrößerungsfunktion der Beschleunigung für das Aufbau (Viertelfahrzeugmodell)

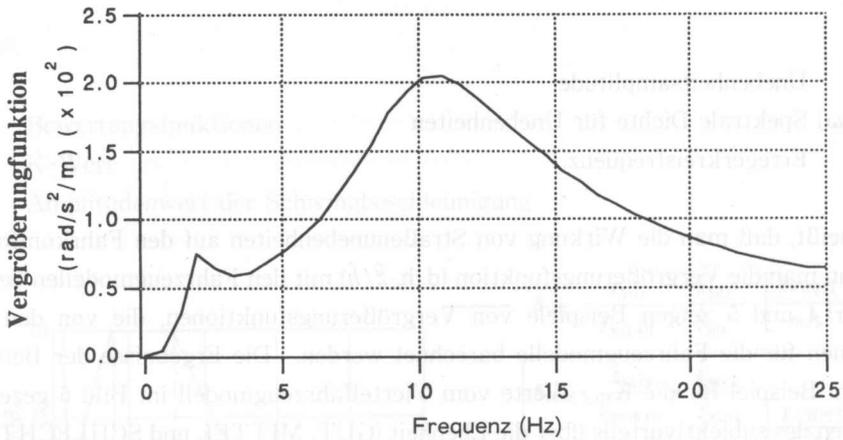


Bild 5: Vergrößerungsfunktion der Nickbeschleunigung (Nickschwingmodell)

Tabelle 2: Vorschläge für die Klassifizierung von Fahrbahnunebenheiten (Stand 1982)⁸⁾

Klassifizierung	Eigenheit (subjektiv)	DIN-FANAK (C8)	ISO (TC 108)
		$\Phi_h(\Omega_0)$ in cm^3 ($\Omega_0 = 1\text{m}^{-1}$; $\omega = 2$ (nach (6.5)) untere Grenze ... Mittelwert ... obere Grenze	
A		—	$\dots 0,25 \dots < 0,5$
B	sehr gut	$\dots \underline{1} \dots < 2$	$0,5 \dots \underline{1} \dots < 2$
C	gut	$2 \dots$	$\underline{4}$ $\dots < 8$
D	mittel	$8 \dots$	$\underline{16}$ $\dots < 32$
E	schlecht	$32 \dots$	$\underline{64}$ $\dots < 128$
F	sehr schlecht	> 128	$128 \dots \underline{256} \dots 512$
G		—	$512 \dots \underline{1024} \dots 2048$
H		—	> 2048

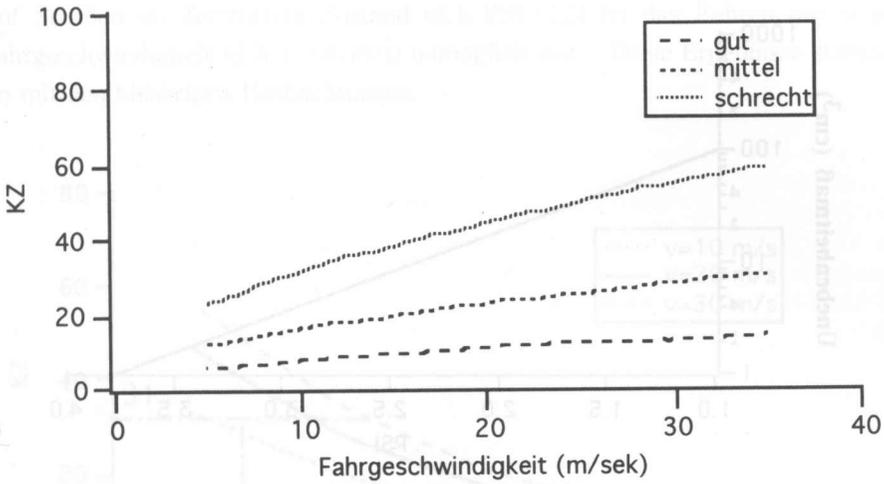


Bild 6: K_{SITZ} -Werte von Viertelfahrzeugmodell

$$SV = \int_0^\infty F^2(\lambda) A(\lambda) d\lambda \tag{3}$$

mit

$$F(\lambda) = (2/\lambda) (\sin(\pi/\lambda) - (1/L)\sin(\pi l/\lambda)) \tag{4}$$

$F(\lambda)$ Übertragungsfunktion des AASHO-Längsprofilneigungsmessers

$l = 2,23$ m

$L = 7,77$ m

λ Wellenlänge

$A(\lambda)$ Energiedichte der Unebenheiten(vgl. 23)

berechnet. PSI wird mit SV durch

$$PSI = 3.27 - 1.37(\log SV - 0.78) \tag{5}$$

einfach dargestellt trotzdem in dem originalen PSI-Wert mehrere Elemente enthalten sind¹³⁾. Außerdem ist die Energiedichte $A(\lambda)$ die spektrale Dichte der Unebenheiten in Abhängigkeit von der Unebenheitswellenlänge und kann grundsätzlich als eine Modifikation der spektralen Dichte der Unebenheiten $\Phi_h(\Omega)$ angesprochen werden. Aus dieser Relation kann man den Wert der spektralen Dichte $\Phi_h(\Omega)$ in den Befahrbarkeitsbeiwert PSI umwandeln. Die auf die oben beschriebene Weise erhaltenen, berechneten Ergebnisse sind in Bild 7 dargestellt.

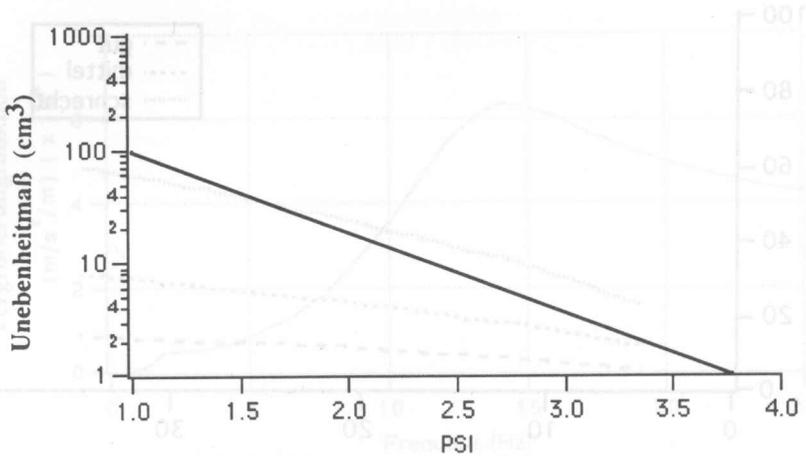


Bild 7: Beziehung zwischen PSI und Unebenheiten

5. Versuch zur Wechselbeziehungsanalyse hinsichtlich Straßenebenheiten

Auf Grund der obigen Ergebnisse wird der Umriß der systematischen Bewertungsmethode von Straßenebenheiten weiter erläutert. Um diese Methode zu untersuchen, werden die zweckmäßigen Indexe unter Berücksichtigung folgender Punkte gewählt :

- Größerordnungen der Indexe auf dieselbe Bewertung zu übertragen,
- Wechselbeziehungen der Indexe zu erklären,
- die Elemente des Systems Fahrer-Fahrzeug-Fahrbahn zu verbinden.

Die gewählten Indexe werden wie folgt benannt.

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| 1) PSI | Befahrbarkeitsbewert |
| 2) K -Wert (KZ) | Bewertete Schwingstärke |
| 3) $\Phi_h (\Omega_0)$ | Unebenheitsmaß |

Die Beziehung zwischen K -Wert und $\Phi_h (\Omega_0)$ ist auf Grund der Ergebnisse der Fahrzeugbewegungssimulation in Kap. 4 erklärt worden, und nach den Ausführungen in Kap. 5 ist klar, daß man einen linearen Zusammenhang zwischen PSI und $\log (\Phi_h (\Omega_0))$ erhält. Als nächstes wurde die Beziehung zwischen PSI und K -Wert ermittelt. Wenn man dies in einer graphischen Darstellung ausdrückt, erhält man die in Bild 8 zusammengestellte Ergebnisse. Wie dieses zeigt, können einige interessante Ergebnisse hinsichtlich dieser Beziehung gezogen werden :

- Auf Grund des Warnwertes aus der bewerteten Schwingbeanspruchung von Fahrzeuginsassen (d. h. $K_{sitz} = 31$, Prädikat mit "sehr stark spürbar" sollte die Fahrgeschwindigkeit bei $PSI = 2,0$ auf weniger als 10 m/s reduziert werden.

- Auf Straßen im Zerstörtem Zustand (d. h. $PSI=1,5$) ist das Fahren mit allgemeiner Fahrgeschwindigkeit (d. h. $v > 10$ m/s) unmöglich usw. Diese Ergebnisse stimmen überein mit den bisherigen Beobachtungen.

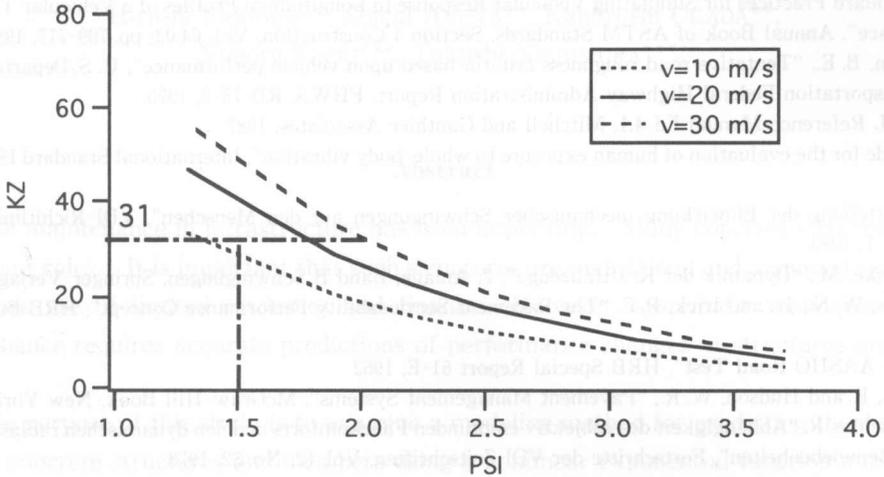


Bild 8 : Wechselbeziehungen von Indexen hinsichtlich Unebenheiten

6. Schlußwort

Ich habe hier nichts weiter getan, als ein ein Teil der Ergebnisse in diesem Institut unternommenen Untersuchungen. Außerdem, sind

- Simulation der Fahrzeugbewegungen beim LKW,
 - Bewertung des Fahrkomforts nach Standard-ISO,
 - dynamisches Verhalten der Fahrbahn
- untersucht worden.

Die Berichte dieser Ergebnisse sollen bei anderer Gelegenheit veröffentlicht werden.

Wie bereits in der Einleitung gesagt wurde, bleiben heute noch viele ungelöste Probleme mit den Wechselbeziehungen von jedem Beurteilungsstandard hinsichtlich Straßenunebenheiten. Auch weiterhin sind Untersuchungen zu diesem Thema sehr erwünscht. Zu diesem Punkt sollte das Ergebnis in Kap. 7 beachtet werden.

Abschließend danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Gerlach, Frau Dr.-Ing. Edeltaud Straube und Herrn Dr.-Ing. Hartmut Beckedahl für die Anregung zu diesen Untersuchungen. Ebenso möchte ich für das Schreiben bei Frau Hitomi Kawamura bedanken.

Literaturverzeichnis

- 1) Hveem, F. N. "Devices for recording and evaluating pavement roughness", HRB Bull. No. 264, 1960
- 2) Wambold, J. C., Henry, J. J., "High-speed noncontact surface texture and its significance", Proc. of ASTM/ASLE Joint Lubrications Conference, Atlanta, 1985
- 3) "Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of a Vehicular Traveled Surface", Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Vol. 04.03, pp. 709-717, 1995
- 4) Quinn, B. E., "Tentative road roughness criteria based upon vehicle performance", U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration Report, FHWA-RD-75-3, 1975
- 5) ACSL Reference Manual Ed. 4.1, Mitchell and Gauthier Associates, 1987
- 6) "Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration", International Standard ISO 2631, 1978
- 7) "Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen", VDI-Richtlinie 2057, Blatt 1, 1983
- 8) Mithske, M., "Dynamik der Kraftfahrzeuge", 2. Anlage, Band B Schwingungen, Springer-Verlag, 1984
- 9) Carey, W. N., Jr. and Irick, P. E. "The Pavement Serviceability Performance Concept", HRB Bull., No. 250
- 10) "The AASHO Road Test", HRB Special Report 61-E, 1962
- 11) Haas, R. and Hudson, W. R., "Pavement Management Systems", McGraw-Hill Book, New York, 1978
- 12) Stenschke, R. "Abhängigkeit des subjektiv empfunden Fahrkomforts und den dynamischen radlasten von Straßenebenenheiten", Fortschritte der VDI Zeitschriften, Vol. 12, No. 32, 1978
- 13) Molenaar, A. A. A., Sweere, G. T. "Road roughness: Its evaluation and effect on riding comfort and pavement life", Transportation Research Record, No. 836, pp. 41-49, 1982