

Unfallrekonstruktion

Aufdeckung von Unfallmanipulationen mithilfe von Fahrzeug-Eigenfrequenzen

von Dr. Manfred Becke, Dipl.-Ing. Sebastian Werner und Dr. Tim Hoyer, Münster*

Anhand von 69 Messergebnissen, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, konnte die Wankeigenfrequenz von normalen Pkw in einem sehr engen Bereich zwischen 1,8 und 2,2 Hz bestimmt werden. Das Ergebnis einer Geschwindigkeitsberechnung aus einer pauschalen Wankeigenfrequenz von 1,9 Hz ist somit relativ unempfindlich gegenüber der Wankeigenfrequenz des spezifischen Pkw. Die eigentliche Schwierigkeit besteht darin, anhand der Kratzspurzeichnung den Anteil einer Schwingung zu bestimmen. Zumindest gelingt es mit dieser Art der Berechnung, die Größenordnung der Kollisionsgeschwindigkeit ausreichend verlässlich zu berechnen.

* Die Autoren sind Sachverständige für Straßenverkehrsunfälle im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münster.

In einem Gutachten war die Frage zu beantworten, ob es sich bei einem wie folgt beschriebenen Unfallhergang um ein absichtliches Fahrmanöver handelt und damit um eine Manipulation.

Ein Ford (in Abb. 1 orange dargestellt) fuhr in einer Linkskurve in einen am Fahrbahnrand geparkten Seat (weiß dargestellt). Der Fahrer des Ford gab an, er sei aufgrund von Unaufmerksamkeit von seiner Fahrbahn abgekommen und mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 km/h an dem Seat entlang geschrammt.

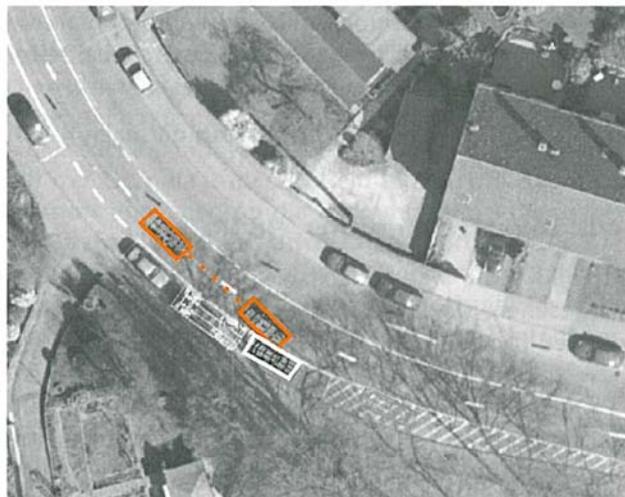


Abb. 1: Darstellung der Unfallsituation

Ein anderer Sachverständiger, der mit diesem Fall beauftragt war, kam zu dem Ergebnis, dass die Endstellung des Ford auch mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h plausibel nachzuvollziehen sei und es daher keinen Grund zur Annahme eines gestellten Unfallereignisses gäbe.

Aufgrund der wellenförmigen Spurenzeichnung auf der linken Seite des Seat (s. Abb. 2), kam die Frage auf, mit welcher Geschwindigkeit diese Spuren erzeugt werden können.



Abb. 2: Wellenförmige Kratzspur am geparkten Seat

Es wurde die Idee geboren, hier mithilfe der Wankfrequenz die Kollisionsgeschwindigkeit zu bestimmen.

Dieses Gutachten war Anregung für eine Diplomarbeit von Herrn WERNER, die das Büro Schimmelpfennig + Becke betreute. Einerseits wurden Wankfrequenzen für eine Vielzahl von Fahrzeugen experimentell ermittelt. Andererseits wurde untersucht, welche Fahrzeugdaten die Wankfrequenz von Pkw beeinflussen und wie aus ihnen die Wankfrequenz errechnet werden kann. Für diesen Vortrag sind in erster Linie die versuchsmäßige Feststellung der Wankfrequenzen und deren Anwendungen relevant.

Ein Fahrzeug kann um drei Achsen rotieren (Abb. 3.): Gieren – Drehung um die Hochachse; Nicken – Drehung um die Querachse; Wanken – Drehung um die Längsachse.

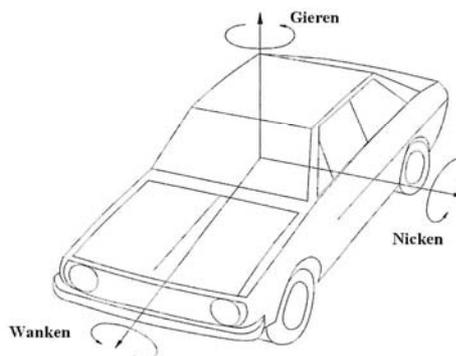


Abb. 3: Die drei Rotationsachsen eines Fahrzeugs

Ein Fahrzeug ist insbesondere in Bezug auf die Hubbewegung und die Nick- und Wankbewegung ein schwingfähiges System. In vereinfachter Form lässt sich ein derartiges System als Oszillator bzw. Federpendel beschreiben. Ungedämpft schwingt ein derartiges System in einer Sinusform.

Die Schwingung wird durch die Periodendauer und durch die Amplitude beschrieben. Wäre das Schwingungssystem nicht gedämpft, würde es unendlich lange weiterschwingen.

In der Realität ist bei einem Kfz eine Dämpfung in Form der Stoßdämpfer gegeben, die sowohl die Hubschwingungen als auch die Nick- und Wankbewegungen dämpfen. Ferner ist die Schwingung noch durch Reibung und durch den Luftwiderstand gedämpft. Daher bleibt bei Anregung einer Schwingung die Amplitude nicht konstant, sondern nimmt rasch ab, bis das System zur Ruhe kommt. Die Amplitude der Schwingung nimmt exponentiell in Abhängigkeit von der sog. Dämpfungskonstante D und der Zeit ab (Abb. 4).

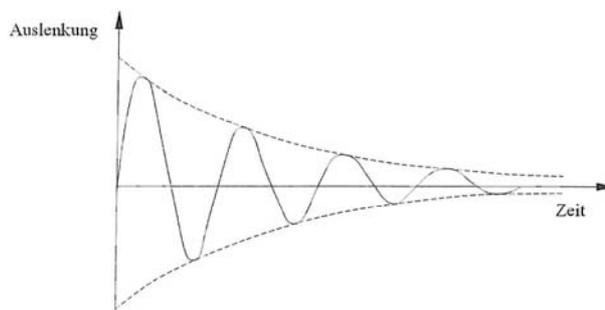
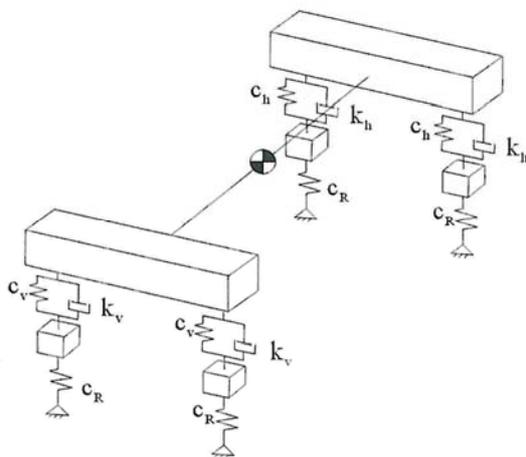


Abb. 4: Dämpfung einer Schwingung mit der Zeit

Ausgehend von einem eindimensionalen Oszillator wurde ein Fahrzeugmodell entwickelt, das alle zur Wankfrequenz benötigten Parameter enthält. Bei einem längsachsensymmetrischen Fahrzeug handelt es sich um:

- die Aufbaufederkonstante pro Achse vorne und hinten $c_{Achse, v, h}$
- die Stabilisatorsteifigkeiten vorne und hinten $c_{St, v, h}$
- die Reifenelastizitäten c_R und um
- die Dämpfung vorne und hinten $k_{v, h}$.

Die Aufbaufedern und die Stabilisatoren sind parallel geschaltet, die Reifen sind zu diesen beiden Systemen in Reihe geschaltet. Danach ergibt sich eine Gleichung für die Gesamtwanksteifigkeit eines Fahrzeuges gemäß Abb. 5.



$$c_{gesamt} = \left(\frac{1}{c_{Achse,v} + c_{Achse,h} + c_{St,v} + c_{St,h}} + \frac{1}{4 \cdot c_R} \right)^{-1}$$

Abb. 5: Gesamtsteifigkeit eines Fahrzeuges

Bei der Schwingung eines derartigen Systems muss zwischen der ungedämpften und der gedämpften Eigenfrequenz unterschieden werden. Sie weichen jedoch nur geringfügig voneinander ab, die gedämpfte Eigenfrequenz ist etwa 5 % kleiner als die ungedämpfte. Dies bedeutet, dass Fahrzeuge mit defekten Stoßdämpfern eine nur unwesentlich höhere Wankfrequenz aufweisen.

Experimentell wurde die Wankfrequenz mithilfe eines Pocket DAQ bestimmt (s. Abb. 6).

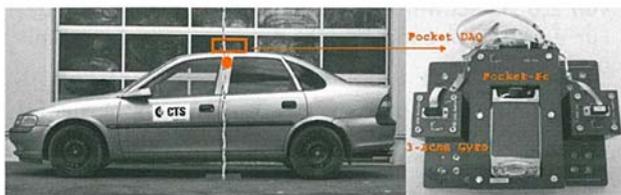


Abb. 6: Anregungspunkt der Wankschwingung und Pocket DAQ

An dem orange markierten Punkt wurde das Fahrzeug durch Hilfskräfte in etwa in der Eigenfrequenz aufgeschaukelt und damit in Schwingung versetzt. Nachdem die Schwingung nicht weiter angefacht wurde, nahm sie rasch ab (Abb. 7).

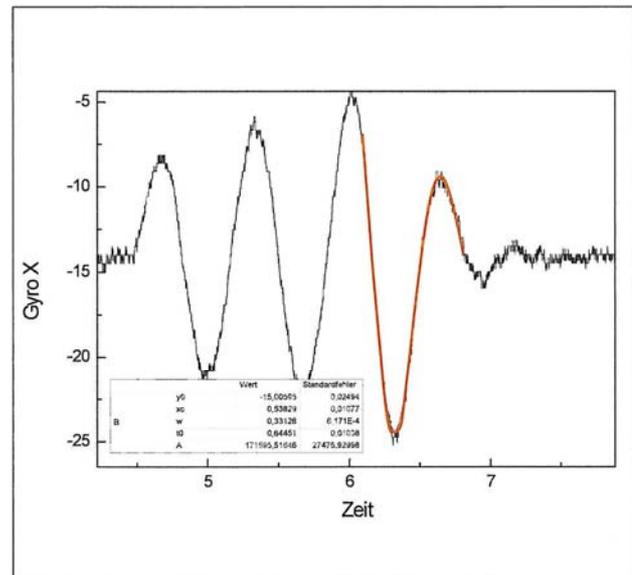


Abb. 7: Experimentell ermittelte Abnahme der Schwingungsamplitude mit der Zeit

Für einen bestimmten Teil einer Periode konnte nun aus der Zeit die Eigenfrequenz ermittelt werden.

Die Messungen wurden bei insgesamt 69 Fahrzeugen durchgeführt. Diese wurden in Klassen eingeteilt, Kleinwagen (Abb. 8), Mittelklassefahrzeuge (Abb. 9) sowie Vans und SUV (Abb. 10).

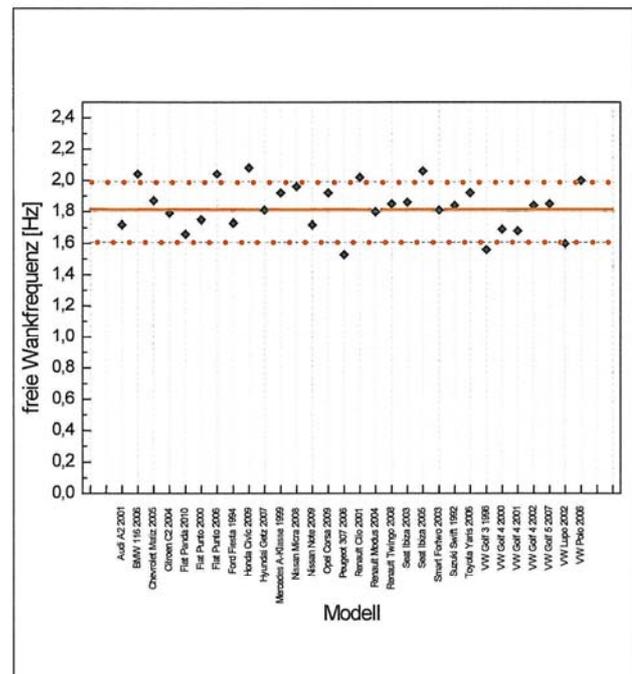


Abb. 8: Wankfrequenz von Kleinwagen

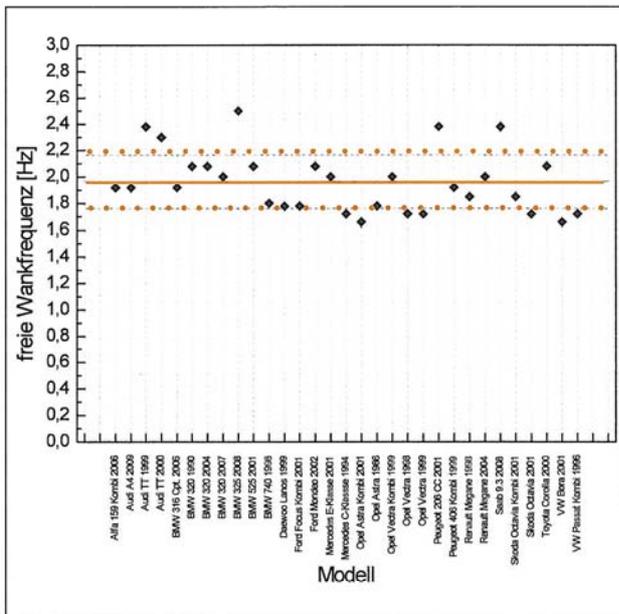
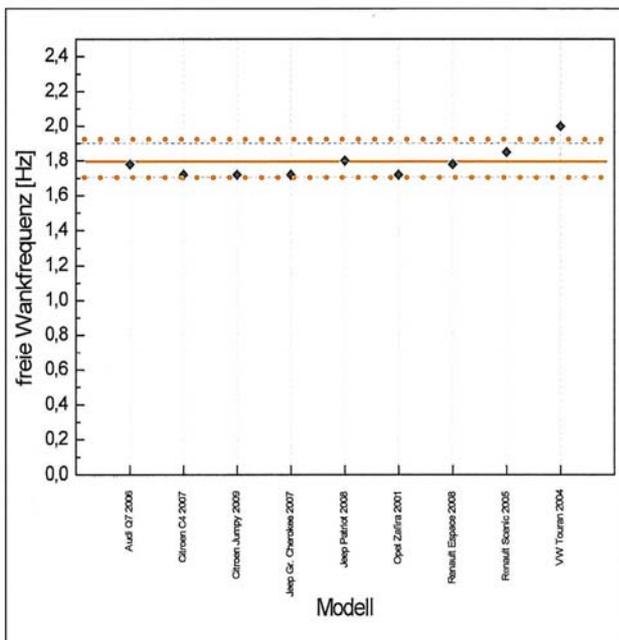


Abb. 9: Wankfrequenz von Mittelklassewagen



Abbi. 10: Wankfrequenz von Vans/SUV

Zusammengefasst ergab sich für sämtliche Messungen ein Mittelwert der Eigenfrequenz von 1,9 Hz mit einer Standardabweichung von etwa $\pm 0,1$ Hz. Für die verschiedenen Kategorien ergaben sich leicht unterschiedliche Mittelwerte:

Kleinwagen	1,8 Hz \pm 0,2 Hz
Mittelklassewagen	2,0 Hz \pm 0,2 Hz
Großraumfahrzeuge	1,8 Hz \pm 0,1 Hz.

Herausragend waren sportlich abgestimmte Fahrzeuge. Es handelt sich dabei bspw. um den Audi TT mit einer Wankfrequenz von etwa 2,4 Hz und um einen BMW 325 („M“-Sportfahrwerk), mit einer Wankeigenfrequenz von etwa 2,5 Hz.

Anhand der nun bekannten Wankeigenfrequenzen soll anhand von drei Crashtest-Beispielen gezeigt werden, wie mithilfe von wellenförmig verlaufenden Kratzspuren die Kollisionsgeschwindigkeiten zu ermitteln sind:

Beispiel 1:

In diesem Versuch fuhr ein Opel Ascona mit 10 km/h unter einem Winkel von 30° in einen stehenden BMW E30 (Abb. 11).

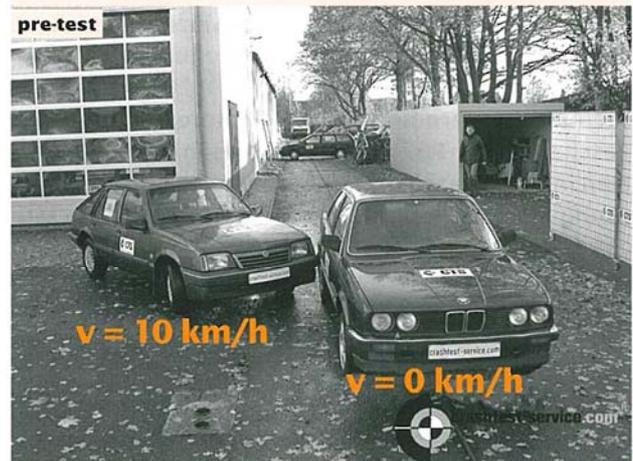


Abb. 11: Anstoßkonfiguration Crashtest 1

Auf der rechten Seite des BMW entstand eine Kratzspur, die einer kompletten Schwingung gleichkommt (Abb.12).



Abb.12: Spurzeichnung Crashtest 1

Die Schwingungslänge der Kratzspur beträgt $1,53 \text{ m} \pm 0,10 \text{ m}$. Die Wankfrequenz eines BMW E30 wurde experimentell ermittelt und beträgt 2,0 Hz. Dominant ist der Fehler bei der Bestimmung der Kratzspurlänge für einen bestimmten Teil einer Schwingung. Bei einer Frequenz von 2,0 Hz schwingt der Pkw 2 Mal in einer Sekunde. Für eine Schwingung beträgt die benötigte Zeit somit 0,5 s.

In diesem Fall beträgt die mittlere Kollisionsgeschwindigkeit also:

$$v_{k,mittel} = \frac{s}{t} = \frac{1,5 \text{ m} \pm 0,1 \text{ m}}{0,5 \text{ s}} = 3 \text{ m/s} \pm 0,2 \text{ m/s} = 11 \pm 1 \text{ km/h.}$$

Beispiel 2:

Bei diesem Crashtest wurde ein BMW E46 Compact von einem Renault 5 seitlich angestoßen (s. Abb. 13).

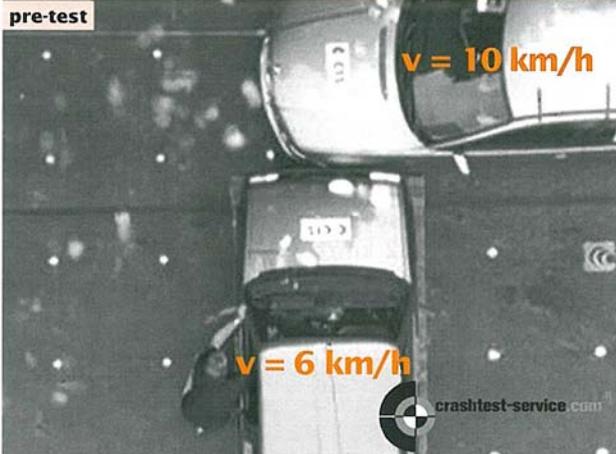


Abb. 13: Anstoßkonfiguration Crashtest 2

Der Kollisionswinkel betrug 90°. Der BMW wies eine Geschwindigkeit von 10 km/h auf, der Renault prallte mit 6 km/h in Höhe des vorderen linken Rads auf den BMW.

Bei dieser Kollision entstand eine Kratzspur auf der linken Seite des BMW, die einer halben Sinusschwingung entspricht (Abb. 14).

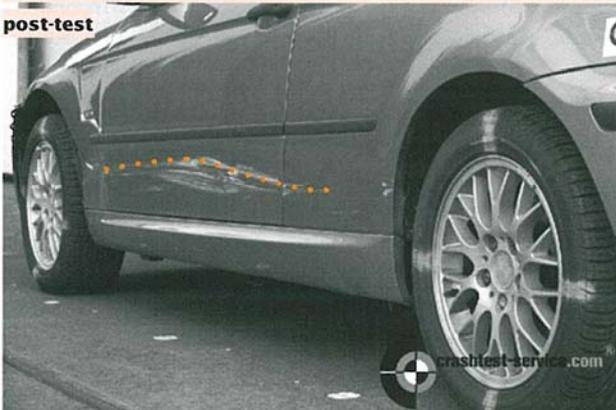


Abb. 14: Spurzeichnung Crashtest 2

Die Länge der halben Sinusschwingung beträgt $0,7 \text{ m} \pm 0,1 \text{ m}$. Die Wankfrequenz eines vergleichbaren BMW E46 Compact wurde experimentell mit 1,9 Hz bestimmt.

Um eine Kratzspur zu erzeugen, die einer halben Sinusschwingung entspricht, wird bei 1,9 Hz eine Zeit von $t = 0,26 \text{ s}$ benötigt. Bei einer Länge dieser Spur von $0,7 \text{ m} \pm 0,1 \text{ m}$ beträgt die mittlere Kollisionsgeschwindigkeit des BMW:

$$v_{k,mittel} = \frac{s}{t} = \frac{0,7 \text{ m} \pm 0,1 \text{ m}}{0,26 \text{ s}} = 2,7 \text{ m/s} \pm 0,4 \text{ m/s} = 10 \text{ km/h} \pm 2 \text{ km/h.}$$

Der Renault führte während dieser Kollision nur eine leichte Nickbewegung aus, die während der Spurzeichnung gegenüber der Wankbewegung zu vernachlässigen ist. Dabei ist zu beachten, dass die Nickbewegung aufgrund der nicht involvierten Stabilisatoren mit einer Eigenfrequenz von nur etwa 1 Hz abläuft.

Beispiel 3:

In diesem Versuch fuhr ein Opel Astra mit einer Geschwindigkeit von 28,8 km/h, wobei er seitlich unter einem Winkel von 44° von einem 10 km/h schnellen Opel Kadett kurz hinter dem vorderen linken Radausschnitt getroffen wurde (Abb. 15).



Abb. 15: Anstoßkonfiguration Crashtest 3

Da in diesem Fall beide Fahrzeuge in Bewegung waren und der Kollisionswinkel ungleich 90° war, muss in diesem Fall die Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuge berücksichtigt werden. Die Geschwindigkeit des Kadett von $v_2 = 10,0 \text{ km/h}$ weist einen Anteil in Bewegungsrichtung des Astra von $v_{2 \text{ längs}} = 10,0 \text{ km/h}$ auf.

Die Relativgeschwindigkeit v_{rel} beider Fahrzeuge liegt also bei:

$$v_{rel} = v_1 - v_{2 \text{ längs}} = 28,8 \text{ km/h} - 7,0 \text{ km/h} = 21,8 \text{ km/h}$$

Am Opel Astra konnte eine Kratzspurlänge von 0,85 m festgestellt werden, die einer 1/4-Schwingung entspricht (Abb. 16).



Abb. 16: Spurzeichnung Crashtest 3

Bei einer Wankfrequenz von 1,8 Hz beträgt die benötigte Zeit, um eine 1/4-Schwingung zu erzeugen, 0,14 s. Mit der Länge von 0,85 m ergibt sich eine Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuge von:

$$v_{rel} = \frac{s}{t} = \frac{0,85 \text{ m} \pm 0,1 \text{ m}}{0,14 \text{ s}} = 6 \text{ m/s} \pm 0,7 \text{ m/s} = 22 \text{ km/h} \pm 3 \text{ km/h.}$$

Das Ergebnis wird umso ungenauer, je kleiner der Anteil einer kompletten Schwingung abgezeichnet ist, da der Fehler in der Bestimmung der Kratzspurlänge steigt.

In Tab. 1 ist eine Übersicht über die experimentellen Ergebnisse dargestellt.

	V _{Versuch}	V _{Schwingungsanalyse}
Crashversuch 1	10 km/h	11 ± 1 km/h
Crashversuch 2	10 km/h	10 ± 2 km/h
Crashversuch 3	21 km/h	22 ± 3 km/h

Tab. 1: Vergleich der Geschwindigkeiten aus den Crashtests mit denen aus der Schwingungsanalyse

Bei der Bearbeitung wurde festgestellt, dass der Anteil der Schwingung anhand des Schadensbildes besonders sorgfältig zu ermitteln ist. Dieses legt in entscheidendem Maße das Ergebnis fest (bei den hier dargestellten Vergleichs-Berechnungen wurde gegenüber dem Kollisionsgeschwindigkeitsmesswert ein Fehler zwischen etwa 10 und 20 % festgestellt).

Kehrt man zurück zum Gutachtenauftrag, so lässt sich bei Angabe einer halben Schwingung über 1,5 m ± 0,1 m unter Berücksichtigung einer Wankfrequenz für einen Mittelklassewagen von 2 Hz, eine Geschwindigkeit von etwa 22 km/h ± 1 km/h berechnen. Damit konnte dargestellt werden, dass die vom Verursacher angegebene Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h unzutreffend war. Die hieraus zu ziehenden Schlüsse sind rechtlicher Natur.