Karl Plankensteiner*

Theorie und Praxis der forensischen Unfallanalyse

Vorwort

Als Mitte der sechziger Jahre an der Technischen Hochschule in Graz die erste Rechenanlage noch in einem eigens dafür errichteten Gebäude installiert wurde, begann für mich der Wettlauf zwischen Software- und Hardwareentwicklung. Mußte damals noch ein Koffer voller Lochkarten ins Rechenzentrum geschleppt werden, so steht heute ein Personalcomputer auf dem Schreibtisch mit einem Vielfachen der Leistungsfähigkeit jener seinerzeitigen Großrechenanlage. War seinerzeit ein Computerprogramm geschrieben und in der Praxis erfolgreich getestet, so konnte man die Computerkonfiguration für die es konzipiert wurde, meist nicht mehr kaufen. Die Entwicklung der Computer hat zwar nichts an Dynamik verloren, doch mit der weiteren Verbreitung haben sich Standards durchgesetzt, die eine zukunftsorientierte Softwareentwicklung ermöglichen. So ist auch das jüngste Produkt, das im Heft 7/8-1993 vorgestellte **C.A.A.D.**-Programm, bereits für eine Computergeneration ausgelegt, die erst für den Herbst 1993 angekündigt wird.
In den mehr als zwei Jahrzehnten als Gerichtssachverständiger wurden jene hier vorgestellten theoretischen Grundlagen für die Software geschaffen, die den praktischen Erfordernissen der forensischen Unfallanalyse entsprechen. Nicht alles, was zu Beginn machbar erschien, hat sich bewährt, weshalb die folgende Arbeit nur den Theorien jener Rekonstruktionsmethoden gewidment ist, die den Härtetest der Praxis bestanden haben. Und wenn die Arbeit mit einer Kritik an Bruchhypothesen der Mediziner endet, dann handelt es sich auch hier nicht um graue Theorie, sondern um leidvolle praktische Erfahrungen, die mir unfreiwillig jene Zeit und Muße verschafften, diese Arbeit zu schreiben.

1 Einleitung

Die bei einem Verkehrsunfall entstandenen Schäden werden entsprechend der geltenden Rechtsordnung primär nach dem Verursachungsprinzip entschädigt und um den oder die Schuldigen feststellen zu können muß man zunächst den Hergang des Unfalles rekonstruieren. Von den mit der Klärung des Unfallherganges betrauten Sachverständigen wird erwartet, daß sie aus den Spuren alle für die Beurteilung erforderlichen Fakten ermitteln, dazu gehören vor allem die Bewegungen der am Unfall beteiligten Fahrzeuge und Personen. Bei der Auswahl und Entwicklung geeigneter Rekonstruktionsmethoden ist zwischen einer höchstmöglichen Genauigkeit und einem möglichst geringen Kostenaufwand in jedem Einzelfall die richtige Optimierung zu treffen. Viele theoretisch gute Rekonstruktionsmethoden sind in der Praxis schon an der Nichtbeschaffbarkeit der für sie benötigten Daten gescheitert. Von den vielen in mehr als zwei Jahrzehnten für die forensische Unfallanalyse entwickelten Methoden sind die nachfolgend beschriebenen jene, welche sich bei der praktischen Anwendung bewährt haben.

Eine vollständige bewegungstechnische Analyse des Unfallgeschehens liegt erst dann vor, wenn die rekonstruierten Daten für eine wirklichkeitsgetreue Darstellung aller Bewegungen in einem Film ausreichen würden. Für die Annäherung an diese Zielvorstellung steht ein ganzes Paket von Computerprogrammen zur Verfügung, deren theoretische Grundlage und praktische Anwendung hier erläutert werden soll. Das zuletzt entwickelte *C.A.A.D.*-Programm[1] (**C**omputer **A**ccident **A**nalysis **D**esign) war ursprünglich für die fotogrammetrische Vermessung der Unfallstellen konzipiert, doch während der Entwicklung eröffneten sich weit über das ursprüngliche Ziel hinausgehende Anwendungsmöglichkeiten. Als Zeichenprogramm ist es ähnlich einem CAD-Programm einsetzbar, deshalb auch der ähnliche Name. Durch die Klotoide[2] als Grundelement speziell für das Zeichen von Straßen und ihre Vermessung über Fotos ausgelegt, ermöglicht es die rasche und vor allem möglichst vollständige Erfassung der Spuren am Unfallort, womit die durch die Vermessung hervorgerufenen Verkehrsbehinderungen und auch die damit verbundenen Gefahren für die Messenden auf ein Minimum reduziert werden können. Das Kapitel **Unfallspuren** befaßt sich daher mit diesen Möglichkeiten.

Für die Beschreibung von Bewegungen benötigt man physikalische und/oder rein mathematisch, statistische Modelle, welche die unendliche Vielfältigkeit der Natur so weit vereinfachen als dies für die Berechnung der gesuchten Parameter mit ausreichender Genauigkeit zulässig ist. Für das lineare Bewegungsmodell eines Fahrzeuges entlang einer Fahrlinie wurde ein spezieller Tabelleneditor entwickelt, in dem die Bewegung beliebig fein in Zeitabschnitte mit linear veränderlicher Beschleunigung bzw. Verzögerung unterteilt werden kann und mit dem sich eine Vielzahl von Fragestellungen einfach und rasch beantworten läßt. Das Kapitel **Lineare Bewegungen** erläutert dieses *Tabellen*-Programm.[3]

Die meisten Stoßprobleme bei Verkehrsunfällen lassen sich hinreichend genau mit einem ebenen Modell beschreiben. Die für die verschiedensten Angabenkonstellationen in der Vergangenheit entwickelten Rückrechenverfahren haben bei den heutigen Rechenanlagen kaum noch Bedeutung, da bei einer iterativen Vorwärtsrechnung mit einem einzigen Programm alle erdenklichen Varianten erfaßt werden. Verhakte oder streifende Stöße, bei denen die Stoßzahl negativ werden kann, sind ebenso erfaßt wie die Berücksichtigung der Deformationsenergie nach dem EES-Verfahren (äquivalente Wandaufprallgeschwindigkeit = EES). Das im Kapitel **Stoßrekonstruktion** [4) 5) 6)] vorgestellte Programm ermöglicht aber auch die Berechnung der Stoßbelastungen von Fahrzeuginsassen, wichtig bei der Beurteilung von Verletzungsfolgen.

Ein besonderes Problem bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen stellen die Serienauffahrunfälle dar. Obwohl man meist mit einem eindimensionalen Stoßmodell auskommt und die Stoßmechanik eher trivial ist, bergen die paradoxen Ergebnisse viele Konfliktstoffe. Die **Paradoxa** des Serienauffahrunfalles sollen daher zeigen, daß dieser Unfalltyp sowohl von der Rekonstruktionstechnik als auch der rechtlichen Beurteilung eine Sonderstellung einnimmt. Da die bisherigen Vorschläge einer Schadenersatzregelung nicht befriedigend sind, wird auf der Basis der technischen Schadenverteilung beim Serienauffahrunfall und des bestehenden Schadenersatzrechtes eine Aufteilungsformel vorgeschlagen, die nicht nur gerechter, sondern vor allem auch wesentlich einfacher zu handhaben ist als alle bisherigen Beiträge.

Bei einem Schienenfahrzeug ist die Fahrlinie durch den Schienenverlauf gegeben und bei Kraftfahrzeugen ist die Bewegungsrichtung bis jetzt meist durch Bremsspuren markiert, aber nicht erst durch die Verbreitung von Antiblockiersystemen kommt der **Fahrlinienanalyse** besondere Bedeutung zu. Mit Hilfe des *C.A.A.D.*-Programms können die mit dem Tabellenprogramm berechneten Fahrzeugpositionen nicht nur entlang einer räumlich gekrümmten Fahrlinie gezeichnet werden, über die Krüm-

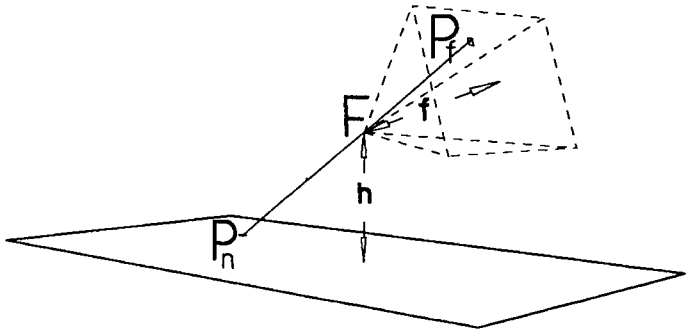


Bild 2.3(1) Zentralprojektion

*Dipl.-Ing. Karl Plankensteiner, Höf 5, A-8301 Laßnitzhöhe

mung der Fahrlinie sind beispielsweise Rückschlüsse auf die mit ABS erzielbaren Bremsverzögerungswerte möglich. Darüber hinaus können Schleuderbewegungen an Hand von Spurfragmenten ausgewertet werden und über die Krümmung der Schwerpunktsbahn ist die Geschwindigkeitsermittlung auch dann noch möglich, wenn die nachfolgende Bewegung nicht mehr einer mathematischen Erfassung zugänglich ist, so beispielsweise ein Fahrzeug sich überschlagend einen Hang hinunterkollert und schließlich in einer Baumgruppe landet.

Einige kleine Hilfsprogramme zur Berechnung der **Glassplitterfelder**, die Auswertung von **Streifungszykloiden**, welche beim Kontakt eines rollenden Rades mit einer Fahrzeugflanke entstehen, oder die Problematik beim **Steinschlag** durch von Reifen abgeschleuderte Steine, sind in den nächsten Kapiteln zusammengefaßt.

Bei der forensischen Tätigkeit eines Unfallanalytikers geht es primär um das Verschulden von Verkehrsteilnehmern, doch bei der Unfalluntersuchung stößt man immer wieder auf gravierende Straßenbaumängel[7] als Mitunfallursache. Hier fehlt es an den Möglichkeiten der Weitergabe solcher Erkenntnisse an jene Stellen, welche für die Beseitigung solcher Mängel zuständig wären, es wäre aber auch eine lohnenswerte Aufgabe, zukünftigen Straßenbauern das Wissen über unfallträchtige Konstruktionen weiterzugeben.

Nach dem Rückblick auf die in mehr als zwei Jahrzehnten entwickelten und praktisch erprobten Rekonstruktionsverfahren bildet den Abschluß eine Vorschau auf künftige Projekte.

2 Unfallspuren

2.1 Das Dreiecksmeßverfahren

Wenn man von Unfallspuren spricht, dann denkt man zuerst an die auf der Fahrbahn abgezeichneten Reifenspuren, doch der Begriff *Spuren* ist viel weiter auszulegen. Die Deformationen der Fahrzeuge, Glassplitterfelder und Endlagen sind beispielsweise ebenso Spuren wie die Verletzungen von Personen und die in ihrem Gedächtnis eingeprägten Bilder vom Unfallablauf. Hier sollen aber nur die Verfahren für die Sicherung der an der Unfallstelle vorgefundenen geometrisch meßbaren Spuren behandelt werden.

Die für die Unfallaufnahme zuständigen Exekutivbeamten sind im allgemeinen mit einem Maßband und Meßrad für die Ausmessung der Spuren ausgerüstet, weil diese Ausrüstung vergleichsweise billig ist. So ist auch das Dreiecksmeßverfahren das am weitesten verbreitete, doch was auf den ersten Blick einfach und billig erscheint, erweist sich bei näherer Betrachtung als recht aufwendig und teuer.

Werden alle Punkte der Spuren von einer einzigen Basis aus gemessen, dann gibt es nur bei Punkten ganz in der Nähe oder weit entfernt von der Basis Probleme mit der Genauigkeit. Soll jedoch ein längeres Kurvenstück vermessen werden, dann ist die Aneinanderreihung mehrerer Dreiecke unvermeidlich und hier kumulieren die Einzelmeßfehler. Da die Einzelmeßgenauigkeit mit dem Meßrad für eine derartige Vermessung nicht ausreichend ist, muß bei der Spurensicherung mehrfach quer über die Fahrbahn mit dem Maßband gemessen werden. Dazu sind nicht nur zumindest zwei Personen beim Maßband erforderlich, bei regem Verkehrsaufkommen ist noch mindestens eine weitere Person mit der Verkehrsregelung beschäftigt. Es darf nicht verwundern, wenn unter diesen Bedingungen häufig Meßfehler vorkommen, die später mit den bisherigen fotogrammetrischen Verfahren nur unter großem Kostenaufwand beseitigt werden konnten.

2.2 Messung mit dem Doppelpentagon

Ein relativ billiges und dennoch praktisches Meßgerät ist das Doppelpentagon, mit dessen Hilfe man den Schnittpunkt zwischen einer durch zwei Fluchtstangen markierten Geraden und der Senkrechten auf diese durch einen dritten Punkt bestimmen kann. In der klassischen Ausführung wird der Punkt mit einem Senkel am Boden markiert, was eine genau senkrechte Ausrichtung der Fluchtstangen erforderlich macht. Für die Vermessung von Unfallstellen wurde dieses Verfahren ein wenig modifiziert und das Meßrad an Stelle des Haltegriffs mit einem Rohr versehen, an dessen oberen Ende das Doppelpentagon entsprechend der Rohrachse ausgerichtet montiert wurde. Sieht man über die Prismenspiegel des Doppelpentagons die beiden Fluchtstangen in einer Linie, dann ist auch das Rohr des Meßrades zu den Fluchtstangen parallel ausgerichtet und mit dem Meßrad kann nunmehr die Entfernung zum angepeilten Punkt einfach ausgemessen werden.

Statt Fluchtstangen lassen sich auch Hauskanten oder Leitungsmasten verwenden, so sie günstig angeordnet sind, was allenfalls später notwendige Nachmessungen erleichtert. Auch wenn diese Kanten nicht genau lotrecht sein sollten, ist dies kein Problem, da dann auch das Rohr des Meßrades immer unter dem gleichen Winkel aus dem Lot ist, was nur eine geringfügige Parallelverschiebung der Meßgeraden bewirkt. Auch wenn die Meßradmessung mit einem Fehler bis zu 10 cm behaftet sein sollte, da jede Messung getrennt erfolgt, gibt es keine Fehlerkumulation.

Bei der Messung mit dem Doppelpentagon auf dem Meßrad ist kein Meßgehilfe erforderlich und es liegt auch kein verkehrsbehinderndes Maßband auf der Straße. Dafür befindet sich der gesuchte Schnittpunkt aber vielfach mitten auf der Straße und es ist auch bei diesem Verfahren eine Verkehrsregelung mit Verkehrsbehinderungen während der Meßdauer erforderlich. Wenn die Vermessung eines Straßenstückes mit Hilfe einer Meßgeraden nicht gefunden wird, dann kann es bei der Winkelbestimmung zwischen den Meßgeraden zu Problemen kommen, zumal es keine handlichen Winkelmesser gibt, die ohne Stativ benutzt werden können.

2.3 Objektorientierte fotogrammetrische Meßtechnik

Anlaß für die Entwicklung des objektorientierten fotogrammetrischen Meß-Verfahrens (OFM) war ein Unfall, der bei der Vermessung nach den oben angeführten Methoden trotz Absicherung der Unfallstelle passiert ist. Schon Ende der Sechzigerjahre wurde mit der Stereofotogrammetrie[8] insbesondere in der Schweiz und Deutschland begonnen, doch wegen der hohen damit verbundenen Kosten für die Geräte hat dieses Verfahren bis heute keine weite Verbreitung gefunden. Eine ebenfalls recht aufwendige fotografische Spurensicherung ist die Draufsicht-Fotografie[9], bei welcher man ein rund 5 m hohes Stativ an der Unfallstelle in Abständen von ungefähr 4 bis 5 m über den gesamten Spurenbereich schleppen muß. Frühere Versuche mit der Vierpunktmethode durch entsprechende Markierungen[10, 11] haben sich nicht besonders bewährt. Von den zahlreichen weiteren fotogrammetrischen Methoden, die im Laufe der Zeit in der Zeitschrift *der Verkehrsunfall* vorgestellt wurden, seien noch die Luftaufnahmen mittels Fesselballon[12] erwähnt, die sich aber auch nicht durchgesetzt haben.

Beim OFM-Verfahren benötigt man im Gegensatz zur Stereofotogrammetrie nur eine gewöhnliche Kamera, wie sie bei der Unfallspurensicherung mittlerweile zur Standardausrüstung gehört, gewöhnliche Markierungshüte oder Markierungstafeln und vor allem ein Computerprogramm, mit dem die aufgenommenen Meßfotos einfach ausgewertet werden können. Da die erforderlichen Markierungen meist am Fahrbahnrand vorgenommen werden, fallen gefährliche Messungen auf der Fahrbahn weg und wenn die Kamera am Dach des Einsatzwagens montiert ist, beschränkt sich die Verkehrsbehinderung auf die Zeit für das Abfahren des auszumessenden Straßenabschnittes.

Die fotogrammetrischen Meßmethoden basieren auf dem Prinzip der Zentralprojektion, durch welche jedem Punkt auf einer definierten Fahrbahnoberfläche eindeutig ein Punkt auf dem Negativ eines Fotoapparates zugeordnet werden kann, wie dies schematisch in **Bild 2.3(1)** dargestellt ist. Wenn man also aus nur einem Foto die auf der Fahrbahn befindlichen Spuren entzerren will, dann muß zunächst die Fahrbahnoberfläche geometrisch beschrieben sein. Die bisher verwendeten Methoden sind von einer zumindest im Bereich der Spuren exakt ebenen Fahrbahn ausgegangen, das *C.A.A.D.*-Programm hingegen kann die gewundene Fahrbahnoberfläche mit wechselnder Querneigung ebenso berücksichtigen, wie die Krümmungen infolge einer parabolisch ausgerundeten Kuppe oder Wanne. Das OFM-Verfahren ist aber nicht nur da, um bei bekanntem Fahrbahnverlauf Spuren aus Fotos zu entzerren, es eignet sich unter bestimmen Voraussetzungen auch dazu, aus solchen Meßfotos die Geometrie der Fahrbahnoberfläche zu ermitteln.

Ist in Bild 2.3(1) der Punkt P_n auf der Fahrbahnebene bekannt, ebenso die Höhe h des Brennpunktes F der Kamera sowie die auf das ausgearbeitete Bildformat bezogene Brennweite f, dann benötigt man nur drei in ihrer relativen Lage zueinander bekannte Punkte, um die Ausrichtung der Kamera zu bestimmen. Einzelne Punkte lassen sich auf Fotos oft schwer mit der erforderlichen Genauigkeit herausmessen und so treten

im *C.A.A.D.*-Programm an Stelle von Punkten ganze **Objekte**, also beispielsweise Leitlinien, Richtungspfeile oder Kanaldeckel. Durch die Vorwärtsrechnung lassen sich die Winkel für die Kameraausrichtung und die Lage der Kamera bezüglich der Fahrbahn durch ein systematisches Variieren, also einer vom User durchgeführten Iteration bestimmen. Damit können die Paßpunkte aus der Natur nicht nur durch ebene *Objekte*, sondern auch durch Modelle von räumlichen Objekten, etwa Leitpflöcken oder Verkehrszeichen, ersetzt werden. Der Rechner ermittelt für die geschätzte Lage der Kamera die perspektivischen Bilder der Objekte und vergleicht sie mit den Abbildungen auf dem Foto und durch iteratives Verändern der Kameradaten einerseits und der *Regellinie* der Straße andererseits kann das Modell der Straße so lange verbessert werden, bis eine für den jeweiligen Zweck ausreichende Genauigkeit erzielt wird.

In der Praxis haben sich in regelmäßigen Abständen am Fahrbahnrand aufgestellte Markierungshüte bewährt, da sie im Gegensatz zu Leitlinien und sonstigen Bodenmarkierungen auch im Bildhintergrund noch gut sichtbar sind. Rein theoretisch läßt sich zwar auch die Ausrundung einer Kuppe und die Querneigung aus den Fotos herausmessen, man sollte aber den Kuppenradius durch Bestimmung der Strecke, auf der sich die Neigung um 1% ändert, vor Ort messen und die Querneigung zumindest stichprobenartig. Durch ungefähre Bestimmung der Punkte mit beginnendem Wechsel der Kurvenradien wird die Iteration wesentlich beschleunigt.

Die Anzahl der notwendigen Kontrollmessungen auf der Straße hängt wesentlich davon ab, ob es sich um eine nach den Richtlinien des modernen Straßenbaus trassierte Fahrbahn handelt oder nicht. Dazu muß man natürlich zumindest die wichtigsten Trassierungsmerkmale kennen, wobei das Grundelement des *C.A.A.D.*-Programms auf diese abgestimmt ist.

Bei der Einzelpunktfotogrammetrie hängt die Genauigkeit der Entzerrung von der Entfernung des Punktes vom Kamerastandort und einem eventuellen Höhenfehler gegenüber der theoretischen Ebene einerseits und von der Punktmeßgenauigkeit im Foto andererseits ab, Verzeichnungen des Objektives sind bei der heutigen Qualität der Fotoapparate aber gegenüber diesen Fehlerquellen meist vernachlässigbar. Wenn man mit der Punktfotogrammetrie versucht, die Punkte eines runden Kanaldeckels wirklich auf einem Kreis zu erhalten, dann mußte man in der Praxis schon einen Fehlerausgleich vornehmen. Dies geschieht nun bei der Objektfotogrammetrie automatisch durch den Modellvergleich des Kreises mit den auf dem Foto ersichtlichen Punkten des Kanaldekkels, weshalb auch bei nur fragmentarisch sichtbaren Objekten, also schon teilweise abgenutzten Bodenmarkierungen, deren Lage mit einer wesentlich höheren Genauigkeit ermittelt werden kann, als bei der Punktfotogrammetrie. Andererseits kann bei der Anpassung an die notwendige Genauigkeit der Entzerrung auch bei einer größeren Unschärfe der Bilder noch ein ausreichend genaues Ergebnis erzielt werden und so eignet sich die Objektfotogrammetrie insbesondere für die Auswertung von Videobildern, die ja bekanntlich eine geringere Auflösung haben als ein 24 x 36 mm Negativ, was in Zukunft noch eine Erweiterung des Verfahrens zu einem Videomeßsystem ermöglichen wird.

Welche Vorteile das OFM-Verfahren bei der Unfallspurensicherung bringt, soll an folgendem Beispiel demonstriert werden. Das **Bild 2.3(2)** zeigt einen Teil der Spuren eines Autobahnunfalles, bei dem die Spuren und drei Fahrzeugwracks auf einer Strecke von ca. 150 m verteilt waren. Bei der Menge an Spuren wäre nach den klassischen Meßmethoden ein ganzes Team von Gendarmeriebeamten wohl mehr als einen Tag mit der Messung beschäftigt gewesen, was gerade an dieser Stelle im Gegenverkehrsbereich eine vollkommene Sperre der Autobahn erforderlich gemacht hätte. Die Aufnahme der Meßfotos war in einer halben Stunde erledigt und einschließlich der Bergungsarbeiten konnte die Autobahn schon vier Stunden nach dem Unfall für den Verkehr freigegeben werden. Das **Bild 2.3(3)** zeigt noch einen Ausschnitt des Planes mit den Spuren und den rekonstruierten Bewegungen.

2.4 Das C.A.A.D.-Programm

Das *C.A.A.D.*-Programm kann eigentlich nur Linien in Auf-, Grund- und Seitenriß sowie in beliebigen perspektivischen Darstellungen zeichnen, wobei jeder Linienzug nur aus Kombinationen und Variationen des Grundelementes bestehen kann. Der Grundriß des Grundelements ist die Klotoide, also jene Kurve, bei der sich die Krümmung konstant

Vorankündigung

für die 3. Jahrestagung
des Europäischen Vereins für Unfallforschung und Unfallanalyse e.V. (EVU)
vom 15. bis 17. September 1994 in Berlin

Themenschwerpunkte:

- **Dunkelheitsunfälle**
- **Programmanwendungen zur Sichtbarkeit und zu Fahrzeugkollisionen**
- **Scheinwerferentwicklung**
- **Verformungsverhalten der neuesten VW-Transporter-Generation**
- **Unfälle mit Airbag-Auslösung**
- **Verletzungsanalyse**
- **Ausfall von ABS-Anlagen**

Durchführung von Kollisionsversuchen mit mehreren in Bewegung befindlichen Fahrzeugen und UDS-Anwendung

Abendprogramm am 16. September 1994: Schiffsfahrt mit Berliner Buffet auf den Gewässern Berlins

Organisation Auskunft Anmeldung	Prof. Dr.-Ing. Hartmut Rau Hainbuchenstr. 2 · 13465 Berlin Tel.: 0 30/4 01 40 40 Fax: 0 30/4 01 11 67	Dipl.-Ing. Ulrich Wanderer Falkentaler Steig 80 · 13467 Berlin Tel.: 0 30/4 04 18 37 Fax: 0 30/4 04 39 75

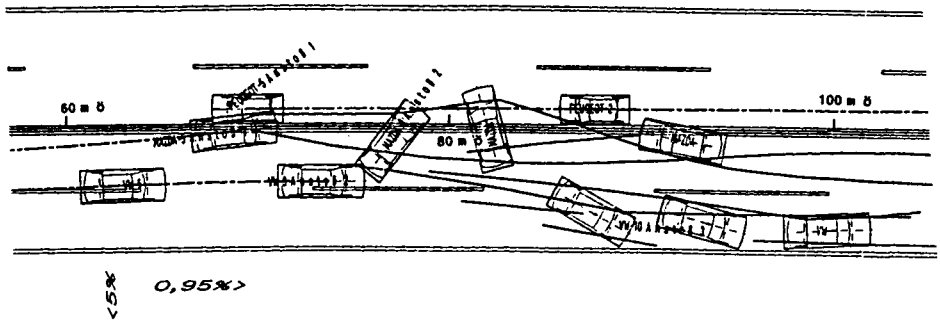
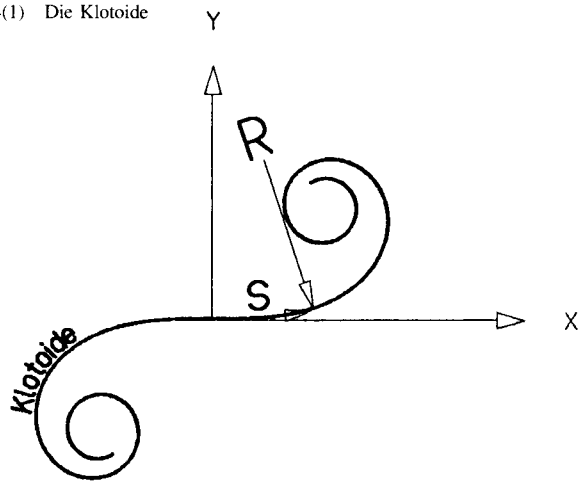


Bild 2.3(3) Entzerrte Spuren mit Unfallablauf

Bild 2.4(1) Die Klotoide



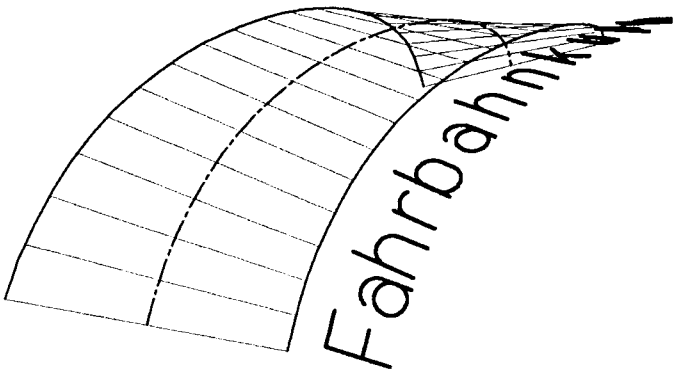


Bild 2.4(2) Räumlich gewundene Straße

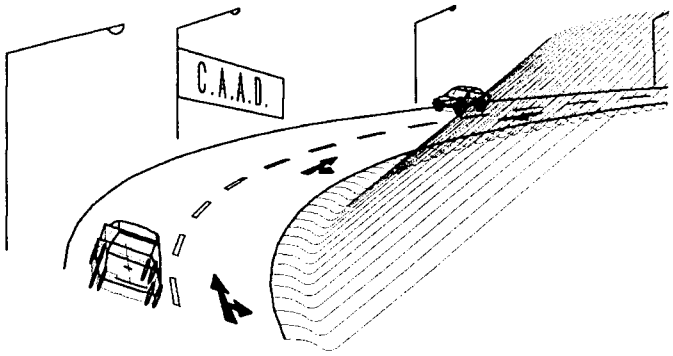
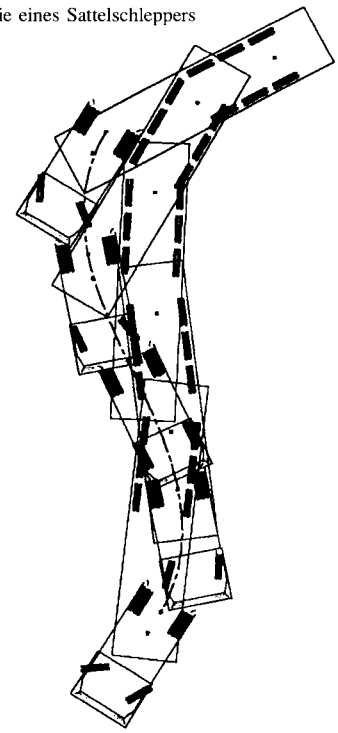


Bild 2.4(3) Beispiel einer Straße mit Objekten

Bild 2.4(4) Fahrlinie eines Sattelschleppers



ändert. Ist der Krümmungsradius R am Beginn der Strecke s unendlich groß, so gilt für die Klotoide die Gleichung

Gl. (1):

$A^2 = s\,R$

wobei A das Maß für die übliche Klotoidenbezeichnung ist. Eine Klotoide A-100 bedeutet auf einem Straßenplan, daß vom Wendepunkt aus gemessen nach 100 m Strecke der Radius 100 m beträgt. Berechnet wird die Klotoide durch numerische Integration, wobei mit der Methode von Heun und einer empirisch dazu ermittelten an die jeweilige Krümmung angepaßten Schrittweite ein Optimum an Rechengenauigkeit und Rechengeschwindigkeit erreicht wurde.

Durch eine lineare Veränderung der in % angegebenen Steigung wird bei der Berechnung eine parabolische Ausrundung berücksichtigt und mit der ebenfalls linear veränderlich angenommenen Querneigung ist die Beschreibung der Straßenoberfläche durch das Grundelement kom-

IMPRESSUM REDAKTIONSANSCHRIFT: »Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik« Obere-Hauptstraße 13, 77971 Kippenheim oder Postfach 208, 77968 Kippenheim, Tel. 0 78 25 / 71 14.
VERLAG: Verlag INFORMATION Ambs GmbH, Obere-Hauptstraße 13, 77971 oder Postfach 208,
77968 Kippenheim, Tel. 0 78 25 / 71 14, Fax: 0 78 25 / 93 76
DRUCK: Hofmann Druck, 79312 Emmendingen.
Erscheingungsform: 12mal jährlich, ab 1.1.1994 zum vierteljährlichen Bezugspreis von **DM 87,65** zuzüglich 7% MwSt. und Versandspesen. **Bezugsform:** Jahresabonnement, kündbar 1/4 Jahr vor Ablauf des Kalenderjahres. **Anzeigen:** Kleinanzeigen: 1 mm hoch – 9,5 mm breit DM 2.80 + MwSt. Chiffregebühr DM 7,50. Preise für Großanzeigen und Beilagen auf Anfrage.
Bankverbindung: Sparkasse Lahr-Ettenheim BLZ 682 500 40, Kto. 00-087 305.
Postscheck: Postscheckkonto Karlsruhe 1405 35-755. Für **Österreich:** Salzburger Sparkasse, Salzburg Kto.Nr. 00 33035, für die **Schweiz:** Sparkasse Basel Hauptsitz Basel, Kto. Nr. 61'996.100.7. **Kontenbezeichnung:** Verlag INFORMATION Ambs GmbH.
Die mit dem Namen des Verfassers oder Berichtserstatters gekennzeichneten Artikel stellen nicht unbedingt die Meinung der Redaktion dar. Redaktionelle Kommentare sind als solche gekennzeichnet. Bei Nichterscheinen der Fachzeitschrift »Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik« durch höhere Gewalt besteht kein Anspruch auf Lieferung oder Rückzahlung des Bezugsgeldes. Alle Rechte, auch die der weiteren Verwendung liegen beim Verlag INFORMATION Ambs GmbH. Vervielfältigungen, Übersetzungen, Kopien, Nachdrucke auch auszugsweise, ist nur mit besonderer Genehmigung des Verlages unter Quellenangabe statthaft. Für unverlangt eingesandte Manuskripte wird keine Gewähr übernommen.
Erfüllungsort und Gerichtsstand ist 77933 Lahr/Schw.

plett. Zusätzlich enthält das Element noch die Informationen über eine sinusförmige oder alternativ lineare Verziehung des Fahrbahnrandes, bei wechselnder Straßenbreite, und für das Zeichnen von allen möglichen Gebilden läßt sich die Linie im Raum beliebig verschieben und verdrehen. Durch eine Aneinanderreihung von Grundelementen kann nicht nur der Straßenverlauf beschrieben und grafisch dargestellt werden, es lassen sich auch beliebige Gebilde damit zeichnen. Solche *Objekte* werden schließlich entlang der Regellinien der Straße oder analog gebildeter *Fahrlinien* als Glieder einer Kette für die Darstellung eines Unfallablaufes zusammengestellt. Die Regel- und Fahrlinien werden ebenfalls als Objekte dargestellt und man muß sie wohl immer neu erstellen aber häufig wiederkehrende Objekte, wie genormte Bodenmarkierungen oder Verkehrszeichen, können in einer Bibliothek abgelegt werden. Auch die Fahrzeugmodelle können auf diese Weise in der Bibliothek festgehalten werden, doch die Konstruktion einer einzigen Fahrzeugtype ist recht zeitraubend. Daher bietet das Programm die Möglichkeit an, aus den wichtigsten Fahrzeugabmessungen ein einfaches Modell zu erstellen, was für die meisten Anwendungen vollkommen ausreichend ist. Ähnlich verfährt das Programm auch mit den Schriftzeichen, die ebenso mit dem Zeichenprogramm für das Grundelement gezeichnet werden, wodurch die beliebige räumliche Anordnung von Beschriftungen ermöglicht wird, wie dies in Bild 2.3(2) zu sehen ist.

Die einzelnen *Objekte* werden schließlich einzeln oder als Kette auf der *Regellinie* plaziert, wobei die Ausrichtung *relativ* zu der durch die Regellinie beschriebenen Fahrbahnoberfläche, tangential aber sonst *vertikal* oder überhaupt unabhängig vom Straßenverlauf *absolut* angeordnet ist. **Bild 2.3(3)** zeigt ein Beispiel für die verschiedene Anordnung von Objekten auf einer Straße. Eine Sonderform von Regellinien sind die Fahrlinien, Objekte auf diesen Linien werden entsprechend dem durch die Fahrlinie definierten Drift- und Wankwinkel dargestellt. Werden Fahrzeugbausteine zu einem Schleppzug zusammengestellt, dann wird auf Wunsch auch die Schleppbahnkurve der nachlaufenden Deichseln und Anhänger berechnet, wobei beispielsweise auch Gelenkbusse mit gelenkter Hinterachse berücksichtigt werden. **Bild 2.4(4)** zeigt dies am Beispiel eines Sattelschleppers.
Die auf einer Fahrlinie oder Regellinie angeordneten Objekte können ihrerseits wieder als Kette von der Kette auf der die Straße beschreibenden Regellinie ebenso orientiert wie einzelne Objekte angeordnet werden. Durch dieses verkettete System können auch komplexe Gebilde mit wenigen Befehlen gezeichnet werden. Die meiste Zeit bei der Unfallanalyse nimmt die Erstellung des Lageplanes bzw. des räumlichen Modells des Straßenverlaufes ein, weshalb die einmal erstellten Modelle in einem eigenen Planarchiv verwaltet werden.

Mit dem *C.A.A.D.*-Programm verhält es sich wie mit einem Textverarbeitungsprogramm, man kann damit Texte leicht weglöschen und an anderer Stelle einfügen und eine schöne Gestaltung des Schriftbildes mit einfachen Mitteln erzielen, aber den Inhalt der Texte kann das Programm nicht beeinflussen. Das C.A.A.D.-Programm erleichtert analog das Zeichnen und Verschieben von Objekten auf der Fahrbahn, doch wo sie schließlich im Gutachten angeordnet sind, entscheidet einzig und allein der Programmbenutzer. Die eigentliche Rekonstruktion des Bewegungsablaufes erfolgt daher erst mit den unten erläuterten Programmen.

3 Lineare Bewegungen

3.1 Das Rechenmodell mit linear veränderlicher Verzögerung

Im gerichtlichen Verfahren stellt das Gutachten eines Sachverständigen stets nur die Grundlage für die Feststellungen des Richters dar, und damit dieser aus Überzeugung den rechtlich zu beurteilenden Sachverhalt feststellen kann, muß er den Inhalt des Gutachtens **nachvollziehen** können. Dabei darf man nicht vergessen, daß ein Richter Gutachten aus den verschiedensten Fachgebieten nachvollziehen sollte und es erhebt sich daher konkret für die Tätigkeit des Unfallanalytikers die Frage, **wie** ein Verkehrsgutachten vollzogen werden soll. Hier herrscht noch verbreitet die Meinung vor, daß ein solches Gutachten nur dann nachvollziehbar wäre, wenn der Richter mit einem einfachen Taschenrechner die Ergebnisse **nachrechnen** kann, ohne dabei je die Basis der Berechnungen, nämlich das Rechenmodell für die Bewegungsabläufe, in Frage zu stellen. Am augenscheinlichsten ist dieses Mißverständnis zwischen Nachvollziehen und Nachrechnen am Beispiel einer Veröffentlichung in der ZVR[13] über alle möglichen Umwandlungen der Bewegungsgleichungen für eine verzögerte Bewegung mit konstanter Verzögerung zu erkennen, wobei dieser Aufsatz den Eindruck erweckt, als ob es sich bei diesen Gleichungen um Naturgesetze handeln würde, obwohl es tatsächlich nur eine sehr grobe Annäherung an die Natur darstellt.

Das oben erläuterte Problem aus der forensischen Praxis ist aber nicht der einzige Grund für möglichst einfache Rechenmodelle. Wenn man die Fachliteratur für forensische Unfallanalyse in den letzten Jahrzehnten verfolgt, dann findet man in fast regelmäßig wiederkehrenden Abständen Rechenverfahren mit äußerst aufwendigen Rechenmodellen, die kaum eine praktische Bedeutung erlangt haben. In den allermeisten Fällen scheitert die Anwendung an Datenmangel und/oder einem nicht finanzierbaren Aufwand.

Die beiden aufgezählten Gründe machen es notwendig, ein möglichst einfaches Rechenmodell zu finden, das aber gleichzeitig eine ausreichende Genauigkeit der gesuchten Größe und eine flexible Anpassung an alle Situationen ermöglicht. Diesen Zielvorstellungen folgend wurde im *TABELLEN*-Programm das nachstehend erläuterte Rechenmodell verwendet. Jeder Punkt (und nicht nur der Schwerpunkt) eines Fahrzeuges bewegt sich entlang einer Fahrlinie auf der Fahrbahn, wobei er mit einer Verzögerung a, welche eine Funktion der Zeit t ist, seine Bahngeschwindigkeit v entlang des Weges s verändert. (Da in der forensischen Praxis die Bremsung und damit auch die Bremsverzögerung eine dominierende Rolle spielt, wurde in den nachfolgenden Gleichungen im Gegensatz zur allgemeinen Mechanik die Verzögerung als positive Größe a definiert, weshalb bei der Benutzung des TABELLEN-Programms die Beschleunigung als negative Verzögerung eingegeben werden muß). Das Modell geht nun davon aus, daß die Verzögerung a(t) zwischen den Zeitpunkten t_i und t_{i+1} durch eine lineare Funktion approximiert werden kann für die gilt:
Gl. (1) ($t_i <= t <= t_{i+1}$):

$$a(t) = a_i + \frac{a_{i+1} - a_i}{t_{i+1} - t_i} (t - t_i) \; [m/s^2]$$

Während die Verzögerung a in der Dimension [m/s²] im normalen Maßsystem angegeben wird, sind für die Geschwindigkeit v die Dimension [km/h] oder [mph] gebräuchlich. Für die in Mitteleuropa übliche und im TABELLEN-Programm berücksichtigte Dimension [km/h] gilt nachfolgende Gleichung:
Gl. (2) ($t_i <= t <= t_{i+1}$):

$$v(t) = v_i - 3{,}6\, a_i\, (t - t_i) - 1{,}8 \; \frac{a_{i+1} - a_i}{t_{i+1} - t_i} (t - t_i)^2 \; [km/h]$$

Durch nochmalige Integration erhält man für den Weg s(t), wobei sich das Fahrzeug zur Zeit t_i in der Position s_i befunden hat, die Gleichung:
Gl. (3) ($t_i <= t <= t_{i+1}$):

$$s(t) = s_i + v_i\, (t - t_i) - 1{,}8\, a_i\, (t - t_i)^2 - 0{,}6 \frac{a_{i+1} - a_i}{t_{i+1} - t_i} (t - t_i)^3 \; [m]$$

Ist der reale Verzögerungs- bzw. Beschleunigungsverlauf bekannt, dann läßt sich durch eine Kette von Zeitabschnitten mit linear veränderlicher Verzögerung ein geeignetes Modell formen. Die in Bild 3.1(1) abgedruckte TABELLE hat von Zeile zu Zeile eine linear veränderliche Verzögerung entsprechend den obigen Gleichungen, wie dies dem darunter befindlichen Diagramm zu entnehmen ist. Das **Rechenmodell** besteht also aus beliebig vielen und beliebig langen Zeitabschnitten von t_i bis t_{i+1}, wobei der Programmbenutzer durch die Angabe der Zeitdifferenzen und der Anfangs- und Endverzögerung das Modell gestaltet.

Man kann die TABELLE der Abbildung 3.1(1) natürlich mit den Gleichungen (1...3) nachrechnen, doch dieses auch mit einem Taschenrechner noch immer aufwendige Rechnen, ist bei dem TABELLEN-Programm überflüssig. Es überprüft nämlich vor jedem Ausdruck noch einmal die Zahlen in den Zeilen nach den obigen Gleichungen und so etwa bei einer Iteration ein Fehler übrig geblieben ist, wird der Druckvorgang erst gar nicht begonnen, ehe dieser Fehler behoben ist. Anstelle des **Nachrechnens** kann sich der Richter daher voll und ganz dem **Nachvollziehen** der immer vom Sachverständigen erstellten Rechenmodelle widmen.

Fortsetzung folgt ■

Karl Plankensteiner*

Theorie und Praxis der forensischen Unfallanalyse

Fortsetzung aus Heft 3/1994

In jeder TABELLEN-Zeile stehen vier Zahlen, die Zeit t, der Weg s, die Geschwindigkeit v und die Verzögerung a. Nach den oben angeführten Gleichungen müßten beim Rechnen von der Zeile i bis i+1 in der nachfolgenden Zeile die Zeit t_{i+1} und die Verzögerung a_{i+1} gegeben sein, während der Weg s_{i+1} und die Geschwindigkeit v_{i+1} die Ergebnisse sind. Durch Umformen der Gleichungen lassen sich Ergebnisse und Angaben beliebig vertauschen, es müssen nur zwei Größen bekannt sein, dann lassen sich die beiden anderen berechnen. Hier eine kurze Zusammenfassung der vier weiteren Kombinationen:

a) Gegeben sind t_{i+1} und s_{i+1}

Wenn man in die Gleichungen (3) für t die gegebene Zeit t_{i+1} einsetzt und die Gleichung sodann nach dem gesuchten a_{i+1} auflöst, dann erhält man eine lineare Gleichung mit einer eindeutigen Lösung. Anschließend läßt sich mit dem errechneten v_{i+1} aus der Gleichung (2) die Geschwindigkeit v_{i+1} berechnen.

Gl. (4):

$$a_{i+1} = -2a_i + \frac{6\,(s_{i+1} - s_i)}{(t_{i+1} - t_i)^2} - \frac{v_i}{0{,}6\,(t_{i+1} - t_i)}$$

b) Gegeben sind t_{i+1} und v_{i+1}

Bei dieser Angabenkonstellation läßt sich die Gleichung (2) nach a_{i+1} auflösen und man erhält eine lineare Gleichung mit einer eindeutigen Lösung. Anschließend erhält man das gesuchte s_{i+1} aus der Gleichung (3).

Gl. (5):

$$a_{i+1} = -a_i - \frac{v_{i+1} - v_i}{1{,}8\,(t_{i+1} - t_i)}$$

c) Gegeben sind v_{i+1} und a_{i+1}

Aus der Gleichung (2) erhält man durch Umformung eine lineare Gleichung für t_{i+1}

Gl. (6):

$$t_{i+1} = t_i + \frac{v_{i+1} - v_i}{1{,}8\,(a_{i+1} + a_i)}$$

d) Gegeben sind s_{i+1} und v_{i+1}

Durch Umformung der Gleichungen (2) und (3) erhält man schließlich für die Zeit t_{i+1} die Gleichung:

Gl. (7):

$$t_{i+1} = t_i - \frac{2v_i + v_{i+1}}{3{,}6\,a_i} \pm \left[\left(\frac{2v_i + v_{i+1}}{3{,}6\,a_i}\right)^2 + \frac{s_{i+1} - s_i}{0{,}6\,a_i}\right]^{1/2}$$

Zeitzuordnung: - vor / + nach dem Anstoß
Wegzuordnung: - vor / + nach der Anstoßposition

Zeile	Anmerkung		Zeit [s]	Weg [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Verzögerung [m/s²]
1	Startentschluß	:	-12,58	-109,9	+0,0	+0,00
2	Beschl.beginn	:	-12,28	-109,9	+0,0	+0,00
3		:	-11,78	-109,8	+1,1	-1,20
4	eingekuppelt	:	-10,57	-108,5	+7,0	-1,54
5	Schaltbeginn	:	-6,84	-88,2	+34,5	-2,55
6	1. -> 2. Gang	:	-6,39	-83,7	+35,7	+1,00
7	Schaltende	:	-5,94	-79,3	+36,2	-1,53
8	Bremsentschluß	:	-1,85	-25,4	+58,7	-1,54
9	Gaswegnahme	:	-1,55	-20,5	+60,4	-1,54
10	Bremsbeginn	:	-1,35	-17,1	+60,6	+1,00
11	Haftgrenze	:	-1,05	-12,2	+55,4	+8,50
12	Blockiergrenze	:	-0,90	-10,0	+51,3	+7,00
13	Anstoß	:	+0,00	+0,0	+28,5	+7,00
14	Stoßende	:	+0,00	+0,0	+13,5	+7,00
15	Endlage	:	+0,54	+1,0	+0,0	+7,00

Die maximal möglichen Beschleunigungswerte wurden aus den unten angeführten Fahrzeugdaten mit jener in der Zeitschrift DER VERKEHRSUNFALL, Heft 11, Jg. 1978, näher beschriebenen Tangenshyperbolikusapproximation berechnet:
Getriebeübersetzungen : 3.450 ; 2.120 ; 1.440 ; 1.130 ; 0.890
max (Schalt-) Geschwindigkeiten : 49.3 ; 80.2 ; 118.0 ; 150.4 ; 191.0 km/h
Im Versuch beschleunigte ein typengleiches Neufahrzeug in 9.70 Sekunden von 0 km/h auf 100 km/h.
Für ein abweichendes Gewicht u.ä.m. wurde ein Faktor von 0.50 berücksichtigt.

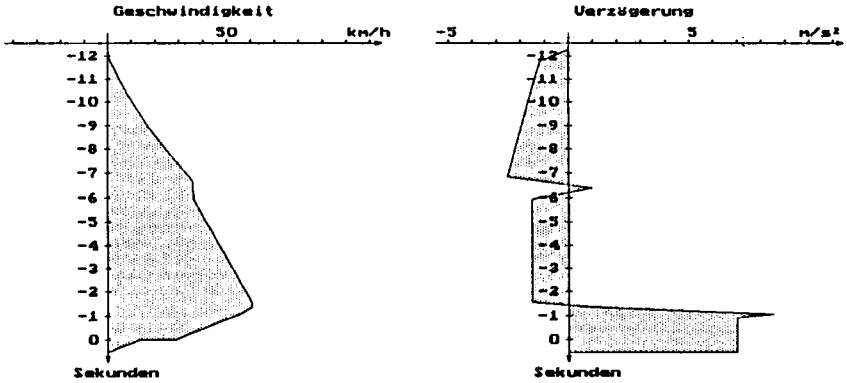
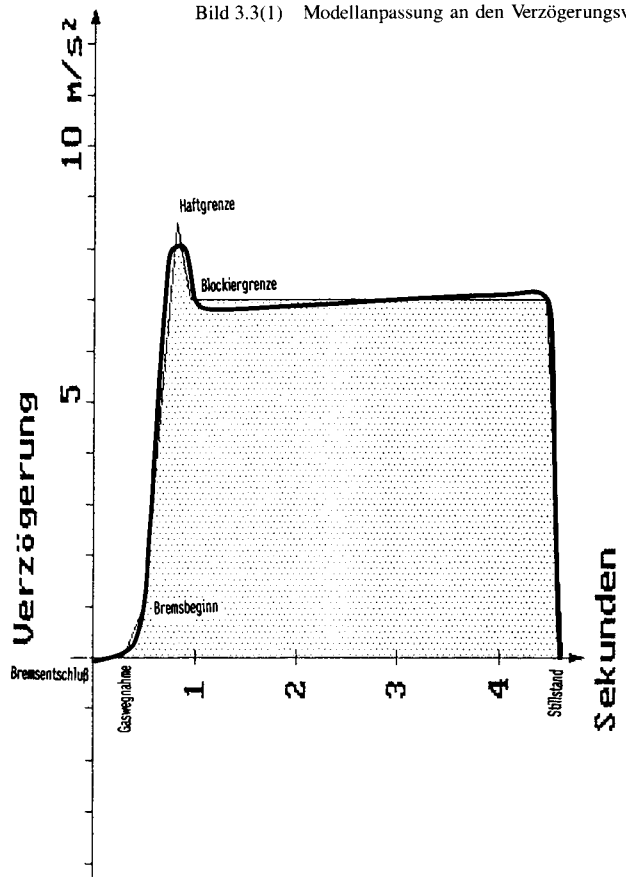


Bild 3.1(1) Beispiel einer Tabelle

*Dipl.-Ing. Karl Plankensteiner, Höf 5, A-8301 Laßnitzhöhe

Bild 3.3(1) Modellanpassung an den Verzögerungsverlauf



Das Rechenmodell setzt voraus, daß der Zeitzuwachs von t_i bis t_{i+1} positiv ist, also

Gl. (8):

$t_{i+1} > t_i$

ist. Damit scheiden in der Gleichung (7) Lösungen mit einem negativen Zeitzuwachs aus und sofern der zweite Term der Gleichung $(2v_i + v_{i+1})/(3{,}6a_i)$ positiv ist, kommt nur das + vor der Quadratwurzel als Lösung in Frage. Ist dieser zweite Term hingegen negativ, dann liefern beide Vorzeichen der Qudaratwurzel einen positiven Zeitzuwachs und hier wurde das TABELLEN-Programm so erstellt, daß die Lösung mit der kleineren Zeitänderung angeboten wird. Das TABELLEN-Programm bricht mit einer Fehlermeldung ab, wenn die Bedingung (8) erfüllt ist oder die Rechnung numerisch nicht durchgeführt werden kann, weil $a_i = 0$ ist. In beiden Fällen kann mit Hilfe einer iterativen Variation der Zeit t_{i+1} eine Anpassung des Weges s_{i+1} bei gegebener Geschwindigkeit v_{i+1} oder umgekehrt eine bzw. die zweite Lösung berechnet werden.

Soll nun zwischen den Zeilen i und i+1 eine Zwischenzeile j eingefügt werden für die gilt

Gl. (9):

$t_{i+1} > t_j > t_i$,

dann gibt es wieder vier Möglichkeiten. Ist die Zeit t_j gegeben und erfüllt sie die Bedingung (9), dann erhält man aus der Gleichung (1) die dazugehörige Verzögerung a_j. Die Auflösung der Gleichung (1) nach der Zeit t_j bei gegebener Verzögerung a_j vermag aber nur dann eine Lösung nach Gleichung (10) zu liefern, wenn deren Bedingung erfüllt ist:

Gl. (10):

$$\{a_{i+1} <> a_i\}: t_j = t_i + \frac{a_j - a_i}{a_{i+1} - a_i}(t_{i+1} - t_i),$$

andernfalls bricht das TABELLEN-Programm mit einer Fehlermeldung ab.

Neben dem Einfügen von Zwischenzeilen zum Synchronisieren mehrerer Tabellen bei vorgegebener Zeit t_j ist bei einer Tabelle für die Relativbewegung hintereinanderfahrender Fahrzeuge die Zwischenzeile für eine bestimmte Geschwindigkeit(sdifferenz) v_j von Bedeutung. Hier ergibt sich aus der Gleichung (2) eine quadratische Gleichung für die Zeit t_j. Nur für den Fall eines Vorzeichenwechsels bei der Verzögerung a liefert die Gleichung allenfalls zwei Lösungen innerhalb der Zeitspanne von t_i bis t_{i+1}, doch dann fügt man zuerst eine Zwischenzeile mit $a_j = 0$ ein und anschließend können beide Lösungen gefunden werden, sofern sie überhaupt real sind, was man ja an Hand der zuvor eingefügten Zwischenzeile leicht beurteilen kann, andernfalls wird man vom TABELLEN-Programm durch eine Fehlermeldung darauf aufmerksam gemacht.

Die Auflösung der Gleichung (3) nach der Zwischenzeit t_j bei gegebenem Weg s_j liefert eine Gleichung dritten Grades mit drei theoretischen Lösungen. Das TABELLEN-Programm rechnet hier mit einer Iteration, wobei die Zeit t_j ausgehend vom Anfangspunkt t_i mit einer fortgesetzten Halbierung rechnet, weshalb für den (äußerst seltenen) Fall mehrerer Lösungen im Zeitintervall t_i bis t_{i+1} die angebotene Lösung vom Zufall abhängt. Vorkommen kann eine Mehrfachlösung nur dann, wenn es im Zeitintervall eine Umkehr der Bewegungsrichtung gibt, doch wenn man zuerst diesen Umkehrpunkt als Zwischenzeile einfügt, dann gibt es nur noch eindeutige Lösungen innerhalb der Zwischenintervalle.

3.2 Anwendung des Rechenmodells

Oben wurde die Berechnung der Zeit-Weg-Geschwindigkeitsrelationen für ein Zeitintervall von t_i bis t_{i+1} besprochen, das gesamte Rechenmodell besteht schließlich aus mehreren Zeilen. Welche Art der Berechnung von Zeile zu Zeile durchzuführen ist, wird im TABELLEN-Programm durch Steuerzeichen hinter den Tabellenwerten für die Zeit, den Weg, die Geschwindigkeit und die Verzögerung bestimmt. Neben der Eingabe von fixen Werten können auch die Differenzwerte sowohl absolut als auch prozentuell angegeben werden, durch ein besonderes Steuerzeichen ist auch während der Berechnung von Zeile zu Zeile eine Nullpunktsverschiebung bei Zeit und Weg zu erreichen. Eine Besonderheit der oben angeführten Gleichungen ist die Möglichkeit der Richtungsumkehr der Berechnung ohne ein gesondertes Gleichungssystem, denn wenn man in den Gleichungen i+1 durch i-1 ersetzt so ändert sich nur die Schranke über den Zeitzuwachs, der dann eben nur eine Zeitabnahme sein darf. Man kann deshalb im TABELLEN-Programm die Berechnungsrichtung vorgeben und man kann auch die Berechnung auf einen bestimmten Block von Tabellenzeilen beschränken. Eben wegen dieser Berechnung nur in einem Teil der Tabelle kann es am Ende zu Unverträglichkeiten zwischen zwei Zeilen kommen, weshalb auch die Prüfung von Tabellenanfang bis Tabellenende vor dem Ausdrucken unbedingt erforderlich ist.

Sind in einer Tabellenzeile drei Werte als Angaben deklariert worden, dann ist das natürlich eine Angabe zuviel. In diesem Fall sucht das Programm entgegen der Berechnungsrichtung nach einem Fragezeichen als Steuerzeichen bei einer Angabe und verändert diesen Wert iterativ so lange, bis der dritte Angabewert hinreichend genau als Rechenergebnis erzielt wird. Nur wenn alle vier Werte als Angaben gekennzeichnet sind oder eine Angabe mit dem Fragezeichen fehlt, meldet das TABELLEN-Programm einen Fehler. Neben der programmierten Iteration ist auch eine vom Benutzer vorgenommene Variation einer Angabe möglich.

Durch die freie Wahl der Steuerzeichenzuordnung in jeder Zeile gibt es eine fast unbegrenzte Variationsvielfalt von lösbaren Problemen. Auch beim TABELLEN-Programm wird vom Computer nur die Rechenarbeit übernommen, die Gestaltung des für jeden Zweck individuell erstellten Modells durch die richtige Wahl der Rechenparamter obliegt dem das Programm benutzenden Sachverständigen. In den folgenden Kapiteln wird die richtige Modellwahl für gebremste und beschleunigte Bewegungen und die Integration der Ergebnisse der Stoßrekonstruktion bei der Tabellenberechnung erläutert, am Schluß wird in einigen ausgewählten Beispielen noch auf spezielle Lösungsmöglichkeiten hingewiesen.

3.3 Die Bremsung eines Kraftfahrzeuges

Als Mitte der Sechzigerjahre die ersten Computer auch auf den Hochschulen verwendet werden konnten, wurde beispielsweise das GAB-Programm[14] zur **G**eschwindigkeitsrückrechnung **a**us **B**remsspuren entwickelt, ergänzend wurde dazu in[15] berichtet. Es berücksichtigte insbesondere die durch die Aufbauschwingungen der Fahrzeuge verursachten Veränderungen der Raddrücke und die unvollkommene Anpassung der Bremskräfte durch diverse Regler bei den verschiedensten Achskonstruktionen. Als das Programm bei der Volkswagenwerke AG in den Jahren 1971 – 72 mit Versuchen überprüft wurde, stellte sich heraus, daß selbst so triviale Parameter wie die Schwerpunktshöhe eines Fahrzeuges bei der Entwicklung nicht ausgemessen wurden und erst mühsam für das Versuchsfahrzeug ermittelt werden mußten. Obwohl die

Tabelle 1 ausführliches Rechenmodell

Zeitzuordnung: - vor / + nach dem Stillstand
Wegzuordnung: - vor / + nach der Stillstandsposition

Zeile	Anmerkung		Zeit [s]	Weg [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Verzögerung [m/s²]
1	Bremsentschluß	:	-4,53	-70,8	+100,0	+0,00
2	Gaswegnahme	:	-4,23	-62,5	+100,0	+0,00
3	Bremsbeginn	:	-4,03	-57,0	+99,6	+1,00
4	Haftgrenze	:	-3,73	-48,8	+94,5	+8,50
5	Blockiergrenze	:	-3,58	-45,0	+90,3	+7,00
6		:	-3,24	-36,7	+81,6	+7,00
7		:	-3,24	-36,7	+81,6	+7,00
8	Stillstand	:	+0,00	+0,0	+0,0	+7,00

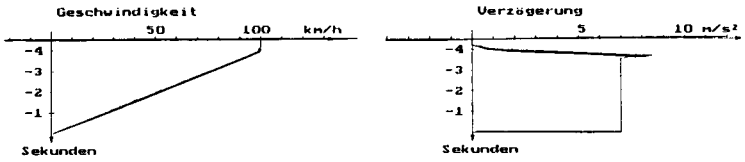


Tabelle 2 einfaches Rechenmodell

Zeitzuordnung: - vor / + nach dem Stillstand
Wegzuordnung: - vor / + nach der Stillstandsposition

Zeile	Anmerkung		Zeit [s]	Weg [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Verzögerung [m/s²]
1	Bremsentschluß	:	-4,53	-81,0	+100,0	+0,00
2		:	-4,23	-72,7	+100,0	+0,00
3		:	-4,03	-67,1	+100,0	+0,00
4		:	-3,73	-58,8	+100,0	+0,00
5		:	-3,58	-54,6	+100,0	+0,00
6	Spurbeginn	:	-3,24	-45,0	+100,0	+0,00
7		:	-3,24	-45,0	+100,0	+8,58
8	Stillstand	:	+0,00	+0,0	+0,0	+8,58

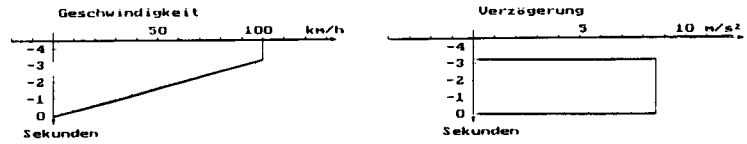


Bild 3.3(2) Vergleich verschiedener Rechenmodelle

Versuche dem Programm eine hohe Genauigkeit attestierten, immerhin betrug die Abweichung von den gemessenen Geschwindigkeiten weniger als 0,1 km/h, verhinderte die Unmöglichkeit für alle am Markt befindlichen Fahrzeuge mit einem vertretbaren Aufwand die notwendigen fahrzeugspezifischen Daten zu bekommen, den weiteren forensischen Einsatz.

Nicht nur durch das oben beschriebene GAB-Programm ist die bessere Ausnutzung der möglichen Bremskräfte in den über 20 Jahren danach fortgeschritten und soweit dies aus den (leider wenigen) veröffentlichten Meßdaten von Bremsversuchen ableitbar ist, kann bei Fahrzeugen ohne Antiblockiersystem von einem ähnlichen Verzögerungsverlauf während einer Panikbremsung ausgegangen werden. Eines hat nämlich die Auswertung realer Unfälle und Versuchsfahrten mit dem GAB-Programm seinerzeit deutlich gezeigt, daß die in einer Paniksituation aufgebrachten Bremspedalkräfte im Versuch nicht annähernd erreicht wurden. Das Bild 3.3(1) zeigt schematisch ein reales Verzögerungsdiagramm und seine Annäherung durch ein Rechenmodell für das TABELLEN-Programm. Jede Abwehrbremsung beginnt mit dem *Bremsentschluß* aufgrund eines gefährlichen Ereignisses, wobei zwischen der ersten Erkennbarkeit des Hindernisses und dem eigentlichen Beginn der Abwehr die Wahrnehmungsdauer von erfahrungsgemäß rund 0,3 s verstreicht, sofern der Fahrzeuglenker mit der Gefahr rechnend bremsbereit gefahren ist. Wenn er hingegen von einem Ereignis völlig überrascht wird und nach der 1. Sicht seinen Blick erst auf die Gefahrenquelle richten muß, dann kann zwischen dieser 1. Sicht und dem Bremsentschluß noch die Blickzuwendungszeit verstreichen, die im Durchschnitt mit rund 0,4 s anzusetzen ist. Die Verzögerung des Fahrzeuges beginnt schon durch die *Gaswegnahme* während des Fußwechsels vom Gas- zum Bremspedal, wofür etwa eine Zeitspanne von 0,2 s im Rechenmodell veranschlagt werden kann.

Mit dem Bremsbeginn endet die durch den Lenker verursachte *Reaktionszeit* und es beginnt der Anstieg der Verzögerung bis zum Erreichen der *Haftgrenze*. Die dafür benötigte Bremsschwellzeit wird durch die Konstruktion der Bremsanlage bestimmt und sie reicht auf trockener Fahrbahn von durchschnittlich 0,3 s bei Pkw bis zu 1,2 s bei großen Lkw und Autobussen. Je kleiner diese Schwellzeit ist, desto heftiger sind die Aufbauschwingungen, welche eine gute Ausnutzung der Haftreibung verhindern. Da die Vorderräder eines Kraftfahrzeuges bei einer Panikbremsung auf griffiger Fahrbahn mehr als 70% der Bremskräfte übertragen, bezieht sich die weitere Beschreibung des Bremsvorganges auf den Übergang zum Blockieren für die Vorderräder. Wenn die Pedalkraft so groß ist, daß sie wesentlich größer ist als für die volle Ausnutzung der Haftreibung erforderlich wäre, dann kommt es relativ rasch nach dem Erreichen der Haftgrenze zum Gleiten der Reifen auf der Fahrbahn und wenn dabei die Bremskraft auf den kleineren Gleitreibwert abgesunken ist, wird im Rechenmodell die *Blockiergrenze* angesetzt, auch wenn in vielen Fällen die Räder erst später oder auch gar nicht blockieren. Für den Wechsel von der Haftgrenze zur Blockiergrenze kann man ungefähr die halbe Bremsschwellzeit veranschlagen. Bis das Fahrzeug den *Stillstand* erreicht, kann die Verzögerung sowohl etwas ansteigen als auch abfallen, das muß in jedem Einzelfall nach der Spurenlage und den Geschwindigkeiten abgeschätzt werden.

Beim Abrollen eines Reifens kommt es im Bereiche der Reifenaufstandsfläche zur Verformungen und als Folge davon in Teilen der Aufstandsfläche zu einem Gleiten und durch dieses partielle Gleiten sinkt die höchst erzielbare Bremskraft unter die theoretische Höchstgrenze ab. Bei älteren veröffentlichten Versuchsergebnissen fällt auf, daß die größten gemessenen Seitenführungskräfte meist deutlich größer als die höchsten Bremskräfte waren. Mittlerweile ist mit den heute üblichen Breitreifen eine weitgehende Annäherung der Bremskräfte an die Seitenführungskräfte erzielt worden. Da aber die Geschwindigkeit aus dem Integral der Verzögerung berechnet wird, soll die Fläche unter dem Verzögerungsverlauf des Modells ungefähr gleich groß sein wie beim realen Verlauf, weshalb der Modellwert für die *Haftgrenze* eigentlich höher als

Zeile	Anmerkung		Zeit [s]	Weg [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Verzögerung [m/s²]
1	Bremsentschluß	:	-0,30	-6,7	+80,0	+0,00
2	Gaswegnahme	:	+0,00	+0,0	+80,0	+0,00
3	Bremsbeginn	:	+0,20	+4,4	+79,6	+1,00
4	Haftgrenze	:	+0,50	+10,9	+74,5	+8,50
5	Blockiergrenze	:	+0,65	+13,9	+70,3	+7,00
6	Stillstand	:	+3,44	+41,2	+0,0	+7,00

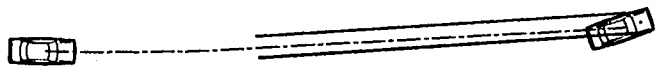


Bild 3.3(3) Richtungsänderung bei Panikbremsung und -lenkung

Zeile	Anmerkung		Zeit [s]	Weg [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Verzögerung [m/s²]
1	Bremsentschluß	:	-0,30	-6,7	+80,0	+0,00
2	Gaswegnahme	:	+0,00	+0,0	+80,0	+0,00
3	Bremsbeginn	:	+0,20	+4,4	+79,6	+1,00
4	Haftgrenze	:	+0,50	+10,9	+74,5	+8,50
5		:	+0,71	+15,0	+68,9	+6,60
6		:	+0,98	+20,0	+62,7	+6,05
7		:	+1,63	+30,0	+47,7	+6,74
8		:	+2,70	+40,0	+18,5	+8,44
9	Stillstand	:	+3,31	+41,6	+0,0	+8,50

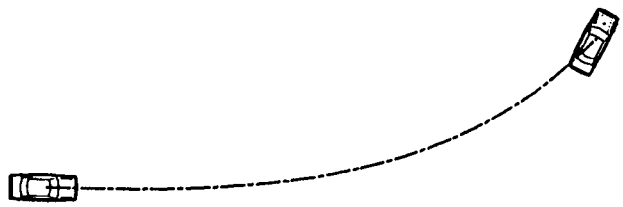


Bild 3.3(4) Panikbremsung mit ABS

der reale Haftreibwert angenommen werden müßte. Dies bringt aber in der forensischen Praxis bei der Diskussion mit technischen Laien Probleme, die sich angesichts des geringen Fehlers nicht lohnen, weshalb man hinreichend genau den Schätzwert der realen Haftgrenze den Berechnungen zugrunde legen kann. Zu berücksichtigen ist bei der Schätzung aber immer der Auslastungsgrad der einzelnen Achsen, dies insbesondere bei Lkw und Lkw-Zügen.

Im Gegensatz zum Haftreibwert wird der Gleitreibwert entlang der *Blokkierstrecke* von der Fahrzeugkonstruktion weniger dafür aber mehr von der Reifenart, der Reifentemperatur, der Flächenpressung in der Reifenaufstandsfläche und der Fahrbahnbeschaffenheit bestimmt. Auf trokkener Fahrbahn sind die Unterschiede der einzelnen Reifen eher gering, bei nasser Fahrbahn aber spielt die Reifenkonstruktion eine große Rolle. Leider hinken die Veröffentlichungen über Bremstests mit einzelnen Reifen[16] oder in Abhängigkeit von der Fahrbahn[17] der Entwicklung weit hinten nach und ob die heute nach diesen Meßdaten bei der Geschwindigkeitsrückrechnung geschätzten Werte auch zutreffend sind, kann zumindest bezweifelt werden. Da aber diese Werte sicher nicht kleiner geworden sind und in der Rechtsprechung der Grundsatz in dubio pro reo gilt, lassen sich zumindest gesicherte Grenzwerte errechnen.

Ein wesentliches Problem der Geschwindigkeitsrückrechnung bei einer Panikbremsung sind die für die Rechnung benötigten Parameter, allen voran die Verzögerungswerte, die immer nur durch Vergleich mit ähnlichen Meßdaten bei Versuchen **geschätzt** werden können. Man kann daher auch mit einem einfacheren Rechenmodell und einer konstant über die Bremsspurlänge angenommenen Verzögerung die richtige Geschwindigkeit errechnen, wenn man den Geschwindigkeitsabbau vor der Spurzeichnung durch einen entsprechend höheren Verzögerungswert ausgleicht. So lange man keine Computer für die Berechnung auch vor Ort einsetzen konnte, war dies auch die einzige Möglichkeit mit einfachen Hilfsmitteln bei einem an Ort und Stelle zu erstattenden Gutachten auf halbwegs vernünftige Geschwindigkeitswerte zu gelangen. Man muß daher sehr darauf achten, zu welchem Rechenmodell die geschätzten Parameter gehören, weshalb in Zukunft beim Nachvollziehen der Gutachten besonders auf diese Modelle und weniger auf die Rechenarbeit geachtet werden sollte.

In Bild 3.3(2) ist der Unterschied zwischen den Rechenergebnissen mit dem im Vorcomputerzeitalter verwendeten einfachen Modell einer gleichförmig verzögerten Bewegung und dem ausführlichen Modell in zwei Tabellen gegenübergestellt, **Tabelle 1** ist mit dem eingangs erwähnten ausführlichen Modell berechnet, **Tabelle 2** mit einem dazu simulierten einfachen Modell, wobei aus einer gleichen Bremsspurlänge der Schätz-wert der mittleren Verzögerung so gewählt wurde, daß die gleiche Geschwindigkeit vor Beginn der Bremsung herauskommt. Nimmt man den Bremsentschlußzeitpunkt in beiden Tabellen gleich an, dann ergibt sich bei der Anhaltestrecke eine Divergenz von ungefähr 10 m oder bei einer durch die Sichtverhältnisse gegebenen Anhaltestrecke eine kleinere Anhaltezeit. Da der Modellwert der Verzögerung für das einfache Modell bereits über dem Meßwert für die Haftgrenze liegt, wird in der Praxis doch mit einem niedrigeren Wert gerechnet und dann eben eine kleinere Geschwindigkeit angegeben, womit die Divergenzen bei den Zeiten und Strecken noch größer werden. Das Beispiel zeigt im Vergleich daher recht deutlich, wie notwendig eine möglichst gute Anpassung des Rechenmodells an die realen Verhältnisse ist, wenn man nicht nur die Geschwindigkeiten, sondern auch die Zeit-Wegrelationen richtig berechnen will. Dabei ermöglichen die bereits recht handlichen Notbookcomputer auch den mobilen Einsatz besserer Rechenmethoden.

In einer Paniksituation werden nicht nur überdurchschnittliche Pedalkräfte erzielt, wenn das Fahrzeug mit einem Antiblockiersystem (ABS) ausgestattet ist, wird auch genau so unkontrolliert gelenkt. Ohne Antiblockiereinrichtung wird bei einer Panikbremsung mit panikartigem Auslenken eine Richtungsänderung von 4° bis 5° auf trockener Fahrbahn bei Geschwindigkeiten von bis zu rund 80 km/h erzielt, wie die Auswertung zahlreicher Unfallspuren gezeigt hat. **Bild 3.3(3)** zeigt zur Tabelle der Abbildung 3.3(1) die Spurrichtung und die Fahrlinie bei gleichzeitigem Auslenken und Bremsen mit blockierten Rädern. Wenn bei einem ideal funktionierendem ABS die Resultierende aus Seitenführungs- und Bremskraft die Haftgrenze erreicht, regelt es bei weiterer Steigerung der Seitenführungskraft die Bremskraft zurück. In diesem Fall bewegt sich das Fahrzeug mit einer der Fahrgeschwindigkeit proportionalen Lenkgeschwindigkeit auf einer Klotoide, weshalb auch im realen Fall die Schwerpunktsbahn durch eine Klotoide oder eine Kombination von Klotoiden approximiert werden kann. **Bild 3.3(4)** zeigt bei einer ABS-Bremsung aus der gleichen Geschwindigkeit wie beim Beispiel des Bildes 3 die bis zum Stillstand erzielte Fahrlinie.

Dabei beginnt das ABS etwa dort mit dem Abregeln der Bremskraft, wo bei der Bremsung ohne ABS die Bremsspuren begonnen hätten. Wenn eine solche Bremsung mit Auslenken etwa zur Vermeidung eines Auffahrunfalles eingeleitet wird, dann gerät das Fahrzeug wegen der Lenkfähigkeit auf die Fahrbahnhälfte für den Gegenverkehr und wie praktische Fälle zeigen, wird dann aus einem relativ harmlosen Auffahrunfall ein schwerer Frontalzusammenstoß. Man kann natürlich wegen einiger solcher Sonderfälle mit negativer Wirkung eines an sich begrüßenswerten technischen Fortschritts die Ausrüstung eines Fahrzeuges mit ABS nicht negativ beurteilen, aber es ist doch wichtig über die Schattenseiten Bescheid zu wissen.

Durch Kombination des C.A.A.D.-Programms mit dem TABELLEN-Programm läßt sich für einzelne Zwischenpunkte der Krümmungsradius ermitteln und dazu kann die resultierende Seitenführungskraft bzw. die dadurch verbleibende Bremsverzögerung berechnet werden. Eine allzu feine Unterteilung der Bewegung ist aber schon deshalb nicht zielführend, weil die Regelung der verschiedensten Antiblockiersysteme vom Idealzustand noch mehr oder minder weit entfernt sind. Man kann natürlich nun auch ohne Bremsspuren die Ausgangsgeschwindigkeit berechnen, wenn man von einer Vollbremsung **mit** panikartigem Auslenken ausgehen darf und Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit bei der Anstoßposition einerseits und die Bewegungsrichtung vor der Bremseinleitung andererseits gegeben sind. Das zeigt auch schon auf, weshalb bei der forensischen Unfallanalyse in Zukunft die rein linearen Bewegungsberechnungen nicht ausreichen. Mit Hilfe des C.A.A.D.-Programms ist zumindest eine ebene aber auch räumliche Rekonstruktion möglich. Neben der linearen Bewegung entlang der Fahrlinie kommt der Krümmung der Fahrlinie bei der Berechnung von *spurlosen* ABS-Bremsungen eine besondere Bedeutung zu.

Man kann in erster Näherung davon ausgehen, daß auch bei der ABS-Bremsung das Lenkrad bei Panik in gleicher Weise gedreht wird und deshalb die Ausweichklotoide die gleiche ist wie bis zum Erreichen der Haftgrenze bei der normalen spurenzeichnenden Bremsung. Aus dem empirischen Wert für die Richtungsänderung bis zur Spurzeichnung kann daraus folgende Faustformel abgeleitet werden. Ist δ [°] die Änderung der Bewegungsrichtung von der Bremseinleitung (im Rechenmodell ab der Gaswegnahme) bis zum Anstoß, s [m] der dabei zurückgelegte Teilbremsweg und v_0 [km/h] die Bremsausgangsgeschwindigkeit, dann gilt für den Teilbremsweg die Formel:

Gl. (1):

$$s = \frac{v_0}{7{,}2}\sqrt{\delta/\delta_0}; \quad \delta_0 = 3° \text{ bis } 4°.$$

Entlang der Ausweichklotoide ist der Krümmungsradius R [m] nach dem Teilbremsweg s [m] in Abhängigkeit von der Richtungsänderung δ [°] gleich

Gl. (2):

$$R = \frac{s}{2\,\delta} \quad \frac{180}{\pi}$$

oder wenn man aus der Gleichung (1) den Winkel δ herausrechnet, dann kann der Radius R auch aus der Gleichung

Gl. (3):

$$R = \frac{v_0^2}{1{,}8\,\delta_0 s}, \qquad R,\ s\ [m],\ \delta\ [°],\ v_o\ [km/h],$$

berechnet werden. Ist nun s_o [m] der bis zum Beginn der Bremsung mit ABS zurückgelegte Weg und s_i [m] der bis zur Tabellenzeile i zurückgelegte Weg, und somit der Weg s in der Gleichung (3) die Differenz der beiden Strecken, weiter v_i [km/h] die Geschwindigkeit in der Zeile i, so gilt für die maximal erzielbare Verzögerung a_i [m/s²], bei der Grenzverzögerung a_h, welche bei Ausnutzung der Haftreibung ohne Auslenken

in der Ebene zu erzielen wäre, auf der Steigung stg [%] mit dem Steigungswinkel vi = arctan (stg/100), die Gleichung:
Gl. (4)

$$a_i \leq [(a_h \cos(vi))^2 \frac{v_i^2}{12{,}96\ R_i})^2]^{1/2} + 9{,}81 \sin(vi).$$

Da die Geschwindigkeit v_i eine Funktion der Verzögerung a_i ist, kann die Berechnung der Bremsung mit ABS und panikartigem Auslenken nur iterativ durchgeführt werden, wobei nach jedem Berechnungsschritt im TABELLEN-Programm der neue Wert für die Verzögerung mit einem Hilfsprogramm errechnet und die Rechnung anschließend so lange wiederholt wird, bis die weitere Änderung der errechneten Geschwindigkeit vernachlässigbar klein wird.

Erreicht die Bremsverzögerung nach Gleichung (4) den Wert 0, dann beginnt bei weiterem Auslenken eine Schleuderbewegung, doch soweit kommt es bei den meisten Unfällen gar nicht vor dem Anstoß. Ob die Voraussetzungen für eine ABS-Bremsung mit panikartigem Auslenken vorliegen, kann immer nur aufgrund der Gesamtanalyse aus der ursprünglichen Fahrtrichtung und der Bewegungsrichtung beim Anstoß beurteilt werden, weshalb die Rückrechnung der Geschwindigkeit in diesem Fall nicht mehr so einfach wie bei einer spurzeichnenden Bremsung aus der Spurlänge ist, bei welcher auch ohne genaue Kenntnis der Lage der Spuren am Unfallort und deren Geometrie eine Geschwindigkeitsrückrechnung möglich ist. Deshalb wird mit der weiteren Verbreitung der Antiblockiersysteme der Unfallanalyse mit Hilfe des C.A.A.D.- und TABELLEN-Programms verstärkte Bedeutung zukommen.

3.4 Die Beschleunigung

Warum sich die Geschwindigkeit eines Kraftfahrzeuges bei einer Vollgasbeschleunigung innerhalb des Geschwindigkeitsbereiches einer Getriebeübersetzung recht gut durch eine **Tangenshyperbolikusfunktion** annähern läßt, wurde schon in[18] ausführlich beschrieben. Im TABELLEN-Programm ist nun ein Hilfsprogramm integriert, das in Abhängigkeit vom eingelegten Gang i zur Geschwindigkeit v (in den folgenden Gleichungen abweichend zu oben in der Dimension [m/s] angegeben!) die dazugehörige maximal erzielbare Beschleunigung a berechnet. Dazu wurde das in [18] festgehaltene Gleichungssystem wie folgt modifiziert:
Ist die Getriebeübersetzung g_i im i-ten Gang definiert als
Gl. (1):

$$g_i = \frac{\text{Motordrehzahl}}{\text{Drehzahl der Antriebswelle}}$$

und das Getriebe so ausgelegt, daß die Höchstgeschwindigkeit v_h im h-ten Gang von insgesamt n Gängen ($h \leq n$) gerade mit jener Motordrehzahl erreicht wird, mit der etwa die maximale Motorleistung abgegeben wird, dann läßt sich die optimale Schaltgeschwindigkeit v_{si} mit
Gl. (2):

$$v_{si} = v_h \frac{g_h}{g_i}$$

angeben. Die in jedem Gang mit der Tangenshyperbolikusapproximation asymptotisch erzielbare theoretische Grenzgeschwindigkeit v_{mi} errechnet sich aus der Gleichung
Gl. (3):

$$v_{mi} = v_h \sqrt{g_i/g_h}.$$

Ist t_1 die Zeit, in welcher die Geschwindigkeit v_1 (meist 100 km/h) bei einer Vollgasbeschleunigung aus dem Stillstand mit einem Fahrzeuggewicht G_1 erreicht und wird bei dieser Versuchsfahrt für den Gangwechsel die Schaltzeit t_s benötigt und bis in den Gang k geschaltet, dann können zunächst mit der relativen Getriebeübersetzung l_i:
Gl. (4):
$l_i = g_i/g_h$
die Hilfsgrößen A, B und C aus den folgenden Gleichungen berechnet werden:
Gl. (5):

$$A = \sum_{j=1}^{k-1} \frac{1}{(l_{j+1})^j} \ln\left\{\frac{l_j\ (l_{j+1})^j + 1}{l_j\ (l_{j+1})^j - 1}\right\}$$

Gl. (6):

$$B = \sum_{j=1}^{k-1} \frac{1}{(l_j)^j} \ln\left\{\frac{l_j\ (l_j)^j + 1}{l_j\ (l_j)^j - 1}\right\}$$

Gl. (7):

$$C = \frac{1}{(l_k)^j} \ln\left\{\frac{v_h\ (l_k)^j + v_1}{v_h\ (l_k)^j - v_1}\right\}$$

und daraus der Parameter τ_h
Gl. (8):

$$\tau_h = \frac{2\ G}{G_1} \frac{t_1 - (k-1)\ t_s}{C + B - A}.$$

Jetzt fehlt für die Berechnung noch die Hilfsgröße u als Funktion der Momentangeschwindigkeit v:
Gl. (9):

$$u = \left[\frac{v_{mi} + v}{v_{mi} - v}\right]^{1/2}$$

Damit sind nun alle Parameter für die Berechnung der Beschleunigung a_0 vorhanden und es gilt nun die Gleichung:
Gl. (10):

$$a_0 = \frac{4\ v_{mi}^2}{(u + 1/u)^2\ v_h\ \tau_h}.$$

Der Beschleunigungswert a_0 gilt nur für die Bewegung auf einer ebenen Fahrbahn und dem Modell entsprechend stimmt der Wert nur dann, wenn die Motorkennlinie eine Gerade wäre. Um hier eine realere Annäherung an eine durchschnittliche Motorkennlinie zu erreichen, wurde folgende Näherung für die Beschleunigung a programmiert
Gl. (11):

$$a \leq 4\ a_0\ (u + 1/u)^2 + a_0\ ([v/(0{,}7 v_{si}) - 1]^2 - 0.002)^{1/2} - 0{,}0981\ \text{stg},$$

in welcher auch gleich die Steigung stg [%] berücksichtigt ist. Auch hier muß analog zur ABS-Bremsverzögerung bei der Panikauslegung in einer Tabellenzeile des TABELLEN-Programms der Beschleunigungswert iterativ mehrmals korrigiert werden, wenn die Geschwindigkeit nicht eine vorgegebene Größe, sondern ein Rechenergebnis ist.

4 Stoßrekonstruktion

4.1 Der Auffahrunfall

Wenn zwei oder mehrere Fahrzeuge in einer Kolonne mit ungefähr gleicher Geschwindigkeit hintereinander fahren und es nach Bremsungen dabei zu einer Kollision kommt, dann spricht man von einem Auffahrunfall. Ist die seitliche Versetzung der Fahrzeuge gering, so handelt es sich meist hinreichend genau um zentrische Stöße, für welche mit ein lineares Stoßmodell ausreicht. Die Straßenverkehrsordnung[19] schreibt im **§ 18 (1)** vor, »*Der Lenker eines Fahrzeuges hat stets einen solchen Abstand vom nächsten vor ihm fahrenden Fahrzeug einzuhal-*

Unfallversuche
Dipl.-Ing. Heinz Burg / Ing. HTL Lindenmann
Deutsch / Englisch / Französisch
Format 17,5 x 25 cm, über 250 Seiten, mit zusätzlichen 9 Faltblättern im Anhang und über 500 Abbildungen und Diagrammen
ISBN 3 88550 021 3, 176,65 DM + Vers.Kosten
In diesem Buch wird über Unfallversuche mit Personenkraftwagen berichtet. 9 Pkw / Pkw-Kollisionen, die in Winterthur durchgeführt wurden. Für jeden Versuch gibt es folgende detaillierte Angaben: Daten – Bilder von der Motorkamera (Überkopfaufnahmen) – Zeichnungen über Versuchsablauf (entspricht den Überkopfaufnahmen M: 1:100) – Unfallskizze mit Spuren und Endlagen M: 1:100) – Schäden und Spuren – Filmbilder (Überkopf) – Filmbilder aus der Fahrbahnebene – Ergebnisse der Filmauswertung mit Ortskurven der Fahrzeugschwerpunkte, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe – Rekonstruktionsdaten (vollständiger Datensatz) – Bewertung der Versuche.
Verlag INFORMATION Ambs GmbH
Postfach 208 · 77968 Kippenheim
Tel.: 0 78 25 - 71 14 · Fax: 0 78 25 - 93 76

ten, daß ihm jederzeit das rechtzeitige Anhalten möglich ist, auch wenn das vordere Fahrzeug plötzlich abgebremst wird« aber im **§ 21 (1)** ist vorgeschrieben, *»Der Lenker darf das Fahrzeug nicht **jäh** und für den Lenker eines nachfolgenden Fahrzeuges **überraschend** abbremsen, es sei denn, daß es die Verkehrssicherheit erfordert.«* Beim einfachen Auffahrunfall mit nur zwei beteiligten Fahrzeugen ist für den Unfallanalytiker daher primär die Frage von Relevanz, ob dem voranfahrenden Fahrzeuglenker eine starke Bremsung nachzuweisen ist und wenn ja, ob diese Intensität zur Abwehr einer Gefahr notwendig war. Strittig sind oft auch die Verletzungsfolgen, weshalb die bei einem Stoß auftretenden Belastungen der Insassen ermittelt werden müssen, dieses Thema wird aber erst in einem gesonderten Kapitel später erörtert. Zunächst sollen aber die Stoßgleichungen des eindimensionalen Stoßmodells behandelt werden.

Wenn die Voraussetzungen für eine lineare Stoßmechanik zumindest hinreichend genau erfüllt sind, dann gelten für den Stoß zweier Fahrzeuge folgende Stoßgleichungen. Mit dem Index i = 1 wird das voranfahrende und mit i = 2 das nachfahrende Fahrzeug bezeichnet. Da die Insassen nicht starr mit dem Fahrzeug verbunden sind, ist beim Stoß zunächst nur die Masse der Fahrzeuge ohne Insassen wirksam, doch kommt es nach dem inneren Stoß meist noch zu einem weiteren Teilstoß der Fahrzeuge, weshalb man für die Masse m_i das momentane Gesamtgewicht ansetzen darf, wenn man das aus der Summe der Teilstöße bestehende Stoßgeschehen als Gesamtheit betrachtet. Sind v_i die Anstoßgeschwindigkeiten, dann gilt zunächst für die Relativgeschwindigkeit v_{rel}:
Gl. (1):

$$v_{rel} = v_2 - v_1.$$

Wenn sich zwei Fahrzeuge nicht gerade mit den Stoßstangen verhaken, ist beim Auffahrunfall die Relativgeschwindigkeit $v_{rel} > 0$. Die Geschwindigkeitsänderung Δv_i der Fahrzeuge bei einer Stoßzahl $-1 < e < +1$ erhält man aus dem Impulssatz mit:
Gl. (2):

$$\Delta v_i = (v_j - v_i)\frac{m_j}{m_i + m_j}(1 + e).$$

Die Stoßzahl e ist bei den Auffahrunfällen in jedem Einzelfall zu schätzen, dabei ist zu beachten, ob die Fahrzeuge ohne Bremsungen und ohne Nickbewegungen direkt mit den dafür bestimmten Stoßstangen zusammenstoßen, dann kann bei kleineren Stößen der Wert bis zu +0,5 anwachsen, stößt aber der auffahrende Pkw mit den Scheinwerfern gegen die Heckstoßstange des voranfahrenden, wie dies bei starken Bremsungen der Fall ist, dann kann mit Schätzwerten um +0,1 gerechnet werden. Negativ kann die Stoßzahl nur werden, wenn es schon vor der ersten Stoßperiode zu einer Trennung der Fahrzeuge kommt, was beim Auffahrunfall aber nicht eintritt, wohl aber bei den später noch erläuterten streifenden Stößen.

Solange die Stoßzahl positiv ist, wird in der ersten Stoßperiode unabhängig vom Material, allein abhängig von den Massen und der Relativgeschwindigkeit, die **Stoßenergie** E_s in Verformungsarbeit umgesetzt.
Gl. (3):

$$E_s = 1/2\,\frac{m_i\, m_j}{m_i + m_i}\, v_{rel}^2.$$

Die Stoßenergie teilt sich meist ungleichmäßig auf die Verformungsenergie der beiden Stoßpartner auf,
Gl. (4):

$$E_s = E_i + E_j,$$

Die Energie kann man in den dafür vorgesehenen physikalischen Einheiten ausdrücken, also Nm oder kWh, aber darunter kann man sich wenig vorstellen. Besser ist hier die **äquivalente Wandaufprallgeschwindigkeit** EES_i als Maß zu verwenden, das ist jene Geschwindigkeit, mit der das Fahrzeug beim Anprall mit der Masse m_{vi} gegen eine starre und unendlich schwere Wand, bei einem genau zentrischen Stoß, die Energie E_i in Verformungen umwandelt:
Gl. (5):

$$E_i = 1/2\, m_{vi}\, EES_i^2.$$

Da die Heckaufprallversuche meist mit fahrbaren Barrieren oder Fahrzeug gegen Fahrzeug durchgeführt werden und in den Veröffentlichungen die Relativgeschwindigkeit beim Versuch und nicht die umgerechnete äquivalente Wandaufprallgeschwindigkeit (EES) angegeben ist, läßt sich oft leichter die Relativgeschwindigkeit aus den Verformungen direkt schätzen.

Für die praktische Berechnung der Auffahrstöße ist im TABELLEN-Programm vorgesehen, daß in zwei aufeinanderfolgenden Zeilen mit der gleichen Zeit ein unstetiger Geschwindigkeitswechsel erlaubt ist, die Geschwindigkeitsänderung kann nach der Gleichung (2) mit Hilfe eines direkt aus dem Programm auf dem Bildschirm aufrufbaren Taschenrechners bestimmt werden oder man kann sich auch des noch unten besprochenen Programms für die Stroßrekonstruktion mit dem ebenen Stoßmodell bedienen.

Zur Frage nach der mittleren Bremsverzögerung des voranfahrenden Fahrzeugs, sofern keine Bremsspuren abgezeichnet worden sind, kann von folgenden Überlegungen ausgegangen werden. Wenn zwei Fahrzeuge mit der gleichen Geschwindigkeit v_0 hintereinander fahren und das voranfahrende Fahrzeug für den Lenker des nachfahrenden *überraschend* abgebremst wird, dann kann man bei der Rekonstruktion davon ausgehen, daß er nicht konzentriert die Bremsleuchten beobachtet hat und somit das Aufleuchten der Bremslichter erst nach einer Blickzuwendungszeit bemerkte. Da die Bremslichter nicht schon nach der ersten Berührung des Bremspedals aufleuchten, verstreicht nach dem *Bremsbeginn* bei dem im Kapitel 3.3 aufgezeigten Rechenmodell noch ungefähr eine Zeitspanne von 0,15 s und so ergibt sich zwischen der mit der *Gaswegnahme* beginnenden Reaktion und dem Aufleuchten der Bremslichter eine Mindestzeitspanne von durchschnittlich 0,35 s. Rechnet man noch die Wahrnehmungsdauer des nachfahrenden Lenkers von rund 0,3 s und die Blickzuwendungszeit von etwa 0,4 s hinzu, dann beginnt die Reaktion des nachfolgenden Lenkers um eine Bremsverzugszeit $\Delta t_v \approx 1{,}05$ s phasenverschoben. Kann für beide Fahrzeuge vom gleichen Rechenmodell für die Bremsung und auch von der gleichstarken Vollbremsverzögerung a_v ausgegangen werden, dann ist für diesen Grenzfall die Grenzgeschwindigkeitsdifferenz Δv_g bis zum Stillstand des voranfahrenden Fahrzeugs gleich und zwar:
Gl. (6):

$$\Delta v_g = 3{,}6\, a_v\, \Delta t_v \text{ [km/h]}.$$

Bei einer Vollbremsverzögerung von 7 m/s² und einer Bremsverzugszeit von 1,05 s sind dies 26,5 km/h. Das ist ein wichtiger Richtwert für die Frage nach der wahrscheinlichen Bremsintensität des voranfahrenden Fahrzeugs. Ist die aus den Schäden abschätzbare Relativgeschwindigkeit kleiner als die Grenzgeschwindigkeitsdifferenz, dann hat das voranfahrende Fahrzeug entweder schon vor dem Anstoß Stillstand erlangt oder weniger stark abgebremst. Rein theoretisch könnte der Anstoß aber auch schon vor dem Erreichen der Vollbremsintensität des voranfahrenden zu einer kleineren Geschwindigkeitsdifferenz beim Anstoß führen, doch dann müßte der Tiefenabstand vor der Bremsung schon extrem klein gewesen sein. Sollte aber die tatsächliche Geschwindigkeitsdifferenz deutlich größer als Δv_g gewesen sein, dann handelt es sich nicht mehr um einen normalen Auffahrunfall, hier muß dann schon nach anderen Ursachen geforscht werden.

Den obigen Überlegungen folgend ergibt sich aus den eingangs zitierten Gesetzesstellen für den ausreichenden Tiefenabstand Δs_{min} die Forderung
Gl. (7):

$$\Delta s_{min} \geq \frac{\Delta v_g\, \Delta t_v}{3{,}6},$$

wenn man die Geschwindigkeit in [km/h] und die Zeit in [s] angibt. Während man bei der Ermittlung des erforderlichen Tiefenabstandes die genaue Ausgangsgeschwindigkeit kennen muß, ist es für Vergleichszwecke bei der rechtlichen Beurteilung besser, das **Zeitäquivalent des Tiefenabstandes** $\Delta t_ä$ mit der günstigsten Bremsverzugszeit Δt_{min} von 0,65 s bei konzentrierter und 1,05 s bei normaler Fahrweise zu vergleichen.

Fortsetzung folgt ■

Fordern Sie bitte unseren Verlagsprospekt an!

Karl Plankensteiner*

Theorie und Praxis der forensischen Unfallanalyse

Fortsetzung aus Heft 4/1994

Bei der Untersuchung der Bremsintensität des voranfahrenden Fahrzeugs ist der Höhenvergleich der Anstoßstellen recht nützlich. Je nach Fahrzeugkonstruktion und Bremsintensität wird das Heck des voranfahrenden Fahrzeugs aus der Normallage mehr oder minder stark nach oben und die Front des auffahrenden Fahrzeugs nach unten bewegt, wie dies in Bild 4.1(1) schematisch dargestellt ist:
Bei extremen Längslenkerkonstruktionen an der Hinterachse und entsprechender Übertragung der Bremsmomente kann es vereinzelt bei der Bremsung zu einem Absenken des Hecks kommen (z.B. bei älteren Citroën), doch da dies auch die Blockierneigung der Hinterräder verstärkt und so die Bremsstabilität beeinträchtigt, findet man solche Konstruktionen heute wirklich nur noch in Ausnahmefällen. Auch die bei den Vorderachsen zur Verhinderung des Absenkens entwickelten Antidivekonstruktionen sind der Bremsstabilität abträglich und so haben heute die Fahrzeuge ein fast einheitliches Verhalten bei der Bremsnickschwingung, daher kann bei einer Vollbremsung auf trockener Straße von beiden Fahrzeugen mit einer Höhendifferenz gegenüber der Ruhelage bei gleicher Beladung von bis zu 15 cm gerechnet werden.

4.2 Das Paradoxon des Serienauffahrunfalles

Wenn drei oder mehrere hintereinanderfahrende Fahrzeuge in einen Unfall verwickelt sind, dann spricht man von einem Serienauffahrunfall. Dieser Unfalltyp schafft bei der Schadenregulierung wegen einiger für den technischen Laien schwer zu verstehender Paradoxa in der Unfallmechanik große Probleme, weshalb zunächst diese Zusammenhänge aus der Stoßmechanik an Hand einfacher Beispiele erläutert werden sollen. Da die paradoxen Rekonstruktionsergebnisse zu zahlreichen Mißverständnisen geführt haben, sind einige recht skurrile Modelle für die Schadenregulierung entwickelt und wieder verworfen worden, weshalb im nächsten Kapitel aufgezeigt werden soll, wie man ein einfaches und dennoch den technischen Gegebenheiten gerecht werdendes Modell erstellen kann.

Der Grundtyp eines Serienauffahrunfalls beginnt mit einer Hintereinanderfahrt von drei oder mehreren Fahrzeugen mit der gleichen Geschwindigkeit v_0. Der Einfachheit halber soll wegen der besseren Überschaubarkeit der Zusammenhänge nun angenommen werden, daß alle den gleichen Abstand mit dem Zeitäquivalent $\Delta t_ä$ einhalten, das kleiner ist als die Bremsverzugszeit Δt_v, die ebenfalls für alle Lenker gleich angenommen wird. Weiter sei das Gewicht aller beteiligten Fahrzeuge gleich groß und die Stoßzahl e unabhängig von der unterschiedlichen Relativgeschwindigkeit bei den einzelnen Stößen ebenfalls. Wenn bei dieser Ausgangssituation das erste Fahrzeug plötzlich und überraschend für die nachfolgenden Lenker voll mit der Blockierverzögerung a_v abgebremst wird und alle weiteren Fahrzeuglenker sich nur an den Bremslichtern des unmittelbar voranfahrenden Fahrzeugs orientieren, dann stößt zunächst das zweite Fahrzeug mit der Grenzgeschwindigkeitsdifferenz Δv_g gegen das noch nicht zum Stillstand gekommene erste Fahrzeug, die Anstoßrelativgeschwindigkeit $\Delta v_{2\text{-}1}$ ist demnach
Gl. (1) $\{v_0 (\Delta t_v - \Delta t_ä) / 3.6 > v_0^2/(25{,}92\ a_v)\}$:
$\Delta v_{2\text{-}1} = \Delta v_g$.

*Dipl.-Ing. Karl Plankensteiner, Höf 5, A-8301 Laßnitzhöhe

Bild 4.1(1) Höhenvergleich der Anstoßstellen

Die Randbedingung der Gleichung (1) muß erfüllt sein, damit der Stillstand des ersten Fahrzeugs nicht schon vor dem Anstoß eintritt und die Geschwindigkeit v_0 ist dort natürlich wieder in [km/h] einzusetzen, die Verzögerung a_v in [m/s²].

Ohne den Anstoß des zweiten Fahrzeugs gegen das erste würde nach den obigen Randbedingungen das dritte Fahrzeug mit der gleichen Relativgeschwindigkeit aber um die Bremsverzugszeit Δt_v später gegen das zweite stoßen, aber nun wurde beim ersten Stoß die Geschwindigkeitsdifferenz auf
Gl. (2):

$$\Delta v_{3\text{-}2} = \Delta v_g + \Delta v_{2\text{-}1}\frac{(1 + e)}{2},$$

vergrößert, wobei dieser zweite Anstoß um die Zeitdifferenz $\Delta t_{s1,2}$
Gl. (3):

$$\Delta t_{s1,2} = \Delta t_v \frac{\Delta v_g}{\Delta v_{3\text{-}2}}$$

später erfolgt, wenn das zweite Fahrzeug nach dem ersten Stoß mit gleicher Intensität weitergebremst wird. Betrug die Bremsverzugszeit Δt_v im Idealfall konzentrierter Fahrweise 0,65 s, so sinkt bei einer Stoßzahl von 0,2 der Zeitabstand auf rund 0,4 s und erreicht damit schon die Größenordnung der Wahrnehmungsdauer. Die Relativgeschwindigkeit beim Heckanstoß des zweiten Fahrzeugs ist 1,6-fach so groß wie beim Frontanstoß, die Stoßenergie und damit die Verformungen sind aber gleich um den Faktor 2,56 größer. Der wesentlich heftigere Heckanstoß und die kurze Zeitspanne zwischen den Stößen haben aber zur Folge, daß fast immer der Heckanstoß als der erste bezeichnet wird, ja es gab Fälle, wo die Beteiligten erst aus den Schäden den Umstand eines Frontanstoßes bemerkten. Es ist für den Laien nur schwer vorstellbar, daß der den größeren Schaden herbeiführende Stoß nicht der erste den Unfall auslösende ist, und so kommt es bei dieser Konstellation eigentlich immer zu einer Angabe der Stoßfolge in verkehrter Reihenfolge, ohne daß deshalb der Vorwurf einer falschen Aussage gerechtfertigt

Zeile	Anmerkung		Zeit [s]	Weg [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Verzögerung [m/s²]
1	Bremsbeginn	:	+0,00	-46,9	+80,0	+0,00
2		:	+0,50	-36,0	+74,6	+5,96
3		:	+0,65	-33,0	+71,4	+5,96
4		:	+0,95	-27,3	+65,0	+5,96
5		:	+1,15	-23,8	+60,7	+5,96
6		:	+1,30	-21,3	+57,5	+5,96
7		:	+1,60	-16,8	+51,0	+5,96
8		:	+1,80	-14,1	+46,7	+5,96
9		:	+2,17	-9,7	+38,8	+5,96
10		:	+2,17	-9,7	+38,8	+5,96
11	Anstoß 2	:	+2,38	-7,6	+34,3	+5,96
12	Stoßende	:	+2,38	-7,6	+46,1	+0,00
13	Bremsbeginn	:	+2,88	-1,2	+46,1	+0,00
14		:	+3,00	+0,3	+45,7	+1,70
15		:	+3,38	+4,9	+39,8	+7,00
16		:	+3,92	+9,9	+26,1	+7,00
17		:	+3,98	+10,3	+24,7	+7,00
18		:	+4,18	+11,5	+19,6	+7,00
19		:	+4,30	+12,1	+16,5	+7,00
20	Endlage	:	+4,96	+13,6	+0,0	+7,00

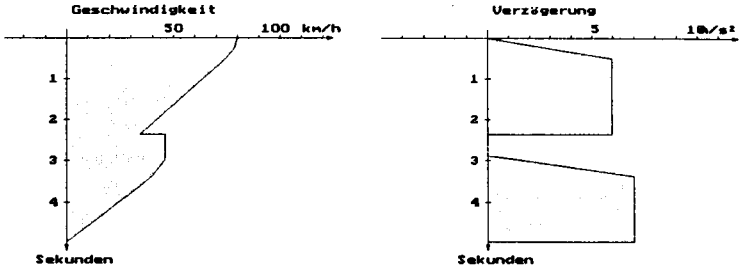


Bild 4.2(1) 1. Fahrzeug der Kolonne

Zeile	Anmerkung		Zeit [s]	Weg [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Verzögerung [m/s²]
1		:	+0,00	-51,9	+80,0	+0,00
2		:	+0,50	-40,8	+80,0	+0,00
3	Bremsbeginn	:	+0,65	-37,4	+80,0	+0,00
4	Haftgrenze	:	+0,95	-30,9	+75,4	+8,50
5	Blockiergrenze	:	+1,15	-26,9	+69,8	+7,00
6		:	+1,30	-24,0	+66,1	+7,00
7		:	+1,60	-18,9	+58,5	+7,00
8		:	+1,80	-15,7	+53,5	+7,00
9	Anstoß 1	:	+2,17	-10,7	+44,1	+7,00
10	Stoßende	:	+2,17	-10,7	+53,9	+0,00
11	Anstoß 2	:	+2,38	-7,6	+53,9	+0,00
12	Stoßende	:	+2,38	-7,6	+42,2	+0,00
13	Bremsung	:	+2,88	-2,0	+35,9	+7,00
14		:	+3,00	-0,9	+32,8	+7,00
15		:	+3,38	+2,1	+23,3	+7,00
16		:	+3,92	+4,5	+9,6	+7,00
17		:	+3,98	+4,7	+8,2	+7,00
18		:	+4,18	+5,0	+3,0	+7,00
19	Endlage	:	+4,30	+5,0	+0,0	+7,00

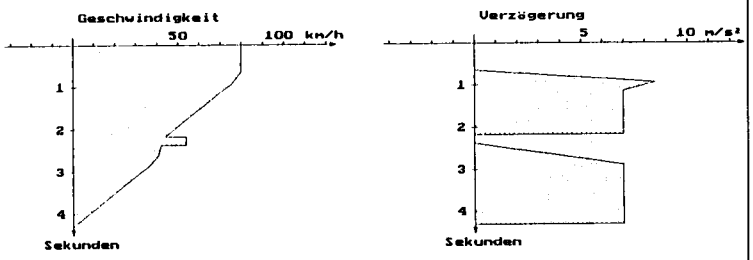


Bild 4.2(2) 2. Fahrzeug der Kolonne

Zeile	Anmerkung		Zeit [s]	Weg [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Verzögerung [m/s²]
1		:	+0,00	-56,9	+80,0	+0,00
2		:	+0,50	-45,8	+80,0	+0,00
3		:	+0,65	-42,4	+80,0	+0,00
4		:	+0,95	-35,8	+80,0	+0,00
5		:	+1,15	-31,3	+80,0	+0,00
6	Bremsbeginn	:	+1,30	-28,0	+80,0	+0,00
7	Haftgrenze	:	+1,60	-21,5	+75,4	+8,50
8	Blockiergrenze	:	+1,80	-17,4	+69,8	+7,00
9	Anstoß 1	:	+2,17	-10,7	+60,5	+7,00
10	Stoßende	:	+2,17	-10,7	+50,7	+7,00
11		:	+2,38	-7,9	+45,4	+7,00
12		:	+2,38	-7,9	+45,4	+7,00
13		:	+2,88	-2,5	+32,8	+7,00
14		:	+3,00	-1,5	+29,8	+7,00
15		:	+3,38	+1,2	+20,2	+7,00
16		:	+3,92	+3,2	+6,6	+7,00
17		:	+3,98	+3,3	+5,2	+7,00
18	Stillstand	:	+4,18	+3,4	+0,0	+7,00

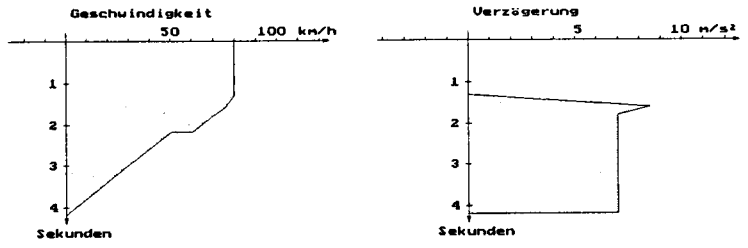


Bild 4.2(3) 3. Fahrzeug der Kolonne

wäre. Das ist aber nur eines der paradoxen Rekonstruktionsergebnisse, welches aber die Akzeptanz derselben bei den Beteiligten stark beeinträchtigt.

Die Ursache des oben beschriebenen Unfallablaufes liegt in den zu geringen Tiefenabständen, wobei die Annahme bei der Berechnung die war, daß die Abstände gleich groß und damit in gleicher Weise auch zu kurz waren. Die zu geringen Abstände des zweiten und dritten Fahrzeugs und allenfalls die unnotwendig starke Bremsung des ersten Fahrzeugs sind jene Faktoren, die den Unfall verursacht haben. Wenn man das obige Beispiel dahingehend variiert, daß das erste Fahrzeug nicht voll abgebremst wurde und das zweite nur deshalb voll gebremst werden mußte, um dem voranfahrenden Fahrzeug möglichst nicht aufzufahren und sich dies im folgenden Grenzfall ohne das dritte Fahrzeug gerade ausgegangen wäre, dann ergibt sich für sonst unveränderte Annahmen hinsichtlich gleicher Ausgangsgeschwindigkeit, gleicher Abstände und gleicher Fahrzeuggewichte, daß nun das dritte Fahrzeug zuerst mit der Geschwindigkeitsdifferenz Δv_g gegen das Heck des zweiten Fahrzeugs stößt. Dadurch wird nicht nur die Geschwindigkeit des zweiten Fahrzeugs um die Geschwindigkeitsdifferenz Δv_g (1+e)/2 angehoben, sondern auch die Bremsung kurz unterbrochen, da durch den Heckanprall der Bremsfuß vom Pedal gestoßen wird. Dadurch erfolgt ebenfalls in kurzem Zeitabstand ein Anstoß des zweiten Fahrzeugs gegen das Heck des ersten Fahrzeugs, wobei die Relativgeschwindigkeit durch die Bremsunterbrechung wieder angehoben wird und zumindest von der gleichen Größenordnung ist wie beim ersten Stoß wenn nicht sogar größer. In den Bildern 4.2(1), 4.2(2), und 4.2(3) sind die TABELLEN der drei Bewegungen für ein Beispiel festgehalten, bei dem in einer Kolonne aus drei Fahrzeugen bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h die Abstände nur je 5 m betrugen. Wenn das erste Fahrzeug anstatt einer Vollbremsung eine um rund 1 m/s² schwächere Bremsung einleitet, dann hat das nach den Tabellen beim Sekundäranstoß bei einer geschätzten Stoßzahl von 0,2 zur Folge, daß die Relativgeschwindigkeit von 16,4 km/h beim ersten Stoß auf 19,7 km/h beim zweiten Anstoß anwächst, die Stoßenergie sich also um das 1,44-fache erhöht!

Sollte der erste Lenker nur als Reaktion auf den drohenden Heckaufprall schwächer gebremst haben, dann ist er für diese an sich gute Reaktion mit einem höheren Schaden belohnt worden, denn bei einer Vollbremsung nach dem vorhergehenden Beispiel wäre die Stoßenergie und damit auch der Schadenumfang kleiner gewesen. Es muß wohl im höchsten Maße als paradox bezeichnet werden, daß ein nach den Bestimmungen der Straßenverkehrsordnung lobenswertes Verhalten zu einer Verschlechterung des Ergebnisses führt und dieses auch für den Fachmann nicht sofort erkennbare **Paradoxon** schafft bei der forensischen Behandlung von Serienauffahrunfällen größte Probleme.

Die Zeitdifferenz im obigen Beispiel beträgt nun sogar nur rund 0,2 s und da auch hier der Anstoß mit den geringeren Schäden der erste ist wird die Reihenfolge der Stöße auch vertauscht angegeben. Die Verminderung der Bremsverzögerung von 7 m/s² auf rund 6 m/s² ist an sich gering und solche Unterschiede sind im Streubereich bei Vollbremsungen durchaus möglich, sie müssen daher nicht unbedingt durch eine bewußte Reaktion entstanden sein. Obwohl also auch beim zweiten Beispiel die Bremsung des ersten Fahrzeugs noch als stark bezeichnet werden muß, und daher genau so ***jäh*** im Sinne des § 21 StVO[19] ist wie die im ersten Beispiel, verändert diese oft rein zufällige Variation das Stoßgeschehen derart gravierend, insbesondere was die Verteilung der Schäden auf die Fahrzeuge anlangt. Eines kann man an diesen beiden Beispielen schon jetzt sehen, beim jeweils zweiten Stoß in der Kette wird der Schaden meist größer als er ohne den ersten Anstoß bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen für die beiden Fahrzeuge für den zweiten Stoß gewesen wäre. Es sind also beim mittleren Fahrzeug immer Teile des Front **und** Heckschadens auf die Ursachen für den Frontanstoß und/oder Heckanstoß zurückzuführen, wobei diese Verknüpfung ganz wesentlich von jenem Zufall abhängt, der die Stoßfolge beeinflußt.

Man kann auch die Bremsverzögerung des mittleren Fahrzeuges so variieren, daß beide Stöße gleichzeitig eintreten. Dieser Fall ist für die Insassen des mittleren Fahrzeugs der beste, da sie keinen oder nur minimalen Stoßbelastungen ausgesetzt werden. Auch für diesen Sonderfall ist meist eine schwächere Bremsung des mittleren Fahrzeugs notwendig, doch eine bewußte Reaktion zur Verminderung des Verletzungsrisikos wurde bisher m.W. noch nicht behauptet.

Bevor noch auf die Probleme, die sich aus den technischen Gesetzmäßigkeiten des Serienunfalles bei der Schadenregulierung durch die Gerichte bzw. die Haftpflichtversicherungen ergeben eingegangen wird, soll an einem weiteren Beispiel aufgezeigt werden, daß auch die Reihenfolge der Stöße kein geeigneter Parameter für die Verknüpfung der Schadenanteile sein kann. Im nächsten Gedankenbeispiel soll davon ausgegangen werden, daß das erste und das zweite Fahrzeug vor dem Anstoß des dritten Fahrzeugs gegen das zweite bereits (längere Zeit) im Stillstand waren. Bei gleichen Fahrzeuggewichten und einer Stoßzahl von 0,414 und einer Auffahrgeschwindigkeit des dritten Fahrzeugs nach Gleichung (2) würde auch beim Folgestoß des zweiten Fahrzeugs gegen das erste die Relativgeschwindigkeit gleich groß ausfallen wie bei dem ersten Beispiel, für den ja die Gleichung (2) abgeleitet wurde. Trotz des

gleichen Schadenbildes an allen Fahrzeugen ist die Ursache dieses Unfalles doch eine wesentlich andere als beim ersten Beispiel.

Zusammenfassend können aus den Beispielen folgende Schlußfolgerungen festgehalten werden. Die Verteilung der Schäden auf die Fahrzeuge und die Reihenfolge der Stöße ist bei gleicher Ausgangslage oft von kleinen Zufälligkeiten und nicht vom Fehlverhalten der Beteiligten vor dem auslösenden Ereignis abhängig. Scheinbar bessere Reaktionen haben oft ein schlechteres Ergebnis zur Folge, sodaß nicht die Reaktionen, sondern nur die vorangegangenen Aktionen für die Beurteilung der Verschuldensfrage sinnvoll herangezogen werden können. Weiter kann eine ganz gleiche Schadenverteilung völlig unterschiedliche Ursachen haben. Diese Naturgesetze gilt es bei der Regulierung des Schadenersatzes zu beachten.

4.3 Die Schadenregulierung bei Serienauffahrunfällen

Die oben aufgezeigten Paradoxa, die sich bei der Analyse oft ergeben, haben in der Vergangenheit viele gut gemeinte Vorschläge einer gerechten und dennoch einfachen Regulierung des Schadenersatzes ad absurdum geführt. Da wurde beispielsweise die These vertreten, daß durch den nur einige Hundertstel Sekunden früheren ersten Anstoß beim mittleren Fahrzeug in einem der obigen Beispiele schon ein Totalschaden eingetreten wäre und daher beim zweiten Anstoß kein weiterer Schaden entstanden sein könne. Ähnlich wurde auch hinsichtlich der Wertminderung argumentiert, wenn das Fahrzeug noch wirtschaftlich zu reparieren gewesen ist, doch bei Betrachtung der Beispiele im Kapitel 4.2 bedarf es wohl keines weiteren Kommentars um zu erkennen, daß diese Vorstellungen an den Realitäten der Stoßmechanik vorbeigehen.

Die für die oben erwähnte Art der Schadenregulierung maßgebende Reihenfolge der Stöße ist nach dem vorigen Kapitel wesentlich von der Bremsintensität der Fahrzeuge abhängig, bei der es sich sowohl um reaktionsbedingte als auch zufällige Abweichungen handeln kann. Einerseits ist eine an sich richtige aber durch das Verhalten eines anderen wirkungslose oder nachteilige Reaktion nach der ständigen Rechtsprechung nicht vorwerfbar und der *bloße Zufall trifft denjenigen, in dessen Vermögen oder Person er sich ereignet*, steht im § 1311 ABGB. Damit ist aber die Stoßfolge kein geeignetes Kriterium für die Beurteilung der Verschuldenskomponenten.

Der Oberste Gerichtshof hat in einer richtungsweisenden und seither immer wieder zitierten Entscheidung[20] das Prinzip der ***Gesamtschau*** bei einem Unfall hervorgehoben, bei dem mehrere Beteiligte sowohl Schädiger als auch Geschädigte sind. Die technischen Verknüpfungen beim Serienauffahrunfall lassen diesen sinnvoller Weise nur als Einheit beurteilen, eine Zerlegung in mehrere Einzelunfälle ist weder technisch durchführbar noch zweckmäßig.
Bei der in[21] vorgenommenen Gesamtschau kommt der OGH in einer späteren Entscheidung zum Ergebnis, daß bei einer Verschuldensteilung des Klägers und der zwei weiteren Beteiligten von 3 : 2 : 1 dem Kläger von den beiden anderen Schädigern ein Ersatz des halben Schadens zustünde. Was auf den ersten Blick so logisch und klar erscheint erweist sich aber bei näherer Betrachtung als sehr problematisch, insbesondere für die betroffenen Haftpflichtversicherungen.

Um die Problematik zu durchschauen sei angenommen, die drei Schädiger, die gleichzeitig auch die Geschädigten sind, wären zu gleichen Teilen am Unfall schuldig, die Schadenbeträge S_i seien aber ungleich groß. Die Summe der Verschuldenskomponenten V_i ist gleich 3 und nach der oben aufgezeigten Logik muß jeder Beteiligte 1/3 seines Schadens selber zahlen und bekommt 2/3 seines Schadens von den anderen Beteiligten zur *ungeteilten Hand* ersetzt, d.h. es zahlt letzten Endes rein rechnerisch jeder Beteiligte 1/3 des Gesamtschadens in einen Topf und unabhängig von der Größe des eigenen Schadens wird dieser aus dem Topf dann bezahlt. So lange keine Haftpflichtversicherungen bei der Schadenregulierung beteiligt sind, ist dies eine durchaus plausible und gerecht erscheinende Lösung, denn jeder der zu gleichen Teilen am Gesamtereignis beteiligten Schädiger zahlt den gleich großen Anteil am Gesamtschaden.

Werden die Schadenersatzleistungen von dazu bestimmten Haftpflichtversicherungen übernommen, dann müßten alle Versicherungen zusammen im obigen Beispiel 2/3 der gesamten Schadensumme bezahlen, bei vier Beteiligten mit gleichem Verschulden sind es schon 75% und wenn bei einer Massenkarambolage 10 und mehr Fahrzeuge ineinander verkeilt waren, dann müßte schon für über 90% des gesamten Schadens aufgekommen werden. Bei dem in[20] behandelten Verkehrsunfall handelt es sich aber nicht um einen Serienauffahrunfall im Sinne der im vorigen Kapitel getroffenen Definition. Es soll daher im folgenden erläutert werden, aus welchen vor allem technischen Gründen die dort aufgezeigte *Gesamtschau* auf Serienauffahrunfälle nicht anwendbar sein kann.
Es gibt grundsätzlich zwei Grenzfälle der Schadenzufügung, die an zwei Beispielen kurz erläutert werden sollen. Haben sich etwa mehrere Täter dazu entschlossen, in einem Gasthaus Bierkrüge zu zerschlagen, dann verursacht jeder Täter nach der Anzahl der von ihm zerschlagenen Bierkrüge einen genau umgrenzten Teilschaden, wobei der Gesamtschaden die algebraische Summe aller Teilschäden ist. Da sich bei diesem Beispiel der Schaden mit der Anzahl der Täter entsprechend vergrößert, ist auch der höhere Schadenersatz nach der Gesamtschau durchaus sinnvoll. Wenn sich hingegen neun Täter dazu entschlossen haben mit einem Seil eine Statue umzustoßen und dies aber erst durch die Mitwirkung eines zehnten Täters gelingt, dann ist an sich nur **ein** Schaden vorhanden, der durch das Zusammenwirken aller zehn Täter ermöglicht wurde, wenn nur einer der zehn Täter die Mitwirkung verweigert hätte, wäre der Schaden ausgeblieben. Der Serienauffahrunfall läßt sich weder dem einen noch dem anderen Beispiel zuordnen, wie an beiden nachfolgenden Beispielen kurz erläutert werden soll.

Man stelle sich eine Kolonne aus unendlich vielen Fahrzeugen vor, in der alle bis auf das Fahrzeug F_j einen Tiefenabstand einhalten, der ihnen das anstoßfreie Anhalten bei einer plötzlichen Vollbremsung des ersten Fahrzeugs noch ermöglicht. Der Abstand des Fahrzeuges F_j hingegen sei gerade um jenes Ausmaß zu kurz, daß er mit der Grenzgeschwindigkeit Δv_g nach Gleichung 4.1(6) gerade in jenem Zeitpunkt gegen das voranfahrende stößt, zu dem dieses Stillstand erlangt. Durch diesen Anstoß kommt es zunächst zu einer Stoßwelle nach vorne bei welcher die Relativgeschwindigkeiten mit dem Faktor $(1+e)/2$ abnehmen, sofern alle Fahrzeuggewichte gleich groß sind, und dies ist bei einer Stoßzahl $e = 0{,}2$ der Faktor 0,6. Die Summe der geometrischen Reihe für die Stoßenergie bei jedem Einzelstoß beträgt $1/(1-0{,}6^2) = 1{,}5625$. Bei den Stößen hinter dem Fahrzeug F_j hängt die Relativgeschwindigkeit auch davon ab, wie groß der Tiefenabstand im Stillstand gewesen wäre und der Einfachheit halber soll hier für das Beispiel angenommen werden, daß dieser Abstand für einen Folgestoß mit ebenfalls jeweils dem 0,6-fachen der vorderen Relativgeschwindigkeit sorgt, womit wieder eine geometrische Reihe entsteht, und so erhält man für die oben angenommene Stoßzahl und gleichen Fahrzeuggewichten auch der hinten nachfahrenden Fahrzeuge für die Summe der Stoßenergien das 2,125-fache jener beim ersten Anstoß. Wenn man noch ungefähr von einer gleichen Aufteilung der Stoßenergie auf die Verformungsarbeiten der Stoßpartner ausgeht, dann entfällt rund 35% der gesamten Schäden aller unendlich vielen Fahrzeuge auf das den Unfall verursachende Fahrzeug.

Nimmt man beim obigen Beispiel die Ausgangsgeschwindigkeit mit 80 km/h und die Blockierverzögerung mit 7 m/s^2 sowie die Bremsverzugszeit mit 1,05 s an, dann werden alle Schäden auf die Reduktion des Tiefenabstandes von gerade ausreichenden 23,5 m auf etwa 19,5 m durch eines der Fahrzeuge bewirkt. Beim ersten Beispiel im vorigen Kapitel führte die Reduktion des Tiefenabstandes auf rund 5 m bei beiden nachfahrenden Fahrzeugen zu einer Erhöhung der Stoßenergie auf das 2,56-fache beim Heckanstoß des mittleren Fahrzeugs, insgesamt vorne und hinten also nur zu einer Erhöhung auf rund das doppelte.

Man kann daher davon ausgehen, daß der durch das Eigenverschulden am eigenen Fahrzeug entstandene Schaden in Relation zur Schadenerhöhung durch das Verschulden der übrigen Fahrzeuglenker in der Kolonne in der Größenordnung von 1 : 1 liegt. Wie die im vorigen Kapitel erläuterten Paradoxa gezeigt haben, sind es meist zufällige Einflüsse, die zu einer wesentlichen Verschiebung dieser Relation beitragen.

Wesentliches Merkmal der Schadenverteilung beim Serienauffahrunfall ist ein Eigenschaden des Schädigers, der im Falle eines Alleinverschuldens auch der Schaden mit der größten Deformationsenergie ist. Bei der Kumulation zu geringer Kolonnenabstände wird der Schaden am einzelnen Fahrzeug aber nicht wie beim Beispiel mit den Bierkrügen proportional mit der Anzahl der Schädiger größer, er ist aber von der Zahl auch nicht unabhängig wie beim Beispiel der umgestürzten Statue.

Das Problem ist nur, daß es kein allgemein gültiges Gesetz für die Schadenverteilung und damit eine eindeutige Zuordnung der Schadenanteile an die Verursacher gibt, wie die oben aufgezeigten Paradoxa gezeigt haben. Man kann also rein statistisch sagen, daß der durch das Eigenverschulden entstandene Eigenschaden im Mittel gleich groß ist als der Zusatzschaden durch das Zusammenwirken aller übrigen Schädiger. Dies gilt aber nur für Serienauffahrunfälle und nicht generell für alle Unfälle mit mehreren Beteiligten.
Die Versicherungen sind bei der außergerichtlichen Erledigung von Serienauffahrunfällen auf der Suche nach einem einfachen Verteilungsschlüssel derzeit bei folgender Variante angelangt: jeder trägt die Kosten für den Frontschaden selbst und erhält den Heckschaden ersetzt. Wenn man die drei Beispiele im vorigen Kapitel nach dieser Methode betrachtet, dann würde im ersten Fall der dritte Lenker trotz der mehr als verdoppelten Schadenhöhe durch das Fehlverhalten der beiden anderen Lenker überhaupt keinen Schadenersatz erhalten. Beim dritten Beispiel wäre dies für den dritten Lenker zwar eine gerechte Lösung, doch wie kommt der zweite Lenker dazu, seinen Frontschaden selbst zu bezahlen, wenn er lange vor dem Unfall sein Fahrzeug ordnungsgemäß und anstoßfrei hinter dem ersten zum Stillstand gebracht hat. Der für die Schadenabwicklung einfache Schlüssel ist daher beim Serienauffahrunfall genau so ungeeignet wie die Methode der Gesamtschau. Eine vor allem auf die technischen Eigenheiten des Serienauffahrunfalles abgestimmte Aufteilungsformel muß daher die Eigenheiten der Schadenverteilung für diesen Unfalltyp berücksichtigen. Ganz wesentlich ist aber auch der Umstand, daß bei keinem anderen Unfalltyp die exakte Rekonstruktion des Herganges in den meisten Fällen an Spurenmangel scheitert, während die Angaben der Beteiligten insbesondere aus den im vorigen Kapitel aufgezählten Gründen unbrauchbar sind.

Sind nur zwei Fahrzeuge an einem Unfall beteiligt und werden deren Lenker zu gleichen Teilen am Zustandekommen des Unfalles für schuldig befunden, dann erhält nach der derzeitigen Judikatur jeder den halben Schaden von der gegnerischen Haftpflichtversicherung ersetzt, egal ob die Schäden nun gleich groß sind oder nicht. Die Versicherungen bezahlen daher insgesamt die Hälfte des Schadens in Prozentpunkten. Da die Hälfte des Einzelschadens auf jeden Fall kleiner oder schlechtestenfalls gleich der Hälfte des Gesamtschadens ist, zahlt kein Beteiligter mehr aus der eigenen Tasche als nach der Methode der Gesamtschau bei gleichmäßiger Aufteilung des Gesamtschadens auf die Schädiger zu bezahlen gewesen wäre.

Bei dem im folgenden erörterten Vorschlag einer **Aufteilungsformel** für n am Unfall beteiligte Fahrzeuge, deren Lenker jeweils sowohl Schädiger als auch Geschädigte sind, sei vom Gericht oder durch einen außergerichtlichen Vergleich für den i-ten Beteiligten der Grad des Verschuldens in Relation zum Verschulden der übrigen durch den Verschuldensfaktor f_{vi} festgestellt worden, das entspricht also den Zahlen 3 : 2 : 1 in der Entscheidung[20]. Wenn man die Entschädigungsfaktoren f_{Ei} gleich dem Reziprokwert der Verschuldensfaktoren annimmt,

Gl. (1):
$f_{Ei} = 1/f_{vi}$,
und der Schaden des i-ten Fahrzeugs S_i beträgt, dann beträgt die Abgeltung des Schadens A_i nach der vorgeschlagenen **Aufteilungsformel**:
Gl. (2):

$$A_i = \frac{n \; f_{Ei} \; S_i}{2 \sum_{k=1}^{n} f_{Ek}}$$

Sind beispielsweise die Verschuldensfaktoren bei drei Beteiligten mit **1 : 2 : 1** festgestellt worden, dann ergeben sich nach der Formel (2) die Entschädigungen in % der Schadensumme mit **60% : 30% : 60%**, das ergibt zusammen die Hälfte aller Schäden in Prozentpunkten. Die Formel hat zunächst rein versicherungsmathematisch den Vorteil, daß unabhängig von der Anzahl der Beteiligten immer nur die Hälfte der Schäden in Prozentpunkten als Summe der Ersatzleistungen aller Versicherungen zu bezahlen ist und auch bei einer Zerlegung in Einzelunfälle zumindest theoretisch das gleiche Ergebnis erzielt würde. Die Formel ist aber insbesondere auf die oben erläuterten Eigenheiten des Serienauffahrunfalles abgestimmt und deshalb sinnvollerweise auch nur auf diesen Typ anwendbar. Wenn nur eine Verschuldenskomponente wie beim dritten Beispiel im vorigen Kapitel vorliegt, dann gibt es auch nur eine Stoßfolge, bei welcher die Stoßenergie mit zunehmender Entfernung vom Schädiger abnimmt. Bei der Kumulation der Schäden aus mehreren Unfallursachen gibt es zwar die aufgezeigten paradoxen Verschiebungen, doch sind diese entweder von rein zufälligen Faktoren oder von scheinbar richtigen Reaktionen abhängig. Die obige Formel trägt daher sowohl dem Umstand Rechnung, daß im statistischen Mittel die Schäden in der Nähe des Schädigers aufgrund seines eigenen Verschuldens größer sind als die durch die Fernwirkung hervorgerufenen Schäden an den anderen Fahrzeugen, und daß allfällige Abweichungen von dieser abnehmenden Schadenintensität auf vorwiegend zufällige Faktoren zurückzuführen sind. Man muß dabei ja bedenken, daß auch beim Unfall mit nur zwei Beteiligten die unterschiedliche Schadenhöhe mehr oder minder vom Zufall abhängt und der prozentuelle Schadenersatz aber darauf keine Rücksicht nimmt. Die **Aufteilungsformel** stellt daher nur die konsequente Extrapolation der Schadenregulierung durch die geltende Rechtsprechung für zwei Unfallbeteiligte auf einen Serienauffahrunfall mit mehreren Beteiligten dar, den man aufgrund der technischen Gegebenheiten nur als einheitliches Ereignis behandeln kann. Die angebotene Lösung erscheint auch durchaus konform zu den Bestimmungen der §§ 1302, 1304 und 1311 ABGB sowie § 11 EKHG.

Die Aufteilung der einzelnen Entschädigungen auf die Versicherungen der Schädiger können zweckmäßigerweise nach einem intern ausgehandelten und in einem Teilungsabkommen festgehaltenen Verteilungsschlüssel erfolgen, wie sich das in anderen Bereichen bereits bestens bewährt hat. Der interne Aufteilungsschlüssel könnte ebenfalls nach den Verschuldensfaktoren vorgenommen werden. Bis zu einer allfälligen Realisierung der obigen Aufteilungsformel in der Praxis sind noch einige Hürden zu überwinden. So muß sie zuerst von der Rechtsprechung auf der Basis der bestehenden Gesetze bestätigt oder so dies wider Erwarten nicht möglich ist, müßte allenfalls der Gesetzgeber aktiv werden. Bei einem Serienauffahrunfall mit vielen Beteiligten ist der Einfluß der weiter entfernten Fahrzeuge auf den Schadenumfang sicher geringer und im Sinne des § 1302 ABGB bzw. § 11 EKHG müßten diese entfernten Schädiger entsprechend weniger an der Schadengutmachung beteiligt werden, auch wenn ihr Beitrag zum Gesamtereignis gleich schwer wiegen sollte wie der des Geschädigten. Es ist daher aus rein technischen Überlegungen im Mittel gerechtfertigt bei gleichem Verschulden am Gesamtunfall den Entschädigungsanspruch des Geschädigten gegenüber den (n-1) Schädigern mit 50% bzw. bei ungleichem Schuldgehalt entsprechend der obigen Formel zu teilen. Die Formel behandelt also die restlichen Schädiger in Relation zum Geschädigten wie einen einzigen Schädiger, womit die bei zwei Beteiligten gültige Aufteilungsregel zur Anwendung kommt. Es ist dies m.E. die richtige Mischung aus *Einzelabwägung* und *Gesamtschau* für den Serienauffahrunfall, wie sie in[20] erörtert wird, doch kann die Aufteilungsformel nicht auf andere Unfalltypen mit mehreren Beteiligten vorbehaltlos übertragen werden.

Ein nicht zu unterschätzendes Problem ist auch noch die Feststellung der Verschuldensfaktoren f_{vi}, die vom Gericht ja nur dann zu prüfen wären, wenn alle Schädiger und Geschädigten in einem Prozeß als Parteien aufscheinen. Dies läßt sich derzeit kaum verwirklichen und da in mehreren Prozessen jeder Richter nach der oft sehr unterschiedlichen Beweislage zu durchaus divergierenden Verschuldensfaktoren gelangen kann, bringt in diesem Fall die obige Verteilungsformel nicht die gewünschte Verbesserung und Vereinfachung. Es müßte die Möglichkeit eines für alle Beteiligten bindenden Feststellungsverfahrens geschaffen werden, in dem alle Schädiger und/oder Geschädigten ex lege Parteienstellung erhalten. Womit noch die nicht unwesentliche Randfrage zu klären wäre, wer die Kosten eines solchen Verfahrens trägt. Hilfreich könnte die Verteilungsformel derzeit nur dann sein, wenn sich die Verschuldensfaktoren mangels geeigneter Spuren nicht bestimmen lassen und dann entsprechend dem § 1304 ABGB von einem gleichteiligen Verschulden aller ausgegangen werden kann. In diesem Fall beträgt die Entschädigungssumme jeweils den halben eigenen Schaden und diese Lösung ist allemal noch sachgerechter und einfacher zu handhaben als die Aufteilung in Front- und Heckschaden.

Fortsetzung folgt ■

Karl Plankensteiner*

Theorie und Praxis der forensischen Unfallanalyse

Fortsetzung aus Heft 6/1994

4.4 Das ebene Rechenmodell

Auch wenn es sich bei Fahrzeugen um räumliche Gebilde handelt, so lassen sich die meisten Stoßprobleme durch ein ebenes Modell hinreichend genau beschreiben. Bewegen sich zwei Fahrzeuge i = 1,2, welche die Masse m_i besitzen, mit den Schwerpunktsgeschwindigkeiten $\vec{v}_{si}$ und den Winkelgeschwindigkeiten $\vec{vip}_i$ derart, daß sie im Stoßpunkt B zusammenstoßen, wie dies in Bild 4.4(1) schematisch dargestellt ist, dann ändert sich die Schwerpunktsgeschwindigkeit um den Vektor $\Delta\vec{v}_{si}$ für die nach dem Impulssatz nachstehende Gleichung gilt:

Gl. (1):

$$m_1 \vec{v}_{s1} + m_2 \vec{v}_{s2} = 0.$$

Bezeichnet man den Trägheitsradius bezüglich der Hochachse durch den Fahrzeugschwerpunkt mit i_{si}, so erhält man für die Änderung des Winkelgeschwindigkeitsvektors $\Delta\ \vec{vip}_i$ mit dem Radiusvektor $\vec{r}_i$ vom Schwerpunkt S_i zum Stoßpunkt B die Gleichung:

Gl. (2):

$$\Delta\ \vec{vip}_i = \frac{\vec{r}_i \times \Delta\vec{v}_{Si}}{i_{Si}^2}.$$

Für die Änderung der Stoßpunktsgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}_{Bi}$ erhält man somit die Gleichung:

Gl. (3):

$$\Delta\vec{v}_{Bi} = \Delta\vec{v}_{si} + \Delta\vec{vip}_i \times \vec{r}_i.$$

Mit der Stoßrichtung $\vec{e}_{si}$

Gl. (4):

$$\vec{e}_{si} = \Delta\vec{v}_{si}^{\,0}$$

gilt für die Komponente der Stoßpunktsgeschwindigkeitsänderung in die Stoßrichtung

Gl. (5):

$$\Delta\vec{v}_{rBi} = \Delta\vec{v}_{Bi} - \vec{e}_{si}$$

Bezeichnet man mit a_i noch den Betrag:

Gl. (6):

$\vec{a}_i = |\vec{r}_i \times \vec{e}_{Si}|$, dann erhält man mit der in den Stoßpunkt B reduzierten Stoßmasse m_{ri}:

Gl. (7):

$$m_{ri} = m_i \left(1 + \frac{a_i^2}{i_{Si}^2}\right)$$

mit den Komponenten der Stoßpunktsgeschwindigkeitsänderungen dv_{rBi} die Impulsgleichung (1) in den Stoßpunkt reduziert:

Gl. (8):

$$m_{r1}\ \Delta v_{rB1} = m_{r2}\ \Delta v_{rB2}$$

analog zur Impulsgleichung für das lineare Stoßmodell beim Auffahrunfall. In gleicher Analogie läßt sich für die Stoßpunktgeschwindigkeitsänderungskomponente Δv_{rB1} mit der Stoßzahl e herleiten:

Gl. (9):

$$\Delta v_{rB1} = -(1 + e)\frac{m_{r2}}{m_{r1} + m_{r2}}(v_{rB1} + v_{rB2}).$$

Das Minuszeichen vor der obigen Gleichung resultiert aus der Definition der Stoßrichtung mit der Richtung der Schwerpunktsgeschwindigkeitsänderung und diese wirkt ja der den Stoß auslösenden Stoßpunktsgeschwindigkeitskomponenten entgegen.

Auch für die Stoßenergie E_s kann mit Hilfe der in den Stoßpunkt reduzierten Massen die Gleichung 4.1(3) analog formuliert werden:

Gl. (10) $\{e \geq 0\}$:

$$E_s = 1/2\ \frac{m_{r1}\ m_{r2}}{m_{r1} + m_{r2}}(v_{rB1} + v_{rB2})^2.$$

Setzt man nun in die Gleichung (3) die Winkelgeschwindigkeitsänderung nach Gleichung (2) ein und berücksichtigt die Gleichung (6), dann erhält man für die Schwerpunktsgeschwindigkeitsänderung Δv_{si}:

Gl. (11):

$$\Delta v_{si} = \Delta v_{rBi}\left(\frac{i_{Si}^2}{i_{Si}^2 + a_i^2}\right)$$

Sind die Schwerpunktsgeschwindigkeiten vor dem Anstoß v_{si} und die Winkelgeschwindigkeiten vip_i sowie die Lage der Schwerpunkte und Stoßpunkte gegeben, dann können aus der Stoßrichtung $\vec{e}_{si}$ und der Stoßzahl e die Schwerpunktsgeschwindigkeiten $\vec{w}_{si}$ und Winkelgeschwindigkeiten $\vec{psi}_i$ und damit auch die Stoßpunktsgeschwindigkeiten $\vec{v}_{Bi}$ aus den oben abgeleiteten Gleichungen berechnet werden, wobei der Vollständigkeit halber noch die folgenden Gleichungen festgehalten seien:

Gl. (12):

$$\vec{w}_{si} = \vec{v}_{si} + \Delta\vec{v}_{si};$$

Gl. (13):

$$\vec{v}_{Bi} = \vec{v}_{si} + \vec{vip}_i \times \vec{r}_i;$$

Gl. (14):

$$\vec{w}_{Bi} = \vec{v}_{Bi} + \Delta\vec{v}_{Bi}.$$

Damit wäre das Gleichungssystem für die **Vorwärtsrechnung** zur Bestimmung der postkollisionalen Geschwindigkeiten von Schwerpunkt und Stoßpunkt vollständig.

Für die Bestimmung der Stoßrichtung sind in der Vergangenheit für verschiedene Angabenkonstellationen Berechnungsverfahren entwickelt worden, so in[5)] bei bekannten Bewegungsrichtungen eines Fahrzeuges vor und nach dem Anstoß aufgrund der Spuren oder für den verhakten Stoß in[22)]. Diese Rückrechenverfahren haben durch die schnelle iterative Vorwärtsrechnung mit modernen Computern an Bedeutung verloren und so ist auch im STOSS-Programm nur eine Vorwärtsrechnung programmiert, bei der jede der Angaben mit Hilfe einer Variation rasch verändert werden kann, während das sich ändernde Ergebnis in Form einer Grafik (**Bild 4.5(1)**), und für ein ausgewähltes Ergebnis auch numerisch, während der Iteration kontrolliert werden kann.

Die iterative Berechnung hat den Vorteil für alle erdenklichen Angabekonstellationen einsetzbar zu sein. Bei der praktischen Stoßrekonstruktion ist es meist so, daß zwar mehr Angaben vorhanden sind als unbedingt erforderlich, aber es handelt sich dabei vorwiegend um mehr oder

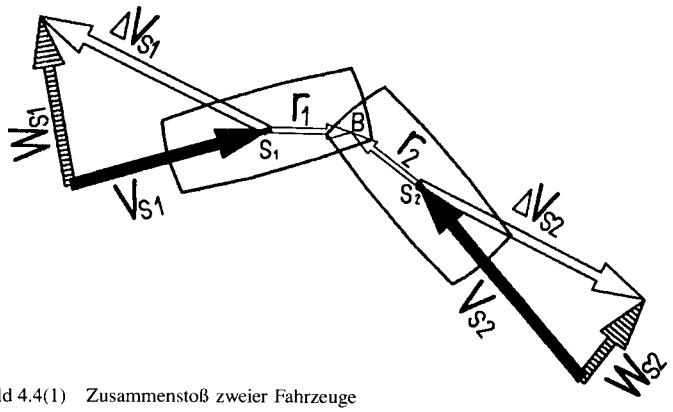


Bild 4.4(1) Zusammenstoß zweier Fahrzeuge

*Dipl.-Ing. Karl Plankensteiner, Höf 5, A-8301 Laßnitzhöhe

Stoßrekonstruktion

Bezeichnung der Stoßpartner :	K F	B F	
Fahrzeugdaten:			
Länge :	4,26	4,18	m
Breite :	1,65	1,64	m
Trägheitsradius :	1,19	1,17	m
Schwerpunkt hinter der Front :	2,04	1,75	m
+li/-re der Mitte :	0,00	0,00	m
Stoßpunkt hinter der Front :	0,50	0,35	m
+li/-re der Mitte :	-0,50	0,26	m
Richtung der Fahrzeuglängsachse :	2,00	119,00	Grad
Fahrzeuggewicht beim Stoß :	1.155,00	1.090,00	kg
Fahrzeuggewicht beim Versuch :	1.115,00	1.020,00	kg
E E S :	15,00	15,00	km/h
Stoßzahl :	0,10		
Bewegungsgrößen:			
vor dem Stoß: →			
Schwerpunktsgeschwindigkeit :	28,74	8,62	km/h
- Richtung :	-6,00	126,00	Grad
Winkelgeschwindigkeit :	20,64	0,17	Grad/s
nach dem Stoß: →			
Schwerpunktsgeschwindigkeit :	18,38	7,35	km/h
- Richtung :	19,39	338,67	Grad
Winkelgeschwindigkeit :	123,65	-50,27	Grad/s
Änderung beim Stoß: →			
Schwerpunktsgeschwindigkeit :	14,47	15,33	km/h
- Richtung :	141,00	321,00	Grad
Winkelgeschwindigkeit :	103,00	-50,44	Grad/s

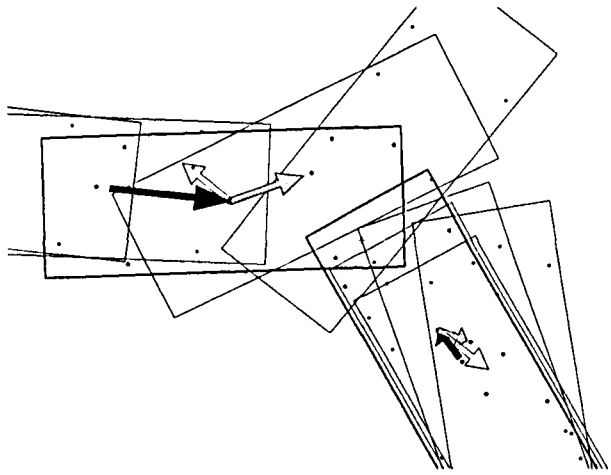


Bild 4.5(1) Beispiel einer Stoßrekonstruktion

minder ungenaue Schätzwerte. Weder die Gewichte noch die Trägheitsradien oder der Stoßpunkt sind exakt gegeben und nur in wenigen Fällen sind die Bewegungsrichtungen aufgrund von fotogrammetrisch entzerrten Spuren halbwegs genau bekannt. Das STOSS-Programm ist daher so wie alle bisher besprochenen Programme ein Hilfsprogramm, bei dem der Benutzer die eigentliche Rekonstruktionsarbeit übernimmt und damit auch die Genauigkeit bestimmt.

4.5 Das EES-Verfahren

Die ersten Ansätze für das EES-Verfahren finden sich schon in[23] und die mathematischen Grundlagen sind in[5] festgehalten. Allerdings wurde dort die Deformationsenergie noch durch die als *äquivalente Wandaufprallgeschwindigkeit* bezeichnete Geschwindigkeit ausgedrückt, erst in der englischen Übersetzung *equivalence experimental speed* (EES) bei Daimler Benz[24] ist das Verfahren fast zehn Jahre später bekannt geworden. Die bei einem Crash-Versuch in Verformungsarbeit umgewandelte Energie läßt sich nach Gleichung 4.1(5) bei bekanntem Versuchsgewicht m_{vi} durch die bei einem zentrischen Stoß gegen eine starre und unendlich schwere Wand erreichte Aufprallgeschwindigkeit ausdrücken. Nun ist nicht bei allen Versuchen der Stoß zentrisch und bei den Versuchen mit fahrbaren Barrieren ist auch das Gewicht keineswegs unendlich groß, sodaß eine Umrechnung der Versuchsgeschwindigkeit nach den in[5] festgehaltenen Gleichungen erforderlich ist. Leider ist diese umgerechnete Größe bei den veröffentlichten Crash-Versuchen nicht angegeben und aus den angegebenen Daten kann sie auch nur mit Mühe ungefähr ermittelt werden.

Die Crash-Versuche zeigen nur ganz bestimmte Stoßformen, die realen Unfälle sind hingegen wesentlich vielfältiger. Nun gibt es immer wieder gut dokumentierte Spuren, die eine Rekonstruktion der Stoßenergie mit hoher Genauigkeit ermöglichen und es läßt sich dabei auch meist die Aufteilung der Energie auf die beiden Stoßpartner hinreichend genau abschätzen. Durch solche Rekonstruktionsergebnisse kann man letzten Endes das Schätzvermögen verbessern, denn man muß beim EES-Verfahren die in den Fahrzeugdeformationen steckende Energie durch Vergleich der Deformationsbilder mit bekannten Bildern von Crash-Versuchen oder eben gut rekonstruierten Unfällen abschätzen. Wenn die Auslaufbewegungen der Wracks einer genauen Rückrechnung nicht zugänglich sind, dann ist aber die Geschwindigkeitsermittlung nach dem EES-Verfahren noch immer die genauere Lösung, ob die Genauigkeit ausreicht muß aber im Einzelfall entschieden werden.

Stoßrekonstruktion

Bezeichnung der Stoßpartner :	F2	F1	
Fahrzeugdaten:			
Länge :	3,99	3,99	m
Breite :	1,67	1,67	m
Trägheitsradius :	1,12	1,12	m
Schwerpunkt hinter der Front :	1,85	1,85	m
+li/-re der Mitte :	0,00	0,00	m
Stoßpunkt hinter der Front :	1,10	1,10	m
+li/-re der Mitte :	0,55	0,55	m
Richtung der Fahrzeuglängsachse :	0,00	180,00	Grad
Fahrzeuggewicht beim Stoß :	995,00	1.015,00	kg
Fahrzeuggewicht beim Versuch :	1.090,00	1.110,00	kg
E E S :	50,00	50,00	km/h
Stoßzahl :	-0,73		
Bewegungsgrößen:			
vor dem Stoß: →			
Schwerpunktsgeschwindigkeit :	78,43	98,15	km/h
- Richtung :	0,00	180,33	Grad
Winkelgeschwindigkeit :	4,16	5,23	Grad/s
nach dem Stoß: →			
Schwerpunktsgeschwindigkeit :	61,25	81,00	km/h
- Richtung :	350,02	173,03	Grad
Winkelgeschwindigkeit :	29,43	29,99	Grad/s
Änderung beim Stoß: →			
Schwerpunktsgeschwindigkeit :	-20,99	-20,58	km/h
- Richtung :	30,37	210,37	Grad
Winkelgeschwindigkeit :	25,26	24,77	Grad/s

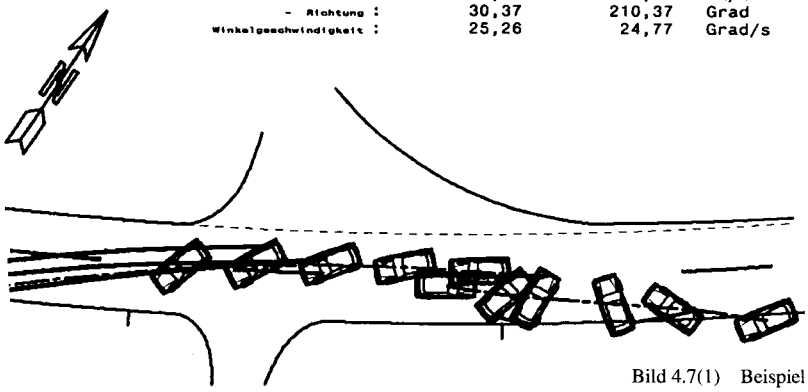


Bild 4.7(1) Beispiel für einen Stoß mit negativer Stoßzahl

Die aus den Verformungen geschätzten Energieinhalte werden mit der Gleichung 4.4(10) im STOSS-Programm verknüpft und damit die zunächst relativ zueinander berechneten Geschwindigkeiten proportional verändert. In Bild 4.5(1) ist ein Beispiel für die Stoßrekonstruktion aus den geschätzten EES-Werten bei einer geschätzten Stoßzahl, wobei die Bewegungsrichtungen mit Hilfe der gezeichneten Radaufstandspunkte an die Spuren angepaßt wurde. Die beim Bild 1 befindliche Grafik erscheint bei jedem Iterationsschritt auf dem Bildschirm, die Bewegungen der Fahrzeuge vor und nach dem Anstoß sind aber ohne Berücksichtigung der Reifenkräfte berechnet und dargestellt. Bei der Anpassung an die Spuren ist also der Einfluß der Reifenkräfte noch zu berücksichtigen.

4.6 Der verhakte Stoß

Wie bereits in[5] abgeleitet, kommt es zu einem verhakten Stoß, wenn während der Stoßdauer die Stoßkraft stets der Relativgeschwindigkeit der Stoßpunkte entgegengesetzt gerichtet ist. Dies ist an sich nur bei einer vollkommen homogenen Struktur der Stoßpartner möglich, von der Fahrzeuge wohl weit entfernt sind. Dennoch gibt es in der Praxis eine relativ große Zahl von Fällen, bei denen sich aus den Deformationsbildern nur eine minimale Relativverschiebung der Anstoßbereiche ergibt und deshalb das Modell des verhakten Stoßes zumindest in guter Näherung herangezogen werden kann, sofern keine besseren Spuren vorhanden sind. Mit dem STOSS-Programm wird dieser Fall dadurch gelöst, daß man jene Stoßrichtung iterativ sucht, bei welcher der Betrag der Relativgeschwindigkeit der Stoßpunkte nach dem Anstoß ein Minimum ist.

4.7 Der unvollkommene Stoß mit negativer Stoßzahl

Der klassische Fall eines Stoßes mit negativer Stoßzahl ist der Durchschuß, wenn also ein Projektil nicht in der Scheibe stecken bleibt, sondern nach Verlassen derselben mit verminderter Geschwindigkeit weiterfliegt. Die Stoßzahl wird also dann negativ, wenn die beiden Stoßpartner die bis zur Geschwindigkeitsangleichung umzusetzende Stoßenergie nicht aufnehmen können ehe die Trennung beginnt. Dies kommt nun bei streifenden Fahrzeugstößen recht häufig vor, wobei auch Stöße mit sehr großen Deformationen bei versetzten Frontalanstößen zu dieser Gruppe gehören, bei denen die Stoßrichtung eher dem Modell eines verhakten Stoßes entspricht. Während sich die Stoßzahlen bei vollkommenen Stößen in der Größenordnung um 0,1 bewegen, bei kleineren Energien eher größere Werte, lassen sich negative Stoßzahlen nicht aus den Deformationen abschätzen. Hier ist für die Rekonstruktion daher immer einer Analyse der Auslaufbewegung zur Bestimmung der Geschwindigkeiten nach dem Anstoß erforderlich. In der Gleichung 4.4(10) ist der nicht verbrauchte Anteil der Stoßenergie noch zu berücksichtigen:

Gl. (1) [e < 0]:

$$E_s = 1/2 \frac{m_{r1}\, m_{r2}}{m_{r2} + m_{r2}} (v_{rB1} + v_{rB2})^2 \,(1\text{-}e^2).$$

In Bild 4.7(1) ist ein Beispiel für einen versetzten Frontalzusammenstoß festgehalten. Hier konnten die postkollisionalen Bewegungen aus den Spuren eindeutig bestimmt werden und aus den geschätzten Deformations-energien, ausgedrückt durch die äquivalente Wandaufprallgeschwindigkeit (EES), errechnet sich die Stoßzahl mit **-0,73**. Für die Schätzung der EES-Werte stehen aber keine direkt vergleichbaren Crash-Versuche zur Verfügung. Da die Deformationsenergie von Blechstrukturen aber vorwiegend durch Faltungen aufgenommen wird, hilft hier ein Vergleich dieser Faltungen. Dennoch muß eine größere Streuung bei diesem Unfalltyp berücksichtigt werden.

4.8 Insassen-Stoßbelastungen

Die Gleichung 4.4(10) bzw. 4.7(1) für die Stoßenergie gelten unabhängig vom Material der beteiligten Stoßpartner, die in Verformungsarbeit umzuwandelnde Stoßenergie ist daher in erster Linie von den kinematischen Ausgangsbedingungen bei Stoßbeginn abhängig, wobei das Material der Stoßpartner nur über die Stoßrichtung und die Stoßzahl, sofern sie negativ wird, einen meist geringeren Einfluß haben kann. Nun besteht auch der menschliche Körper aus diversen Materialien, die bei einem Stoß verformt werden und letzten Endes sind alle Verletzungen im physikalischen Sinne Energie aufnehmende Verformungen. Da der Mensch aus recht unterschiedlichen Materialien zusammengesetzt ist und die einzelnen Teile für die Gesundheit unterschiedlich wichtig sind, ist die Schwere einer Verletzung im medizinischen Sinne natürlich nicht unmittelbar proportional dem vom Körper aufgenommenen Anteil an der Stoßenergie, aber bei gleichartigen Verletzungen der selben Körperteile ist die *Verformungsenergie* doch eine brauchbare Vergleichsgröße. Deshalb läßt sich die Insassenstoßbelastung am besten durch die beim inneren Stoß zwischen Fahrgastzelle und Insassen auftretenden Stoßenergien beurteilen. Da die Fahrzeuge meist wesentlich schwerer sind als die Insassen, ist auch die **Insassenrelativgeschwindigkeit** beim Anstoß ein vergleichbarer Parameter. Ersetzt man in der Gleichung 4.4(3) den Radiusvektor des Stoßpunktes durch den Radiusvektor $\vec{r}_{Pi}$ der Insassenposition in Relation zum Schwerpunkt des i-ten Fahrzeugs, dann hat man schon die Gleichung für die Insassenrelativgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}_{Pi}$:

Gl. (1):

$$\Delta\vec{v}_{Pi} = \Delta\vec{v}_{si} + \Delta\vec{\omega}_i \times \vec{r}_{Pi}.$$

Die in obiger Gleichung berechnete Relativgeschwindigkeit ist aber nur dann beim Anstoß des Insassen gegen die Fahrgastzelle oder deren Rückhalteelemente, wie Gurt, Airbag oder Rückenlehne, wirksam, wenn es zu keiner Verformung der Fahrgastzelle in diesem Bereich kommt. Wenn sich hingegen etwa das Lenkrad dem Insassen entgegenbewegt, dann ist diese Verformungsgeschwindigkeit noch vektoriell zu addieren, was bei der forensischen Unfallrekonstruktion wohl immer nur im Wege einer Schätzung vorgenommen werden kann, da hier einfach die notwendigen Rechenparameter fehlen, beim Crashversuch lassen sich solche Einflüsse allenfalls auch messen.

Was für die Personen in einem Fahrzeug gilt, gilt analog auch für andere Fahrzeugteile, etwa den Glühbirnen. Auf die gleiche Weise wie die Insassenrelativgeschwindigkeit läßt sich die Stoßbelastung der Wendeln von unverformten Glühbirnen bestimmen. Das ist aber eine der Grundvoraussetzung für den Glühwendelvergleich zur Feststellung des Schaltzustandes beim Anstoß, denn ohne Stoßbelastung kann es auch keine Verformung der glühenden Wendel geben, andererseits zeigt die Stoßanalyse in einigen Fällen vollkommene Übereinstimmung mit der Relativgeschwindigkeitsrichtung und der Verformungsrichtung der Wendeln. Man muß bei solchen Analysen immer bedenken, daß es bei starken

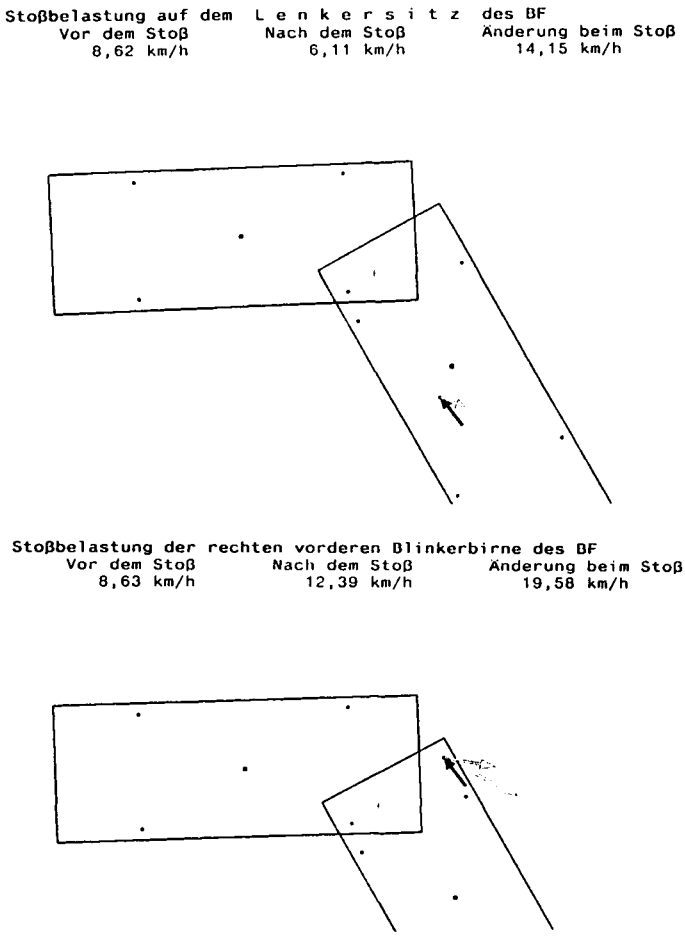


Bild 4.8(1) Stoßbelastung von Insassen oder Fahrzeugteilen

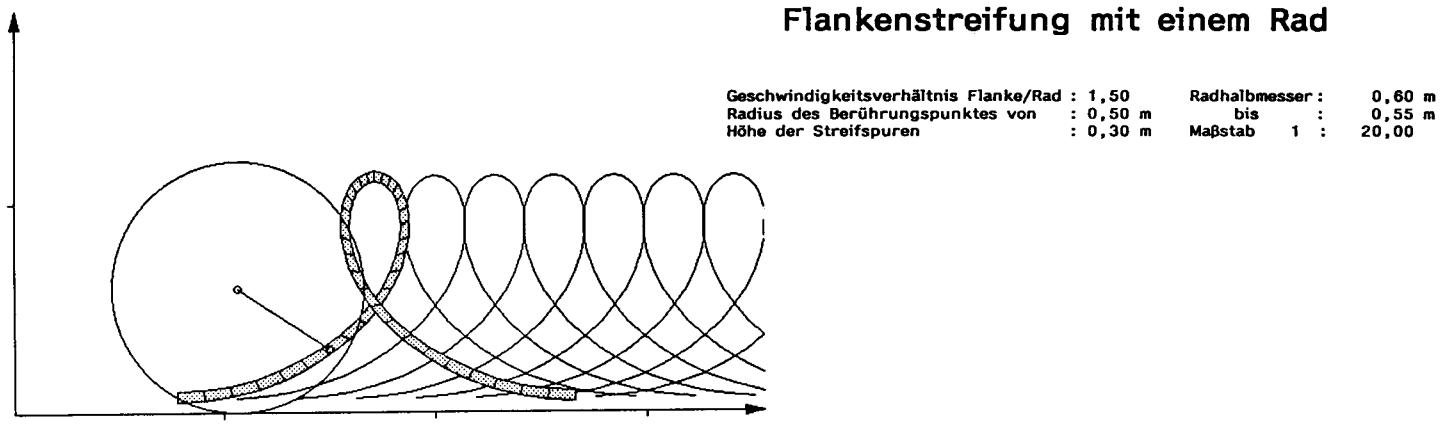


Bild 4.9(1) Streifungszykloiden

Drehungen durch den Stoß einen Punkt innerhalb des Fahrzeuges geben kann, der ohne Stoßrekation ist, i.A. liegt dieses Stoßzentrum allerdings außerhalb des Fahrzeuges.

In Bild 4.8(1) ist die Insassenbelastung zum Beispiel in **Bild 4.5(1)** für den Lenkersitz des BF berechnet und grafisch dargestellt. Die *Änderung beim Stoß* für die Geschwindigkeit gilt für die Fahrgastzelle, der Insasse bewegt sich natürlich in entgegengesetzter Richtung relativ zur Fahrgastzelle, bei Betrachtung der Grafik somit schräg nach links vorne direkt in den Gurt, sofern er angelegt war. Eine frühere Version des Programms wurde in[25] vorgestellt.

4.9 Streifender Stoß mit einem rollenden Rad

Eine Besonderheit bei der Stoßrekonstruktion sind streifende Stöße zwischen einer Fahrzeugflanke und einem rollenden Rad, dessen Reifen auf der Flanke markante zykloidenförmige Abriebe hinterläßt. An Hand dieser Zykloiden läßt sich zwar nicht die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge in absoluter Größe aber in ihrer Relation zueinander bestimmen, wenn die Abmessungen des Reifens und der Radius der abzeichnenden Stellen bekannt ist. In Bild 4.9(1) ist die Zykloidenform für ein Beispiel dargestellt, berechnet mit dem FLANSTER-Programm. Durch geeigneten Vergleich der Streifspuren mit iterativ gezeichneten Zykloiden kann das Geschwindigkeitsverhältnis meist recht gut eingegrenzt werden.

5 Fahrlinienanalyse

Die Änderung der Bewegungsrichtung eines Kraftfahrzeuges erfolgt über den Einschlag der gelenkten Räder durch die Seitenführungskräfte der Reifen. Auf diese Weise können sich Kraftfahrzeuge nicht auf allen beliebigen Linien bewegen, sondern nur auf speziellen **Fahrlinien**. Bei der forensischen Unfallanalyse kann die Rekonstruktion von Fahrlinien vielfach wegen des damit verbundenen Aufwandes nicht durchgeführt werden, wenn die Position der Fahrzeuge nicht durch Reifenspuren auf der Fahrbahn bestimmbar ist, bleiben die Antworten auf die rechtlich relevanten Fragen aus. Mit Hilfe des C.A.A.D.-Programms kann aber auch die Fahrlinie zwischen zwei durch Spuren oder sonst gesicherte Punkte mit einem vertretbaren Aufwand rekonstruiert werden, und wie man dabei auch ohne Spuren die Bremsausgangsgeschwindigkeit bei einer ABS-Bremsung berechnen kann, wurde schon im Kapitel 3.3 aufgezeigt. Man unterscheidet nun zwischen normalen Fahrlinien, bei denen die Seitenführungskräfte der Räder die Grenzwerte nicht erreichen, und den Schleuderbahnkurven.

Die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen liefert nur dann eindeutige Ergebnisse, wenn sich die Bewegungen in irgendeinem Grenzbereich abspielen. Bei der spurenzeichnenden Vollbremsung ist es der Verzögerungsverlauf, welcher sich im Grenzbereich befindet und der eine Rückrechnung der Ausgangsgeschwindigkeit erlaubt, bei der ABS-Bremsung ohne Reifenspuren ist eine eindeutige Rekonstruktion hingegen nur noch möglich, wenn mit der Bremsung eine Auslenkbewegung im Grenzbereich stattgefunden hat und sich dies aus der Anstoßsituation, zusammen mit den kinematischen Möglichkeiten einer Bewegung auf der Fahrbahn davor, bestimmen läßt.

Beim normalen Lenkvorgang wird das Lenkrad aus der Ruhelage in eine zunächst beschleunigte und nachfolgend wieder verzögerte Drehbewegung versetzt. Selbst bei größeren Lenkeinschlägen erfolgt die Drehung nicht gleichförmig, sondern in mehreren solchen Drehungen hintereinander. Man könnte natürlich diese Lenkraddrehungen analysieren und etwa durch eine Sinusfunktion annähern, doch ist damit bei der praktischen Unfallanalyse wenig anzufangen. Es ist sicher nur eine Näherung aber eine ausreichend genaue, wenn man von einer mittleren aber konstanten Lenkraddrehgeschwindigkeit proportional zur sich allenfalls wechselnden Fahrgeschwindigkeit für einzelne Bewegungsabschnitte ausgeht, denn dann erhält man für die Fahrlinie eine Klotoide. Die Klotoide für die einzelnen Fahrlinienabschnitte ist also ein Modell der Fahrlinie, analog wie die linear veränderliche Verzögerung im TABELLEN-Programm.

Bild 5(1) zeigt am Beispiel eines realen Unfalles das resonanzartige Aufschaukeln von Kursschwankungen aus der Perspektive und Bild 5(2) einen Ausschnitt des Grundrisses dazu. An Hand der fragmentarisch vorhandenen Schleuderspuren konnten einzelne Fahrzeugpositionen rekonstruiert und anschließend die Schwerpunkte durch eine Fahrlinie, die aus einzelnen Klotoiden besteht, verbunden werden. Zuerst schleudert der Pkw über den rechten Rand und gelangt dann auf die linke Seite, wo durch starkes Gegenlenken während der weiteren Schleuderbewegung sich sogar die Drehrichtung ändert.

Das obige Beispiel ist in mehrfacher Hinsicht lehrreich. Der Einfluß des Lenkers auf die Schleuderbewegung ist deutlich an der Drehrichtungs-

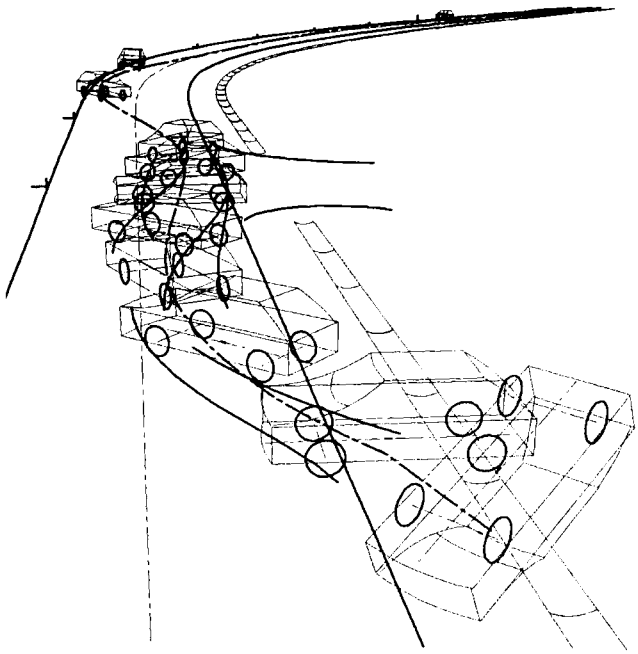
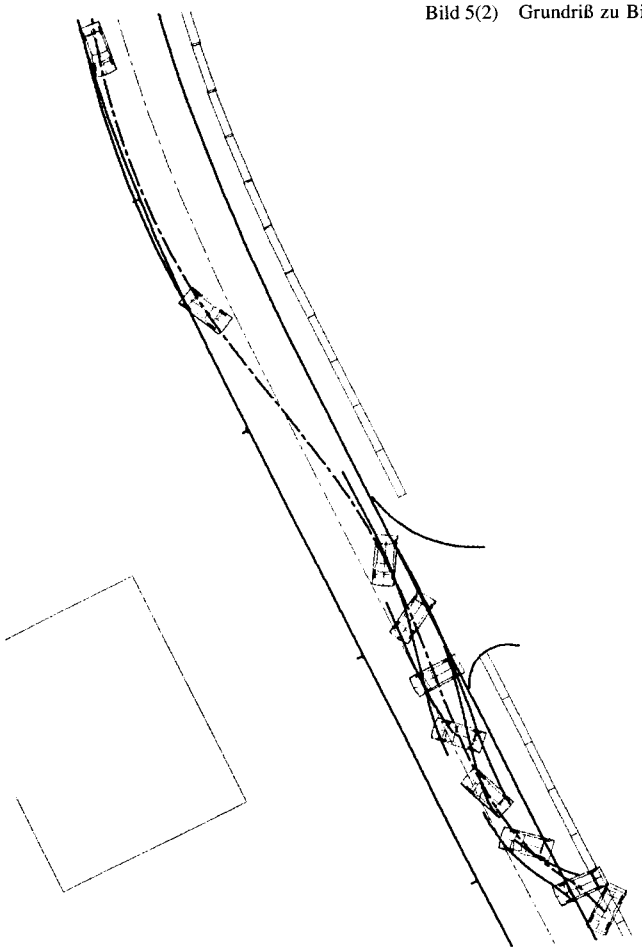


Bild 5(1) Resonanzartige Kursschwankungen

Bild 5(2) Grundriß zu Bild 1



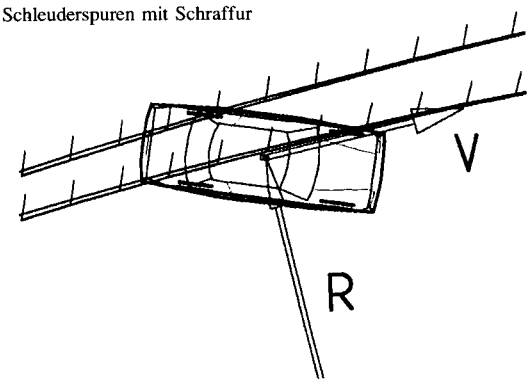
umkehr im letzten Abschnitt zu erkennen und dieser Einfluß ist mit keinem der bisher bekannten Simulationsprogramme für Schleuderbewegungen[26] richtig nachzuvollziehen. Ähnlich verhält es sich bei postkollisonalen Schleuderbewegungen von Wracks, deren Radstellungen durch den vorangegangenen Stoß stark verändert sind, die Rekonstruktion solcher Schleuderbewegungen ist nur bei Spuren oder zumindest Spurfragmenten mit den Mitteln der Fahrlinienanalyse hinreichend genau möglich. Im obigen Beispiel läßt sich das Hin und Her der Lenkbewegungen über den eigentlichen Spurbereich extrapolieren und so war es zusammen mit einer genauen Vermessung des Straßenverlaufes auch möglich, einen Baufehler der Straße als eine der Ursachen zu entdekken, worauf im Kapitel 8 nochmals zurückgekommen wird.

Unter bestimmten Voraussetzungen ermöglicht die Fahrlinienanalyse eine punktuelle Geschwindigkeitsbestimmung. Dies ist insbesondere dann von großer Bedeutung, wenn für die Bewegung nach dem Abkommen von der Fahrbahn kein brauchbares Rechenmodell mehr erstellt werden kann, da für das Überschlagen eines Fahrzeuges in unebenem Gelände keine Vergleichswerte existieren.

In **Bild 5(3)** sind schematisch zwei Schleuderspuren mit einer Schraffurstruktur dargestellt. Wenn man das Fahrzeug mit den Rädern auf diese Spuren stellt und die Schraffurrichtung der Hinterradspur mit der Achsrichtung übereinstimmt, dann ist dies zunächst einmal ein Hinweis für ungebremste Räder. Demnach müßte die Schraffurrichtung der Vorderräder mit der Achsrichtung übereinstimmen. Auf diese Wiese erhält man den aktuellen Lenkeinschlag in dem zu untersuchenden Punkt der Bahnkurve. Deren Krümmungsradius R sei durch die Fahrlinienanalyse bekannt und damit auch die Richtung der Schwerpunktsgeschwindigkeit v, die mit der Fahrzeuglängsachse den Driftwinkel dw einschließt. Findet die Schleuderbewegung auf einer Fahrbahn mit der Querneigung q [%] bzw. dem sich daraus ergebenden Querneigungswinkel qw sowie einer Steigung stg [%] bzw. dem Steigungswinkel sw statt und können die Reifen eine Querbeschleunigung a_q beim seitlichen Gleiten auf einer ebenen Fahrbahn erzeugen, dann kann die Geschwindigkeit für den Fall **parallel eingeschlagener Vorderräder** aus folgender Gleichung berechnet werden:

Gl. (1) {cos qw ≈ 1; cos sw ≈ 1}:

Bild 5(3) Schleuderspuren mit Schraffur



$v = 3{,}6\ [R(a_q \cos dw + 9{,}81 \sin qw)]^{1/2}$ [km/h].

Die Schwerpunktsbahnverzögerung a kann ebenfalls für den Fall parallel eingeschlagener Vorderräder und einem Steigungswinkel sw nach folgender Gleichung berechnet werden:

Gl. (2):

$a = a_q \cos \sin dw + 9{,}81 \sin sw$

Wenn die Vorderräder nicht parallel eingeschlagen sind, wird die Berechnung komplizierter, da dann auch die dynamischen Raddrücke und die diesen entsprechenden Seitenkräfte bekannt sein müßten, was praktisch für eine Bewegung nach einem Stoß nicht exakt zu ermitteln ist. Hier muß man sich dann mit einer Näherung begnügen und allenfalls durch eine Kombination mehrerer punktueller Geschwindigkeitsberechnungen mit einer Berechnung der Längsbewegung unter Benutzung des TABELLEN-Programms iterativ korrigieren, wozu ein aus jeder Tabellenzeile aufrufbares Hilfsprogramm zur Berechnung der Längsverzögerung dient, das eine Auflösung der Gleichungen (1) und (2) in alle Richtungen ermöglicht.

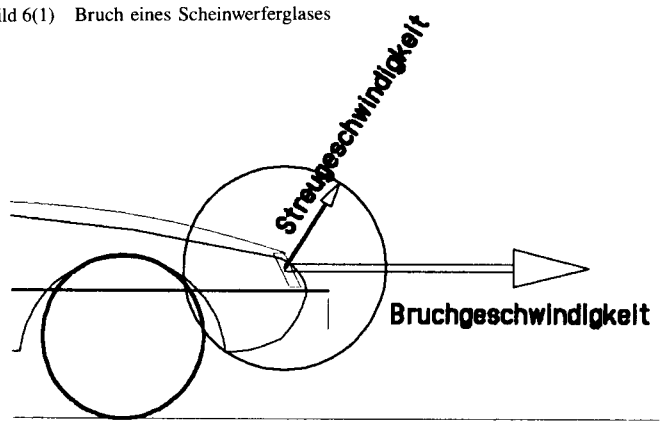
Nicht immer ist die Schraffurrichtung auf den Spurenbildern zu erkennen, doch auch ohne dieselbe lassen sich aus der Fahrlinienanalyse Rückschlüsse auf den momentanen Lenkeinschlag ziehen. Bei dem in **Bild 4.7(1)** dargestellten Unfall war dies der Fall, doch dort konnte eine konstante Zunahme des Driftwinkels aus den Spuren abgeleitet werden. Bei parallel eingeschlagenen Vorderrädern wird so lange die Drehgeschwindigkeit nicht geändert, so lange sich Vorder- und Hinterräder in der gleichen Richtung quer bewegen, rein theoretisch erhält man dann eine zykloidenförmige Schwerpunktsbahn, wenn keine Aufbauschwingungen die Raddrücke gegenüber dem stationären Zustand verändern. In der Praxis ist diese Zykloide nicht so exakt ausgeprägt, weshalb eine Approximation durch Klotoiden sinnvoller ist, aber aus der über die zurückgelegte Strecke gleichbleibenden Driftwinkeländerung kann auf hinreichend genau parallel eingeschlagene Räder geschlossen werden.

Nicht bei allen Fällen sind Fahrlinien im Grenzbereich der Lenkmöglichkeiten oder der Seitenführungskräfte vorhanden, aber auch die Straßenbreite stellt vielfach eine Schranke dar, die eine weitgehende Eingrenzung des Streubereiches der Fahrlinien ermöglicht. Bereits in **Bild 2.4(4)** wurde ein weiteres Anwendungsgebiet der Fahrlinienanalyse vorgestellt, es ist dies die Ermittlung des Platzbedarfes von Großfahrzeugen beim Befahren von engen Kurven. Dabei wird für das Zugfahrzeug nicht der Schwerpunkt, sondern die Mitte der Hinterachse(n) als Führungspunkt der Klotoide vorgegeben und vom C.A.A.D.-Programm automatisch die Schleppkurve von Anhängern oder Sattelaufliegern berechnet.

6 Glassplitterfelder

Zu den Spuren, die unter gewissen Voraussetzungen auswertbar sind, gehören auch die Glassplitterfelder. Für die Analyse solcher Splitterfelder wurde das SPLITTER-Programm entwickelt und wie dieses rechnet und eingesetzt werden kann, soll im folgenden erörtert werden. Das Rechenmodell des SPLITTER-Programms geht davon aus, daß sich beim Bruch eines Glases, etwa dem eines Scheinwerfers in **Bild 6(1)**, der Bruchgeschwindigkeit eine kugelförmig verteilte Streugeschwindigkeit überlagert. Das Programm rechnet nun für verschiedene Winkel in gleichmäßigen Abständen für eine Wurfparabel ohne Luftwiderstand die Wurfweite, sowohl für einen mittleren Punkt der Scheibe als auch für

Bild 6(1) Bruch eines Scheinwerferglases



Randpunkte. Diese Wurfweite wird anschließend mit einem **Rutschweitenfaktor** multipliziert und der so errechnete Punkt grafisch dargestellt. Das Ergebnis ist in **Bild 6(2)** für ein Beispiel dargestellt und es zeigt eine kometenschweifartige Verteilung der Splitter.
Natürlich rutschen die Glassplitter nicht nach dem ersten Aufprall in die Endlage, sondern springen wieder auf und erst nach mehreren Wurfparabeln bleibt der Splitter liegen, aber die Summe aller dieser Wurfweiten ist doch der ersten Wurfweite ungefähr proportional. Der Rutschweitenfaktor ergibt sich beim Vergleich mit diesbezüglich veröffentlichten Versuchsergebnissen[27] mit rund **2** und auch die Analyse von diversen Unfällen, bei denen die Bruchgeschwindigkeit aus anderen Spuren rekonstruiert werden konnte bestätigten diesen Faktor, nur in vereinzelten Fällen konnte keine Übereinstimmung erzielt werden.

Im SPLITTER-Programm kann der jeweilige Rutschweitenfaktor ebenso variiert werden wie die Größe der geschätzten Streugeschwindigkeit, mit der die Form des errechneten Splitterfeldes an die des vermessenen angepaßt werden kann. Weicht die Form des realen Splitterfeldes stark von der errechneten ab, dann muß immer nach den Ursachen dieser Abweichung gesucht werden. In Bild 6(2) ist im Text ausdrücklich angeführt, daß es sich um das Splitterfeld *bei ungehinderter Flugbahn der Splitter* handelt. Genau diese Prämisse ist in vielen Fällen nicht gegeben und hier werden bei der Auswertung von Splitterfeldern auch die meisten Fehler gemacht.

Damit die Splitter etwa beim Bruch eines Scheinwerferglases frei fliegen können, muß zunächst das Fahrzeug stärker verzögert werden als die Splitter durch den Luftwiderstand, was bei einem stark gebremsten Fahrzeug sicher der Fall ist. Bewegt sich das Fahrzeug hingegen ungebremst weiter, dann sind nur einige Splitter schneller, der Rest bleibt im Scheinwerfergehäuse oder wenn es sich um eine Windschutzscheibe handelt, fallen die Splitter in das Fahrzeug. Wird dieses Fahrzeug später doch noch stark gebremst, dann trennen sich die Splitter wieder und fallen nun in einer ganz anderen Verteilung auf die Fahrbahn, vor allem aber wesentlich weiter vom Anstoßort entfernt. Meist sieht man dann die Splitter auf engstem Raum vor dem Fahrzeug liegen. Da wird dann oft der unrichtige Schluß gezogen, daß der Anstoß auch in der Nähe der Endlage erfolgt sein müßte.

Die Gesetzmäßigkeiten für das Splitterfeld sind aber nicht uneingeschränkt auf andere Fahrzeugteile zu übertragen, so sind beispielsweise zerbrochene Kunststoffteile relativ viel leichter und damit werden auch die Störfaktoren durch den Luftwiderstand größer. Handelt es sich aber gar um ganze Stoßstangenteile, dann darf man nicht vergessen, daß es sich hier nicht um ungefähr kugelförmige Teile handelt, sondern um solche mit einer sehr unregelmäßigen Form und hier spielen die Kreiselmomente beim Aufprall auf der Fahrbahn für die weitere Bewegung eine sehr große Rolle. Da aber die geometrische Form solcher gebrochener Teile nicht genau rekonstruierbar ist und schon gar nicht die Randbedingungen bei ihrem Bruch, sind verläßliche Rückschlüsse aus der Endlage solcher Teile auf den Anstoßort nicht zulässig. Ganz abgesehen davon, daß bei der Bergung der Unfallopfer meist diese größeren Teile in ihrer Lage verändert werden, noch ehe die Spurensicherung begonnen hat, während sich echte Glassplitterfelder auch beim Überrollen durch andere Fahrzeuge in ihrer Lage nur unwesentlich ändern.

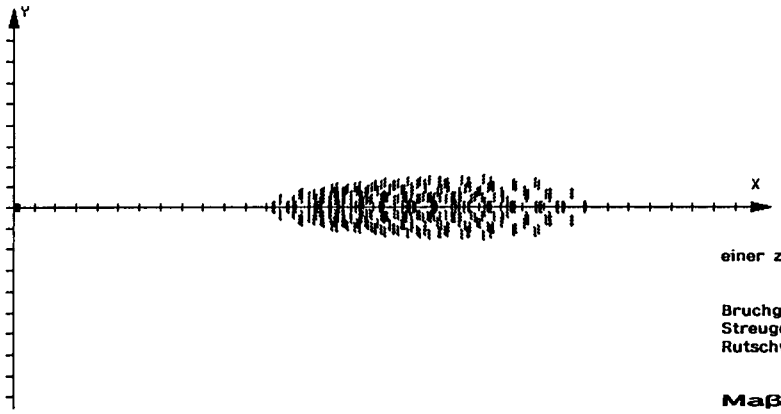
Gelegentlich lassen sich auch die Ablagerungen von Schmutz aus den Kotflügeln ähnlich verwerten, sofern man den Kotflügel kennt, aus dem er nach dem Anstoß gefallen ist. Hier ist aber schon deshalb besondere Vorsicht am Platze, da der Schmutz zuerst auf das Rad fällt und erst von diesem auf die Fahrbahn, es ist nur in den seltensten Fällen eine ungehinderte Flugbahn nachzuweisen. Bei der Gesamtbetrachtung aller Spuren sollte man aber auch diese Kotablagerungen berücksichtigen und überprüfen, ob sie zu dem Bewegungsmodell passen, das man als Rekonstruktionsergebnis anbietet.

7 Steinschlag

Von den Fahrzeugrädern werden auf der Fahrbahn liegende oder im Profil eingeklemmte Steine abgeschleudert. Wenn diese eine Windschutzscheibe treffen und diese beschädigen, dann wird gelegentlich versucht, bei der Haftpflichtversicherung des Steinaufwirblers Schadenersatz zu erlangen. Meistens wurde dabei aber das falsche Fahrzeug verdächtigt und zur Aufklärung hat dabei das STEIN-Programm beigetragen. Die im Profil oder zwischen den Zwillingsreifen eingeklemmten Steine oder sonstigen Körper werden infolge der Fliehkraft vom Reifen getrennt, wobei es weitgehend vom Zufall abhängt, in welcher Winkelstellung dies passiert. In Bild 7(1) ist gezeigt, daß der Großteil aller Steine innerhalb des Radkastens bleibt, nur die unter dem Schmutzfänger oder der Unterkante der Karosserie abgeschleudert werden, gelangen hinter das Fahrzeug. Die Darstellung aus der Sicht des **mitbewegten Beobachters** entspricht dem Bild, das man von einer Wasserfontäne bei nasser Fahrbahn gewinnt, wenn man mit den Augen das Fahrzeug verfolgt. Man braucht daher nicht unbedingt als Beobachter mitbewegt werden, es genügt die Verfolgung des Fahrzeuges mit den Blicken, um nicht mehr die Absolutbewegung der Wassertropfen zu beobachten, sondern die Relativbewegung.

Da sich das Momentanzentrum der Drehbewegung der rollenden Reifen in der Radaufstandsfläche befindet, kann sich kein Punkt des Rades nach hinten bewegen, dementsprechend haben auch die plötzlich vom Reifen getrennten Steine oder Wassertropfen eine Geschwindigkeitskomponente in Fahrtrichtung des Fahrzeuges, doch da diese kleiner ist erscheint es so, als ob die Steine nach hinten weggeschleudert würden. In **Bild 7(1)** ist unter der Relativbewegung auch die Absolutbewegung dargestellt, sie entspricht so gar nicht dem gewohnten Bild der Wasserfontäne hinter einem Fahrzeug.

Bild 6(2) Splitterfeld

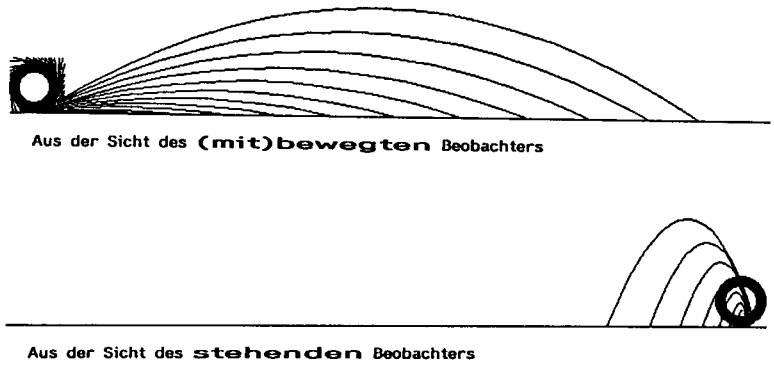


Splitterfeld

einer zerbrochenen Scheibe bei ungehinderter Flugbahn der Splitter.

Bruchgeschwindigkeit:	80,00 km/h	Bruchhöhe von :	0,80 m
Streugeschwindigkeit:	5,00 km/h	bis :	1,00 m
Rutschweitenfaktor:	2,00	-breite :	0,30 m

Maßstab: 1 : 200



Von einem rollenden Rad aufgewirbelter
Steinschlag

Radgeschwindigkeit:	30,00 km/h	Radius:	0,24 m
Beobachtergeschwindigkeit:	30,00 km/h	Steigung:	0,00 %
Schmutzfängerabstand:	0,30 m	Schmutzfängerhöhe:	0,15 m
Luftwiderstandsbeiwert:	0,01 1/m	Maßstab:	1 : 40

Bild 7(1) Relativ- und Absolutbewegung der Steine

Das Rechenmodell des STEIN-Programms rechnet mit einer numerischen Integration bei Berücksichtigung eines dem Quadrat der Geschwindigkeit proportionalen Luftwiderstandes. Dabei wird aber angenommen, daß sich die Luft weitgehend mit dem Fahrzeug mitbewegt, der Widerstand wird daher für die Relativbewegung berechnet. Das ist natürlich nur eine grobe Näherung, doch die exakten Luftbewegungen hinter einem Fahrzeug lassen sich ohnehin nicht rekonstruieren und die speziellen Luftwiderstandsbeiwerte von Steinchen sind auch nicht eruierbar, da diese Steine nur selten auch sichergestellt werden können. Der Sinn und Zweck des Programms ist daher, zunächst das Aufzeigen der Bewegungstendenz, denn meist läßt sich schon daraus ableiten, daß der vermeintliche Verursacher gar nicht der *Steinschleuderer* sein kann.

Es gab aber in der Praxis auch tragische Unfälle mit Steinen, so wurde beispielsweise von einem Lkw ein faustgroßer Stein in den Zwillingsrädern eingeklemmt und dieser löste sich erst, nachdem die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschritten wurde und schleuderte genau auf der Beifahrerseite eines entgegenkommenden Pkw gegen die Windschutzscheibe und verletzte schließlich die Beifahrerin tödlich. Steine können von Lkw-Reifen aber auch seitlich weggeschleudert werden, wie ein anderes Beispiel zeigt, bei dem auch ein faustgroßer Stein zwischen dem Reifen und der vereisten Fahrbahnoberfläche seitlich *weggeschnepft* wurde und in weitem Bogen aus dem Baustellengelände hinaus gegen ein etwas tiefer stehendes Gebäude bzw. ein Fenster desselben stieß und eine Person dahinter schwer verletzte. In diesem letzten Fall kann die Relativbewegung des STEIN-Programms als Absolutbewegung betrachtet werden, so daß sich das Programm auch zur Lösung dieses Falles einsetzen ließ.

8 Verborgene Straßenbaufehler als Unfallursachen.

In der forensischen Praxis der Unfallanalyse geht es immer um das Verschulden von Personen, dabei zeigt die Rekonstruktion der Unfälle oft schwerwiegende und unfallkausale Mängel an den Straßen auf, für die sich bei Gericht niemand zu interessieren scheint. Dabei könnten durch Beseitigung solcher Mängel weit mehr zukünftige Unfälle vermieden werden, als durch die Bestrafung der schuldigen Lenker. Es handelt sich meist nicht um Mängel, die jedermann mit freiem Auge erkennen kann, die Unfallhäufungspunkte sind stets dort, wo der Mangel für den Laien nicht erkennbar ist, also *verborgene Straßenbaufehler* für die Fahrzeuglenker oft zu einer tödlichen Falle werden. An einigen Beispielen aus der Praxis soll daher aufgezeigt werden, wie oft kleine Fehler große Wirkung zeigen.

Wenn es rein statistisch an einer Straßenstelle zu einer Häufung von Unfällen kommt, dann reagiert die Behörde meist mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung. Dabei ist diese Maßnahme schon das Eingeständnis dafür, daß die Mehrzahl der Kraftfahrer die Gefahren dieser Stelle nicht erkennen können und deshalb zu schnell fahren. Wenn aber beispielsweise auf einer dreispurig ausgebauten Bundesstraße im Freilandgebiet aus diesen Gründen auf einer Strecke ohne Kreuzungen eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 70 km/h erforderlich wird, dann darf man dies wohl als groben Baumangel bezeichnen, denn bei der Planung einer dreispurigen Bundesstraße sollte man doch eine Trassie-

Bild 8(1) Ampelkreuzung

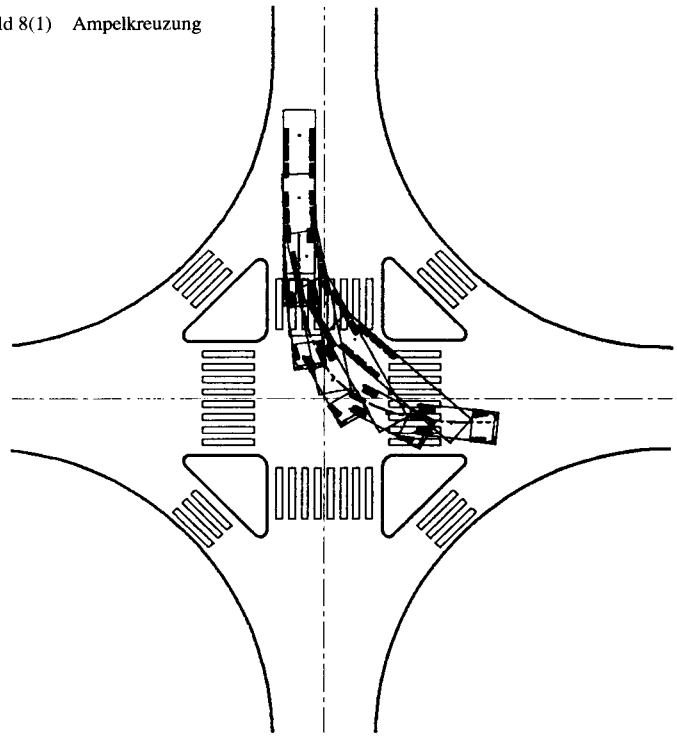
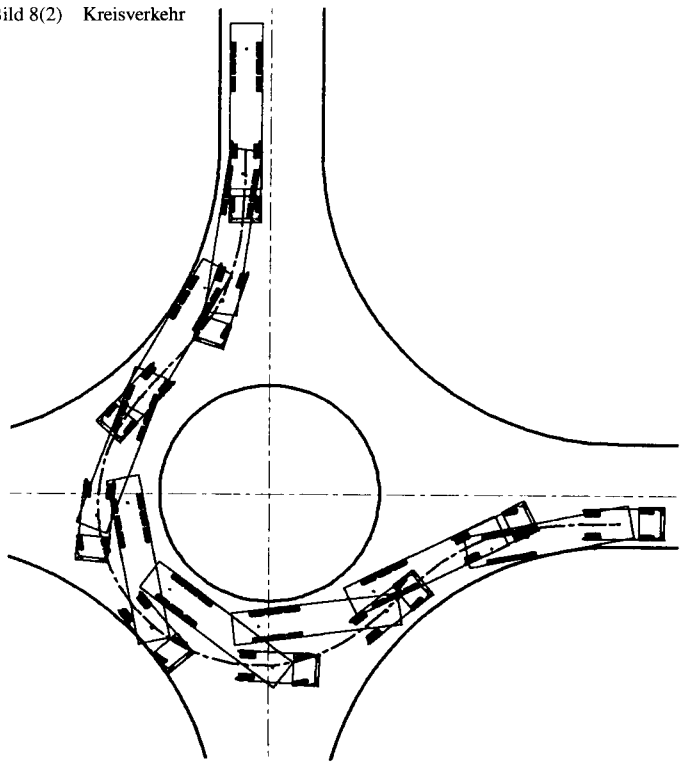


Bild 8(2) Kreisverkehr



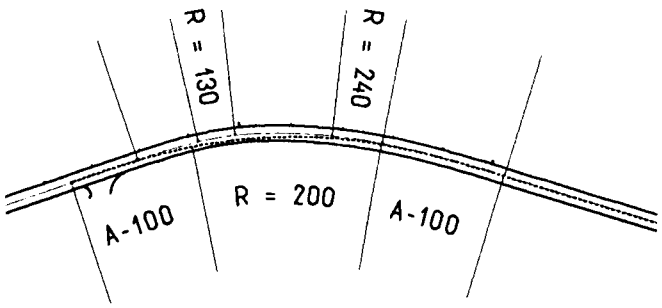


Bild 8(3) Beispiel eines Baufehlers

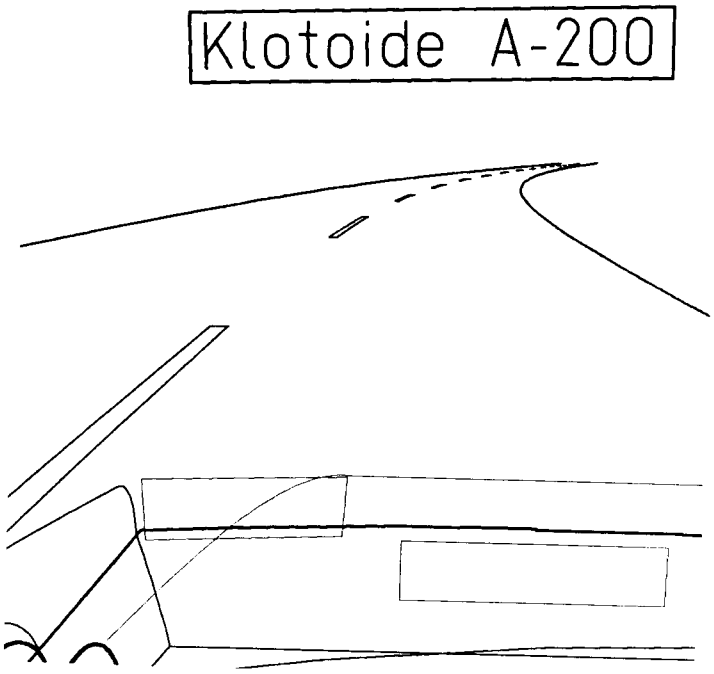


Bild 8(4) Perspektive einer Klotoide

rung anstreben, die zumindest der im Freiland zulässigen Höchstgeschwindigkeit gerecht wird.

Besonders interessant war der Vergleich zweier Bundesstraßenkreuzungen im Freilandgebiet, die eine als Ampelkreuzung (Leibnitz) entsprechend des **Bildes 8(1)** und die zweite als Kreisverkehr (Weiz) ausgeführt. Beide Kreuzungen haben etwa den gleichen Platzbedarf und wie die Linksabbiegefahrlinien eines Sattelschleppers zeigen, reicht der Platz gerade für diese Fahrzeuggröße aus. Bei der gerichtlichen Tätigkeit bei den zu den Kreuzungen gehörigen Bezirksgerichten hat es an der ampelgeregelten Kreuzung eine Vielzahl zum Teil schwerer Unfälle gegeben, während an der Kreuzung mit Kreisverkehr kein einziger Unfall zu bearbeiten war. Das liegt sicher nicht daran, daß sich beim Kreisverkehr eine schöne Grüninsel befindet, während an der anderen Kreuzung die Ampellichter die einzige Abwechslung im Grau des Asphalts darstellen.
Die Analyse der Unfälle an der Ampelkreuzung zeigten insbesondere die Probleme beim Phasenwechsel auf, die zusammen mit einer zulässigen Annäherungsgeschwindigkeit von 100 km/h auftreten.
Ampelkreuzungen mit höheren zulässigen Geschwindigkeiten als 70 km/h führen zu einer überdurchschnittlichen Steigerung von Unfällen. Nun ist aber ein natürliches Hindernis wie die runde Insel beim Kreisverkehr zur Verminderung der Geschwindigkeit wesentlich wirksamer als Beschränkungstafeln, ganz abgesehen davon, daß beim Kreisverkehr keine teure Ampelanlage erforderlich ist.
Daß der Kreisverkehr nach **Bild 8(2)** besser ist als die Ampelkreuzung hätte man ohne Unfallanalyse rein statistisch auch ermitteln können, anders ist es beim nächsten Beispiel eines Baufehlers. Es ist dies die Straße auf dem sich der in **Bild 5(1)** und **5(2)** dargestellte Unfall ereignet hat. Als eine der Ursachen für das resonanzartige Aufschaukeln der Kursschwankungen konnte die in **Bild 8(3)** dargestellte Abweichung des Kurvenverlaufes vom Bauplan ermittelt werden.

Statt der Kurve mit 200 m Radius und zwei Übergangsbögen als Klotoiden A-100 ist der Kurvenbeginn links im Bild etwas später und dementsprechend mußte mit einem kleineren Krümmungsradius wieder der Anschluß an den geraden Straßenverlauf gefunden werden. Wenn man sich von rechts im Bild der Kurve nähert, ist dies aber aus der Perspektive nicht erkennbar und wenn dann noch ein ortsunkundiger Lenker durch ein anderes Ereignis von der Beobachtung der Fahrbahn abgelenkt wird, dann gerät das Fahrzeug gegen den Willen des Lenkers zu weit nach links. Bei der panikartigen Ausweichlenkung zurück nach rechts kam das Fahrzeug zunächst in den Splittstreifen am äußeren Kurvenrand und den weiteren Verlauf des Schleuderns kann man aus **Bild 5.(1)** erkennen.

Die nachträgliche Korrektur von Baufehlern ist sehr teuer und deshalb sollte schon bei der Planung auf mögliche Unfallfaktoren Bedacht genommen werden, wichtig ist aber auch die unmittelbare Kontrolle der Bauausführung. Die nachträgliche Vermessung bringt nicht mehr viel, aber mit Hilfe des OFM-Verfahrens bzw. seiner Erweiterung auf ein Videomeßsystem könnte die Absteckung durch einen direkten Bildvergleich mit dem aus dem Plan konstruierten Modell ohne großen Aufwand überprüft werden.

Klotoiden als Übergang zwischen Kreisbögen und Geraden entsprechen sicher am ehesten dem natürlichen Lenkverhalten, doch nicht jede beliebige Klotoide wird den Fahrzeugen und ihren Lenkern gerecht. So zeigt **Bild 8(4)** eine Klotoide A-200 aus der Perspektive eines Pkw vom Übergang zwischen Kreisbogen (R = 300 m) in Richtung Gerade geblickt. Obwohl von diesem Punkt aus die Krümmung laufend abnimmt, scheint sie optisch eher zuzunehmen. Der Kraftfahrer sieht also nicht den Punkt, ab dem er das Lenkrad wieder zurück in die Gerade drehen soll und *überdreht* deshalb die Kurve, gerät zu nahe an den rechten Fahrbahnrand und bei einer panikartigen Lenkkorrektur kann es wieder zu resonanzartigem Aufschaukeln der Kursschwankungen kommen. In einer Linkskurve hat die gleiche Perspektive ein Abkommen zur Fahrbahnmitte hin zur Folge. Wenn dann noch eine eingeschränkte Sicht durch starken Regen dazukommt, dann kann dies schon einmal zu einem Frontalanstoß führen.

Die Schlußfolgerung aus dem obigen sollte sein, keine zu langen Übergangsbögen zu bauen. Ein Beispiel für extrem kurze Zwischenstücke ist die Autobahn Passau – Regensburg, hier wechselt auch auf kurze Distanz die Querneigung und so kann man den Wendebereich einer Kurve fast freihändig durchfahren. Wenn hingegen auf anderen Autobahnstücken Klotoiden A-1500 gebaut sind, so kann man auch bei den hohen Autobahngeschwindigkeiten das Lenkrad nicht so langsam drehen, wie dies dem Übergangsbogen entsprechen würde. Als Übergang zu einem Krümmungsradius von 6.000 m(!) ist eine solche Klotoide reiner Luxus (z.B. Pyhrnautobahn Knoten Leibnitz).
Um eine Vorstellung zu bekommen, was ein Klotoidenübergangsbogen fahrtechnisch bedeutet, sei folgende Gleichung für die mittlere Lenkraddrehgeschwindigkeit festgehalten. Ist a [m] der Achsabstand und v [km/h] die Fahrgeschwindigkeit, i_L die mittlere Lenkübersetzung, also das Verhältnis zwischen dem Drehwinkel am Lenkrad und dem mittleren Einschlag der Vorderräder, und ist schließlich A [m] das Maß für den Klotoidenübergangsbogen nach Gleichung 2.4(1), dann gilt für die **Lenkgeschwindigkeit** V_L [°/sec]:
Gl. (1):

$$V_L = \frac{50\ v\ i_L\ a}{\pi\ A^2}\ [°/\text{sec}].$$

Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h, einem Achsabstand von 2,5 m und einer Lenkübersetzung von 20 bedeutet dies bei einer Klotoide A-1500 eine Lenkraddrehgeschwindigkeit von **0,035 [°/sec]** und das über eine Strecke von über 375 m Länge, d.h. in 13,5 s wird das Lenkrad nur um 0,47° weitergedreht.

Die unnötige Aneinanderreihung von Klotoiden verschiedenster Größe macht eine Straße nur unharmonisch, die Verwendung einer Klotoidengröße für alle Übergänge läßt angenehm zu befahrende Straßenstücke entstehen. Dies hat zwar keinen direkten Einfluß auf die Unfälle, aber ein unharmonischer Straßenverlauf ermüdet stärker und bewirkt so oft

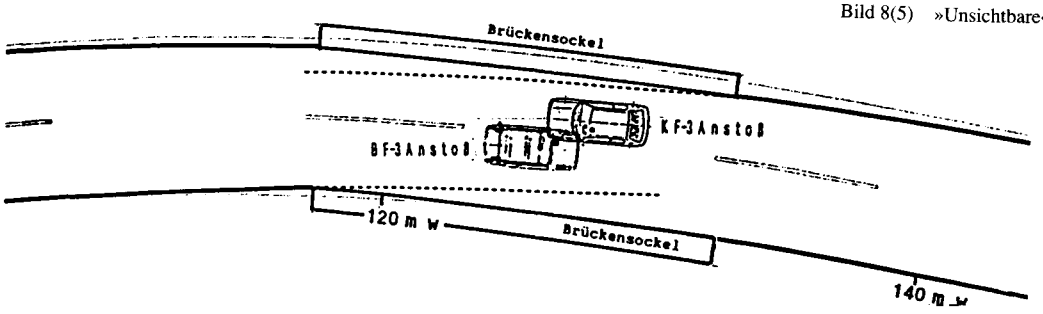
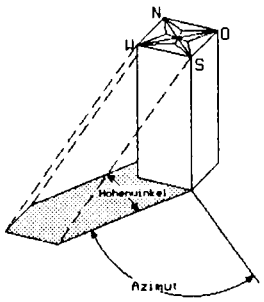


Bild 8(5) »Unsichtbare« Engstelle



Sonnenstand

Ort : 16° 0' 10" ö. Länge
47° 20' 30" n. Breite

Tag : 12. Oktober

Uhrzeit : 6 Uhr 40

Höhenwinkel : 3.99 °

Azimut : 105.92 °

Bild 8(6) Sonnenstand zur Unfallzeit

indirekt an ganz anderen Stellen einen Unfall, ermüdend wirken auch wenig gekrümmte Straßenstücke auf denen nur mit relativ geringer Geschwindigkeit gefahren werden darf.

Zu den unfallträchtigsten Straßen gehören die dreispurig ausgebauten. Ein extremes Beispiel ist die Radelpaßbundesstraße von Lieboch nach Stainz. Vor dem Ortsgebiet Rossegg durchfährt man ein rund 1 km langes fast gerades und aus einer Senke allmählich ansteigendes Straßenstück mit zwei Spuren für diese Fahrtrichtung. Diese beiden Spuren vereinigen sich gerade an einer Stelle wieder zu einer Spur, wo nach der Geraden eine Rechtskurve mit nur rund 100 m Scheitelkrümmungsradius vorhanden ist. Und als ob dies noch nicht genug wäre, nimmt dort die Steigung in einer Kuppe ab und wegen des nahenden Wendepunktes wechselt auch noch die Querneigung, wodurch der effektive Kuppenradius noch verkleinert wird. Im ersten Jahr nach der Fertigstellung dieses Straßenstückes sind bereits 24 mehr oder minder schwere Unfälle in dieser Kurve gezählt worden. Auch hier spielt die Perspektive eine große Rolle, da man wegen der relativ großen Straßenbreite den kleinen Kurvenradius nicht richtig abschätzen kann und auch wegen des dreispurigen Ausbaus gar nicht erwartet, daß schon eine Geschwindigkeit um 80 km/h das Fahrzeug in einen gefährlichen Grenzbereich bringen kann.

Das letzte Beispiel zeigt u.a. auch, daß nur die verborgenen Baufehler zu einer Unfallhäufung führen. Eine Engstelle, die man von weitem als solche erkennt, ist nicht so gefährlich, wie eine Verengung der Fahrbahn beispielsweise durch eine nicht richtig in den Straßenverlauf passende Brücke, die in **Bild 8(5)** dargestellt ist. Zwei jugendliche Fahrzeuglenker haben die dort abgebildete Engstelle vor der Begegnung in der Nacht nicht erkannt und sind im Bemühen vor der Brücke möglichst weit rechts zu fahren auf der Brücke erst recht weit in die Mitte gekommen und die Folge war ein versetzter Frontalzusammenstoß.
Man könnte diese Beispiele von Bausünden noch beliebig fortsetzen, doch zum Abschluß sei noch ein eher ungewöhnlicher Fall erwähnt. Auf der Wechselbundesstraße gibt es ein Straßenstück, das in einer Rechtskurve mit rund 6% Steigung gerade eine Tangente um 105° zu Nord aufweist und wo in Verlängerung dieser Tangente ein V-förmiger Einschnitt der Geländeform am Horizont bis zur Tangentialebene der Fahrbahn reicht. Da zweimal im Jahr (am 1. März und am 12. Oktober) genau dort die Sonne steht, strahlt diese nach der Kurve den Autolenkern direkt in die Augen, und da die Sonne parallel zur Fahrbahnoberfläche scheint, gibt es auch keine Abblendmöglichkeit mit der Sonnenblende. Die Sonne steht auch schon rund 4° über dem Horizont und strahlt daher wesentlich stärker als sonst bei Sonnenauf- oder -untergang. Die Folge dieser ungewöhnlichen Konstellation an einem außergewöhnlich schönen Oktobertag war ein schwerer Unfall, da ein Lenker auf dieses Ereignis hin bremste während der nächste ungebremst weiter rollte und mit hoher Geschwindigkeit auffuhr.
Um bei der Planung von Straßen auch solche Unfallgefahren zu vermeiden, könnte man sinnvoll das ebenfalls im PLS-Programmpaket enthaltene SONNE-Programm benutzen, mit dem nach **Bild 8(6)** der Sonnenstand zu einer gegebenen Zeit berechnet werden kann, bzw. alle Umkehrungen der Fragestellungen. So ist mit diesem Programm zum Beispiel auch aus dem Schatten eines Objektes auf einem Foto der Tag und die Uhrzeit der Aufnahme, bzw. die beiden in Frage kommenden Tage eines Jahres, ermittelbar, was gelegentlich zum überraschenden Ergebnis führen kann, daß eine Aufnahme schon früher gemacht wurde als die in der Anzeige angeführte Unfallzeit. Das Programm ist ebenso nützlich bei Dämmerungsunfällen oder zur Frage eines Phantomlichteffektes, durch den ein Blinklicht oder Bremslicht an Auffälligkeit verliert.

9 Zukunftsperspektiven

Nachdem dieser Artikel ein Rückblick auf über 20 Jahre Forschungs- und Entwicklungsarbeit mit praktischer Erprobung bei der forensischen Tätigkeit war, sollen zur Abrundung noch die Wünsche für die Zukunft kurz erwähnt werden. Eine der Zielsetzungen bei der Entwicklung von Rekonstruktionsmethoden war die Darstellung des rekonstruierten Unfallablaufes in einem Trickfilm, der die Perspektiven der beteiligten Lenker zeigt. Mit dem jüngsten der Computerprogramme, dem C.A.A.D.-Programm wurden die Weichen für dieses Ziel bereits gestellt und es ist nur noch eine Frage einer preisgünstigen Hardware-Entwicklung bis zur Realisierung. Damit wird hoffentlich eine Darstellungsform der Rekonstruktionsergebnisse erreicht, die auch ein technischer Laie augenscheinlich **nachvollziehen** kann, ohne die zur Berechnung notwendige Mathematik beherrschen zu müssen.

Ein besonderes Anliegen für die Zukunft wäre die Weitergabe von Erkenntnissen über Baufehler an Straßen an die für eine Sanierung zuständigen Stellen, denn bei allem wirtschaftlichen Interesse eines Sachverständigen am Eintritt von Verkehrsunfällen sollten doch die Vorbeugemaßnahmen gegen zukünftige Unfälle die höhere Priorität haben. In diesem Sinne wäre vor allem eine bessere Ausbildung der zukünftigen Straßenbauer sehr wichtig.

Da die Entwicklung der Kraftfahrzeuge sicher weitergehen wird und hier vor allem die Antiblockiersysteme nicht nur den Wegfall von Spuren

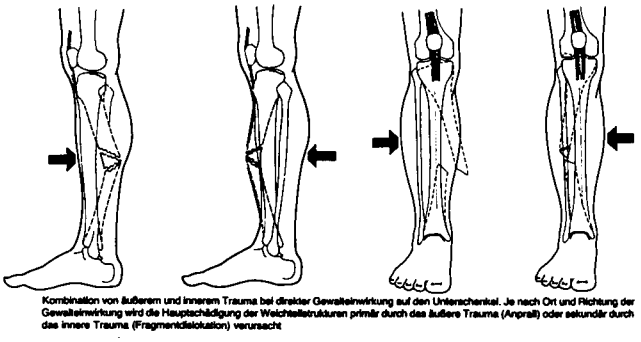


Bild 9(1) Bruchhypothese in der Medizin

bringt, die in der Vergangenheit für viele Sachverständige die einzigen Anhaltspunkte waren, sondern auch neue Unfallprobleme, wird die hier schon angedeutete Rekonstruktionstechnik durch weitere experimentelle Unterstützung weitergeführt werden müssen. Bis es eine lückenlose Versorgung aller Fahrzeuge mit einem Unfalldatenspeicher (UDS) gibt, werden noch Jahrzehnte vergehen, doch auch diese Entwicklung wird eine neue Ära der Unfallrekonstruktion bringen, die Entwicklung entsprechender Auswerteprogramme müßte schon in naher Zukunft beginnen.

Die Ausbildung von Technikern ist auf die **Konstruktion** von Bauwerken aller Art ausgerichtet, die eher zur Archäologie zu zählende **Rekonstruktionstechnik** fehlt weitgehend in Forschung und Lehre. Die meisten heute bei den Gerichten tätigen Sachverständigen sind Autodidakten, die sich die Kenntnisse auf Kongressen und diversen Kursen bzw. durch eigene Forschungstätigkeit erwerben müssen, eine systematische Ausbildung gibt es nur vereinzelt. Dabei reicht der Aufgabenbereich des forensisch tätigen Unfallanalytikers weit über die oben aufgezeigten Problemstellungen hinaus, etwa das gesamte Gebiet der Unfallreparatur, wie es z.B. hervorragend im Allianz Zentrum in Ismaning betreut wird, oder der Problemkreis der Biomechanik. Gerade auf letzterem Gebiet wäre eine Verbesserung der Gesprächsbasis zwischen Technikern und Medizinern sehr wünschenswert, wie man etwa am Beispiel des Messererkeiles[28] beim Bruch von Röhrenknochen sehen kann, wo in der medizinischen Literatur eine technisch unhaltbare Bruchhypothese als Stand der Wissenschaft gilt.

[1] Das C.A.A.D.-Programm für die Unfallanalyse, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 7/8, 1993

[2] Otto Finsinger: »Straßenbauliche Grundsätze und Richtlinien für den Ausbau und Neubau von Kurven«, Zentralblatt für Unfall-Untersuchung, Heft 3-1971

[3] Die erste Programmvariante für Taschenrechner wurde in der Verkehrsunfall, 11-1977, 7/8, 9-1978: »Mathematische Grundlagen für die Programmierung von Taschenrechnern zur Unfallrekonstruktion« vorgestellt.

[4] Im Zentralblatt für Unfalluntersuchung, Bd. 1/7, 9-1973 wurde erstmals die »Rekonstruktion von Fahrzeugstößen mit dem grafisch-iterativen Lösungsverfahren« vorgestellt.

[5] 1975 wurde in der Technischen Hochschule in Aachen die Dissertation »Mathematische Grundlagen für die Rekonstruktion von Fahrzeugstößen« angenommen.

[6] In der Serie »Mathematische Grundlagen für die Programmierung von Taschenrechnern zur Unfallrekonstruktion« wurde in der Verkehrsunfall 6-1979, der Stoß und vor allem die Grundlagen des EES-Verfahrens erläutert.

[7] Bereits im Heft 7/8-1977 der Verkehrsunfall wurde auf die »Grenzen der technischen Möglichkeit zur Einhaltung der Straßenverkehrsordnung« hingewiesen.

[8] Im Zentralblatt für Unfalluntersuchung, Bd. 2 Heft 1, 4-1976 stellte Max Sorg »Die Ausrüstung einer modernen Unfallalarmgruppe« mit der Weitwinkel-Stereometerkamera Wild C-120 vor.

[9] P. Drechsler: »Maßstäbliche Aufnahme von Spuren mit Hilfe der Draufsicht-Fotografie«, der Verkehrsunfall, 5-1974.

[10] Im Einleitungsaufsatz: »Der Einsatz programmierbarer Taschenrechner bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen«, der Verkehrsunfall, 11-1977, wurde darüber berichtet.

[11] Von B.-G. Müller und I. Roth wurde im Aufsatz: »Photogrammetrische Tatbestandsaufnahme aus heutiger Sicht«, der Verkehrsunfall, 1-1981 ein ähnliches Verfahren wie in 10) vorgeschlagen.

[12] Max Lindenmann: »Luftaufnahme mittels Fesselballon«, der Verkehrsunfall, 10-1983.

[13] Adolf Lammer: »Hinweise zu Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen für die forensische Praxis«, Zeitschrift für Verkehrsrecht, 4-1979.

[14] »Die Berechnung der Geschwindigkeit von Automobilen aus den Bremsspuren«, Rechenzentrum Graz, Heft 57, 1970.

[15] »Der Einfluß der Fahrzeugkonstruktion auf die Länge der unsichtbaren Bremsstrecke bei einer Panikbremsung«, Zentralblatt für Unfall-Untersuchung, Bd. 1, Nr. 4/6-1972.

[16] Automobildynamische Versuchsstelle, Kantonales Technikum Biel, Versuchsbericht Nr. 1.

[17] H. Indra: »Spurenkatalog«, TÜV-Bayern, 1973.

[18] Vorgestellt in der Serie »Mathematische Grundlagen für die Programmierung von Taschenrechnern zur Unfallrekonstruktion«, der Verkehrsunfall, 11-1978.

[19] Österreichisches Straßenverkehrsrecht: »Straßenverkehrsordnung 1960«, ORAC-Verlag.

[20] Zeitschrift für Verkehrsrecht, Spruchbeilage Nr. 207/1978.

[21] Zeitschrift für Verkehrsrecht, Spruchbeilage Nr. 12/1986.

[22] Hans Kudlich: »Beitrag zur Mechanik des Kraftfahrzeugunfalles«, Dissertation 1966, TH-Wien.

[23] Werner Holste: »Einfluß der Gesetzgebung auf die Entwicklung künftiger Fahrzeuge« – Vorlesung TH-Aachen, 1971-72.

[5] »Mathematische Grundlagen für die Rekonstruktion von Fahrzeugstößen«, Dissertation TH-Aachen, 1975.

[24] Falk, Zeidler: »Die Bedeutung der Formänderungsenergie für die Unfallforschung und das EES-Unfallrekonstruktionsverfahren«, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 4-1984.

[25] »Rechenmodelle für die Rekonstruktion des Unfallablaufes aus Spuren, insbesondere den Unfallverletzungen«, Kongreßbericht 1986 der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin e.V.

[26] Helmut Springer: »Untersuchung der allgemeinen ebenen Bewegung eines luftbereiften und nicht angetriebenen Personenkraftfahrzeuges«, Dissertation 1972, TH-Wien.

[27] Helgo Schneider: »Experiment und Unfallwirklichkeit beim Fußgängerunfall«, der Verkehrsunfall 8-1975.

[28] N. Haas, D. Otte: »Weichteilschädigungen und Frakturformen von Unterschenkelschaft-Frakturen in Abhängigkeit vom Unfallmechanismus«, Kongreßbericht 1986 der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin e.V.

Bitte beachten Sie, daß sämtlichen zitierten Rechtsvorschriften österreichische Vorschriften sind. ■

Pressenotizen

Gut informiert in den Motorrad-Frühling:
Vorgaben für Reifen bei »schweren« Maschinen gelockert

Welche Reifen ziehe ich auf? Diese Frage stellt sich beim Start in den Motorrad-Frühling. Wie die Unternehmensgruppe TÜV Bayern mitteilt, gibt es zu diesem Thema eine wesentliche Neuerung: Die 45. Ausnahmeverordnung zur Straßenverkehrs-Zulassungsordnung (StVZO) erlaubt es jetzt, Krafträder mit Reifen von »unterschiedlicher Bauart« auszurüsten. Das heißt, daß man zum Beispiel vorne eine Diagonal- und hinten eine Radialbereifung haben darf. Bisher untersagte § 36 der StVZO eine solche Mischbereifung für alle motorisierten Zweiräder. Unter diese Vorgabenlockerung fallen nur die »schweren« Motorräder. Dieses Verbot gilt jedoch weiterhin für Leicht- und Kleinkrafträder sowie den Mofas.

Achtung beim Nachrüsten

Technisch gesehen kann eine solche Mischbereifung bei den größeren Maschinen nach Feststellung der TÜV-Experten durchaus sinnvoll sein. Wer jedoch sein Motorrad entsprechend nachrüstet, muß einige Punkte im Vorfeld klären, da er sonst die Betriebserlaubnis für sein Fahrzeug verlieren kann. Im Falle, daß bestimmte Kombinationen von Radial- und Diagonalreifen in den Fahrzeugpapieren ausgewiesen sind, kann ohne weiteres eine Montage vorgenommen werden. Das gleiche gilt für Mischbereifungen, die in der allgemeinen Betriebserlaubnis für das Kraftrad oder einem Nachtrag enthalten sind. Eine Rückfrage beim Hersteller des Fahrzeuges klärt dieses Problem. Fehlt ein solcher Kombinationshinweis im Fahrzeugschein und -brief oder der allgemeinen Betriebserlaubnis, so ist das Guthaben eines amtlich anerkannten Sachverständigen für den Kfz-Verkehr über eine Mischbereifung nötig: Eine unsachgemäße Kombination von Diagonal- und Radialreifen kann für den Motorradfahrer höchst gefährlich sein.

Pkw-Reifen passen nicht zum Motorrad

Ein wichtiger Hinweis: Die Erlaubnis, schwere Motorräder mit einer Mischbereifung auszustatten, bezieht sich nicht auf Pkw-Reifen. Diese Reifen – so die Unternehmensgruppe TÜV Bayern – sind für andere fahrphysikalische Bedingungen konstruiert und deshalb für Zweiräder ungeeignet.

Bei Fragen zum Thema richtige Motorrad-Bereifung, steht Ihnen Eduard Meier (Tel.: 089/5791-1298) zur Verfügung).

Quelle: TÜV Bayern Sachsen, 15/94 ■

Bitte geben Sie Ihre Adressenänderung bekannt! Vielen Dank!

Buchreihe für das Kfz-Mechaniker-Handwerk
Karosserieinstandsetzung

Folgende Bücher dieser Reihe sind noch lieferbar:

Instandsetzungsarbeiten bei Rostschäden	18.80 DM	Abschnittsiep. an Außenhautteilen	11.20 DM
Verbindungen in der Karosserieinstandsetzung	21.30 DM	Direktverglasung und Glashubdächer	16.50 DM
Karosseriereparaturen mit Meß- u. Richtsystemen	18.80 DM		

Verlag INFORMATION Ambs GmbH · Postfach 208 · 77968 Kippenheim · Fax: 0 78 25 - 93 76