

K.-H. Schimmelpfennig*

Kollisionsgeschwindigkeitsberechnung

bei eindimensionalen

Fahrzeug/Fahrzeug-Kollisionen

Die Ausarbeitung wurde gefördert durch das Sachverständigenbüro Radeck, Wissler und Prußnat, Gießen

Band-Schnitt-Verfahren

Grundsätzlich ist die Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeiten bei eindimensionalen Fahrzeug/Fahrzeug-Kollisionen mit Kenntnis des Unfallortes unproblematisch.

Durch Beschreibung der Auslaufvorgänge kann der Impuls-Erhaltungssatz und durch die Beschreibung der Fahrzeugbeschädigung der Energieerhaltungssatz Anwendung finden. Für die unbekanntenen Kollisionsgeschwindigkeiten v_{1x} und v_{2x} stehen somit zwei Gleichungen zur Verfügung, die eine eindeutige Lösung ermöglichen.

Da im Rahmen der Unfallrekonstruktion Absolutwerte nicht vorliegen, ist es von Interesse, welchen Einfluß die einfließenden Toleranzen auf das Endergebnis haben. Im folgenden wird eine grafische Lösungsfindung vorgestellt, die eine klare Darstellung des Toleranzfeldes ermöglicht.

Zur grafischen Lösungsfindung sind die Gleichungen als Funktion $v_{1x} = f(v_{2x})$ umzustellen.

Aus dem Impuls-Erhaltungssatz für einen plastischen Stoß

$$m_1 \cdot v_{1x} + m_2 \cdot v_{2x} = (m_1 + m_2) v_x' \quad (1)$$

folgt:

$$v_{1x} = \frac{(m_1 + m_2) \cdot v_x'}{m_1} - \frac{m_2}{m_1} \cdot v_{2x} \quad (2)$$

Dies ist die Gleichung einer Geraden, die sich im Diagramm entsprechend Bild 1 darstellt.

Im rechten Quadranten sind beide Kollisionsgeschwindigkeiten positiv. Es wird ein Auffahrunfall beschrieben. Der linke Quadrant beschreibt einen Frontalzusammenstoß.

Zum Einzeichnen der Geraden im Koordinaten-System ist zuerst $v_{2x} = 0$ zu setzen. Man erhält den Durchgangspunkt durch die y-Achse (v_{1x}).

$$v_{1x}(\text{für } v_{2x} = 0) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot v_x'}{m_1} \quad (3)$$

*Dipl.-Ing. (TU) K.-H. Schimmelpfennig
Öff. best. u. vereidigter Sachverständiger für Kfz.-Technik
und Straßenverkehrsunfälle
Ingenieurbüro Schimmelpfennig und Becke
Im Bilskamp 2 F 44 Münster-Wolbeck

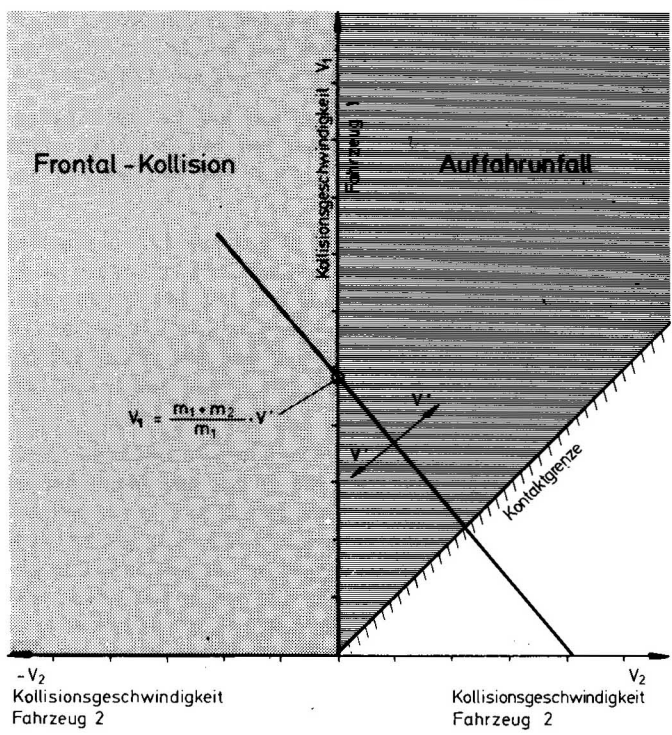


Bild 1 Darstellung des Impuls-Satzes

Die Steigung der Geraden wird durch das Massenverhältnis vorgegeben.

$$\text{Steigung} = - \frac{m_2}{m_1} \quad (4)$$

Aus dem Energie-Erhaltungssatz

$$\Sigma E_{\text{vor}} = \Sigma E_{\text{nach}} + \Sigma E_{\text{Form}} \quad (5)$$

folgt für einen plastischen Stoß

$$v_{1x} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{Form}}(m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}} + v_{2x} \quad (6)$$

Dies ist ebenfalls die Gleichung einer Geraden, die sich im Diagramm entsprechend Bild 2 darstellt.

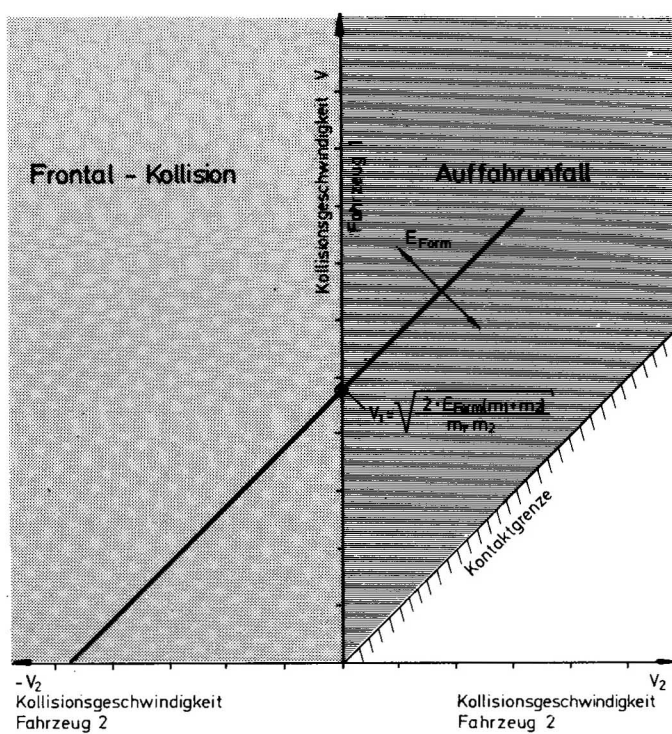


Bild 2 Darstellung des Energie-Satzes

Setzt man für $v_{2x} \gg 0$ ein, erhält man ebenfalls den Durchgang der Geraden durch die y-Achse. Die Steigung ist stets »1«. Bei gleichem Maßstab der Achsen verläuft die Gerade somit unter 45° .

Beim Impuls-Satz liegt eine negative Steigung vor, beim Energie-Satz eine positive. Die Geraden schneiden sich. Der Schnittpunkt gibt die Lösung beider Gleichungen für die Unbekannten v_{1x} und v_{2x} wieder, siehe Bild 3.

Da im Rahmen der Verkehrsunfallrekonstruktion Toleranzen zu beachten sind, und diese für den Ausgang eines Verfahrens häufig entscheidender sind als Mittelwerte – in [1] wird im Kapitel 7 hierauf deutlich hingewiesen – muß auch bei relativ einfachen Berechnungsverfahren nach Möglichkeiten gesucht werden, die tatsächlichen Toleranzen zu erfassen und anschaulich und verständlich darzulegen.

Bei der Verknüpfung von Impuls- und Energie-Satz ist in der Handhabung und Darstellung die grafische Methode der rechnerischen überlegen. Wird rechnerisch vorgegangen, dann sind die partiellen Ableitungen zu bilden. Das Ergebnis ist jedoch unübersichtlich, und der Einfluß der Toleranzen nur schwer zu erkennen. Das vorgestellte grafische Verfahren erlaubt auch einem Nicht-Techniker, den Einfluß der Toleranzen zu erkennen. Es ist schnell manuell durchzuführen und erlaubt eine Variation während der Verhandlung.

Im konkreten Fall schlagen sich die Toleranzen im Diagramm als Lösungsfeld nieder, siehe Bild 4.

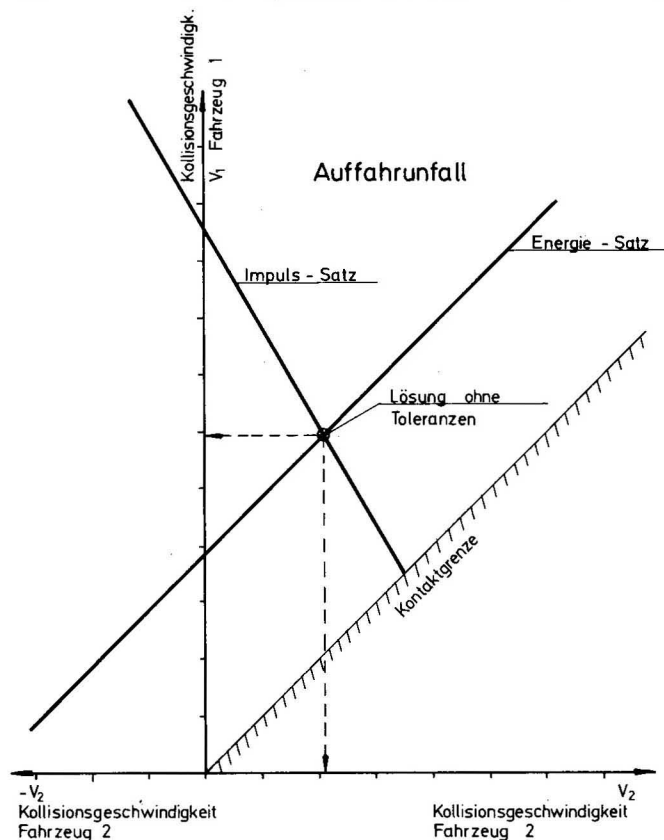


Bild 3 ► Verknüpfung zwischen Impuls- und Energie-Satz

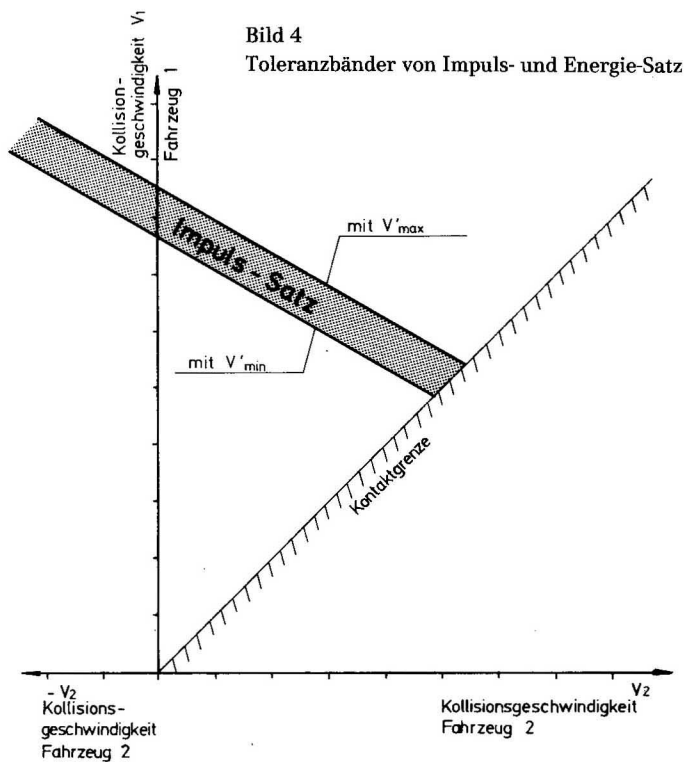
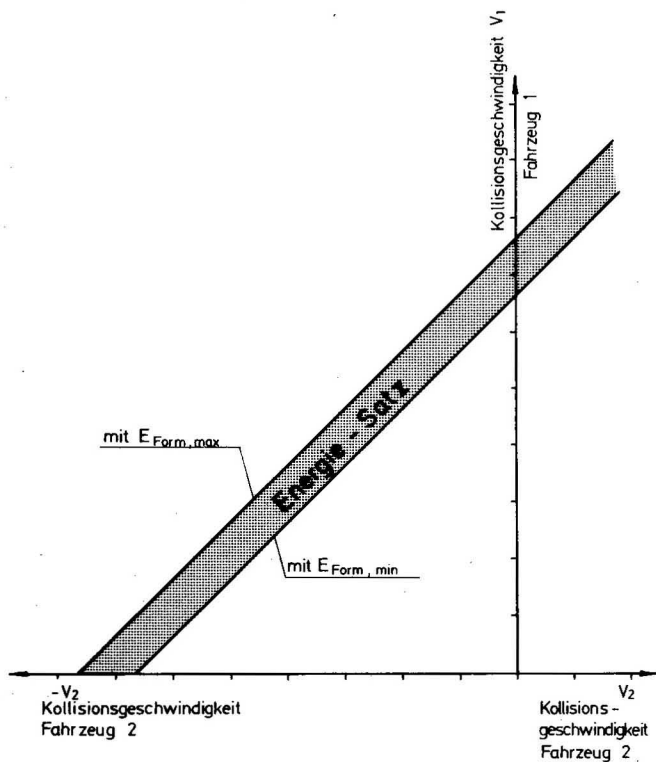


Bild 4
Toleranzbänder von Impuls- und Energie-Satz

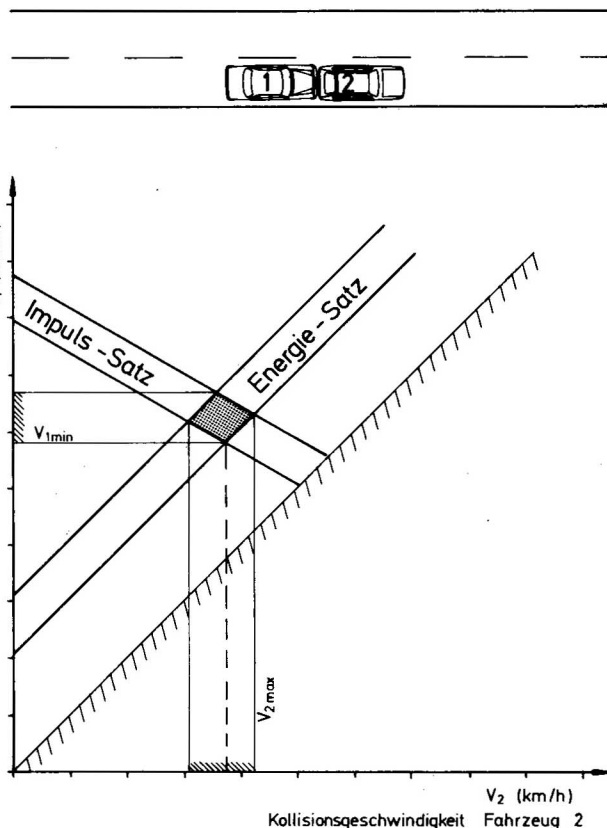
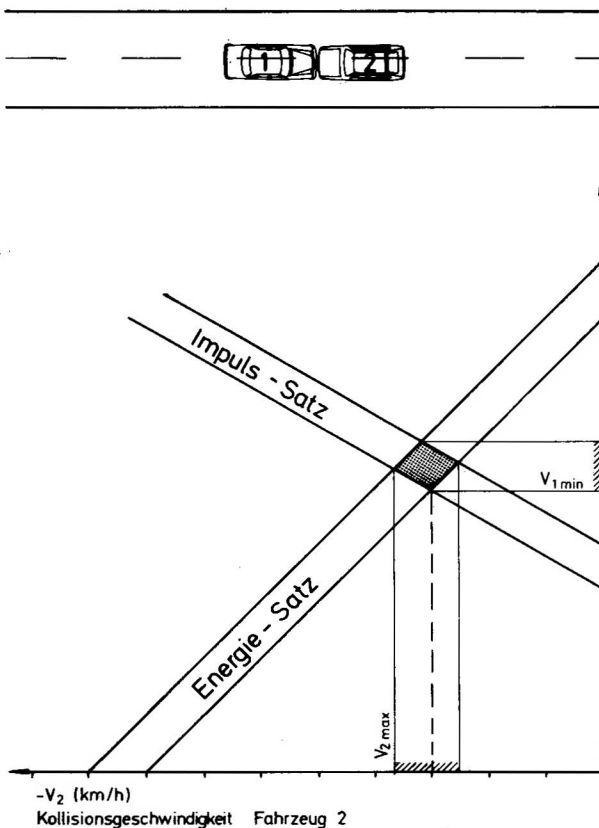


Bild 5 Band-Schnitt-Verfahren

Werden beide Lösungsfelder miteinander verknüpft, dann stellt das im Schnitt vorhandene Parallelogramm das gesamte Lösungsfeld dar, auch lassen sich die gegenseitigen Abhängigkeiten z.B. zwischen v_{1max} zu v_{2x} oder v_{2min} zu v_{1x} direkt ablesen.

Literatur

- [1] Danner, Halm
Technische Analyse von Verkehrsunfällen
Kraftfahrzeugtechnischer Verlag, München 82

Dr. Gerhart Prell, Dipl.-Physiker, Gutachter im Sachgebiet Physik des Bay. Landeskriminalamtes, an der Grundbreite 17, 8031 Weßling

Leserbrief zum Artikel:

»Geschwindigkeiten bei kreisförmiger Bogenfahrt, Stabilitäts- und Sicherheitsgrenzen«

im »Verkehrsunfall« 5/82, Seite 97.

Der Artikel enthält dankenswerte Überlegungen zur Frage, welche Fahrgeschwindigkeiten von PKW-Fahrern auf einer Kurvenstrecke bei normaler Fahrt oder im Grenzfahrtzustand gewählt werden können. Der Grundansatz der Überlegungen dieses Artikels besteht darin, daß der richtige Lenkwinkel am Fahrzeug in vernachlässigbarer Zeit eingestellt wird (V-förmige Lenkeinleitung).

Die Übertragung der hier durchgeführten Modellrechnung auf forensische Gutachten ist jedoch problematisch, da die zudem vorgenommene Idealisierung der Fahrzeugbewegung (genau längs der Fahrbahn) der Tatsache nicht Rechnung trägt, daß ein realer Fahrbetrieb durch eine Rückkopplung zwischen Fahrzeugbewegung und Fahrerreaktion gekennzeichnet ist. Diese Rückkopplung erfolgt über visuelle und taktile Reize; sie veranlassen den Lenker zu Reaktionen, die der Fahrspur stabilisierung dienen.

1. Auch auf gänzlich gerader Fahrbahn wird ein Fahrzeug nicht auf einer Geraden fahren. Auf das Fahrzeug wirken auf seinem Weg Kräfte von außen ein (Querwellen, Spurrillen, Quermiegung, Seitenwind u.ä.); weiterhin können die Bauteile des Fahrzeugs nicht spielfrei gelagert sein.

Während der Fahrt eines Fahrzeugs auf der Fahrbahn erfolgen daher ständig korrigierende Eingriffe des Fahrzeuglenkers. Diese Eingriffe können angenähert durch eine periodische Fahrerreaktion beschrieben werden; sie haben eine Periodendauer von 3-20 s (eigene Messungen). Die Unterschiede der Korrekturzeiten lassen sich aus dem Fahrercharakter, dessen Fahrpraxis, durch das gefahrene Fahrzeug und den Fahrbahnverlauf erklären. Die Korrekturlenkungen führen zu einem vergrößerten Breitenbedarf des Fahrzeugs im ungestörten Fahrbetrieb von 0,3-1 m.

2. Am Übergangspunkt einer Gerade in eine Kurve wird vom Fahrer nicht die Überlegung angestellt, daß bei 80 m Kurvenradius am Kurvenbeginn ein Lenkwinkel von 1,7° (bzw. am Lenkrad von 37°) eingestellt werden muß. Es wird vielmehr ein aus der Fahrpraxis angenehmer Lenkwinkel eingespeist, und danach die Spurhaltung des Fahrzeugs geprüft. Überlicherweise erfolgt eine Korrektur des Lenkwinkels etwa 2-3 s nach Kurvenbeginn.

Würde bei der primären Lenkwinkleinstellung für die Kurvenfahrt ein zu geringer Wert eingestellt, so muß nun in einer engeren Korrekturkurve weitergefahren werden. Eine Berechnung der auftretenden Querbeschleunigung eines Fahrzeugs allein aus dem mittleren Krümmungsradius der Fahrbahnkurve führt zu deutlich niedrigeren Seitenbeschleunigungswerten als tatsächlich bei der realen Kurvenfahrt eines PKW in dieser Kurve auftreten.

3. Die angegebene Stabilitätsgrenze von $a_1 = 7 \text{ ms}^{-2}$ stellt für den normalen Fahrzeuglenker einen über längere Kurvenstrecken unerreichbaren Wert dar; er liegt im Bereich des Grenzfahrtzustandes von modernen Fahrzeugen ($\Delta 7,5 - 8,5 \text{ ms}^{-2}$ auf trockener, extrem griffiger Fahrbahn [1]). Bei einer derartigen Querbeschleunigung laufen beide Radsätze eines Fahrzeugs bereits mit Schräglaufwinkeln von etwa 6°; Schwerpunktsbewegungsrichtung und Fahrzeuglängsachse fallen deutlich auseinander.

Der Beweis dafür, daß auch Berufskraftfahrer auf Fahrzeugen der Spitzenklasse den Bereich der Stabilitätsgrenze deutlich meiden, findet sich in [2]. Höhere Seitenbeschleunigungen als etwa 4 ms^{-2} (Maximum bei Geschwindigkeiten von 40-60 km/h) traten hier praktisch nicht auf. Die Meßergebnisse in dieser Veröffentlichung enthalten zudem den Seitenbeschleunigungswert auch der Korrekturkurven (siehe Punkt 2).

4. Während bei weiten Kurven (Radius über 100 m) die Lenkradeinstellzeit bezogen auf den Kurvenweg nahezu vernachlässigt werden kann, ist für den bei Schimmelpfennig angegebenen Geschwindigkeitsbereich unter 30 km/h diese Vernachlässigung nicht mehr möglich. Die Querbeschleunigung an der Sicherheitsgrenze bedeutet (stationär gerechnet):

| Geschwindigkeit | Kurvenradius | Lenkwinkel | Lenkraddrehwinkel |
|-----------------|--------------|------------|-------------------|
| 20 km/h | 15,0 m | 9° | 180° |
| 15 km/h | 11,5 m | 12° | 240° |
| 10 km/h | 7,7 m | 18° | 360° |

Der hier als zulässig gegebene Querbeschleunigungswert kann also nur erreicht werden, wenn am Lenkrad große Drehwinkel eingestellt werden. Die mittleren Lenkraddrehgeschwindigkeiten sind aber abhängig vom zu erreichenden Winkelwert und sinken von ca. 450 s^{-1} bei Verreißenkungen (unter 30°) auf ca. 270 s^{-1} ab (bei Winkeln von ca. 360°).

Ein Beispiel zeigt die Bedeutung der Lenkradeinstellzeiten: Es soll an der »Sicherheitsgrenze« mit 15 km/h Fahrgeschwindigkeit eine 90°-Kurve mit 11,5 m Radius durchfahren werden. Der Kurvenweg beträgt 18 m; die Kurvenfahrzeit 4,4 s. Für die Einstellung der Vorderräder auf den Kurvenradius von 11,5 m wird die Zeit von mindestens 0,9 s benötigt. Das Lenkrückstellen soll in der gleichen Zeit erfolgen. Das Fahrzeug fährt während dieser Stellzeiten auf einem sehr viel größeren Bogen (im Mittel: doppelter Radius) den Weg von 7,5 m.

40% der Kurvenstrecke werden daher auf dem größeren Bogen zurückgelegt; um den angestrebten mittleren Radius von 11,5 m erreichen zu können, müßte ein deutlich kleinerer Radiuswert im Kurvenscheitel eingestellt werden (d.h. es muß noch länger am Lenkrad gedreht werden).

Diese Betrachtung der engen Kurvenfahrt mit Lenkradeinstellzeit zeigt daher, daß die vorgeschlagenen Querbeschleunigungen (Sicherheitsgrenze) im Geschwindigkeitsbereich von unter 30 km/h von einem »real« fahrenden Fahrzeuglenker nicht gewählt werden.

Zur Bestätigung wird wieder auf [2] hingewiesen: Die Messungen ergaben bei Geschwindigkeitswerten unter 30 km/h tatsächlich auftretende Querbeschleunigungen von 1 ms^{-2} (Grenze: $1,5 \text{ ms}^{-2}$).

5. Wird demgegenüber bei engen Kurvenfahrten (Einmündungen, Kreuzungen u.a.) vor der Kurvenwegstrecke angehalten, so kann die Lenkradeinstellung vor dem Anhalten bzw. im Stand erfolgen. Der nachfolgende Kurvenfahrvorgang wird dann nur durch die gewählte Anfahrbeschleunigung und die Reibwertgrenzen: Reifen/Fahrbahn an der Antriebsachse bestimmt.

6. Für die Beurteilung, ob eine fahrtechnisch mögliche Fahrgeschwindigkeit in einer Kurve gewählt wurde, ist daher (ggf. im Wert etwas vermindert) die Sicherheitsgrenze anzusetzen. Die Seitenbeschleunigungswerte in VU 5/82 unter 30 km/h sind jedoch nicht in den realen Fahrbetrieb umzusetzen.

Der Querbeschleunigungswert der Stabilitätsgrenze ist für den realen Fahrbetrieb in Kurven nicht anzusetzen und sollte daher als zulässiger, frei wählbarer Wert nicht mehr diskutiert werden.

Literatur

- [1] Burckhardt M.: Verkehrsunfall 4/82
- [2] Burckhardt M.: Verkehrsunfall 2/77