

K.-H. Schimmelpfennig\*  
N. Hebing\*\*

## Das Energie-Ring-Verfahren

### Grafische Lösung der Stoßgleichungen

#### unter Einbeziehung

#### der Formänderungsenergie

#### 1. Einleitung

Der Bewegungszustand eines Fahrzeuges läßt sich im allgemeinen durch die Schwerpunktsgeschwindigkeit beschreiben. Kommt es zu einer Kollision mit einem anderen Fahrzeug oder einem festen Hindernis, können sich folgende Änderungen ergeben:

- Die Geschwindigkeit des Schwerpunktes ändert sich nach Betrag und Richtung
- Der Translation des Schwerpunktes wird eine Rotation überlagert, so daß die Längsachse des Fahrzeuges gegenüber ihrer ursprünglichen Richtung verdreht wird
- Das vor der Kollision unbeschädigte Fahrzeug ist nach der Kollision deformiert
- Diese Änderungen ergeben sich auch für den zweiten Kollisionspartner.

Für das System aus beiden Stoßpartnern gelten folgende physikalische Gesetzmäßigkeiten:

- Impulserhaltung
- Drehimpulserhaltung und
- Energieerhaltung.

Auf diesen drei Erhaltungssätzen basiert letztlich jedes Rechenverfahren zur Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge.

Im Gegensatz zu anderen Disziplinen ist es im Rahmen der Unfallrekonstruktion nicht möglich, die für die Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeit benötigten Daten exakt anzugeben. Im nachhinein wird es daher nicht möglich sein, aus den Fahrzeugendstellungen in bezug auf die Kollisionsstellung unter Berücksichtigung der Beschädigungsbilder der Fahrzeuge Absolutwerte für die Kollisionsgeschwindigkeiten zu berechnen. Es lassen sich nur untere und obere Grenzen erfassen, also eine Bandbreite. Die Größenordnung der Bandbreite hängt einerseits von dem Fehler ab, mit dem die Eingabedaten behaftet sind, und andererseits auch davon, in welcher Weise sich dieser Fehler in einem speziellen Rechenverfahren auswirkt. Als Beispiel sei hier die Kollision unter nahezu 180° Kollisionswinkel genannt. Berücksichtigt man in diesem Fall nur den Impulserhaltungssatz, so bewirkt eine leichte Änderung der Stoßausgangswinkel eine starke Änderung der Kollisionsgeschwindigkeiten. Eine bessere Eingrenzung der Er-

\*Dipl.-Ing. (TU) K.-H. Schimmelpfennig  
Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle.  
\*\*Dipl.-Physiker N. Hebing  
Mitarbeiter im Ing.-Büro Schimmelpfennig und Becke  
Im Bilskamp 2 f, 4400 Münster-Wolbeck

gebnisse erhält man nur dann, wenn zur Berechnung auch die anderen Erhaltungssätze herangezogen werden. Für eine genaue Analyse einer Kollision ist es daher wichtig, möglichst alle drei Erhaltungssätze heranzuziehen. Dies wird nicht immer zu realisieren sein, da nicht alle Daten, die dann benötigt werden, zur Verfügung stehen.

In den Ursprüngen der Unfallrekonstruktion erfolgte in der Regel die Kollisionsgeschwindigkeitsberechnung auf der Basis der Impulserhaltung. Neben der klassischen Darstellung des Impulsdigrammes wurde durch (1) ein für die Praxis der Unfallrekonstruktion verbessertes Verfahren aufgezeigt. In (2) wurde ein weiteres Verfahren gezeigt, das neben der einfachen Handhabung gleichzeitig die einfließenden Toleranzen im Rahmen eines einzigen Lösungsganges erfaßt.

#### 2. Impuls-Spiegel-Verfahren

Bei diesem Verfahren wurde darauf geachtet, daß die Stoßeinlaufimpulse direkt über den Kontaktpunkt K eingezeichnet werden können. Dies erlaubt die grafische Anwendung des Impulssatzes direkt in der skizzierten Unfallposition und ist von daher anschaulicher.

Durch Antragung der Bandbreite der Stoßauslaufwinkel und der Bandbreite der Stoßauslaufimpulse läßt sich ein Schnittfeld aufzeigen, in dem die Stoßimpulse enden. Durch dieses Schnittbild ist auch die Richtung, also die räumliche Lage des Stoßimpulses im System vorgegeben. Allein durch Überprüfung der Drehbewegung der Fahrzeuge läßt sich eine erste Aussage treffen, ob die angesetzten Ausgangsdaten den vorliegenden Fall konkret beschreiben.

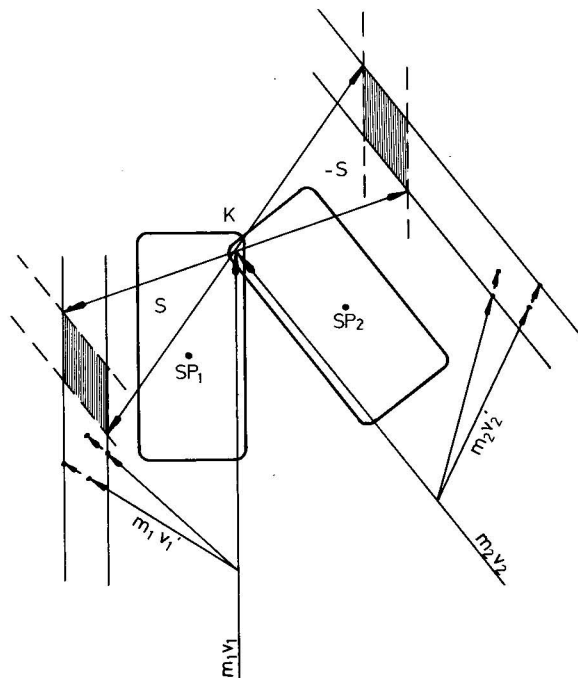


Bild 1 Impuls-Spiegel-Verfahren

#### 3. Drehimpuls-Spiegel-Verfahren

Durch Einbeziehung der Drehimpulserhaltung wird auf der einen Seite eine getrennte Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeit ermöglicht und auf der anderen Seite durch die Verknüpfung mit dem Impulssatz eine Einengung der Toleranzfelder vorgegeben. In das Impuls-Diagramm lassen sich geometrische Ortslinien für konstante Winkelgeschwindigkeiten eintragen. Diese Linien verlaufen parallel zu der Verbindungsachse zwischen Kontaktpunkt und

Schwerpunkt. Durch Spiegelung an dieser Achse ergeben sich wiederum Schnittfelder, die Lage und Größe des Stoßimpulses eingrenzen.

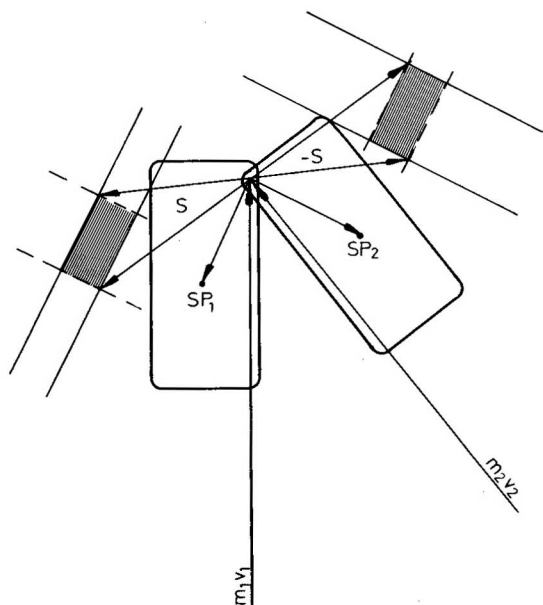


Bild 2 Drehimpuls-Spiegel-Verfahren

#### 4. Rhomboid-Schnitt-Verfahren

Durch Überlagerung der angeführten Verfahren (Impuls-Spiegel-Verfahren, Drehimpuls-Spiegel-Verfahren) erhält man das Rhomboid-Schnitt-Verfahren. Dieses Verfahren ermöglicht die gleichzeitige Erfassung aller Größen des Falles ohne zeitraubendes Probieren. Durch Überlagerung der erarbeiteten Toleranz-Felder für die Enden des Stoßimpulses aus dem Impuls-Spiegel-Verfahren und dem Drehimpuls-Spiegel-Verfahren ergibt sich eine Eingrenzung der Toleranzfelder. Im Bereich der Überschneidung sind die wahren Lösungen zu suchen. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist in (2) beschrieben, eine ausführliche Darlegung ist in (3) zu finden.

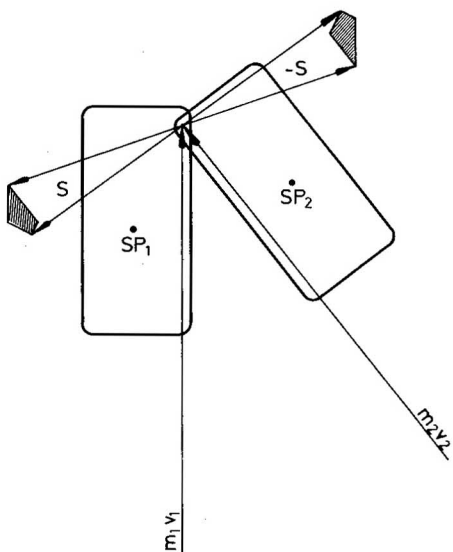


Bild 3 Rhomboid-Schnitt-Verfahren

#### 5. Energie-Ring-Verfahren

Durch einen klaren Strukturaufbau der Pkw-Karosseriekörper aus den Bedingungen der internationalen Gesetzgebung auf dem Sektor der Passiven Sicherheit ist das Deformationsvermögen der ein-

zelnen Fahrzeugstrukturen erfaßbar. Das heißt, die mechanische Energie, die erforderlich ist, um Verformungen einzelner Strukturbereiche zu erzeugen, läßt sich angeben. In der Praxis der Unfallrekonstruktion wird der Deformationsgrad einer EES (Energy Equivalent Speed) zugeordnet (4).

In (5) wird ein rechnerisches Verfahren zur Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeit unter Einbeziehung der Fahrzeugbeschädigungen beschrieben. Es bietet sich an, auch in diesem Fall ein grafisches Verfahren zu erarbeiten, das die Formänderungsenergie mitberücksichtigt. Dieses Verfahren soll den schon bekannten grafischen Verfahren überlagert werden können, so daß sich seinerseits eine Einengung des Toleranzfeldes für den Stoßimpuls ergibt, andererseits die Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeit auch dann möglich ist, wenn z.B. die Stoßausgangsgeschwindigkeit eines der beteiligten Kollisionspartner nicht bekannt ist.

Durch die Gleichung

$$S = \sqrt{2 \cdot \Delta E \cdot m^* \frac{1+k}{1-k}} \quad (I)$$

ergibt sich der Betrag S des Stoßimpulses unabhängig von seiner jeweiligen Richtung nur durch die Formänderungsenergie  $\Delta E$  und den k-Faktor.  $m^*$  ist die sogenannte relative Masse und berechnet sich nach Gleichung (II) aus den Massen der beteiligten Stoßpartner.

$$m^* = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad (II)$$

Gleichung (1) gilt für sogenannte punktförmige Massen bzw. für einen zentralen Stoß. Die Spitzen der Stoßimpulse liegen auf einem Kreis um den Kontaktpunkt.

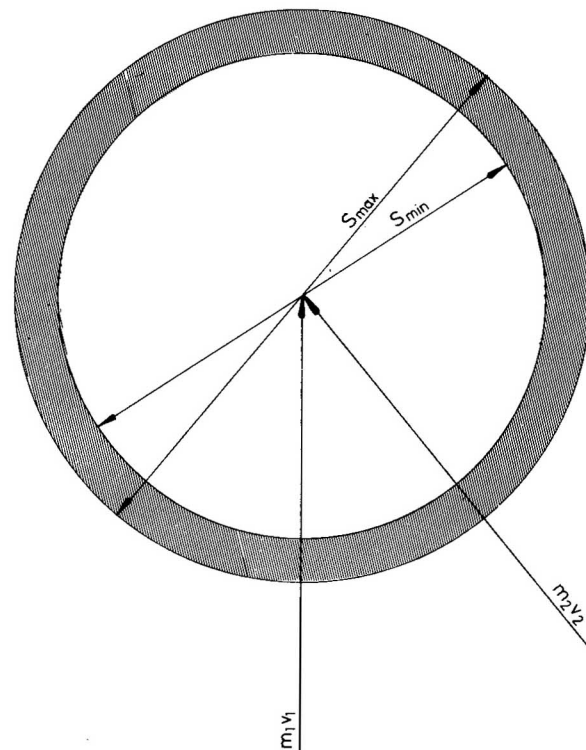


Bild 4 Energie-Ring  
(Punktförmige Massen - zentraler Stoß)

Da im tatsächlichen Unfallgeschehen ein zentraler Stoß die Ausnahme bildet, muß die oben angegebene Gleichung für den nicht zentralen Stoß erweitert werden. Sie nimmt die folgende Form an:

$$S = \sqrt{2 \cdot \Delta E \cdot \bar{m}^* \frac{1+k}{1-k}} \quad (III)$$

Der Unterschied zwischen der Gleichung für den zentralen und den nicht zentralen Stoß besteht praktisch in der Einführung einer reduzierten relativen Masse  $\bar{m}^*$ . Diese berechnet sich aus den reduzierten Massen der einzelnen Stoßpartner.

$$\bar{m}^* = \frac{\bar{m}_1 \cdot \bar{m}_2}{\bar{m}_1 + \bar{m}_2} \quad (IV)$$

Die reduzierten Massen wiederum berechnen sich nach folgenden Gleichungen:

$$\bar{m}_1 = m_1 \frac{i_1^2}{i_1^2 + a_1^2} \quad (V) \quad \bar{m}_2 = m_2 \frac{i_2^2}{i_2^2 + a_2^2} \quad (VI)$$

Wobei  $i$  der Trägheitsradius und  $a$  die Komponente des Stoßvektors senkrecht zum Stoßimpuls ist. Zur Berechnung der reduzierten Massen siehe auch (6).

Da sich die Größen  $a_1$  und  $a_2$  mit der Richtung des Stoßimpulses ändern, wird der Betrag des Stoßimpulses abhängig von seiner Richtung. Der Kreis verformt sich zu einer Ellipse.

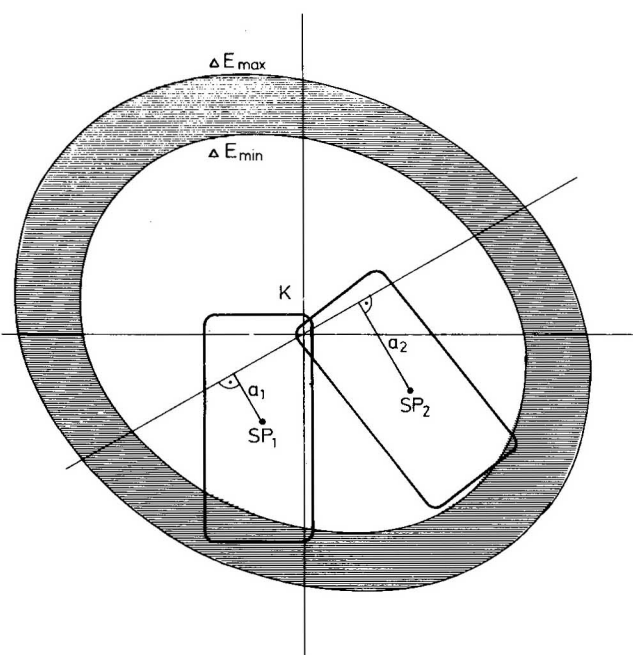


Bild 5 Energie-Ellipse  
(ausgedehnte Massen - nicht zentraler Stoß)

Im konkreten Fall ist im allgemeinen die Lage des Stoßimpulses größenordnungsmäßig bekannt. Dieser Bereich der Ellipse läßt sich dann näherungsweise durch einen Kreis beschreiben. Man berechnet mit Hilfe der Gleichung (IV) für einen mittleren Stoßimpuls eine mittlere reduzierte relative Masse.

Der Radius des Kreises ergibt sich dann nach Gleichung (III). Dieses Verfahren kann im Rahmen der Unfallrekonstruktion als hinreichend genau angesehen werden.

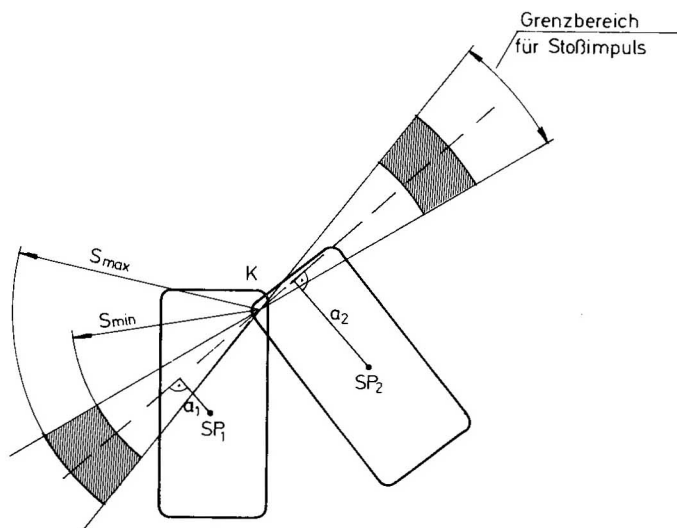


Bild 6 Energie-Ring-Verfahren

Werden die Toleranzen für die Grenzbereiche der Stoßimpulslagen und die Toleranzen für die Grenzbereiche der Formänderungsenergie eingeführt, dann stellt sich analog zum Impuls-Spiegel-Verfahren und dem Drehimpuls-Spiegel-Verfahren ein Schnittbereich für die Enden der Stoßimpulse ein.

## 6. Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeit

Ist neben der Formänderungsenergie und dem Stoßfaktor z.B. die Stoßauslaufrichtung eines Fahrzeuges bekannt, dann kann mit dem Energie-Ring-Verfahren die Kollisionsgeschwindigkeit erarbeitet werden.

In Bild 7 sind zunächst einmal die Felder dargestellt, die sich durch Eingrenzung der Formänderungsenergie- und der Stoßrichtung ergeben. Der Stoßausgangsimpuls von Fahrzeug 1 ist so eingezeichnet, daß er die ermittelte Stoßausgangsrichtung wiedergibt. Damit folgt als erstes das Toleranzfeld für die Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeuges 1. Um die Kollisionsgeschwindigkeit des zweite Fahrzeuges zu bestimmen, muß folgende Gleichung herangezogen werden:

$$V_{1i} - V_{2i} = \sqrt{\frac{2\Delta E}{1 - k^2} \cdot \frac{1}{\bar{m}^*}} \quad (VII)$$

Diese Gleichung verknüpft die Komponenten der Kollisionsgeschwindigkeiten in Richtung des Stoßimpulses über die Formänderungsenergie und den  $k$ -Faktor miteinander. Der Zusammenhang ist linear und läßt sich daher leicht in einem Diagramm wiedergeben.

Es müssen daher als erstes die Komponenten der Kollisionsgeschwindigkeiten des Fahrzeuges 1 in Richtung des Stoßimpulses

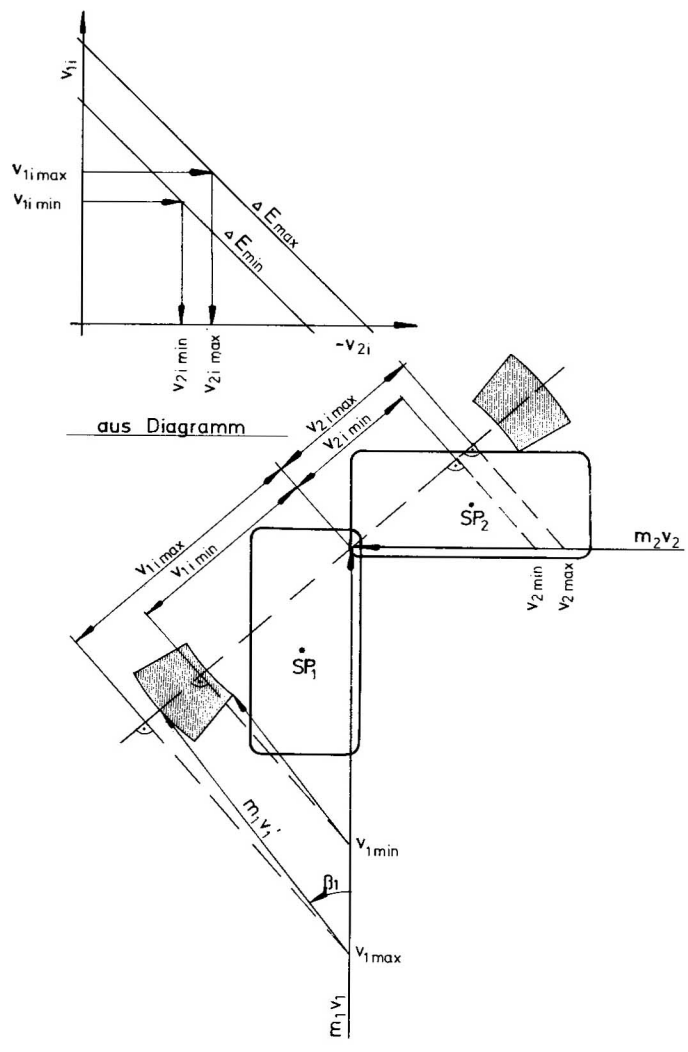


Bild 7 Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeiten mit Hilfe des Energie-Ring-Verfahren

bestimmt werden. Aus dem Diagramm lassen sich die entsprechenden Komponenten für die Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeuges 2 ablesen. Dabei gehören die jeweils maximalen Geschwindigkeiten zur maximalen Formänderungsenergie und die beiden minimalen Geschwindigkeiten zur minimalen Formänderungsenergie.

Die so gefundenen Werte wurden für das Fahrzeug 2 in das Impuls-Diagramm eingetragen. Durch Bildung der Senkrechten ergeben sich die Kollisionsgeschwindigkeiten für Fahrzeug 2. Aus dem Impuls-Diagramm lassen sich nun weiterhin auch die Ausgangsgeschwindigkeit von Fahrzeug 2, sowie die Winkelgeschwindigkeiten beider Fahrzeuge ablesen bzw. berechnen.

Dieses Verfahren läßt sich in analoger Weise durchführen, wenn statt der Richtung der Betrag der Stoßausgangsgeschwindigkeit eines der beteiligten Fahrzeuge bekannt ist.

### 7. Erweitertes Rhomboid-Schnitt-Verfahren

Durch die Darstellung der grafischen Einführung der Formänderungsenergie in dem Bereich der Kollisionsgeschwindigkeitsberechnung sind alle drei grundsätzlichen Ausgangsparameter, wie Impuls, Drehimpuls und Energie grafisch zu handhaben. Lassen sich in einem konkreten Fall alle drei Verfahren gleichzeitig anwenden, dann ergibt dies auf der einen Seite eine deutliche Einengung der Toleranzfelder und auf der anderen Seite eine interne Überprüfung der angesetzten Daten. Neben der Verbesserung der Ergebnisse durch die gleichzeitige Anwendung aller drei Verfahren werden somit gleichzeitig mögliche einfließende Fehler verringert bzw. überhaupt erkannt.

Überlagert man in einem konkreten Fall das Impuls-Spiegel-Verfahren, das Drehimpuls-Spiegel-Verfahren und das Energie-Ring-Verfahren, dann stehen drei Toleranzfelder für die Endpunkte der Stoßimpulse zur Verfügung. Werden diese drei Toleranzfelder überlagert, dann kristallisiert sich ein gemeinsames Feld heraus, in dem die tatsächlichen Lösungen zu suchen sind. Weiterhin sei angemerkt, daß auch die Kollisionsgeschwindigkeiten der Gleichung (VII) gehorchen müssen. Sollten sich alle drei Verfahren widerspruchlos ineinander einfügen, so kann davon ausgegangen werden, daß das daraus resultierende Ergebnis richtig ist.

#### Literatur

- 1 Slibar A. «Das Antriebs-Balance-Diagramm als optimales Hilfsmittel der Unfallanalyse» Der Verkehrsunfall 1973, Heft 2
- 2 Schimmelpfennig K.-H., Becke M. »Ausnutzung der Symmetriebedingungen beim Impuls-Diagramm zur engeren Eingrenzung der Kollisionsgeschwindigkeiten unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Drallsatzes« Der Verkehrsunfall 1980, Heft 10
- 3 Danner M. Halm J. »Technische Analyse von Straßenverkehrsunfällen« Kraftfahrzeugtechnischer Verlag, 1981
- 4 Burg H., Martin H.-J., Zeidler F. »EES – Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkung auf die Unfallforschung« Der Verkehrsunfall 1980, Heft 4-6
- 5 Burg H., Rau H. »Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion« Verlag Information, 1981
- 6 Plankensteiner, K. »Mathematische Grundlagen für die Rekonstruktion von Fahrzeugstößen« Dissertation TH Aachen, 1975

Die Ausarbeitung wurde im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft für Unfallrekonstruktion – UREKO – vom Sachverständigen-Büro Schweigert und Schumann Dortmund unterstützt.