

Stephan Schal*, Wolfgang Hugemann**

Fahrbahnschwellen – verkehrsberuhigend oder verkehrsgefährdend?

Zusammenfassung

Die Problematik von Fahrbahnschwellen wird im vorliegenden Aufsatz unter fahrdynamischen Aspekten untersucht. Hierzu wird ein einfaches mathematisches Fahrzeuersatzmodell für eine Computersimulation vorgestellt und anschließend durch reale Fahrversuche verifiziert. Es zeigt sich, daß bei Schwellen, deren Länge in Fahrtrichtung geringer ist als der Radstand der sie überquerenden Fahrzeuge, es in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit zu einer ungünstigen Überlagerung von Karosserie-Nickbewegung und Radeinfederungen kommen kann.

Summary

In this paper the problem of speed-ramps (»sleeping policeman«) will be analyzed taking the dynamic aspects of vehicle movement into account. A simple mathematic simulation vehicle-model is presented and afterwards verified by real driving-experiments. It turns out that ramps which length in driving direction is shorter than the vehicles wheelbase can lead to a critical dynamic minimization of vehicle-ground-clearance.

1 Einleitung

Zur Durchsetzung von Geschwindigkeitsbeschränkungen insbesondere in Wohngebieten, vor Schulen, Altersheimen und Krankenhäusern gelten Fahrbahnschwellen, Aufpflasterungen oder ähnliches als probates Mittel. Dabei handelt es sich in der Regel um gezielt angelegte, kurze Erhöhungen des Fahrbahnniveaus, die den Fahrzeugführer zwingen sollen, seine Fahrgeschwindigkeit zu reduzieren, um eine Beschädigung seines Fahrzeugs zu vermeiden. Dennoch kommt es trotz angepaßter Fahrgeschwindigkeit immer wieder zum »Aufsetzen« von Fahrzeugen auf solchen künstlichen Fahrbahnhindernissen. Dieses führt oftmals zu einem langwierigen Rechtsstreit zwischen Fahrzeughalter und Kommune über die Regulierung des am Fahrzeug entstandenen Schadens. Für die Gestaltung von Fahrbahnschwellen und Aufpflasterungen existieren keine verbindlichen Richtlinien. Einzig die EAE [1] (Empfehlung für die Anlage von Erschließungsstraßen) enthält einen Bauvorschlag. Häufig verlassen Städte und Gemeinde sich beim Bau von Schwellen jedoch auf eigene, ihren Bedürfnissen und Möglichkeit angepaßte Entwürfe, die gegebenenfalls durch subjektive Fahrversuche auf ihre Wirksamkeit und Sicherheit hin untersucht werden. Neben bautechnischem Wissen wäre bei den zuständigen Tiefbauämtern dafür jedoch auch eine umfangreiche Kenntnis der Fahrdynamik von Fahrzeugen erforderlich. Daß dieser Aspekt oft nicht ausreichend berücksichtigt wird, zeigt die große Zahl der trotz Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit an solchen Fahrbahnhindernissen beschädigten Fahrzeuge. Im folgenden sollen daher die fahrdynamischen Aspekte des Überfahrens einer Fahrbahnschwelle mit einem Pkw näher untersucht werden.

2 Fahrzeuersatzmodell

Für die theoretische Beschreibung der Aubaubewegung beim Überqueren einer Fahrbahnebenheit wird ein einspuriges mechanisches Ersatzmodell gemäß Bild 1 verwendet. Der Fahrzeugaufbau mit der Masse m und dem Nickträgheitsmoment Θ ist über masselose Feder-Dämpfer-Systeme an die ebenfalls masselos angenommenen Fahrzeugachsen gekoppelt. Da die Eigenfrequenzen der Aufbaubewegungen etwa

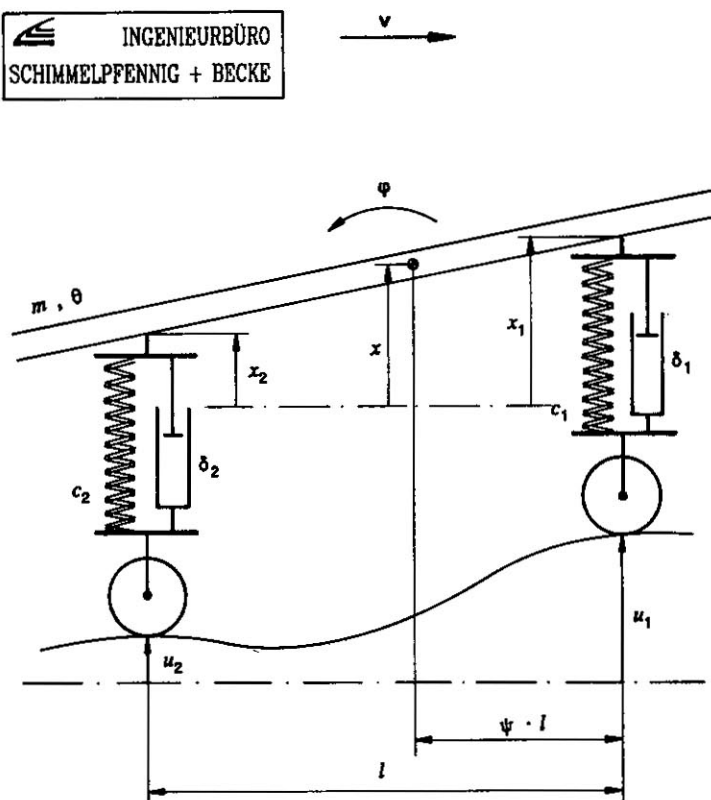
INGENIEURBÜRO
SCHIMMELPFENNIG + BECKE

Bild 1 Fahrzeuersatzmodell

Fig. 1 Mechanically simplified vehicle model

um den Faktor 10 niedriger liegen als die Eigenfrequenz der auf den Reifen schwingenden Achsen [2], folgen die Achsen bei geringen Geschwindigkeiten dem Höhenprofil des Fahrbahnuntergrundes, während der Aufbau auf den Feder-Dämpfer-Systemen zu schwingen vermag. Die Reifenfederung wird im folgenden ebenfalls vernachlässigt; die inelastischen Räder folgen exakt dem Höhenprofil des Fahrbahnuntergrundes, ein Abheben der Räder ist also ausgeschlossen.

Es bezeichnet

- l den Radstand des Fahrzeugs
- ψ den relativen Abstand des Schwerpunktes von der Vorderachse, bezogen auf den Radstand
- u_1, u_2 die Höhe der Radaufstandspunkte, bezogen auf das normale Fahrbahnniveau
- x_1, x_2 die Auslenkungen des Fahrzeugaufbaus an der Vorder- und Hinterachse, bezogen auf die Ruhelage.

Der Ansatz der Kräftegleichgewichte liefert dann die Beziehung

$$m \cdot \ddot{x} = c_1 (u_1 - x_1) + c_2 (u_2 - x_2) + \delta_1 (\dot{u}_1 - \dot{x}_1) + \delta_2 (\dot{u}_2 - \dot{x}_2) \quad (1)$$

Analog folgt aus dem Momentengleichgewicht

$$\frac{\Theta \cdot \ddot{\phi}}{l} = \psi c_1 (u_1 - x_1) - (1 - \psi) c_2 (u_2 - x_2) + \psi \delta_1 (\dot{u}_1 - \dot{x}_1) - (1 - \psi) \delta_2 (\dot{u}_2 - \dot{x}_2) \quad (2)$$

Zusammen mit den geometrischen Beziehungen

$$x = x_1 + \psi (x_2 - x_1) \quad (3)$$

$$\phi = \arctan \frac{x_1 - x_2}{l} \approx \frac{x_1 - x_2}{l} \quad (4)$$

und der Definition

$$\tau = \sqrt{\frac{\Theta}{m}} \cdot l \quad (5)$$

*Dipl.-Ing. Stephan Schal, Sachverständiger im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstr. 101, 4400 Münster-Wolbeck

**Dipl.-Ing. Wolfgang Hugemann, Sachverständiger im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstr. 101, 4400 Münster-Wolbeck

ergibt sich damit folgendes Differentialgleichungssystem zur Beschreibung der Aufbaubewegung

$$(1 - \psi) \ddot{x}_1 + 2 d_1 \omega_{0_1} (\dot{x}_1 - \dot{u}_1) + \omega_{0_1}^2 (x_1 - u_1) + \psi \ddot{x}_2 + 2 d_2 \omega_{0_2} (\dot{x}_2 - \dot{u}_2) + \omega_{0_2}^2 (x_2 - u_2) = 0 \quad (6)$$

und

$$\frac{\tau^2}{\psi} \ddot{x}_1 + 2 d_1 \omega_{0_1} (\dot{x}_1 - \dot{u}_1) + \omega_{0_1}^2 (x_1 - u_1) - \left\{ \frac{\tau^2}{(1 - \psi)} \ddot{x}_2 + 2 d_2 \omega_{0_2} (\dot{x}_2 - \dot{u}_2) + \omega_{0_2}^2 (x_2 - u_2) \right\} = 0 \quad (7)$$

In der Schreibweise der Gln. (6) und (7) wurden die gängigen Abkürzungen

$$\omega_{0_i} = \sqrt{\frac{c_i}{m}} \quad (8)$$

und

$$d_i = \frac{\delta_i}{2 m \omega_{0_i}} \quad (9)$$

verwendet. Bei den Gln. (6) und (7) handelt es sich um zwei gekoppelte lineare inhomogene Differentialgleichungen zweiter Ordnung, die in Abhängigkeit von den beiden Eingangssignalen u_1 und u_2 zu lösen sind.

Der zeitliche Verlauf des Eingangssignals $u_1(t)$ ist von der Geometrie der Fahrbahnnunebenheit $u_1(s)$ und der Fahrgeschwindigkeit v abhängig

$$u_1(t) = \frac{1}{v} u_1(s) \quad (10)$$

Der Verlauf des Eingangssignals $u_2(t)$ ist bis auf einen durch den Radstand l verursachten zeitlichen Versatz mit dem Verlauf des Eingangssignals $u_1(t)$ identisch

$$u_2(t) = u_1\left(t - \frac{l}{v}\right) \quad (11)$$

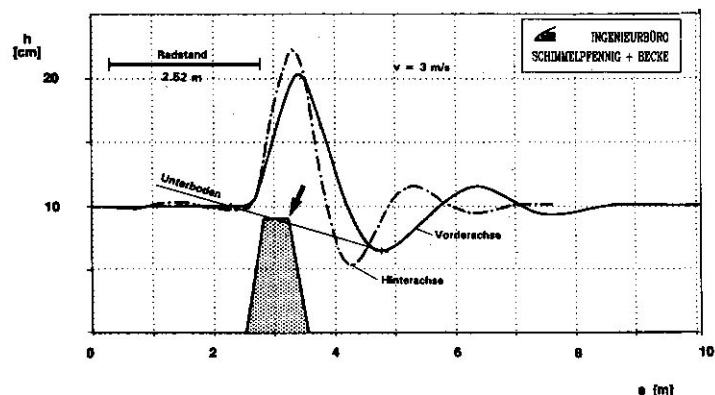


Bild 2 Aufbaubewegung an der Vorder- und Hinterachse beim Überfahren der Schwelle mit $v = 3 \text{ m/s}$

Fig. 2 Bodywork movement at front and rear axle while passing the ramp with $v = 3 \text{ m/s}$

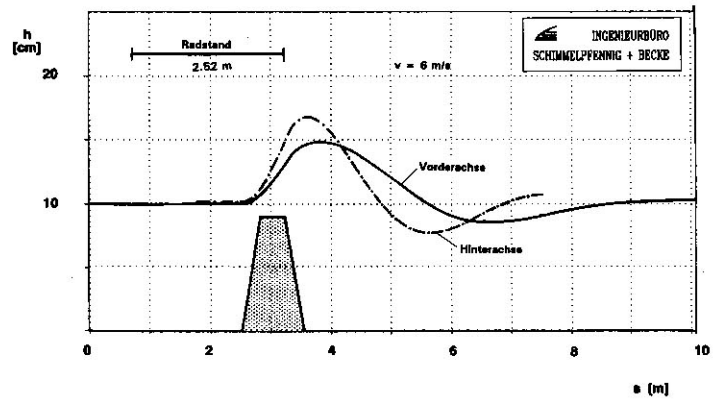


Bild 3 Aufbaubewegung an Vorder- und Hinterachse beim Überfahren der Schwelle mit $v = 6 \text{ m/s}$

Fig. 3 Bodywork movement at front and rear axle while passing the ramp with $v = 6 \text{ m/s}$

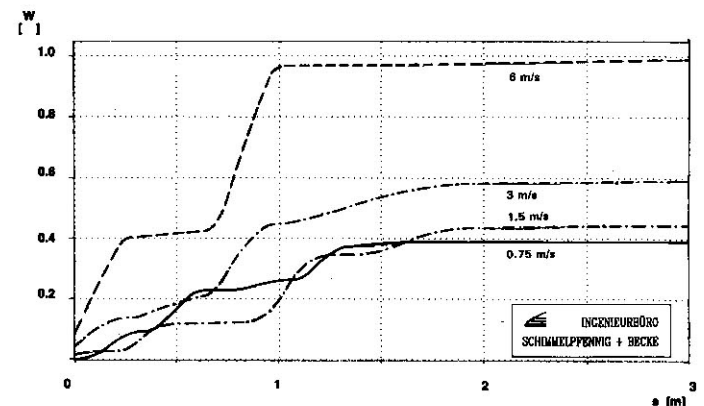


Bild 4 Reibarbeit an der Vorderachse in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit
Fig. 4 Friction work at the front axle as a function of driving speed

3 Simulation der Aufbaubewegung

Obwohl der homogene Teil des Differentialgleichungssystems Gln.(6) und (7) durchaus analytisch lösbar ist, ist eine Lösung des inhomogenen Gleichungssystems für beliebige Eingangssignale praktisch nur noch numerisch möglich.

Für die Simulation wurde die Kontur der für die Versuche verwendeten Schwelle Bild 5 mathematisch nachgebildet. In Anlehnung an die in [3] angegebenen Daten eines älteren Fahrzeugtyps wurde der Simulation folgender Parametersatz zugrundegelegt

$$\begin{aligned} \psi &= 0.42 & \tau &= 0.47 \\ \omega_{0_1} &= 5.0 \text{ s}^{-1} & \omega_{0_2} &= 6.1 \text{ s}^{-1} \\ d_1 &= 0.256 & d_2 &= 0.210 \end{aligned}$$

Die Bilder 2 und 3 zeigen das Ergebnis der Simulationsläufe für zwei verschiedene Fahrgeschwindigkeiten. Aufgetragen ist jeweils die Aufbaubewegung an Vorder- und Hinterachse über der zurückgelegten Wegstrecke, $x_1(s)$ und $x_2(s)$. Da die Variablen x_1 und x_2 lediglich die Auslenkung des Fahrzeugaufbaus aus der Ruhelage bezeichnen, ist die Ruhelage des Fahrzeugs, die Bodenfreiheit, frei wählbar. Sie wurde mit 10 cm angesetzt. Bei den Darstellungen ist zu beachten, daß der Maßstab in vertikaler Richtung deutlich größer ist als in horizontaler Richtung. Die Darstellungen zeigen deutlich, daß die Aufbaubewegung in Höhe der jeweiligen Achse dem Verlauf der Fahrbahnnunebenheit stark verzögert folgt. So befindet sich in Bild 2 zu dem Zeitpunkt, da das Fahrzeug an Vorderachse maximal weit eintaucht, die entsprechende Achse bereits mehr als 1 m hinter dem Ende der Erhebung. Zur

gleichen Zeit befindet sich die Hinterachse des Fahrzeugs noch vor der Fahrbahnebenheit. Verbindet man die korrespondierenden Lagerungspunkte des Aufbaus an Vorder- und Hinterachse, so stellt man fest, daß der Unterboden des Fahrzeugs zu diesem Zeitpunkt auf dem Hindernis aufsetzt. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten hingegen, vgl. Bild 3, erfolgen deutlich geringere Aufbaubewegungen. Die höhere Fahrgeschwindigkeit hat auch zur Folge, daß sich die Vorderachse zum Zeitpunkt des tiefsten Eintauchens deutlich weiter, nämlich etwa 3 m, hinter dem Hindernis befindet. Zu diesem Zeitpunkt hat die Hinterachse das Hindernis bereits ebenfalls überquert.

Es ergibt sich die auf den ersten Blick kuriose Feststellung, daß das Hindernis mit höherer Fahrgeschwindigkeit problemlos zu meistern ist, während der Fahrzeugboden bei niedrigerer Fahrgeschwindigkeit auf dem Hindernis aufsetzt.

Dieser Effekt ist darin begründet, daß bei niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten die Geschwindigkeit der Relativbewegung zwischen Achsen und Fahrzeugaufbau beim Überfahren des Hindernisses abnimmt. Da diese Relativgeschwindigkeit den Energieverzehr in den Stoßdämpfern bewirkt, wird bei höheren Fahrgeschwindigkeiten die Aufbaubewegung entsprechend stärker gedämpft.

Für die geleistete Reibarbeit W ergibt sich

$$W = \int \delta |\dot{x}_{rel}| dx_{rel} \quad (12)$$

mit

$$x_{rel} = x - u \quad (13)$$

und damit

$$W = \delta \int \dot{x}_{rel}^2 dt. \quad (14)$$

In Bild 4 ist die Reibarbeit an der Vorderachse über dem Fahrweg aufgetragen. Die geleistete Reibarbeit wurde derart normiert, daß sich bei einer Fahrgeschwindigkeit von 6 m/s der stationäre Endwert »1« ergibt. Die Kurvenschar ist mit der Fahrzeuggeschwindigkeit parametrisiert. Insbesondere bei der Verdoppelung der Fahrgeschwindigkeit von 3 m/s auf 6 m/s ist ein deutlicher Anstieg der Reibarbeit zu verzeichnen. Bei niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten ergibt sich hingegen ein deutlich schwächerer Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit und geleisteter Reibarbeit.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, daß das Fahrzeugmodell Gln. (6) und (7) bei sehr geringen Fahrgeschwindigkeiten die Aufbaubewegungen nicht realistisch nachbildet, da es die bei langsamen Relativbewegungen zwischen Achsen und Aufbau erheblichen Anteile der trockenen Reibung und Haftreibung unberücksichtigt läßt.

4 Fahrversuche

Um die Ergebnisse der Computersimulation zu verifizieren, wurden auf dem Versuchsgelände des Ingenieurbüros Schimmelpfennig + Becke eine Vielzahl von Versuchen mit verschiedensten Pkw durchgeführt. Hierfür wurde eine Versuchsfahrbahnschwelle, Bild 5, angefertigt, die eine Höhe von 9 bzw. 7 cm besaß und in Fahrtrichtung ca. 100 cm lang war. Der Spurweite der Versuchsfahrzeuge angepaßt waren zwei Überfahrten vorhanden, die jeweils aus einer 30 cm langen Auffahrrampe, einem 40 cm langen Plateau und einer wiederum 30 cm langen Abfahrrampe bestanden. Der Zwischenraum zwischen den beiden Überfahrten wurde mit einer verformungsweichen Masse gefüllt, wodurch die Möglichkeit bestand zu lokalisieren, welches Fahrzeugteil beim Überfahren wo aufgesetzt hatte, ohne den Fahrzeugunterboden zu beschädigen.

Grundsätzlich zeigten bei den Versuchen alle Fahrzeuggattungen (Kleinwagen, Mittel-Klasse, Sportlimousine, Reiselimousine) ein ähnliches Fahrverhalten. Beim Überfahren der 9 cm-Schwelle mit Schrittgeschwindigkeit kam es bei keinem der mit einer Person besetzten Fahrzeuge zu einem Aufsetzen des Bodenbereichs. Bereits bei einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit auf 10 km/h berührte der vordere Auspufftopf der tiefergelegten Sportlimousine die Schwelle. Die restlichen, alle mit größerer Bodenfreiheit ausgestatteten Fahrzeuge, hatte in diesem Geschwindigkeitsbereich keine Probleme. Nach Erhöhung der

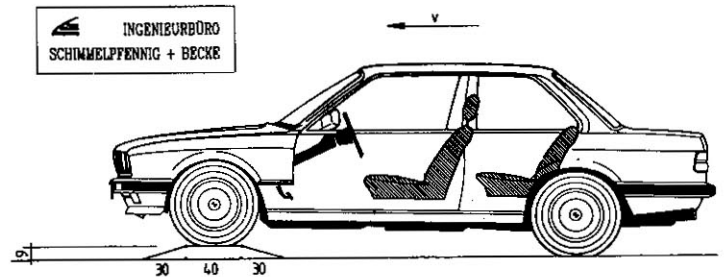


Bild 5 Versuchsschwelle
Fig. 5 Test ramp

Fahrgeschwindigkeit auf 20 km/h und mehr kam es dann wieder bei keinem Fahrzeug zu einem Kontakt des Bodenbereichs mit der Versuchsschwelle.

Die bei der tiefergelegten Sportlimousine schon im unbeladenen Zustand zu erkennende Tendenz, daß eine Art kritische Geschwindigkeit beim Überfahren einer Fahrbahnschwelle existiert, zeigte sich im beladenen Zustand (5 Personen im Fahrzeug) dann auch bei den anderen Fahrzeugen. Während die schwere Reiselimousine in diesem Beladungszustand nahezu bei jeder Geschwindigkeit aufsetzte, zeigten die anderen Fahrzeuge ein kritisches Verhalten (Aufsetzen) in einem Geschwindigkeitsbereich oberhalb der Schrittgeschwindigkeit und deutlich unter 30 km/h.

Auch nach Herabsetzung der Schwellenhöhe auf 7 cm, kam es bei den meisten Fahrzeugen in voll beladenem Zustand zu einem Kontakt zwischen Schwelle und Unterbodenbereich, wenn sie die Schwelle im oben genannten kritischen Geschwindigkeitsbereich überfuhren. Der Hauptkontaktbereich war bei allen Fahrzeugen die Auspuffanlage.

5 Schlußfolgerungen

Es kann also festgestellt werden, daß für das Überfahren von vergleichsweise kurzen Fahrbahnschwellen eine Art »Resonanzgeschwindigkeit« existiert. Diese ist abhängig von der Form – insbesondere der Länge – der Schwelle in Fahrtrichtung und den Fahrzeugparametern, wie Federungs-/Dämpfungs-Eigenschaften und Radstand. Der zeitliche Ablauf des Überfahrvorgangs ergibt sich dann wie folgt:

Beim Auffahren auf die Schwelle werden die Vorderräder angehoben, sie federn ein. Nach einer kurzen Verzugszeit beginnt auch die Fahrzeugkarosserie, sich anzuheben. Aufgrund des Nickschwingverhaltens eines Pkw folgt der Aufwärtsbewegung der Karosseriefront zwangsläufig eine Abwärtsschwingung. Fällt diese aufgrund der Fahrgeschwindigkeit mit dem Zeitpunkt zusammen, in dem die Vorderräder gerade wieder von der Schwelle heruntergefahren sind und die Hinterräder sich noch vor der Schwelle befinden, kommt es zu einer maximalen Einfederung (Eintauchen) der Fahrzeugfront, so daß sich ein Minimum an Bodenfreiheit ergibt, welches bei ungünstigen Randbedingungen (Schwellenhöhe, Fahrzeugbeladung) zum Aufsetzen führen kann.

Bei niedrigeren oder höheren Geschwindigkeiten als der »Resonanzgeschwindigkeit« kommt es nicht zu einer solch ungünstigen Überlagerung von Karosserie-Nickbewegung und Radeinfederung, so daß die kritische Minimierung der Bodenfreiheit ausbleibt. Es ist also bei kurzen Fahrbahnschwellen (Länge kleiner als Fahrzeuggradstand) möglich, daß man sie im Schritt-Tempo und mit 30 km/h gefahrlos überfahren kann, während das Fahrzeug beim Überfahren der Schwelle mit Geschwindigkeiten von 10 bis 15 km/h aufsetzt. Da solch ein in der Formgebung der Schwelle begründeter Effekt von einem normalen Fahrzeugführer sicherlich nicht erwartet wird, ist es erforderlich, daß bei der Gestaltung von Fahrbahnschwellen die Fahrdynamik der Fahrzeuge stärkere Berücksichtigung findet, um trotz ausreichender Wirksamkeit der Schwelle die Gefährdung der Verkehrsteilnehmer zu minimieren.

Literaturnachweis

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Empfehlungen für die Anlage von Erschließungsstraßen (EAE 85)/Anhang 4: Schleppkurven für Bemessungsfahrzeuge. Selbstverlag, Köln 1985
- [2] Mitschke M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge/Schwingungen. Springer-Verlag, Berlin 1984
- [3] Reimpell J.: Fahrwerktechnik/Stoßdämpfer. Vogel-Verlag, Würzburg 1983