

Wolfram Kalthoff*, Manfred Becke**

Die Stoßzahl bei Auffahrkollisionen

Ein wesentlicher Parameter

zur Bestimmung der HWS-Belastung

Zusammenfassung

Die Stoßzahl beschreibt den teilelastischen Charakter einer Kollision und ist ein wesentlicher Parameter zur Bestimmung der biomechanischen Insassenbelastung. Die Analyse einer Vielzahl an Pkw-Auffahrkollisionen ergibt, dass die Elastizität einer Kollision mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Bis zu einer Relativgeschwindigkeit von etwa 25 km/h liegt bei den analysierten Versuchen keine Stoßzahl unter 0,10. Allerdings stehen hier keine Versuche mit geringer Überdeckung auf diesem Relativgeschwindigkeitsniveau zur Verfügung. Die tiefergehende Auswertung von insgesamt 38 Pkw-Auffahrkollisionen mit Relativgeschwindigkeiten zwischen 7,8 und 32,4 km/h zeigt, dass im wesentlichen der Überdeckungsgrad der unfallbeteiligten Fahrzeuge auf diesem Relativgeschwindigkeitsniveau auf die Stoßzahl Einfluss nimmt. Bei einer Überdeckung unter 50 % liegen die Stoßzahlen etwa zwischen 0,00 bis 0,15, bei einem Überdeckungsgrad von etwa 50 % zwischen 0,10 und 0,20 und bei einer Überdeckung von über 50 % zwischen 0,15 und 0,30. Ferner sind die Stoßzahlen bei »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen im Mittel höher als bei »Unterfahrer«-Kollisionen. Die minimale Stoßzahl bei »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen liegt bei 0,10 (bis auf zwei Anstöße nur Versuche mit 100 % Überdeckung). Beide Kollisionstypen erreichen dagegen maximale Stoßzahlen von etwa 0,30. Zur Untersuchung dieser Problematik wären weitere Versuche insbesondere mit geringer Überdeckung sinnvoll.

Die aufgeführten Stoßzahlen bilden eine Arbeitsgrundlage für die Beurteilung des teilelastischen Charakters einer Pkw-Auffahrkollision. Dabei sind diese Ergebnisse lediglich als Orientierungshilfe anzusehen, da bei besonderen Fahrzeugen und Anstoßkonfigurationen auch hiervon abweichende Stoßzahlen vorstellbar sind.

Summary

The coefficient of restitution quantifies the restitution that occurs in the final phase of a vehicle-to-vehicle collision. Therefore this coefficient is an essential parameter to determine the biomechanical stress of an occupant. The higher the velocity, the lower is the elasticity of the impact. Up to a closing velocity of 20 km/h no coefficient of restitution of the analysed crash tests is below 0.10. Though there are here no tests with a low degree of overlap at this speed level. The analysis of totally 38 rear impact car crash tests with a closing velocity between 7.8 and 32.4 km/h shows, that the coefficient of restitution is mainly influenced by the degree of overlap of the participating vehicles. Dependent on this parameter the coefficient of restitution can be determined with a degree of overlap under 50 % between 0.00 and 0.15, with a degree of overlap of 50 % from 0.10 to 0.20 and with a degree of overlap more than 50 % between 0.15 and 0.30. The coefficients of bumper-to-bumper collisions are on the average higher than those of underlapping collisions. The lowest coefficient of bumper-to-bumper collisions is 0.10 (all crashes except of two with a degree of overlap of 100 %). The highest coefficient of all kinds of impacts is 0.3. In this case further crash tests especially with a low degree of overlap would be useful. The coefficients of restitution shown in this essay are fundamental for the reconstruction of rear end car collisions. Nevertheless they can be only a guidance because under certain circumstances the coefficient of restitution may differ from these values.

1 Einleitung

In der Verkehrsunfallrekonstruktion werden mittlerweile, u.a. auch zur Bestimmung der Belastung der Halswirbelsäule nach Auffahrkollisionen, eine Vielzahl mathematischer Berechnungsverfahren verwendet. Diese Verfahren basieren teilweise auf allgemeingültigen Zusammenhängen, die über den Bereich der Unfallrekonstruktion hinausgehen. Hierzu zählt auch die Beschreibung der Elastizität eines Stoßes unter Verwendung der Stoßzahl. Dieser Ansatz geht ursprünglich auf Versuche des Sir Isaac Newton zurück. Newton ließ Bälle auf eine ebene Oberfläche fallen und beobachtete, wie hoch sie zurücksprangen [11]. Basierend darauf entstand die Newton'sche Stoßhypothese, die besagt, dass die Relativgeschwindigkeiten vor und nach dem Stoß in einem konstanten Verhältnis stehen [7]. Dieses feste Verhältnis wurde von Newton als eine Materialkonstante betrachtet [8]. Mittlerweile ist jedoch bekannt,

dass es sich hierbei nicht ausschließlich um eine Konstante des Materials handelt, sondern die Stoßzahl ebenfalls von der Form der Körper und dem in Frage kommenden Geschwindigkeitsbereich abhängt [11, 12]. Das Verhältnis der Relativgeschwindigkeiten am Ende und zu Beginn eines Stoßes ist demnach ein Maß für die Elastizität einer Kollision:

$$k = \frac{v_{\text{rel}}'}{v_{\text{rel}}} \quad (1)$$

Bei Fahrzeugkollisionen lassen sich die in Gl. (1) aufgeführten Relativgeschwindigkeiten durch die Absolutgeschwindigkeiten der unfallbeteiligten Fahrzeuge ersetzen. Damit erhält man folgende allgemeine Gleichung zur Beschreibung des teilelastischen Charakters einer Kollision:

$$k = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2} \quad (2)$$

Der in Gl. (1) und (2) definierte Quotient wird als *Stoßzahl*, *Stoßziffer*, *k-Faktor*, *k-Wert*, *Geschwindigkeits-Differenz-Faktor* [10] etc. bezeichnet. Eine einheitliche Benennung fehlt bis heute. Im anglophonen Raum hat sich die Bezeichnung *coefficient of restitution* etabliert. Anfänglich wurde die Stoßzahl jedoch *coefficient of elasticity* genannt [11]. Daher ist alternativ zu *k* auch die Bezeichnung *e* gebräuchlich.

2 Plastische und teilelastische Fahrzeugkollisionen

Kollisionen zwischen zwei Fahrzeugen laufen in der Regel bei hohen Relativgeschwindigkeiten annähernd plastisch ab. Bei einem plastischen Stoß verformen sich die unfallbeteiligten Fahrzeuge entsprechend der wirkenden Kräfte, ohne sich anschließend zurückzuverformen. Beide Fahrzeuge haben am Ende der Kollision die gleiche Stoßausgangsgeschwindigkeit, weshalb sie sich nicht voneinander trennen. Die maximale Deformation der Fahrzeuge entspricht der nach der Kollision sichtbaren statischen Verformung.

Bei Anstößen auf geringem Relativgeschwindigkeitsniveau, welche insbesondere im Rahmen der Diskussion um mögliche Verletzungen der Halswirbelsäule an Bedeutung gewonnen haben, ist jedoch der teilelastische Charakter einer Kollision zu beachten. Bei einem teilelastischen Stoß verformen sich die unfallbeteiligten Fahrzeuge zunächst analog zum plastischen Stoß entsprechend der wirkenden Kräfte. Am Ende dieser als Kompression bezeichneten Phase sind die Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge gleich. Anschließend kommt es jedoch noch zu einer teilelastischen Rückverformung der Fahrzeuge (Restitution), so dass sich diese voneinander abstoßen, sich also trennen. Hierdurch ist das gestoßene Fahrzeug am Ende einer teilelastischen Kollision schneller als das stoßende Fahrzeug. Die Teilelastizität eines Anstoßes bewirkt somit einen Geschwindigkeitsunterschied der Fahrzeuge am Ende der Kollision (Trennungsgeschwindigkeit bzw. Relativgeschwindigkeit bei Kollisionsende).

Bild 1 soll diese Abfolge anhand der Geschwindigkeitsverläufe eines Heckanstoßes verdeutlichen [4]. Bei einer Auffahrkollision wird das stoßende Fahrzeug als Fahrzeug 1 und das gestoßene als Fahrzeug 2 bezeichnet. Zu Beginn der Kollision ist das stoßende Fahrzeug um die Relativgeschwindigkeit (v_{rel}) schneller als das gestoßene. Am Ende der Kompressionsphase haben beide Fahrzeuge die gleiche Geschwindigkeit. Innerhalb der sich anschließenden Restitutionsphase trennen sich die Fahrzeuge aufgrund der Teilelastizität wieder voneinander. Am Ende der Restitutionsphase und damit am Ende der Kollision bewegen sich die Fahrzeuge mit einer Relativgeschwindigkeit (Trennungsgeschwindigkeit v_{rel}') zueinander, um die nun das gestoßene Fahrzeug schneller als das stoßende ist. Je größer die Trennungsgeschwindigkeit der Fahrzeuge im Verhältnis zu deren ursprünglicher Relativgeschwindigkeit ist, desto elastischer verhalten sich die an der Kollision beteiligten Karosseriebereiche (vgl. Gl.(1)).

*Dipl.-Ing. Wolfram Kalthoff

**Dipl.-Ing. Manfred Becke, Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle, IHK Münster beide c/o Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstraße 101, 48155 Münster-Wolbeck

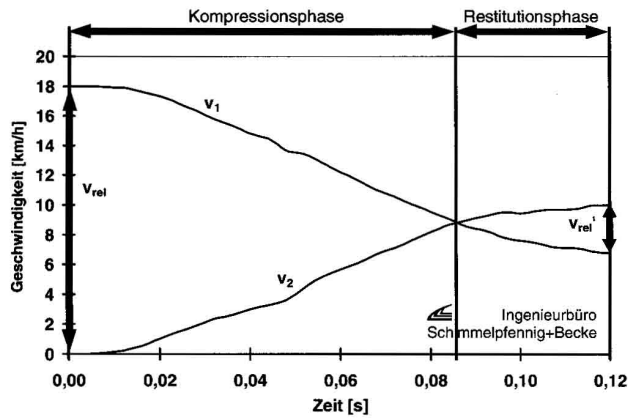


Bild 1 Schwerpunktgeschwindigkeiten der Fahrzeuge eines Auffahrunfalls
Fig. 1 Velocities of the center of gravity of the vehicles of a rear impact

Die nach der Kollision sichtbare Verformung der Fahrzeuge (statische Verformung) ist geringer als die maximale Deformation, die am Ende der Kompressionsphase auftritt, da sich ein Teil der Verformung wieder zurückgebildet hat. In Bild 2 sind neben den Geschwindigkeiten (vgl. Bild 1) auch die Wege der Fahrzeugschwerpunkte eingezeichnet. Die Differenz dieser Wege ergibt die Gesamtdeformation der Fahrzeuge. Am Ende der Kompressionsphase ist die größte Verformung erreicht ($S_{\text{def ges max}}$). Durch die teilelastische Rückverformung in der Restitutionsphase ist jedoch am Kollisionsende nur noch die statische Gesamtdeformation der Fahrzeuge vorhanden ($S_{\text{def ges stat}}$).

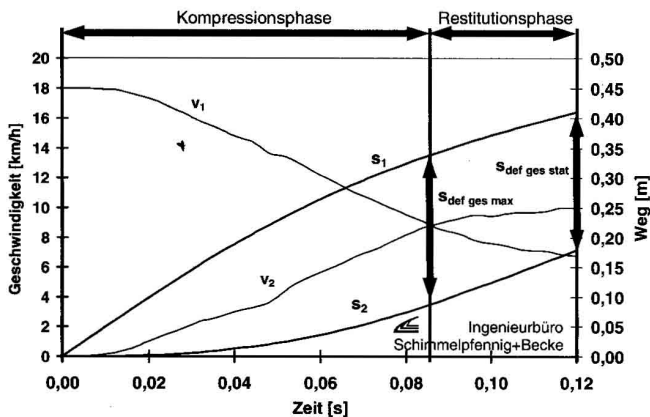


Bild 2 Schwerpunktgeschwindigkeiten und Wege der Fahrzeuge eines Auffahrunfalls
Fig. 2 Velocities and crash of the center of gravity of the vehicles of a rear impact

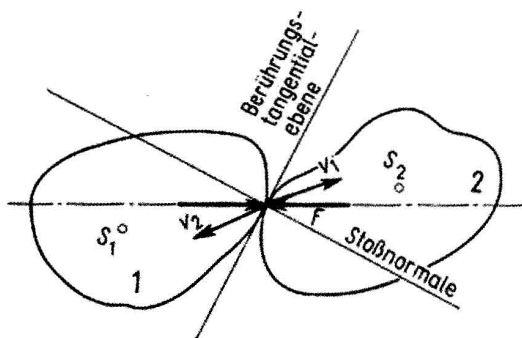


Bild 3 Stoß zweier Körper [1]
Fig. 3 Impact of two objects [1]

Gemäß der Newton'schen Theorie setzt die Stoßziffer die Normalgeschwindigkeiten der Stoßpartner vor und nach dem Stoß in Beziehung. Hierbei gilt eine unendlich kurze Stoßdauer. Bei Fahrzeugkollisionen ist

jedoch aufgrund der veränderlichen Stoßkrafttrichtung bei großen Deformationen innerhalb der Kollisionsdauer eine Stoßnormale nicht immer festzulegen (als Stoßnormale bezeichnet man die zur gemeinsamen Tangentialebene der Körper an der Berührungsstelle senkrechte Gerade [1], s. Bild 3). Mit Hilfe des Mittelwertsatzes der Integralrechnung lässt sich allerdings ein Geschwindigkeits-Differenz-Faktor auf die resultierende Stoßrichtung beziehen [10].

Die somit auf die resultierende Stoßrichtung bezogene Stoßzahl hat einen Definitionsbereich von $-1 < k < 1$. Mit $0 < k < 1$ wird der teilelastische Stoß beschrieben. Dabei entspricht $k = 1$ dem ideal elastischen und $k = 0$ dem ideal plastischen Stoß. Die so definierte Stoßzahl kann aber auch negative Werte annehmen [10]. Dieser Fall tritt beispielsweise auf, wenn ein Pkw unter der Deichsel eines Lkw-Zuges hindurchfährt [8]. Negative Stoßzahlen liegen bei Streifkollisionen vor. Hierbei kommt es zu einem gegenseitigen »Passieren« der Fahrzeugschwerpunkte aufgrund der streifenden Anstoßcharakteristik.

3 Die Stoßzahl bei Auffahrkollisionen

Prinzipiell lässt sich die Stoßzahl für alle Kollisionstypen ermitteln. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich jedoch auf die Beschreibung des teilelastischen Kollisionscharakters von Heckanstoßen. In den letzten Jahren haben diese »klassischen« Auffahrkollisionen im Hinblick auf die dadurch möglicherweise hervorgerufenen Verletzungen der Halswirbelsäule übermäßig an Bedeutung gewonnen. Aus diesem Grunde ist eine tiefergehende kollisionsmechanische Betrachtung insbesondere dieses Anstoßtyps von Interesse.

Zunächst soll auf die Bedeutung der Stoßzahl im Hinblick auf die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung eingegangen werden, da zahlreiche durchgeführte Studien zur Belastbarkeit der Halswirbelsäule infolge von Pkw-Auffahrkollisionen belegen, dass die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung einen geeigneten Parameter zur Beschreibung der biomechanischen Insassenbelastung darstellt [5, 6, 7]. Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung entspricht dabei dem Geschwindigkeitszuwachs (gestoßenes Fahrzeug: Δv_2) bzw. -abbau (stoßendes Fahrzeug: Δv_1) eines Fahrzeuges infolge des Anstoßes.

Bei der Rekonstruktion eines Auffahrunfalls kann die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung, basierend auf den dokumentierten Fahrzeugbeschädigungen, ermittelt werden. Dazu wird zunächst die Relativgeschwindigkeit der unfallbeteiligten Fahrzeuge (v_{rel}) zum Kollisionszeitpunkt bestimmt. Darauf aufbauend ist es mit Hilfe des Impulssatzes der Mechanik in Verbindung mit der Stoßzahl (Gl. (1) bzw. (2) möglich, die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung sowohl des stoßenden als auch des gestoßenen Fahrzeuges zu berechnen. Dabei gilt folgender Zusammenhang:

$$\Delta v_1 = (1 + k) \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_{\text{rel}} \quad (3a)$$

$$\Delta v_2 = (1 + k) \cdot \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_{\text{rel}} \quad (3b)$$

Die Gl. (3 a) und (3 b) enthalten die Stoßzahl und berücksichtigen somit bei der Berechnung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung die Teilelastizität der betrachteten Kollision. Mit zunehmender Elastizität erhöht sich bei konstanter Relativgeschwindigkeit die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung und damit auch die biomechanische Belastung. Daraus folgt, dass das teilelastische Kollisionsverhalten der unfallbeteiligten Fahrzeuge einen deutlichen Einfluss auf die biomechanische Insassenbelastung infolge eines Auffahrunfalls hat. Aus diesem Grunde kommt der Bestimmung der bei Auffahrkollisionen möglichen Stoßzahlen eine hohe Bedeutung zu.

Den Einfluss der Stoßzahl auf die Berechnung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung veranschaulicht der nachfolgend beschriebene Crash-Test. Dieser Versuch wurde auf der Crash-Anlage des Ing.-Büros Schimmelpfennig und Becke durchgeführt. Hierbei fuhr ein VW-Golf mit voller Überdeckung und einer Kollisionsgeschwindigkeit von 19,5 km/h auf das Heck eines Opel Kadett Caravan auf (Bild 4). Da der Opel zum Kollisionszeitpunkt stand, lag die Relativgeschwindigkeit

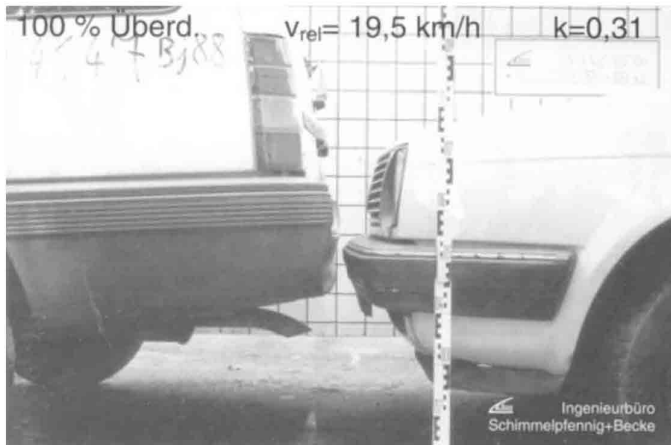


Bild 4 Beispielversuch
Fig. 4 Example of crash test



Bild 5 Deformation des stoßenden VW Golf
Fig. 5 Deformation of bullet vehicle



Bild 6 Deformation des gestoßenen Opel Kadett
Fig. 6 Deformation of target vehicle

ebenfalls bei 19,5 km/h. Die **Bilder 5** und **6** zeigen die durch die Kollision hervorgerufenen Fahrzeugschäden. Die in beiden Fahrzeugen installierten Unfalldatenspeicher nahmen die Fahrgastzellenbeschleunigungen auf. Nach der Integration der gemessenen

senen Beschleunigungsverläufe wurde eine Stoßzahl von 0,31 sowie eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Opel von 11,4 km/h berechnet. Würde man anhand von Gl. (3 b) die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung dieses Fahrzeuges unter Berücksichtigung eines rein plastischen Stoßes ($k = 0$) bestimmen, so läge das Ergebnis unter 11,4 km/h. Damit ergäbe sich eine zu geringe biomechanische Insassenbelastung. Es folgt somit, dass auf diesem Geschwindigkeitsniveau bei der Rekonstruktion von Heckaufprallkollisionen und insbesondere darauf aufbauend bei der Bestimmung der biomechanischen Insassenbelastung der teilelastische Charakter einer Kollision nicht zu vernachlässigen ist.

3.1 Die Stoßzahl in Abhängigkeit des Crash-Test-Typs und der Relativgeschwindigkeit

Um für die praktische Anwendung in der Verkehrsunfallrekonstruktion verwertbare Aussagen bezüglich der Stoßzahl zu erhalten, soll nachfolgend deren Abhängigkeit von verschiedenen Versuchstypen sowie der Relativgeschwindigkeit untersucht werden. Allgemein ist bekannt, dass Pkw-Kollisionen mit steigender Relativgeschwindigkeit zunehmend plastisch verlaufen. **Bild 7** stellt eine Zusammenstellung verschiedener Stoßzahlen dar [9], die diesen Zusammenhang bestätigt.

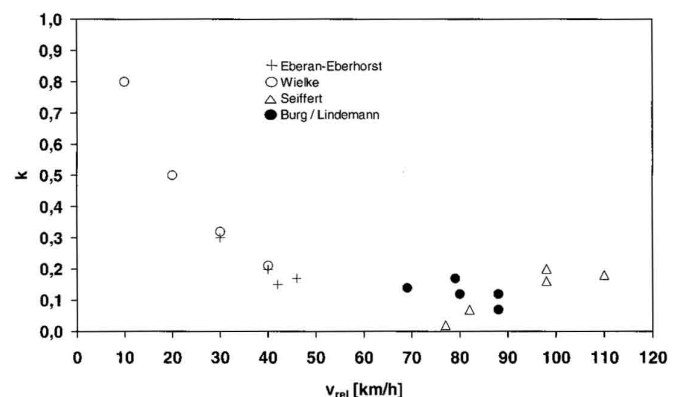


Bild 7 Abhängigkeit der Stoßzahl von der Relativgeschwindigkeit [9]
Fig. 7 Coefficient of restitution in relation to closing velocity [9]

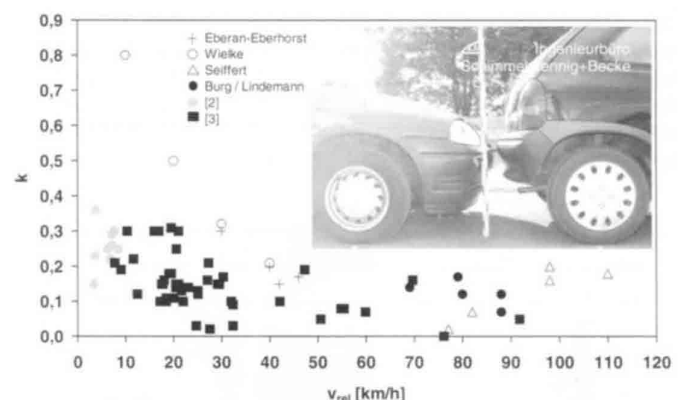


Bild 8 Abhängigkeit der Stoßzahl von der Relativgeschwindigkeit bei Pkw-Auffahrkollisionen [2, 3, 9]
Fig. 8 Coefficient of restitution in relation to closing velocity of vehicle collisions [2, 3, 9]

Bild 8 zeigt, neben den bereits in **Bild 7** aufgeführten Werten, die bei Versuchen auf der hauseigenen Crash-Anlage des Ing.-Büros Schimmelpfennig und Becke ermittelten Stoßzahlen. Dabei wurden ausschließlich Versuche berücksichtigt, bei denen sowohl im stoßenden als auch im gestoßenen Fahrzeug Messgeräte vorhanden waren und somit die der Bestimmung der Stoßzahl zugrunde liegenden Absolutgeschwindigkeiten der Fahrzeuge nicht berechnet, sondern gemessen wurden. Bei diesen Pkw-Pkw-Heckanstoßen lagen Stoßzahlen zwischen 0,00 und 0,31 (σ 0,15) vor, die bei Relativgeschwindigkeiten zwischen 7,8 und 91,8 km/h (σ 28,8 km/h) ermittelt wurden. Weiterhin sind in **Bild 8** von HOWARD et al. in [2] angegebene Stoßzahlen von Pkw-Pkw-Kolli-

sionen eingetragen. Die nunmehr in Bild 8 zusätzlich gegenüber Bild 7 angegebenen Werte unterstreichen den tendenziellen Zusammenhang einer zunehmend plastisch verlaufenden Kollision bei steigender Relativgeschwindigkeit. Allgemein zeigt sich, dass die Stoßzahlen bis zu einer Relativgeschwindigkeit von etwa 25 km/h Werte zwischen 0,10 und 0,30 annehmen. Bei den analysierten Versuchen lagen jedoch unterhalb dieser Geschwindigkeit ausschließlich Überdeckungen von 50 % und mehr vor. Um zu untersuchen, ob insbesondere bei geringen Überdeckungen Stoßzahlen unter 0,10 bis zu einer Relativgeschwindigkeit von 25 km/h auftreten, wären weitere Versuche sinnvoll. Oberhalb dieser Relativgeschwindigkeit werden die Kollisionen plastischer, so dass auch Werte deutlich unterhalb von 0,10 erreicht werden.

Außer für Pkw-Auffahrkollisionen können Stoßzahlen auch für Anprallversuche an eine feststehende, nicht deformierbare Barriere angegeben werden. Derartige Crash-Tests zeigen am deutlichsten eine Analogie zu den eingangs beschriebenen, ursprünglichen Versuchen von Newton zur Bestimmung der Rückprallintensität. Aufgrund der unbeweglichen Barriere wird v_2 und v_2' in Gl. (2) zu null, so dass sich Gl. (4) ergibt:

$$k = \frac{-v_1'}{v_1} \quad (4)$$

Die bei Barrierenanprallversuchen auftretenden Stoßzahlen sind insofern von praktischem Interesse, als dass nach Gl. (5) bei Kenntnis der Elastizität der Kollision basierend auf der Relativgeschwindigkeit der EES-Wert (Energie-Äquivalente Geschwindigkeit: Maß für die aufgenommene Deformationsenergie eines Fahrzeuges beim Crash) berechnet werden kann. Der folgenden Gleichung liegt zugrunde, dass die Deformationsenergie beim Barrierenanprall der Differenz zwischen kinetischer Ein- und Ausgangsenergie entspricht.

$$EES_1 = \sqrt{v_1^2 - (v_1')^2} \Rightarrow EES_1 = \sqrt{v_1^2 - (k \cdot (-v_1))^2} \quad (5)$$

Die im Rahmen eigener Barrierenanprallversuche ermittelten Stoßzahlen (0,00 bis 0,71; σ 0,31) sind neben den von HOWARD et al. [2] angegebenen Werten in Bild 9 eingetragen. Verglichen mit den bei Pkw-Pkw-Kollisionen ermittelten Stoßzahlen (Bild 8) sind diese deutlich höher. Dies liegt in der extremen Struktursteifigkeit einer Barriere begründet, wodurch von diesem Kollisionspartner keinerlei Energie in Deformation umgewandelt wird und somit ein größerer Teil der kinetischen Eingangsenergie als bei einer Pkw-Pkw-Kollision als kinetische Ausgangsenergie erhalten bleibt. Im Bereich einer Kollisionsgeschwindigkeit bis ca. 15 km/h liegen die Stoßzahlen im wesentlichen etwa zwischen 0,15 und 0,60. Es treten jedoch auch voll plastische Kollisionen auf.

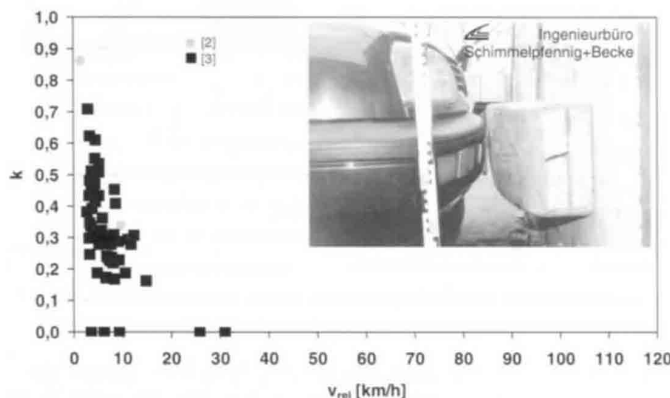


Bild 9 Abhängigkeit der Stoßzahl von der Kollisionsgeschwindigkeit beim Barrierenanprall [2, 3]

Fig. 9 Coefficient of restitution in relation to closing velocity (barriere impact) [2, 3]

Abschließend sind zur Veranschaulichung hochelastischer Anstöße noch Autoskooter-Auffahrkollisionen (Bild 10) zu erwähnen. Wie zahlreiche, vom Ing.-Büro Schimmelpfennig und Becke durchgeführte Versuche zeigen, unterscheiden sich Autoskooteranstöße von Pkw-Pkw-



Bild 10 Autoskooter-Kollision
Fig. 10 Bumper car collision

Crashes kollisionsmechanisch durch die Elastizität des Anstoßes. Autoskooter sind mit Prallringen ausgestattet, welche die Karosserie vor Schäden schützen. Durch dieses Konstruktionsmerkmal verlaufen Autoskooteranstöße sehr elastisch. Bei Kollisionen, bei denen sich sowohl im stoßenden, als auch im gestoßenen Skooter Messwertaufnehmer befanden, wurden Stoßzahlen zwischen 0,64 und 0,75 (σ 0,70) ermittelt [4, 7].

3.2 Die Stoßzahl in Abhängigkeit verschiedener kollisionsmechanischer Parameter

Nachdem der Einfluss des Versuchstyps und der Geschwindigkeit auf die Stoßzahl diskutiert wurde, soll nunmehr auf einzelne kollisionsmechanische Parameter eingegangen werden, die u.U. Auswirkungen auf die Teilelastizität einer Pkw-Auffahrkollision haben. Hierbei wurden lediglich auf der Crash-Anlage des Ing.-Büros Schimmelpfennig und Becke durchgeführte Versuche berücksichtigt, da bei diesen sämtliche Kollisionsparameter bekannt sind. Weil bei zunehmender Relativgeschwindigkeit die Elastizität einer Pkw-Pkw-Kollision abnimmt, wurden ferner die in Bild 8 dargestellten Werte oberhalb einer Relativgeschwindigkeit von 40 km/h nachfolgend ausgeklammert. Ab dieser Geschwindigkeit erscheint ein Einfluss der kollisionsmechanischen Parameter fraglich, wodurch die Untersuchung eines solchen auf geringem Geschwindigkeitsniveau verfälscht würde. Ferner findet das Grcs der im Hinblick auf Verletzungen der Halswirbelsäule zu analysierenden Pkw-Kollisionen und demnach auch der im Rahmen dieser Problematik durchgeführten Versuche bei Relativgeschwindigkeiten bis etwa 30 km/h statt. Zur nachfolgenden Analyse wurden somit Stoßzahlen aus insgesamt 38 Versuchen mit Relativgeschwindigkeiten zwischen 7,8 bis 32,4 km/h (σ 21,2 km/h) herangezogen.

Bild 11 stellt die Stoßzahlen der oben angesprochenen Versuche in Abhängigkeit des Überdeckungsgrades der unfallbeteiligten Fahrzeuge

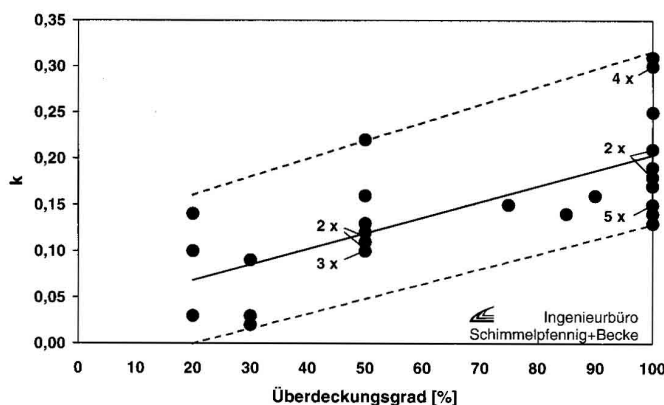
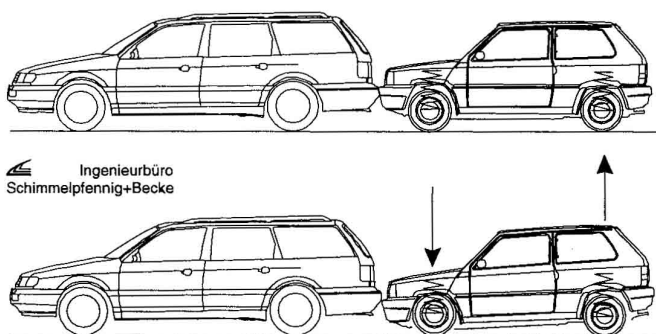


Bild 11 Abhängigkeit der Stoßzahl vom Überdeckungsgrad
Fig. 11 Coefficient of restitution in relation to degree of overlap

inklusive der linearen Regression (durchgezogene Linie) dar. Ferner ist zur Veranschaulichung der Bandbreite der sich aus den Minima und Maxima ergebende Trendkanal gestrichelt eingezeichnet. Dieser hat eine Breite von etwa 0,15. Das Bild 11 zeigt eine deutliche Zunahme des teilelastischen Verhaltens einer Kollision beim Anstieg der erzielten Fahrzeugüberdeckung.

Neben der Abhängigkeit der Stoßzahl vom Überdeckungsgrad ist ebenfalls eine Abhängigkeit vom Bremszustand des auffahrenden Fahrzeuges zu erwarten. Ist das stoßende Fahrzeug bei einem Auffahrunfall gebremst, so tritt infolge der dynamischen Achslastverschiebung ein »Unterfahren« auf. Bei »Stoßfänger auf Stoßfänger«-Kollisionen treffen hingegen die hierfür konstruktiv ausgelegten Stoßfänger beider Fahrzeuge aufeinander. Beim »Unterfahren« kontaktieren die Stoßfänger weichere Fahrzeugstrukturen (der Frontstoßfänger des auffahrenden Fahrzeuges trifft auf den Bereich unterhalb des Heckstoßfängers des angestoßenen Fahrzeuges; der Heckstoßfänger des gestoßenen Fahrzeuges kontaktiert den Bereich oberhalb des Frontstoßfängers des auffahrenden Fahrzeuges (Bild 12)). Aufgrund der unterschiedlichen Zonen, die bei »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen und »Unterfahren«-Kollisionen miteinander kontaktieren, ist anschaulich bei »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen im Gegensatz zu »Unterfahren«-Kollisionen ein elastischeres Verhalten zu erwarten.



Ingenieurbüro
Schimmelpfennig+Becke

Bild 12 Höhenzuordnung in Abhängigkeit des Bremszustandes
Fig. 12 Vertical offset dependent on brake conditions

Bild 13 zeigt die ermittelten Stoßzahlen, unterteilt in »Stoßfänger auf Stoßfänger«-Kollisionen und Kollisionen, bei denen ein gebremstes Auffahren simuliert wurde. Hierbei wurden die Stoßzahlen der Übersichtlichkeit halber in sieben Abstufungen (Range jeweils 0,05) zusammengefaßt. Es wurden bei den »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen Stoßzahlen zwischen 0,10 bis 0,31 ($n = 12$) und bei den »Unterfahren«-Kollisionen zwischen 0,02 und 0,30 ($n = 26$) berechnet. Die bei den »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen ermittelten Stoßzahlen lagen nicht unter 0,10; wobei lediglich zwei teilüberdeckte Versuche zur Analyse zur Verfügung standen (die anderen zehn Versuche 100 % Überdeckung). Die »Unterfahren«-Kollisionen hatten im Gegensatz zu den »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen teilweise annähernd plastischen Charakter. Im Mittel

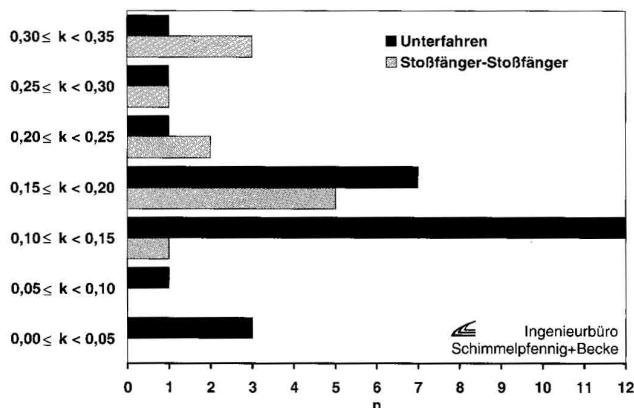


Bild 13 Stoßzahl (»Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen/»Unterfahren«-Kollisionen)
Fig. 13 Coefficient of restitution (bumper-to-bumper impact or underriding impact)

lagen die Stoßzahlen der »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen bei 0,21 und der »Unterfahren«-Kollisionen bei 0,14. Dies deutet auf einen prinzipiell elastischeren Anstoß bei »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen hin. Allerdings reicht die Bandbreite der Stoßzahlen bei »Unterfahren«-Kollisionen auch bis zu Werten von 0,3. Um hier eindeutige Aussagen treffen zu können, wären weitere Versuche sinnvoll. Dies gilt insbesondere für eine Untersuchung der Stoßzahl bei gering überdeckten »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen.

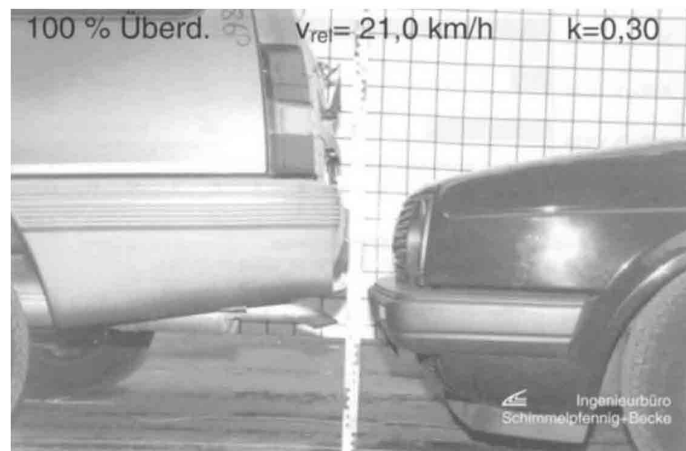


Bild 14 Anstoßkonfiguration
Fig. 14 Impact configuration



Bild 15 Beschädigung des stoßenden VW Golf
Fig. 15 Damage of target vehicle

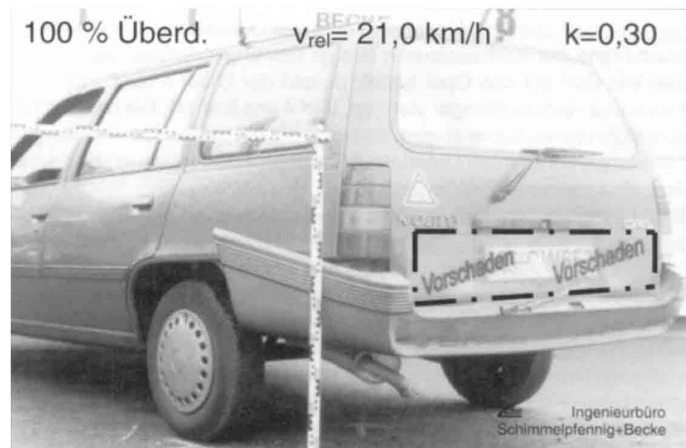


Bild 16 Beschädigung des gestoßenen Opel Kadett
Fig. 16 Damage of bullet vehicle

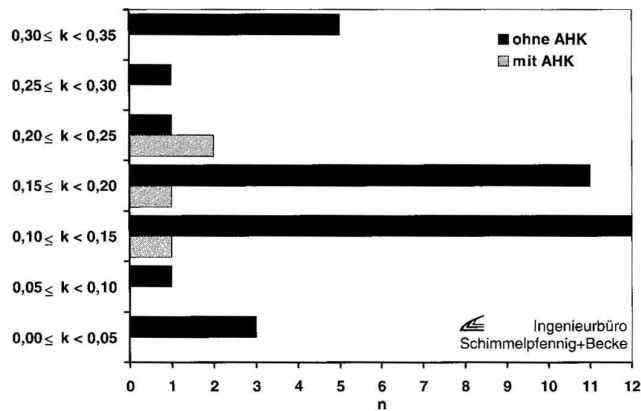


Bild 17 Stoßzahl (mit und ohne Anhängerkupplung)
Fig. 17 Coefficient of restitution (with or without trailer coupling)

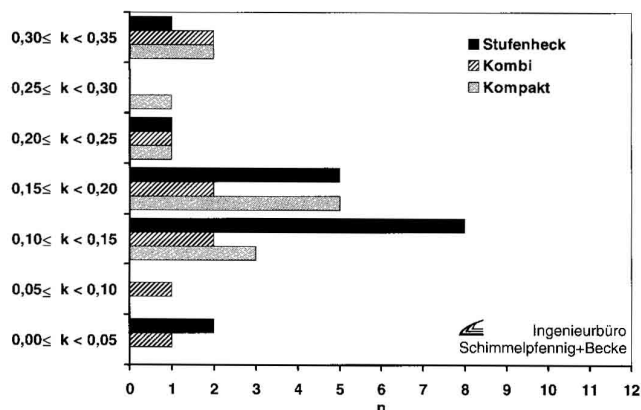


Bild 18 Stoßzahl (Fahrzeugtypen: Stufenheck, Kombi und Kompaktfahrzeug)
Fig. 18 Coefficient of restitution (different car conceptions)

Zur Veranschaulichung des beschriebenen Sachverhalts des »Unterfahrens« ist in den **Bildern 14 bis 16** ein Beispielversuch dargestellt. Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Versuch (Bilder 4 bis 6, bei dem ein VW-Golf ungebremst mit einem Opel Kadett Caravan kollidierte (Bild 4) und dabei die beiden Stoßfänger miteinander kontaktierten ($k = 0,31$), fuhr hier ein VW Golf mit einer Geschwindigkeit von 21,0 km/h gebremst auf das Heck eines stehenden Opel Kadett (Bild 14). Die Stoßzahl dieses Versuchs lag bei 0,30. Aufgrund des Unterfahrens kam es zu einem Kraftaustausch der Bereiche oberhalb des Frontstoßfängers des Golf und des Heckstoßfängers des Opel Kadett. Im Gegensatz hierzu fand der Kraftaustausch infolge des ungebremsten Auffahrens des VW Golf auf den Opel Kadett gemäß der Bilder 4 bis 6 zwischen Front- und Heckstoßfänger statt (vgl. Bild 4 und Bild 14). Die beispielhaft aufgeführten Versuche zeigen, dass sowohl bei Stoßfänger-Stoßfänger-Kollisionen als auch bei Unterfahr-Kollisionen eine deutlich teilelastische Anstoßcharakteristik vorliegen kann.

Bild 17 stellt die ermittelten Stoßzahlen, unterteilt in Versuche mit Fahrzeugen ohne ($n = 34$) und mit Anhängerkupplung ($n = 4$), dar. Ein signifikanter Einfluss einer Anhängerkupplung auf die Teilelastizität einer Pkw-Pkw-Kollision lässt sich, basierend auf den ausgewerteten Crash-Tests, allerdings nicht erkennen. Hierbei ist jedoch auf den geringen Anteil der Versuchsfahrzeuge mit einer Anhängerkupplung hinzuweisen. Weiterhin sind die ermittelten Stoßzahlen, unterteilt nach dem Typ des gestoßenen Fahrzeuges, in **Bild 18** aufgeführt. Danach wird zwischen Stufenheck- ($n = 17$), Kombi- ($n = 9$) und Kompaktfahrzeugen ($n = 12$) unterschieden. Hierbei ist jedoch keine Beeinflussung der Stoßzahl auf dem hier betrachteten Geschwindigkeitsniveau durch diesen Parameter zu erkennen.

Die Analyse der beschriebenen Heckaufprallversuche zeigt letztendlich, dass im wesentlichen der Überdeckungsgrad auf dem hier betrachteten geringen Relativgeschwindigkeitsniveau einen Einfluss auf das teilelastische Verhalten einer Pkw-Pkw-Kollision hat. Ferner lagen allgemein »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen, im Gegensatz zu »Unterfahr«-Kollisionen, nicht unter einer Stoßzahl von 0,1. Ein signifikanter Einfluss einer am gestoßenen Fahrzeug angebrachten Anhängerkupplung sowie des Typs des angestoßenen Fahrzeuges lässt sich den vorliegenden Stoßzahlen nicht entnehmen. Wie bereits unter 3.1 gezeigt werden konnte, liegen die Stoßzahlen bei Pkw-Auffahrkollisionen bis zu einer Relativgeschwindigkeit von etwa 25 km/h nicht unter 0,10 (vgl. Bild 8).

Aufbauend auf diesen Ergebnissen kann der auf die Stoßzahl im wesentlichen Einfluss nehmende Parameter des Überdeckungsgrades in drei verschiedene Abstufungen unterteilt werden. Diesen werden die ent-

Überdeckungsgrad	Stoßzahl
< 50 %	0,00 bis 0,15
≈ 50 %	0,10 bis 0,20
> 50 %	0,15 bis 0,30

Tabelle 1 Stoßzahl in Abhängigkeit des Überdeckungsgrades bei Pkw-Pkw-Heckanstoßen (gerundete Werte; $v_{rel} = 7,8$ bis 32,4 km/h)

Table 1 Coefficient of restitution relative to degree of overlap of vehicle-vehicle rear end impacts (values rounded up; $v_{rel} = 7,8$ bis 32,4 km/h)

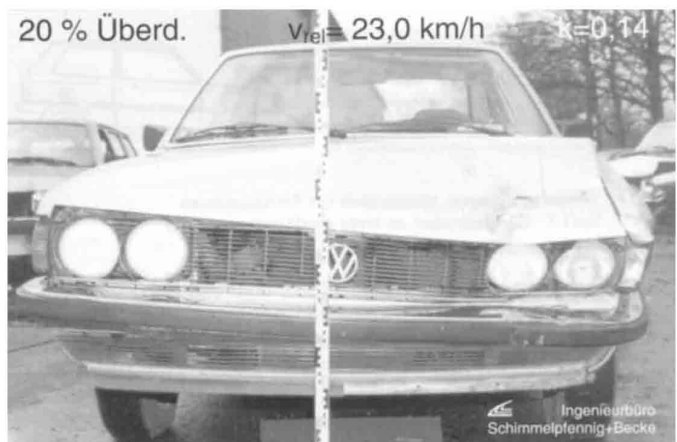


Bild 19 Beschädigung des stoßenden VW Passat
Fig. 19 Damage of bullet vehicle



Bild 20 Beschädigung des gestoßenen Audi 80
Fig. 20 Damage of target vehicle



Bild 21 Beschädigung des stoßenden VW Golf
Fig. 21 Damage of bullet vehicle



Bild 22 Beschädigung des gestoßenen Opel Kadett
Fig. 22 Damage of target vehicle

sprechenden Stoßzahlen der beschriebenen Heckaufprallversuche zugeordnet, um für die Praxis der Unfallrekonstruktion verwendbare Wertebereiche zu erhalten. Bild 11 lassen sich bei einer Überdeckung von bis zu 50 % Stoßzahlen von 0,02 bis 0,14 (σ 0,07; $n = 6$) entnehmen. Bei einem Überdeckungsgrad von etwa 50 % liegen die Stoßzahlen in einem Bereich von 0,10 bis 0,22 (σ 0,13; $n = 10$). Oberhalb einer Überdeckung von 50 % wurden Stoßzahlen von 0,13 bis 0,31 ermittelt (σ 0,20; $n = 22$). In **Tabelle 1** sind diese Stoßzahlen zur praxisnahen Anwendung gerundet in Abhängigkeit des Überdeckungsgrades zusammengestellt. Dabei spiegelt die angegebene Bandbreite die in Bild 11 ersichtliche Streuung von etwa 0,15 wieder. Die Einteilung stellt eine Orientierungshilfe zur Bestimmung des teilelastischen Charakters von Pkw-Auffahrkollisionen dar, die zu einer genaueren Angabe der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung und damit zu einer präziseren Bestimmung der biomechanischen Insassenbelastung infolge eines Heckanstoßes beiträgt. Schließlich muß allerdings deutlich darauf hingewiesen werden, dass unter bestimmten Umständen, wie z.B. besonderen Pkw-Lkw-Kollisionen oder speziellen Formen der unfallbeteiligten Fahrzeuge, durchaus Abweichungen von den in **Tabelle 1** angegebenen Werten vorstellbar sind.

Neben den in den Bildern 4 bis 6 ($k = 0,31$) und 14 bis 16 ($k = 0,30$) gezeigten Versuchen mit einer Überdeckung von 100 % veranschaulichen die nachfolgenden Versuche die in **Tabelle 1** in Abhängigkeit des Überdeckungsgrades abgestuften Stoßzahlen. Die **Bilder 19 bis 20** zeigen die an den Crash-Fahrzeugen durch eine Kollision mit einer Relativgeschwindigkeit von 23,0 km/h hervorgerufenen Deformationen. Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Audi 80

lag bei 11,8 km/h. Dieser Versuch, mit einem Überdeckungsgrad von etwa 20 %, liegt mit einer Stoßzahl von 0,14 bereits an der Obergrenze des für diese Anstoßkonfiguration in **Tabelle 1** angegebenen Wertebereiches.

Bild 21 zeigt den Beschädigungsumfang eines VW Golf, der mit einer Geschwindigkeit von 18,0 km/h auf einen stehenden Opel Kadett (**Bild 22**) auffuhr. Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Kadett lag bei 9,8 km/h. Bei diesem Versuch wurde eine Stoßzahl von 0,16 bei einem Überdeckungsgrad von 50 % berechnet. Der teilelastische Kollisionscharakter dieses Versuches war damit, trotz des vergleichbaren Beschädigungsniveaus, gegenüber dem in den Bildern 4 bis 6 dokumentierten Versuch ($k = 0,31$) wesentlich geringer. Der Vergleich dieser beiden Versuche zeigt damit anschaulich die Abhängigkeit der Stoßzahl vom Überdeckungsgrad der Fahrzeuge. Aus diesem Grunde ist insbesondere im Rahmen der Bestimmung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung und damit der biomechanischen Belastung infolge einer Auffahrkollision der Überdeckungsgrad nicht nur im Hinblick auf die zunehmende Struktursteifigkeit der beteiligten Fahrzeuge, sondern auch bezüglich des steigenden teilelastischen Kollisionscharakters zu berücksichtigen.

4 Fazit

Ausgehend von der Newton'schen Stoßhypothese hat sich die Stoßzahl in der Kollisionsmechanik zur Beschreibung der teilelastischen Kollisionscharakters etabliert. Einheitliche Bezeichnungen sowie konkrete, empirisch ermittelte Angaben zur Stoßzahl sind allerdings in der Literatur kaum vorhanden.

Anhand zahlreicher Versuche kann der bekannte Zusammenhang, dass die Elastizität eines Pkw-Pkw-Anstoßes mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt, bestätigt werden. Bei Relativgeschwindigkeiten bis etwa 25 km/h liegt die Stoßzahl bei Pkw-Auffahrkollisionen nicht unter 0,10. Ergebnisse aus Versuchen mit Überdeckungsgraden unter 50 % und unter 25 km/h stehen allerdings nicht zur Verfügung, so dass hier noch Bedarf an weiteren Versuchen besteht.

Die tiefergehende Untersuchung der Stoßzahl wird auf die Auswertung von insgesamt 38 Pkw-Auffahrkollisionen mit Unfalldatenspeichern sowohl im stoßenden als auch im gestoßenen Fahrzeug und Relativgeschwindigkeiten zwischen 7,8 und 32,4 km/h beschränkt, da in den letzten Jahren die »klassischen« Auffahrkollisionen im Hinblick auf die dadurch hervorgerufenen Verletzungsmöglichkeiten der Halswirbelsäule übermäßig an Bedeutung gewonnen haben. Die in diesem Zusammenhang zu diskutierenden Kollisionen bewegen sich in etwa auf diesem Relativgeschwindigkeitsniveau. Die Berücksichtigung des teilelastischen Charakters einer Kollision spielt bei der Bestimmung der biomechanischen Insassenbelastung eine wesentliche Rolle, da diese mit zunehmender Teilelastizität – entsprechend zunehmender Stoßzahl – bei gleichbleibender Relativgeschwindigkeit ansteigt.

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass der Überdeckungsgrad der unfallbeteiligten Fahrzeuge auf dem betrachteten Relativgeschwindigkeitsniveau der im wesentlichen auf die Stoßzahl Einfluss nehmende Parameter ist. Bei einer Überdeckung von unter 50 % liegen die Stoßzahlen etwa zwischen 0,00 bis 0,15 bei einem Überdeckungsgrad von etwa 50 % zwischen 0,10 und 0,20 sowie bei einer Überdeckung von über 50 % ca. zwischen 0,15 und 0,30. Die Untersuchung ergibt ferner, dass im Mittel die Stoßzahlen bei »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen höher als bei »Unterfahrer«-Kollisionen sind. Die minimale Stoßzahl bei »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionen liegt bei 0,10. Allerdings stehen hierbei, bis auf zwei Kollisionen, lediglich Anstöße mit voller Überdeckung zur Analyse zur Verfügung. Beide Kollisionstypen erreichen dagegen maximale Stoßzahlen von etwa 0,30. Um in diesem Zusammenhang eine klare Tendenz erkennen zu können, wären weitere »Stoßfänger-Stoßfänger«-Kollisionsversuche insbesondere mit geringer Überdeckung sinnvoll. Ein signifikanter Einfluss einer am gestoßenen Fahrzeug angebrachten Anhängerkupplung oder des Typs des gestoßenen Fahrzeuges kann anhand der vorliegenden Versuche nicht aufgezeigt werden.

Die in Abhängigkeit des Überdeckungsgrades eingestufteten Stoßzahlen (**Tabelle 1**) bilden eine Arbeitsgrundlage für die Beurteilung des teilelastischen Charakters einer Pkw-Auffahrkollision. Dabei sind diese Ergeb-

nisse lediglich als Orientierungshilfe anzusehen, da bei besonderen Fahrzeugen und Unfallkonfigurationen auch hiervon abweichende Stoßzahlen vorstellbar sind.

Formelzeichen

k, e	Stoßzahl	[]
s_1	Weg des stoßenden Fahrzeuges	m
s_2	Weg des gestoßenen Fahrzeuges	m
v_1	Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeuges zu Beginn der Kollision	km/h
v_2	Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeuges zu Beginn der Kollision	km/h
v_1'	Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeuges am Ende der Kollision	km/h
v_2'	Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeuges am Ende der Kollision	km/h
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit zu Beginn der Kollision	km/h
v_{rel}'	Relativgeschwindigkeit, Trennungsgeschwindigkeit am Ende der Kollision	km/h
Δv_1	kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des stoßenden Fahrzeuges	km/h
Δv_2	kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Fahrzeuges	km/h
EES_1	Energieäquivalente Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeuges	km/h
EES_2	Energieäquivalente Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeuges	km/h
m_1	Masse des stoßenden Fahrzeuges	kg
m_2	Masse des gestoßenen Fahrzeuges	kg

Literaturnachweis

- [1] Holzmann G., Meyer H., Schumpich G.: Technische Mechanik, Teil 2 Kinematik und Kinetik, Teubner Verlag, Stuttgart, 1991
- [2] Howard R. P., Bomar J., Bare C.: Vehicle Restitution Response in Low Velocity Collisions, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA, 8/1993
- [3] Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke: Crash-Versuche
- [4] Kalthoff W.: Experimentelle Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der Bestimmung der Insassenbewegung auf der Grundlage der Fahrzeugbeschädigungen nach Pkw-Auffahrkollisionen, Diplomarbeit FH Osnabrück, 1997
- [5] Meyer S.: Experimentelle Untersuchung des Zusammenhangs zwischen technischen Kollisionspartnern und der Bewegungskinetik von Insassen im Hinblick auf leichte HWS-Schleudertraumen. Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen der Universität Hannover, 1993
- [6] Meyer S., Hugemann W., Weber M.: Zur Belastung der Halswirbelsäule durch Auffahrkollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 32 (1994), S. 15 bis 21, Verlag Information Ambis GmbH, Kippenheim
- [7] Meyer S., Weber M., Kalthoff W., Schilgen M., Castro W. M. (1999): Freiwilligen-Versuche zur Belastung der Halswirbelsäule durch Pkw-Heckanstoße. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 37 (1999), S. 13 – 24, Verlag Information Ambis GmbH, Kippenheim
- [8] Plankensteiner K.: Mathematische Grundlagen für die Rekonstruktion von Fahrzeugstößen; Dissertation, TH Aachen, 1975
- [9] Schimmelpfennig K.-H.: Die Analyse von Serien-Auffahrunfällen mit Hilfe des Delta V-Schritt-Verfahrens, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 3 (1984), S. 73 – 75, Verlag Information Ambis GmbH, Kippenheim
- [10] Schimmelpfennig K.-H., Schmedding K.: Geschwindigkeits-Differenz-Faktor – eine erweiterte Betrachtung der Stoßtherorie, Automobiltechnische Zeitschrift 91 (1989) 1
- [11] Swanson P. J.: Mechanics Background for Impact Models, Appendix A, Homepage der University of Michigan, <http://krusty.eecs.umich.edu/people/pjswan>
- [12] Szabo I.: Einführung in die technische Mechanik, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1966