

Unfallrekonstruktion

Näherungsgleichung für die Berechnung von Fahrwerksbelastung durch Schlaglöcher

von Professor Karl-Heinz Schimmelpfennig und Dipl.-Ing. Tobias Uphoff, Münster*

174

VRR 5/2011



* Prof. KARL-HEINZ SCHIMMELPFENNIG ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Kfz-Technik und Straßenverkehrsunfälle sowie Unfälle mit mechanisch-technischem Gerät im eigenen Ingenieurbüro in Münster.

Dipl.-Ing. TOBIAS UPHOFF ist Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle im Büro Schimmelpfennig und Becke in Münster.

Weniger Geld in den Kassen der Gemeinden und der harte Winter sorgen dafür, dass Schlaglöcher häufig nicht oder erst spät beseitigt werden. Gemeinden reagieren mit Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Warnschildern, um Gefahren zu verringern und auf diese aufmerksam zu machen.

Die Folge sind aber auch vermehrt Klagen auf Schadensersatz aufgrund entstandener Schäden. Bricht aber eine Achse beim Durchfahren eines 8 cm tiefen Schlagloches mit einer Fahrgeschwindigkeit von 10, 20, 30, 40 oder 50 km/h?

Diesbezüglich wurden zahlreiche Akten gefüllt, die jedoch lediglich offene Fragen hinterlassen. Aus der Literatur der Unfallrekonstruktion geht zu diesem Thema kaum etwas hervor. Es bietet sich daher an, eine verständliche Näherungslösung zu finden, um in Zukunft einfacher Aussagen über entstandene Beschädigungen treffen zu können.

I. Entstehung von Schlaglöchern

Bei Schlaglöchern handelt es sich um einen bestimmten **Typ** von **Straßenschäden**. „Schlagloch“ ist die umgangssprachliche Bezeichnung für Ausbrüche im Straßenbelag, welche hauptsächlich im Winter entstehen. Zu einem Ausbruch des Straßenbelags kommt es, wenn Wasser in eine defekte Fahrbahnoberfläche eindringen kann. Friert dieses Wasser dann ein, vergrößert sich sein Volumen um etwa 10 %. Da dieses zusätzliche Volumen jedoch nicht zur Verfügung steht, bewirkt es, dass der Riss weiter aufgedrückt wird und sich vergrößert. In den vergrößerten Riss kann neues Wasser nachfließen und der Prozess beginnt von Neuem. Mit zunehmender Vergrößerung der Beschädigung nimmt die Geschwindigkeit mit der sich die Schlaglöcher vergrößern zu. Mit zunehmender Größe treten des Weiteren auch mechanische Belastungen durch das Durchfahren mit Kfz auf (www.wikipedia.de).

II. Verkehrstechnische Auswirkungen von Schlaglöchern

Kleine Beschädigungen der Fahrbahnoberfläche werden von Kfz problemlos ertragen und stellen daher zunächst kein direktes Risiko für den Verkehr dar. Mit zunehmender Größe vor allem aber Tiefe steigt die Gefahr von Schäden an Reifen, Felgen, Fahrwerk und auch Lenkung.

Bei der **Durchfahrt** eines Schlagloches kann hauptsächlich zwischen **zwei Belastungen** unterschieden werden (s. Abb. 1).

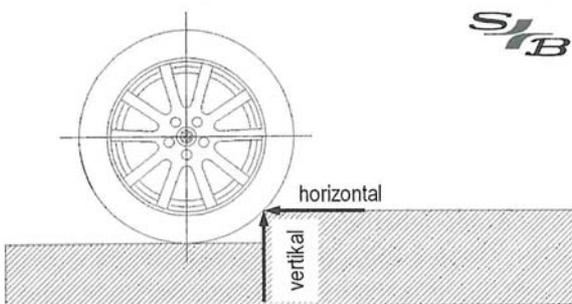


Abb. 1: Belastungen bei der Schlaglochdurchfahrt

Zum einen wird das Rad in **vertikaler Richtung** belastet, da der Höhenunterschied überwunden werden muss. Hierbei wird das Feder-/Dämpfersystem gestaucht. Daher kommt es hier hauptsächlich zu einer

Belastung des Feder-/Dämpfersystems. Zum anderen kommt es zu einer Belastung in **horizontaler Richtung**. Dies hat besonders eine Belastung der Fahrwerksaufhängung und, bei entsprechender Schrägstellung des Rads, der Lenkung zur Folge. In beiden Fällen steigt jedoch die Belastung erst dann stark an und führt zu Schäden, wenn die Schlaglochtiefe größer ist als die Höhe des Reifenquerschnitts, da es dann zu einem Durchschlagen, abhängig von der Geschwindigkeit, bis auf die Felge kommen kann und somit eine direkte Einleitung der Kräfte ins Fahrwerk erfolgt. Felgen und Reifen werden durch horizontale sowie vertikale Kräfte gleichermaßen belastet und können bei Schlaglochdurchfahrten am Leichtesten beschädigt werden.

III. Belastungsgrößen bei der Durchfahrt eines Schlaglochs

Die **Höhe** der **Belastung** hängt im Wesentlichen von der gefahrenen Geschwindigkeit und der Tiefe des Schlaglochs ab (s. Abb. 2). Jedoch ist nicht jedes Rad gleich empfindlich gegen Schlaglöcher.

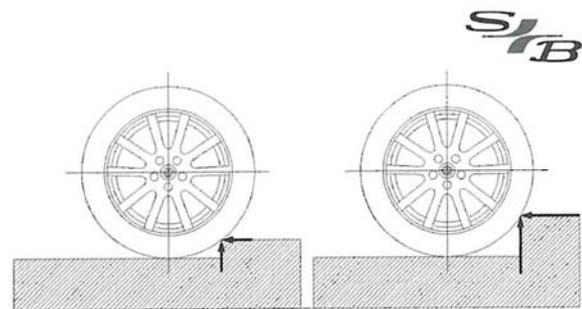


Abb. 2: Belastungsänderung mit zunehmender Schlaglochtiefe

Bei Niederquerschnittreifen bspw., die nur einen geringen Reifenquerschnittshöhe aufweisen, besteht auch schon bei geringen Schlaglochtiefen das Risiko eines Aufsetzens mit der Felge. Ein weiterer Einflussfaktor ist der Reifendruck: Ein nur unzureichend aufgepumpter Reifen wird Schlaglöcher besser wegdämpfen als ein stark aufgepumpter Reifen. Allerdings kann bei einem nur wenig aufgepumpten Reifen die Kante des Schlaglochs schneller bis auf die Felge durchschlagen. Damit kommt dem Reifen eine Dämpfungswirkung zu, die so lange anhält, bis die Schlaglochtiefe einen Felgenkontakt zur Folge hat.

Wie bereits weiter oben erläutert, steigt die Belastung erst dann signifikant an, wenn das Schlagloch eine Tiefe erreicht, bei der es zu einer Berührung mit der Felge kommen kann. Darunter treten vor allem in horizontaler Richtung nur geringe Belastungen auf, da das Rad die Schlaglochkante „hinauf rollt“.

Damit hat die Schlaglochtiefe vor allem dann eine Auswirkung auf das Fahrwerk, wenn der Querschnitt des Reifens geringer ist als die Höhe der Kante, die bewältigt werden muss. Außerdem hängt die Stärke der Belastung von der Höhe der Geschwindigkeit ab.

IV. Sonderfälle beim Durchfahren von Schlaglöchern

1. Gebremstes Rad

Bei der Durchfahrt eines Schlaglochs mit gebremstem Rad handelt es sich um einen **Sonderfall**. Denn hier ist es dem Rad nicht möglich, die Kante des Schlaglochs „hochzurollen“, sondern es wird hinaufgeschoben. Hierdurch erhöht sich die Belastung in vertikaler Richtung und es kommt schneller zu einem Durchschlagen auf die Felge.

2. Eingeschlagene Lenkung

Bei eingeschlagener Lenkung **steigt** vor allem die **Belastung** für die **Lenkung**.

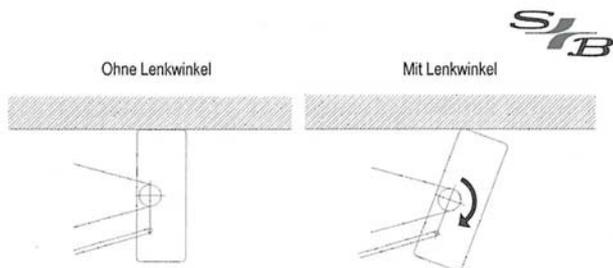


Abb. 3: Belastung Lenkgetriebe

Aufgrund der Schrägstellung des Rads entsteht eine Hebelwirkung, die eine Drehbewegung um die Lenkachse erzeugt. Durch diese Drehbewegung kommt es zu einer Kräfteinleitung in das Lenkgetriebe, welches hierdurch Schaden nehmen kann. Ähnliche Zustände herrschen bei der Überwindung von Bordsteinen in einem spitzen Winkel. Hierzu sind schon häufiger Versuche durchgeführt worden. Bei diesem Sonderfall kommt es auch schneller zu einer Felgenberührung mit dem Bordstein, da sich die Kraft nicht auf die gesamte Reifenbreite verteilen kann (s. Abb. 3).

V. Mathematische Beschreibung der Belastung

Da es in der Erstellung von Gerichtsgutachten besonders wichtig ist, schnell und kostengünstig Aussagen über die Möglichkeit von Beschädigungen und deren Schwere zu treffen, soll an dieser Stelle ein **Näherungsansatz** entwickelt werden, mit dem sich das vorliegende Problem beschreiben lässt. Wie bei Straßenverkehrsunfällen üblich, lässt sich auch hier die

Belastung anhand der auftretenden Beschleunigung beschreiben. Hierfür muss man sich zunächst Gedanken darüber machen, welche Größen in eine solche Überlegung einfließen müssen.

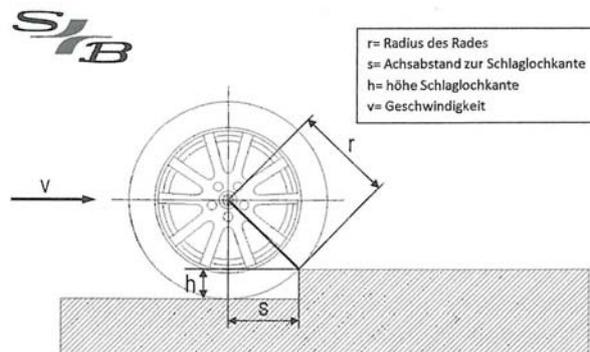


Abb. 4: Berechnungsgrößen für die Näherungsgleichung

Abb. 4 gibt die entscheidenden Einflussgrößen wieder, die für eine Berechnung der Beschleunigung am Rad in vertikaler Richtung wichtig sind. Hieraus lässt sich die in unten dargestellte Formel herleiten. Auf eine genaue Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet.

$$a_z = \frac{2}{2 \cdot r - h} \cdot v^2$$

Diese Formel gilt jedoch nur für den Fall, dass der Reifen beim Überfahren der Schlaglochkante nicht nachgibt, es sich also praktisch um einen beliebig harten Reifen handelt. Jedoch hat der Reifen, wie bereits oben beschrieben, einen entscheidenden Einfluss beim Durchfahren eines Schlaglochs. Daher muss eine Möglichkeit gefunden werden, diese Variable in die Formel mit einzubeziehen. Sinnvoll geschieht dies durch Einführung eines zusätzlichen Faktors k, der das Dämpfungsverhalten des Reifens beschreibt:

$$a_z = k \cdot \frac{2}{2 \cdot r - h} \cdot v^2$$

Schon jetzt lässt sich sagen, wovon dieser abhängig ist. Hierfür muss man nur folgende Überlegung anstellen: Damit sich eine maximale Beschleunigung am Rad einstellen kann, d.h. ein großer k-Faktor erreicht wird, müsste der Reifen besonders hart sein und dürfte nicht nachgeben, da sonst eine Dämpfung erzeugt würde. Ein solcher Faktor würde natürlich aufgrund des federnden Reifens in der Realität nie erreicht. Hohe k-Werte erreicht man bei Pkw Reifen dann, wenn diese mit hohem Druck aufgepumpt werden und dadurch die Härte zunimmt. Denn gegenteiligen Effekt erreicht man, wenn man mit nur niedrigem Luftdruck fährt.

Um diesen Faktor ermitteln zu können, wurde eine Messreihe durchgeführt, um anhand der Ergebnisse diesen zu bestimmen.

VI. Versuch

1. Aufbau und Durchführung

Um einen k-Faktor für die Berechnung zu finden und um die Vorgänge beim Überfahren einer Schlaglochkante zu verdeutlichen, wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Hierfür stand ein Audi A6 zur Verfügung mit Reifen der Dimension 195/65 R15, mit dem über ein 8 cm hohes Hindernis gefahren wurde (s. Abb. 5).



Abb. 5: Versuchsaufbau

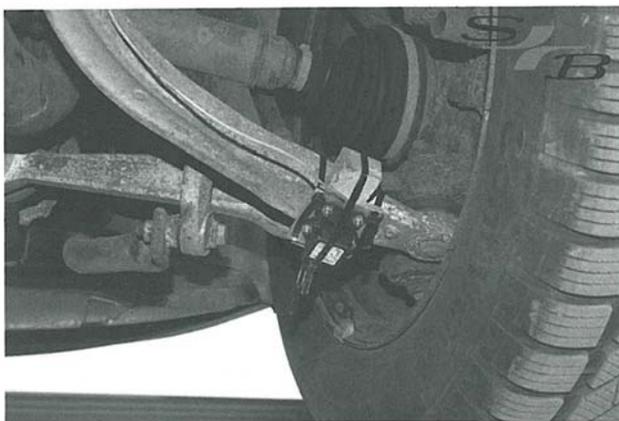


Abb. 6: Beschleunigungssensor

Um das Verhalten des Reifens beim Überfahren des Hindernisses zu dokumentieren, erfolgte eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Vorderrads beim Aufahren auf die „Schlaglochkante“. Des Weiteren wurde eine Beschleunigungsmessung in unmittelbarer Nähe zum rechten Vorderrad (s. Abb. 6) sowie im Beifahrerfußraum durchgeführt.

Am Rad erfolgte die Messwertaufnahme mithilfe eines Beschleunigungssensors, der in allen drei Achsrichtungen aufzeichnet, wobei für diesen Fall vorrangig die vertikalen Messwerte von Interesse sind. Hieraus soll im Anschluss der für die Näherungsformel notwendige k-Faktor abgeleitet werden, um später die Belastung beim Durchfahren eines Schlaglochs berechnen zu können. Vor Beginn der Versuche erfolgte zunächst noch eine Achsvermessung, um hinterher überprüfen zu können, ob es zu einer Beschädigung des Fahrwerks gekommen sein kann.

Um die Belastungen abzubilden, die innerorts beim Durchfahren eines Schlaglochs auftreten, wurden die Versuche in einem Geschwindigkeitsbereich von etwa 10 km/h – 60 km/h durchgeführt.

2. Ergebnisse und Ausblick

Wie bereits zu erwarten war, erfolgte die **hauptsächliche** Abfederung der Belastung durch den **Reifen**, da dieser einen größeren Querschnitt aufwies als die Höhe des zu überfahrenen Hindernisses. In der Bildfolge ist jedoch zu sehen, dass der Reifen eine starke Verformung erfuhr (s. Abb. 7). Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Reifen hierdurch beschädigt wurde; von außen konnte jedoch kein Schaden festgestellt werden.

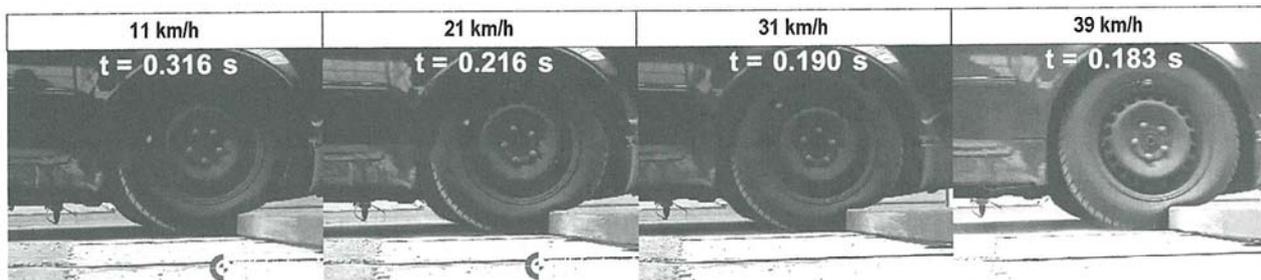


Abb. 7: Reifenverformung bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Aus der Bilderserie ist zu sehen, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die Verformung des Reifens zunimmt. Jedoch ist auch zu sehen, dass es nicht zu einer Felgenberührung kommt, solange der Querschnitt des Reifens größer ist als die Höhe der Schlaglochkante. Damit kann schon jetzt gesagt werden, dass eine Geschwindigkeitsbegrenzung als Sofortmaßnahme auf Straßen mit vielen Schlaglöchern sinnvoll ist, um Reifenschäden zu vermeiden.

Nach Auswertung der Beschleunigungswerte am Rad zeigte sich, dass die Werte vor allem im hohen Geschwindigkeitsbereich deutlich hinter denen zurückblieben, die sich aus obiger Formel ergeben, wenn kein Korrekturfaktor berücksichtigt wird. Dies entsprach genau den Erwartungen, wie sie oben beschrieben wurden (s. Tab. 1).

Geschwindigkeit [km/h]	11	21	31	39	58
berechnete Beschleunigung [m/s]	36	130	285	451	998
gemessene Beschleunigung [m/s]	47	75	100	123	215

Tab. 1: Beschleunigungswerte am Rad

Bei der **Auswertung** der Ergebnisse zeigte sich, dass sich für den k-Faktor eine von der Geschwindigkeit abhängige Gleichung herleiten ließ, mit der sich der Umrechnungsfaktor beschreiben lässt. Eingesetzt in die hergeleitete Gleichung, lässt sich so auf einfache Art die Belastung in vertikaler Richtung bestimmen.

$$a_z = \left(\frac{11,5}{v - 0,5} \right) \cdot \frac{2}{2 \cdot r - h} \cdot v^2$$

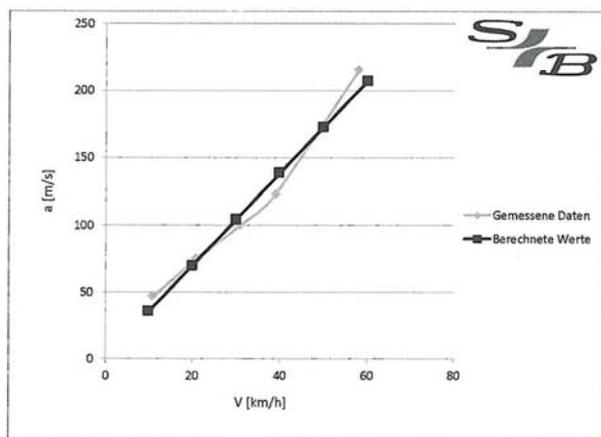


Abb. 8: Belastungsdiagramm

Auf Basis dieser Formel lässt sich nun für jeden Geschwindigkeitsbereich die Beschleunigung des Vorderrads in vertikaler Richtung errechnen und in ein Diagramm auftragen (Abb. 8). Wie sich im Diagramm zeigt, konnte eine hohe Übereinstimmung zwischen Messwerten und Rechenwerten erreicht werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der angegebene

k-Faktor vom Reifendruck und der Reifendimension abhängig ist. Eine direkte Übertragung der Formel auf andere Reifentypen ist somit nur begrenzt möglich. Des Weiteren lässt sich diese Formel nur anwenden, wenn es nicht zu einem Kontakt zwischen Felge und Schlaglochkante kommt, da dann der k-Faktor seine Gültigkeit verliert.

Bleibt abschließend noch zu überprüfen, ob es zu einer Beschädigung des Fahrwerks gekommen ist. Hierfür wurden neben der Achsvermessung vor Beginn der Versuche zwei weitere Vermessungen jeweils nach Überfahren des Hindernisses mit 39 km/h und 58 km/h durchgeführt. Mit dem Ergebnis, dass sich keine Veränderung an der Achsgeometrie ergab, die außerhalb der Messtoleranz gelegen hat. Dies bedeutet, dass eine Beschädigung der Achsaufhängung praktisch ausgeschlossen werden kann.

3. Zusammenfassung

Die Untersuchung hat ergeben, dass es möglich ist, die Belastungen an der Achsaufhängung eines Pkw in vertikaler Richtung zu berechnen. Die hierfür bereitgestellte Formel ist abhängig vom Reifendruck und dessen Dimension, jedoch ist sie eine wertvolle Hilfe, entsprechende Abschätzungen durchführen zu können. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass das Durchfahren eines Schlaglochs für die Achsaufhängung erst dann problematisch wird, wenn die Querschnittshöhe des Reifens geringer ist als die Höhe der Schlaglochkante. Anderenfalls kann eine Beschädigung praktisch ausgeschlossen werden, da es nicht zu einem Felgenkontakt kommen kann.