

## Die Stoßzahl – ein entscheidender Parameter bei der Rekonstruktion eines Auffahrunfalls

von Dipl.-Ing. Wolfram Kalthoff, Münster\*

*Neben der Einschätzung der von den Fahrzeugen aufgenommenen Deformationsenergien ist bei der Rekonstruktion einer Heckauffahrkollision auch die Elastizität der Kollision durch den technischen Sachverständigen zu beurteilen. Dieses elastische Kollisionsverhalten wird durch die Stoßzahl beschrieben. Bei Heckauffahrkollisionen, bei denen eine Verletzungsmöglichkeit der Halswirbelsäule zu untersuchen ist, muss darauf aufbauend die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung bestimmt werden. Die realistische Einschätzung der Stoßzahl ist hierbei von entscheidender Bedeutung.*

### I. Einleitung

Um eine Heckauffahrkollision zu rekonstruieren, muss die Relativgeschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen ermittelt werden. Dazu müssen die von den Fahrzeugen aufgenommenen Deformationsenergien bestimmt werden. Ein besonders anschauliches Mittel ist hierfür der visuelle Vergleich mit Crashtests [1]. Hierbei werden die Beschädigungsbilder aus Kollisionsversuchen mit den Schäden der real verunfallten Fahrzeuge verglichen. Damit lässt sich eine fundierte und für alle Beteiligten nachvollziehbare Aussage ableiten. Des Weiteren muss jedoch auch die **Elastizität der Kollision** beurteilt werden. Im Rahmen einer Kollision stoßen zwei Fahrzeuge aufeinander und verformen sich. Aufgrund des teilelastischen Kollisionsverhaltens kommt es jedoch während der Kollision zu einer teilweisen Rückverformung der Karosserien. Aufgrund dieser Rückverformung trennen sich die Fahrzeuge am Ende der Kollision wieder voneinander. Aus diesem Verhalten folgt, dass die nach der Kollision an den Fahrzeugen sichtbaren Schäden nur den Zustand nach der Rückverformung zeigen. Das bedeutet, dass die Fahrzeuge während der Kollisi-

sion – vor Beginn der elastischen Rückverformung – noch stärker deformiert waren. Diese **dynamische Verformungstiefe** ist höher als die schließlich sichtbare, bleibende statische Verformung.

In der Abb. 1 ist der Messschrieb einer Heckauffahrkollision exemplarisch dargestellt. Bei dem hier vorliegenden Beispiel fährt ein Pkw mit einer Geschwindigkeit von 18 km/h ( $v_1$ ) auf einen stehenden Pkw ( $v_2 = 0$  km/h) auf. Während der Kompressionsphase verformen sich die Fahrzeuge und deren Geschwindigkeiten gleichen sich an. Am Ende der **Kompressionsphase** haben die Fahrzeuge die maximale dynamische Verformung erreicht und ihre Geschwindigkeiten sind gleich. Aufgrund des elastischen Kollisionsverhaltens beginnt nunmehr die **Restitutionsphase**, bei der die Fahrzeuge sich wieder voneinander trennen. Dabei wird die Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs größer als die Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs, sodass am Ende der Restitutionsphase und damit am Ende der Kollision die Fahrzeuge eine **Trennungsgeschwindigkeit** haben. Die Elastizität einer Heckauffahrkollision lässt sich als Verhältnis der Relativgeschwindigkeiten der Fahrzeu-

\* Der Autor ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münster.

ge nach und vor der Kollision beschreiben. Dieser Quotient wird als **Stoßzahl**, Stoßziffer oder k-Faktor bezeichnet. Im anglophonen Raum hat sich die Bezeichnung Coefficient of Restitution etabliert. Anfänglich wurde die Stoßzahl jedoch Coefficient of Elasticity genannt. Daher ist alternativ zu k auch die Bezeichnung e gebräuchlich.

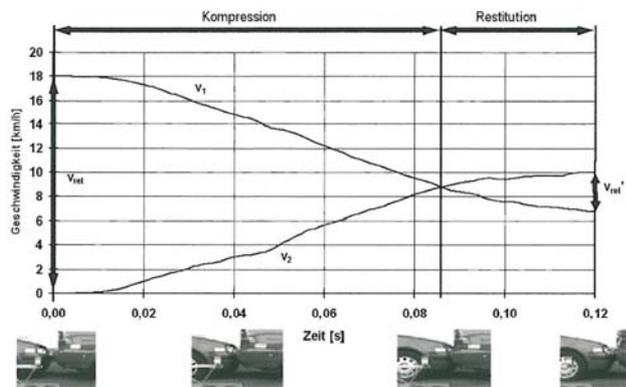


Abb. 1: Beispiel Heckauffahrkollision

Der vorliegende Artikel beschränkt sich auf die Beschreibung des teilelastischen Kollisionsverhaltens von **Heckauffahrkollisionen**. Gerade bei Heckauffahrkollisionen, bei denen die Verletzungsmöglichkeit der Halswirbelsäule untersucht werden soll, ist die genaue Kenntnis der Stoßzahl essenziell. Führt bspw. ein Pkw auf ein gleich schweres Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 15 km/h auf, so resultiert hieraus bei einem voll plastischen Stoß ( $k = 0$ ) eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des heckseitig angestoßenen Fahrzeugs von 7,5 km/h. Berücksichtigt man jedoch das teilelastische Kollisionsverhalten mit einer Stoßzahl von 0,45, so resultiert hieraus eine Geschwindigkeitsänderung von 10,9 km/h. Würde man also fälschlicherweise eine zu geringe Stoßzahl zugrunde legen, so erhielte man eine zu geringe **biomechanische Insassenbelastung**. Das teilelastische Kollisionsverhalten darf somit keinesfalls vernachlässigt werden. Für die Stoßzahl müssen in Abhängigkeit des zu untersuchenden Unfallgeschehens realistische Werte bei der Rekonstruktion berücksichtigt werden.

#### Praxistipp:

Aus einer zu niedrig angesetzten Stoßzahl resultiert im Ergebnis eine zu geringe biomechanische Insassenbelastung. Eine zu hohe Stoßzahl ergibt eine unrealistisch hohe Belastung.

## II. Heckauffahrversuche

Bereits im Jahr 2000 wurden vom Autor **38 Heckauffahrversuche** mit Relativgeschwindigkeiten zwischen 7,8 und 32,4 km/h als Arbeitsgrundlage ausgewertet [2]. Es folgte, dass auf diesem Geschwindigkeitsniveau im Wesentlichen der Überdeckungsgrad der unfallbeteiligten Fahrzeuge Einfluss auf die Stoßzahlen hat. Diese lagen etwa zwischen 0,00 und 0,30.

In den vergangenen Jahren wurden die Fahrzeuge konstruktiv immer weiterentwickelt. Ziel der Konstrukteure war es hierbei, das Gewicht zu reduzieren. Andererseits mussten die Stoßfängersysteme dahingehend optimiert werden, dass die aus einer Kollision resultierenden Schäden möglichst gering waren. In Abb. 2 ist beispielhaft die Entwicklung eines Ford Fiesta dargestellt. Aufgrund der veränderten Bauform der Fahrzeuge ist folglich zu überprüfen, ob die bisher angesetzten Stoßzahlen auch auf **aktuelle Fahrzeugtypen** übertragbar sind. Weiterhin stehen mittlerweile insgesamt deutlich mehr Crashtests zur Verfügung.



Abb. 2: Modellreihen des Ford Fiesta

Nachfolgend werden Heckauffahrkollisionen aus der Crashtest-Datenbank CTS [3] untersucht. Diese **214 Kollisionen** fanden in einem Relativgeschwindigkeitsbereich von 4,5 – 141 km/h statt. Es kamen sowohl Pkw als auch Transporter unterschiedlicher Baujahre zum Einsatz. Des Weiteren werden im Rahmen der nachfolgenden Auswertung **75 Heckauffahrkollisionen** der Datenbank AGU [4] verwendet. Dabei traten Relativgeschwindigkeiten zwischen 9,5 und 61 km/h auf.

Howard et al. [5] führten mit US-amerikanischen Fahrzeugen aus Mitte der 1980er Jahre **neun Kollisionen** mit Pkw sowie Pick-ups in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 5,2 und 11,6 km/h durch, die ebenfalls in die Analyse mit einfließen. Schließlich werden auch die von Cipriani et al. [6] durchgeführten **30 Heckauffahrkollisionen** mit US-amerikanischen Pkw aus den 1980er Jahren mit Geschwindigkeiten von 3,2 – 20,9 km/h berücksichtigt. Damit liegen insgesamt **328 Heckauffahrkollisionen** vor. Die hierbei auftretenden Stoßzahlen liegen zwischen 0,02 und max. 0,73.

## III. Auswertung

Je höher die Relativgeschwindigkeit ist, desto stärker verformen sich die unfallbeteiligten Fahrzeuge. Anschaulich ist folglich davon auszugehen, dass bei **zunehmender Relativgeschwindigkeit** und damit zunehmender Deformation die Kollisionen plastischer, d.h. weniger elastisch verlaufen. In der Abb. 3 sind die Stoßzahlen über der Relativgeschwindigkeit aufgetragen. Hieraus folgt deutlich, dass die Stoßzahl mit zunehmender Relativgeschwindigkeit sinkt.

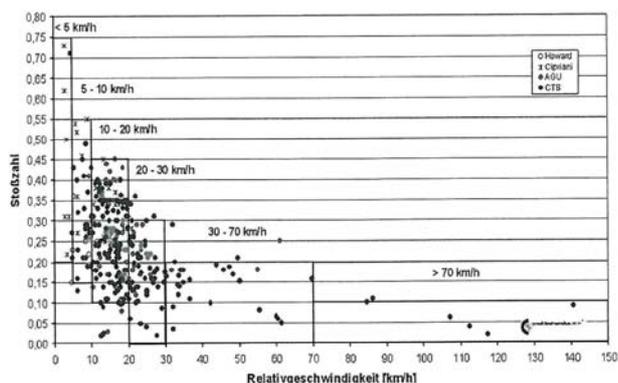


Abb. 3: Stoßzahl in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit

In Abb. 3 sind des Weiteren die gezeigten Stoßzahlen in **Relativgeschwindigkeitsbereiche** unterteilt. Die Stoßzahlen lagen bei Relativgeschwindigkeiten bis zu 5 km/h etwa zwischen 0,2 und 0,75. Bei Relativgeschwindigkeiten von 5 – 10 km/h traten Stoßzahlen von ungefähr 0,15 – 0,55 auf. Zwischen 10 und 20 km/h kam es zu Stoßzahlen zwischen 0,10 und 0,45. Hierbei traten jedoch auch geringere Stoßzahlen auf. Zwischen 20 und 30 km/h lagen Stoßzahlen zwischen 0,00 und 0,35 vor. Bei Relativgeschwindigkeiten von 30 bis 70 km/h waren Stoßzahlen von 0,00 – 0,20 das Ergebnis der Kollision. Bei Relativgeschwindigkeiten oberhalb von 70 km/h nahmen die Stoßzahlen Werte zwischen 0,00 und 0,10 an. Hierbei ist jedoch deutlich darauf hinzuweisen, dass die hier genannten Stoßzahlen auch durch Einzelwerte über- bzw. unterschritten wurden.

Aus Abb. 3 folgt, dass die Relativgeschwindigkeit ein wesentlicher Parameter zur Bestimmung der Stoßzahl ist. Die Stoßzahlbandbreite oberhalb von 70 km/h ist bereits für die Unfallrekonstruktion hinreichend genau. Unterhalb dieser Geschwindigkeit weisen jedoch die Stoßzahlen eine vergleichsweise große Bandbreite auf, sodass noch untersucht werden muss, ob ggf. weitere Parameter eine **Eingrenzung der Stoßzahlen** ermöglichen. Nachfolgend werden zur diesbezüglichen Auswertung die Versuche von CTS und teilweise auch AGU herangezogen, da bei diesen Versuchen sämtliche Parameter der Kollisionen vorlagen.

Bei stark unterschiedlichen **Massenverhältnissen**, etwa wenn das auffahrende Fahrzeug gegenüber dem gestoßenen Fahrzeug besonders schwer oder das auffahrende Fahrzeug gegenüber dem gestoßenen Fahrzeug besonders leicht ist, könnte man vermuten, dass auch dies einen Einfluss auf das elastische Kollisionsverhalten hat. Daher wurde die Stoßzahl im Hinblick auf den Parameter des Massenverhältnisses untersucht. Hierbei konnte jedoch **keine eindeutige Tendenz** festgestellt werden. Daraus folgt, dass das Massenverhältnis kein signifikanter Parameter zur Eingrenzung der Stoßzahl bei einer Heckauffahrkollision ist.

Bei einer Auffahrkollision kommt es oftmals zu einer Bremsung des auffahrenden Fahrzeugs. Hierdurch kommt es aufgrund der dynamischen Achslastverschiebung zu einem Eintauchen der Fahrzeugfront im dynamischen Zustand gegenüber der statischen Höhe. Daraus folgt, dass bei einem gebremst auffahrendem Fahrzeug dessen Stoßfänger nicht mehr auf den Heckstoßfänger des gestoßenen Fahrzeugs trifft, sondern diesen unterfährt. Dadurch kontaktieren strukturweiche Bereiche des stoßenden Fahrzeugs oberhalb des Frontstoßfängers (Kühlergrill, Scheinwerfer etc.) den struktursteifen Heckstoßfänger des gestoßenen Fahrzeuges. Die Auswertung der zugrunde liegenden Stoßzahlen im Hinblick auf diesen Kollisionsparameter ergab, dass hierbei ebenfalls **keine signifikanten Unterschiede** zwischen Stoßfänger-Stoßfänger- und Unterfahrkollisionen festgestellt werden konnten.

Da bei Fahrzeugen mit montierter **Anhängerkuppelung** das Fahrzeugheck struktursteifer ist, ist zu vermuten, dass bei derartigen Fahrzeugen die Elastizität der Kollision zunimmt. Jedoch auch hier konnte **kein signifikanter Einfluss** der Anhängerkuppelung auf die Stoßzahl herausgearbeitet werden. Es kam unabhängig von einer verbauten Anhängerkuppelung am gestoßenen Fahrzeug zu hohen, aber auch zu niedrigen Stoßzahlen.

In einer Publikation von Grundler et al. [7] wurde basierend auf der Analyse von 126 Heckauffahrkollisionen festgestellt, dass der **Bremszustand** des stoßenden Fahrzeugs einen Einfluss auf die Stoßzahl hat. Dieser Parameter wurde daher ebenfalls untersucht. In Abb. 4 sind die Ergebnisse von 180 von CTS durchgeführten Crashtests dargestellt. Der Abb. ist jedoch keine signifikante Abhängigkeit der Elastizität der Kollision vom Bremszustand des auffahrenden Fahrzeugs zu entnehmen. In Abb. 5 wurde ferner der Bremszustand des gestoßenen Fahrzeugs untersucht. Auch hieraus ergibt sich **kein deutlicher Einfluss** auf die Stoßzahl, wenn das gestoßene Fahrzeug ungebremst war oder in einem gebremst Zustand angetroffen wurde. Hierbei wurden 157 von CTS ausgeführte Tests untersucht.

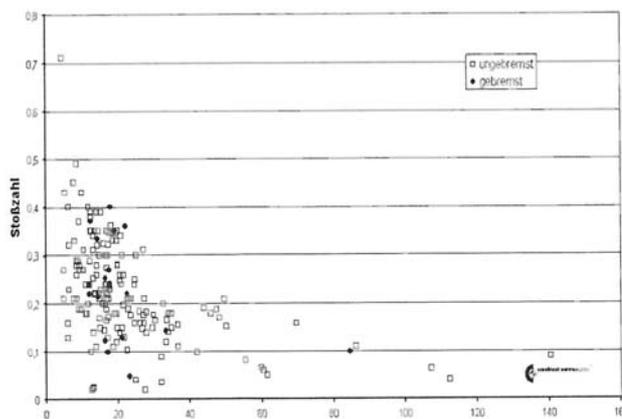


Abb. 4: Stoßzahl in Abhängigkeit des Bremszustandes des auffahrenden Fahrzeugs

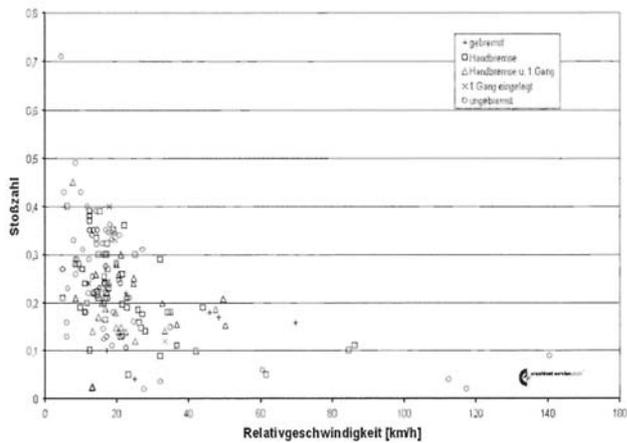


Abb. 5: Stoßzahl in Abhängigkeit des Bremszustandes des gestoßenen Fahrzeugs

Da bereits bei Erstellung der obengenannten Arbeitsgrundlage eine Abhängigkeit der Stoßzahl vom Überdeckungsgrad aufgezeigt werden konnte, bietet es sich an, die in Abb. 3 dargestellten Stoßzahlen **unterhalb einer Geschwindigkeit von 70 km/h** hinsichtlich der Abhängigkeit vom Überdeckungsgrad zu untersuchen. Der Überdeckungsgrad wurde dabei in Bereiche von bis zu 30 %, >30 % bis 60 % und >60 % bis 100 % unterteilt.

Bei Relativgeschwindigkeiten zwischen 30 und 70 km/h wurde festgestellt, dass bei einem Überdeckungsgrad von bis zu 30 % Stoßzahlen zwischen 0,00 und 0,10 zu erwarten sind.

Oberhalb dieses Überdeckungsgrades liegen die Stoßzahlen etwa zwischen 0,05 und 0,20. Bei Relativgeschwindigkeiten zwischen 20 und 30 km/h liegen bei einem Überdeckungsgrad von bis zu 30 % Stoßzahlen von 0,00 – 0,15, bei 30 – 60 % von 0,10 – 0,20 und bei 60 – 100 % Überdeckung ca. von 0,15 – 0,30 vor.

Auf einem Relativgeschwindigkeitsniveau zwischen 10 und 20 km/h lagen die Stoßzahlen ungefähr bei 0,10 – 0,45. Es traten aber auch Stoßzahlen nahe des vollplastischen Stoßes – also 0,00 – auf. Auf diesem Geschwindigkeitsniveau lassen sich die Stoßzahlen für einen Überdeckungsgrad bis max. 60 % zwischen 0,10 und 0,35 angeben.

Bei einer Überdeckung von mehr als 60 % treten höhere Stoßzahlen von bis zu 0,45 auf. Stoßzahlen von 0,40 – 0,45 traten jedoch fast ausnahmslos bei Anstoßen mit **voller Überdeckung, Stoßfänger-Stoßfänger-Kontakt und mit modernen Fahrzeugen** auf. In Abb. 6 ist hierzu ein Beispiel dargestellt. Die Abb. 7 zeigt jedoch, dass selbst bei Fahrzeugen älteren Baujahres vergleichsweise hohe Stoßzahlen auftreten können.



Abb. 6: Relativgeschwindigkeit 14,2 km/h,  $k = 0,44$  ([8] in [4])



Abb. 7: Relativgeschwindigkeit 18 km/h,  $k = 0,40$  [3]

In dem Relativgeschwindigkeitsbereich zwischen 5 und 10 km/h kam es ausschließlich zu Kollisionen, die **oberhalb eines Überdeckungsgrades von 60 %** durchgeführt wurden. Die hierbei erreichten Stoßzahlen lagen zwischen 0,15 und 0,50. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Versuche von CIPRIANI folgt hieraus eine Bandbreite von ca. 0,15 – 0,55. Die Analyse der Stoßzahlen im Hinblick auf den Überdeckungsgrad war in diesem Bereich nicht möglich. Bei Relativgeschwindigkeiten bis max. 5 km/h konnte lediglich auf die Versuchsergebnisse von CIPRIANI zurückgegriffen werden. Die hierbei mit US-amerikanischen Fahrzeugen erreichten Stoßzahlen lagen etwa zwischen 0,20 und 0,75. Eine tiefer gehende Analyse der Kollisionsparameter konnte hier nicht durchgeführt werden.

In Bild 8 ist ein Versuch dargestellt, bei dem ein VW Fox mit einer Geschwindigkeit von 4,5 km/h auf einen stehenden VW Golf auffuhr. Hierbei trat eine **extrem hohe Stoßzahl** von 0,71 auf. Infolge der unterschiedlichen Massen der Versuchsfahrzeuge erfuhr der VW Fox eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von 4,5 km/h. Dies entspricht seiner Kollisionsgeschwindigkeit. Damit kam der VW Fox

durch die Kollision zum Stillstand. Der gestoßene VW Golf erfuhr eine Geschwindigkeitsänderung von 3,2 km/h. Bei diesem Extrembeispiel lag eine äußerst niedrige Relativgeschwindigkeit vor. Des Weiteren besitzen diese Fahrzeuge massive Stoßfängerträger und sind folglich sehr hart.



Abb. 8: Relativgeschwindigkeit 4,5 km/h,  $k = 0,71$  [3]

#### IV. Ergebnis

Aus der durchgeführten Analyse folgt, dass im Wesentlichen die Relativgeschwindigkeit und der Überdeckungsgrad verantwortlich für die Stoßzahl sind. Die Ergebnisse sind in Abb. 9 zusammengefasst. Diese Tabelle ist für den Unfallrekonstrukteur eine grundlegende Arbeitshilfe zur Bestimmung der im zu untersuchenden Fall anzusetzenden Stoßzahl. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei um eine **prinzipielle Klassifizierung** handelt, sodass auch hiervon abweichende Werte auftreten können. Im Zweifelsfall ist die Verwendung von einzelnen konkreten Crashversuchen ratsam.

$V_{rel}$	Überdeckung	Stoßzahl
< 5 km/h		0,20 – 0,75
5 – 10 km/h		0,15 – 0,55
10 – 20 km/h	< 60 %	0,10 – 0,35
	> 60 %	0,10 – 0,45
20 – 30 km/h	0 – 30 %	0,00 – 0,15
	> 30 – 60 %	0,10 – 0,20
	> 60 – 100 %	0,15 – 0,30
30 – 70 km/h	< 30 %	0,00 – 0,10
	> 30 %	0,05 – 0,20
> 70 km/h		0,00 – 0,10

Abb. 9: Klassifizierung der Stoßzahlen

#### V. Zusammenfassung

Bei der Rekonstruktion einer Heckauffahrkollision ist neben der von den Fahrzeugen aufgenommenen Deformationsenergie die **Elastizität der Kollision** zu beurteilen. Diese wird mathematisch durch die **Stoß-**

**zahl** beschrieben. Die Stoßzahl hat einen **maßgeblichen Einfluss** auf die Berechnung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung und damit auf die Bestimmung der **biomechanischen Belastungshöhe**. Die Bandbreite möglicher Stoßzahlen ist gegenüber früheren Erkenntnissen bei Heckauffahrkollisionen extrem hoch. Eine Abhängigkeit der Stoßzahl vom Massenverhältnis, der Anstoßhöhe, einer Anhängerkupplung oder vom Bremszustand des stoßenden oder gestoßenen Fahrzeugs ist **nicht signifikant** darstellbar. Der wesentliche Parameter zur Bestimmung der Stoßzahl ist dagegen die **Relativgeschwindigkeit**. Diese kann in mehrere Bereiche eingestuft werden. Hierbei ist ferner eine Unterteilung anhand des **Überdeckungsgrades** sinnvoll. In dem Relativgeschwindigkeitsbereich zwischen 10 und 20 km/h, der insbesondere bei Heckauffahrkollisionen von Interesse ist, bei denen eine Verletzungsmöglichkeit der Halswirbelsäule zu untersuchen ist, können Stoßzahlen bis zu 0,4 auftreten. Bei **modernen Fahrzeugen**, strukturstreifen Stoßfängersystemen und vollem Überdeckungsgrad wurden sogar Stoßzahlen bis 0,45 ermittelt. Maximale Stoßzahlen von bis zu 0,75 treten bei Relativgeschwindigkeiten von bis zu 5 km/h auf. Die in Tabelle 1 dargestellte **Klassifizierung der Stoßzahlen** liefert eine Arbeitsgrundlage zur Bestimmung der Elastizität einer Kollision. Hierbei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass vereinzelte Abweichungen von den prinzipiellen Abstufungen möglich sind. Im Zweifel ist es sinnvoll, geeignete **Crashversuche** mit vergleichbaren Fahrzeugen heranzuziehen, um die Stoßzahl enger einzugrenzen.

#### Literatur:

- [1] KALTHOFF, W.: Unfallanalyse durch visuellen Vergleich mit Crashtests, VRR 2006, 14
- [2] KALTHOFF, W.; Becke, M.: Die Stoßzahl bei Auffahrkollisionen; Ein wesentlicher Parameter zur Bestimmung der HWS-Belastung, Verkehrsunfall- und Fahrzeugtechnik 10/2000
- [3] [www.crashtest-service.com](http://www.crashtest-service.com)
- [4] [www.agu.ch](http://www.agu.ch)
- [5] HOWARD, R. P., BOMAR, J., BARE, C.: Vehicle Restitution Response in Low Velocity Collisions, Society of Automotive Engineers, SAE Future Transportation Technology Conference, San Antonio, Texas, USA 8/1993
- [6] Cipriani, A.L., Bayan, F. P., Woodhouse, M. L., Cornetto, A. D., Dalton, A. P., Tanner, C. B., Timbario, T. A., Deyerl, E. S.: Low Speed Colinear Impact Severity: A Comparison between Full Scale Testing and Analytical Prediction Tools with Restitution Analysis, Society of Automotive Engineers, SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA 3/2002
- [7] GRUNDLER, R.; SINZIG, B.; EICHHOLZER, TH.; BRUNNER, A., Eingrenzung der Stoßzahl k für die Rekonstruktion von Heckkollisionen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 10/2008
- [8] [www.dtc-ag.ch](http://www.dtc-ag.ch)