

Karl-Heinz Schimmelpfennig*

Geschwindigkeitsrückrechnung

nach Spurenbild

– Achskoppelverfahren –

*Meinem geschätzten Lehrer,
Herrn Dipl.-Ing. Karl Spange, zum 65. Geburtstag*

Einleitung

Die Geschwindigkeitsrückrechnung nach überlieferten Brems Spuren ist ein klassisches Thema der Verkehrsunfallrekonstruktion.

Wirft man einen Blick in die Veröffentlichungen der letzten Jahre, kann man den Eindruck gewinnen, daß die Grundlagen dieser Thematik erschöpfend dargestellt sind, so wenig wird über sie geschrieben. Themenkreise wie »Bremsen in der Kurve«, »Bremsen auf nasser Fahrbahn« und die »Problematik der Reaktionsdauer« sind in den Vordergrund gerückt und beherrschen die Diskussion.

Doch der Eindruck täuscht: Eine theoretische Darlegung, die auch Detailprobleme aus der Praxis der Geschwindigkeitsrückrechnung berücksichtigt, fehlt.

Gerade die Details aber, die im ersten Moment überflüssig erscheinen, werden immer wieder in Gerichtsverhandlungen zur Sprache gebracht – vor allen Dingen dann, wenn die Vermeidbarkeitsbetrachtung zu knappen Ergebnissen führt:

Die größte Aufmerksamkeit wird der Frage gewidmet, welche Verzögerung während des Blockiervorgangs auftritt. Die Höhe der Verzögerung resultiert aus der Reifen-/Fahrbahnpaarung und fließt als variable Größe in die mathematische Beschreibung eines Bremsvorganges ein.

Da dieser Themenkreis grundsätzlich als geklärt angesehen werden kann, soll er in diesem Aufsatz ausgeklammert werden. Häufig bleibt aber unklar, ob der Radstand von der Spurlänge abgezogen werden muß.

Schließlich wird oft diskutiert, welchen Einfluß Beladung und Schwelldauer auf das Ergebnis haben.

Ein erster Schritt in die richtige Richtung war die Einführung des Bremskraftverteilungs-Schaubildes in den Rechengang der Rückrechnung. Dadurch wird zum ersten Mal der Beladungszustand mit erfaßt, und auch der zeitliche Verzug zwischen dem Blockierbeginn der Vorder- und Hinterachse fließt mit in die Betrachtung ein. Bremsversuche zeigen jedoch, daß die Rückrechnung allein auf der Basis des Bremskraftverteilungs-Schaubildes zu nicht reproduzierbaren Spurenbildern führt. Teilweise liegt das an der falschen Anwendung in der Praxis. BURCKHARDT [1] weist in diesem Zusammenhang darauf hin, daß auch die Pedalkraft, die der Fahrzeugführer in der Notsituation aufbringt, berücksichtigt werden muß. Die gleichzeitige Anwendung von Pedalkraft- und Bremskraftverteilungs-Schaubild ist jedoch kaum zu beobachten. Wenn man zusätzlich beachtet, daß das Bremskraftverteilungs-Schaubild nur für den stationären Vollbremsvorgang Gültigkeit besitzt, und daß in der Analyse der Schwellphase (instationäre Abbremsung) die entscheidende Voraussetzung zur Beantwortung der stets wiederkehrenden Frage liegt, dann wird deutlich, daß nach anderen Wegen zur Rückrechnung gesucht werden muß.

*Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schimmelpfennig, Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle, Ing.-Büro Schimmelpfennig und Becke, 4400 Münster-Wolbeck

In der folgenden Ausarbeitung soll daher ein Vorschlag zur Diskussion gestellt werden, der sowohl das Betätigungsverhalten des Fahrzeugführers in einer Notsituation als auch fahrzeugspezifische Daten, wie z.B. unterschiedliche Beladungszustände und den technischen Aufbau der Bremsanlage berücksichtigt. Auch bei der Rückrechnung soll eine bessere Anpassung des Ersatzmodells an das Spurenbild ermöglicht werden.

Derzeitiger Berechnungsweg

Die Berechnung der Ausgangsgeschwindigkeit erfolgt nach der Gleichung

$$v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s} \quad (1)$$

Gelegentlich wird die Schwellphase zusätzlich berücksichtigt:

$$v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s + \frac{a}{2} t_s} \quad (2)$$

Wie diesen Gleichungen zu entnehmen ist, fließt in die Geschwindigkeitsrückrechnung die Verzögerung a , der Bremsweg s und die Bremschwelldauer t_s ein:

Die Verzögerung wird anhand der Reifen-/Fahrzeugbahnpaarung bestimmt. Der Bremsweg kann der Verkehrsunfallskizze entnommen werden, manchmal wird von ihm auch der Radstand abgezogen.

Die Schwelldauer wird schließlich mit einem Mittelwert von 0,2 s berücksichtigt.

Diesen Rechengängen liegt ein »Einrad-Ersatzmodell« zugrunde (Bild 1). Da ein Fahrzeug aber ein Zweiachsfahrzeug mit hochliegendem Schwerpunkt ist, müssen sie als stark vereinfacht bezeichnet werden.

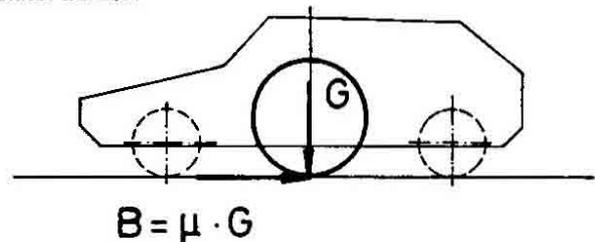


Bild 1 Einrad-Ersatz-Modell

Daß die unterschiedlichen Ansätze nach den Gleichungen (1) und (2) trotzdem zu vergleichbaren Ergebnissen führen, zeigt die alltägliche Praxis (Bild 2).

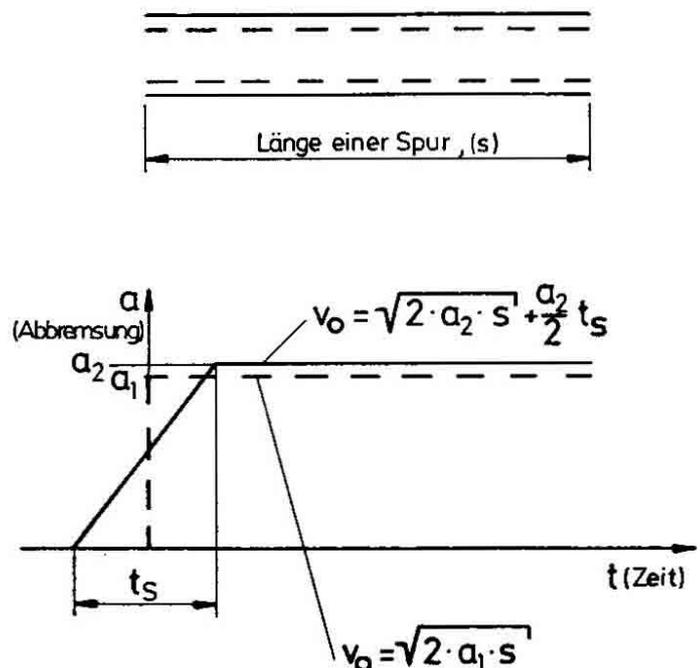


Bild 2 Konventionelle Geschwindigkeitsrückrechnung

Daß auch trotz des stark vereinfachten Rechengangs richtige Endergebnisse erzielt werden, ist durch die Qualität des Datenmaterials zu erklären, das aus unzähligen Versuchs- und Vergleichsbremungen gewonnen wurde.

In [2] wird dieser Zusammenhang sehr deutlich gezeigt.

Die meisten Ergebnisse wurden aber durch Versuchsbremsungen im mittleren Geschwindigkeitsbereich von 50 – 70 km/h ermittelt (vertretbarer Reifenverschleiß), können aber nicht ohne weiteres auf niedrige Geschwindigkeiten bzw. Hochgeschwindigkeitsbereiche übertragen werden.

Die Datenverarbeitung bietet jedoch die Möglichkeit, für die Rückrechnung eines Bremsvorganges aus Geradeausfahrt einen Näherungsansatz auf der Basis eines Zweiradmodells zu erarbeiten (Bild 3).

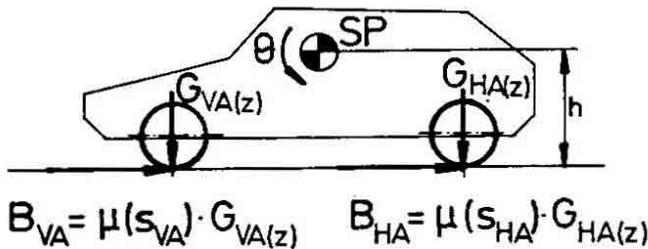


Bild 3 Zweirad-Ersatz-Modell

Bei Bremsungen während einer Kurvenfahrt müßte dagegen zur korrekten Erfassung aller Details mit einem Vierrad-Ersatzmodell gearbeitet werden.

Großserienfahrzeuge werden aus Stabilitätsgründen so ausgelegt, daß die Hinterachse zeitlich nach der Vorderachse blockieren soll. Bei blockierter Vorderachse bleibt das Fahrzeug spurstabil. Hält man sich vor Augen, daß die Hinterachse z.B. 0,1 s nach der Vorderachse blockiert, dann wird deutlich, daß bei der Festlegung des Bremsweges nicht über den Radstand zu diskutieren ist, sondern über die Wegdifferenz, die während des Zeitversatzes durchfahren wird. Die Zeitdifferenz zwischen dem Blockieren der Vorder- und Hinterachse ist aber keine Konstante, sondern hängt u.a. vom Beladungszustand ab. Dieser Zusammenhang kann dem stationären Bremskraftverteilungs-Schaubild prinzipiell entnommen werden.

Definition des Vollbremsvorganges

Ein Teil der Diskussionen in den Gerichten beruht allein auf der unklaren Unterscheidung von Schwelphase und Vollbremsvorgang.

Im folgenden wird davon ausgegangen, daß der Vollbremsvorgang erst dann einsetzt, wenn alle vier Räder blockieren. Daher sollte man ihn treffender als »Blockiervorgang« bezeichnen. Der davor gelegene Bremsvorgang wird daher der Schwelphase zugeordnet (Bild 4).

Bremsfluß im Fahrzeug

Baulich bedingte Parameter, die das Zeitverhalten der blockierenden Räder beeinflussen, können nur durch eine Analyse der Bremsanlage erfaßt werden. Das Bremskraftverteilungs-Schaubild in seiner jetzigen Form reicht dazu nicht aus.

Im Rahmen einer Notsituation wird das Bremspedal unkontrolliert »im Automatismus« betätigt; dadurch wird Druck im Hydrauliksystem aufgebaut. Für die Betrachtung des Bewegungsablaufs ist zum einen das zeitliche Verhalten des Pedalkraftanstiegs von Bedeutung, zum anderen das zeitliche Verhalten der Bremsanlage. Zur Bestimmung des Pedalkraft-Zeit-Verlaufs sind statistische Untersuchungen heranzuziehen. Das Zeitverhalten des Bremssystems kann aus den Bauelementen der Anlage ermittelt werden.

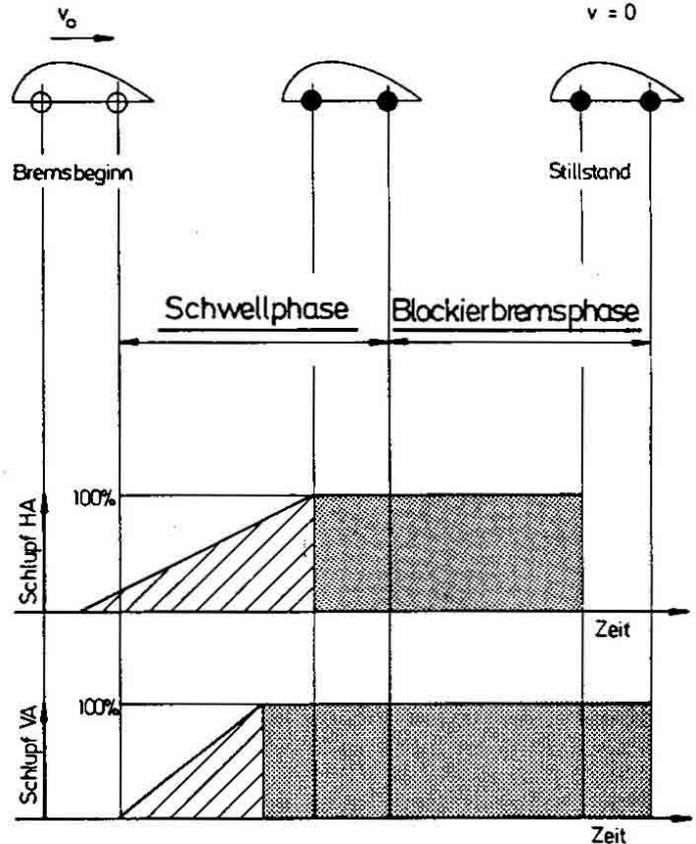


Bild 4 Definition des Bremsvorganges

So bewirkt z.B. das Spiel zwischen den Reibpartnern (Belag-Scheibe bzw. Belag-Trommel) Totzeiten im System. Der Unterdruckverstärker und bauliche Gegebenheiten der Bremsanlage verursachen zusätzliche Verzögerungen, z.B. die Aufteilung des Schwimm-Druckkreises im Hauptbremszylinder (Bild 5).

Zu dieser Thematik ist kaum Literatur vorhanden. Die Firmen sind zudem sehr zurückhaltend in der Angabe von spezifischen Daten über das Bremssystem.

Wird zusätzlich berücksichtigt, daß auch die Firmenangaben zu den übergeordneten Grunddaten, wie z.B. Fahrzeugmasse und Lage des Schwerpunkts, nur mit großer Vorsicht zugrundegelegt werden können [3], dann bleibt für die weitere Arbeit in der Verkehrsunfallrekonstruktion nur der Weg über umfangreiche Versuchsreihen.

Zweiradersatzmodell

Der hochliegende Fahrzeugschwerpunkt führt beim Bremsen zu Radlastveränderungen.

Weil aber in konventionellen Bremsanlagen »nur« eine lineare Bremskraftverteilung verwirklicht ist, blockieren Vorder- und Hinterachse mit einer Zeitdifferenz. Diese wird überlagert von dem baubedingten Zeitverzug aus der Bremsanlage.

Selbstverständlich spielen auch Feinheiten, wie Reibwertschwankungen, eine entscheidene Rolle. Bei Großserienfahrzeugen sollte die Differenz zwischen dem Blockierbeginn der Vorder- und Hinterachse jedoch kein Zufallsprodukt sein. Für kritische Beladungszustände ist dieses Problem jedoch noch nicht zufriedenstellend gelöst.

Um den Einfluß der Differenz zwischen dem Blockierbeginn der Vorder- und Hinterachse auch in Abhängigkeit vom Beladungszustand erfassen zu können, muß zuerst jede Achse für sich betrachtet werden.

Durch die Pedalkraft wird der Bremsdruck in Abhängigkeit von der Zeit aufgebaut.

Der zeitliche Verzug bis zum Erreichen der maximalen Pedalkraft

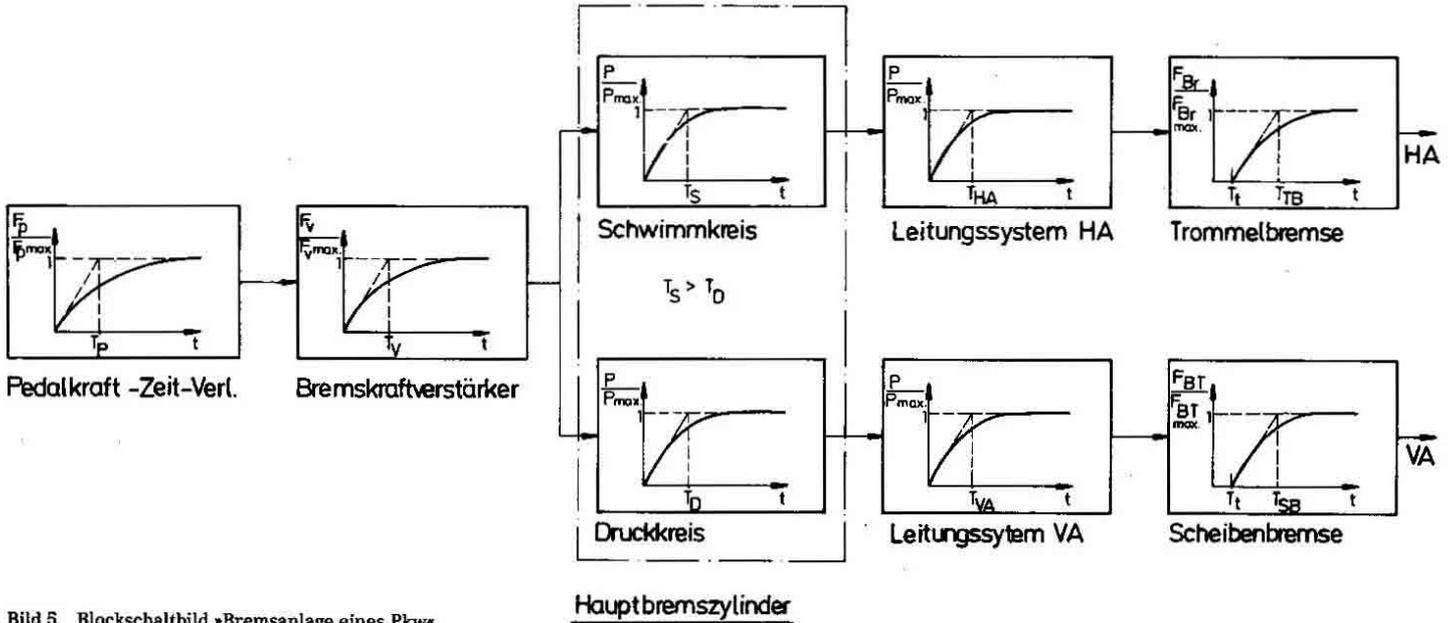


Bild 5 Blockschaltbild »Bremsanlage eines Pkw«

wird durch die Elastizität im System weiter vergrößert. Unter Berücksichtigung der rotatorischen Massen kann mit dieser zeitlichen Abhängigkeit die Bewegungsgleichung eines Rades, d.h. die Abhängigkeit des Schlupfes von der Zeit, berechnet werden [4].

Ist die Abhängigkeit der Kraftschlußausnutzung vom Schlupf bekannt, wird eine Verbindung mit dem Bremskraftverteilungsschaubild möglich. Wird diese Berechnung mit beiden Achsen des Ersatzsystems durchgeführt, erhält man die Bremskraftverteilung auch in der Schwellphase als Funktion der Zeit (Bild 6).

Die getrennte Erfassung der Achsen in Form von Einradmodellen kann somit durch den Bremskraftverteilungsfaktor zu einem Zweiachssystem gekoppelt werden. Durch diese Koppelung folgt aus der Bremskraftverteilung der direkte Verlauf der Schwerpunktsverzögerung des Zweiradmodells in Abhängigkeit von der Zeit.

Werden weitere in der Literatur bekannte Parameter in dieses System einbezogen, erhält man in Abhängigkeit der Schwerpunktsverzögerung von der Zeit sowohl die Punkte, an denen die erste Spurzeichnung der Achsen erfolgt als auch die, bei denen die Ach-

sen blockieren. Die in [5] und [6] dargelegten Ergebnisse können bei dieser Vorgehensweise direkt einbezogen werden.

Die mathematische Aufbereitung von der Fußkraftbetätigung bis zur Abhängigkeit der Fahrzeugschwerpunktsverzögerung von der Zeit ist sehr aufwendig und in der Praxis der Unfallrekonstruktion nicht zu handhaben. Aus der mathematischen Beschreibung können aber mit Hilfe der Datenverarbeitung Diagramme erstellt werden, mit deren Hilfe auch eine schnelle Geschwindigkeitsrückrechnung unter Berücksichtigung der zahlreichen Parameter möglich wird.

So wären in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit Diagrammserien zu erarbeiten, aus denen für bestimmte Fahrzeugklassen und verschiedene Beladungszustände folgende Differenzstrecken abgelesen werden können:

- (I) – Differenzstrecke zwischen Brems- und Spurbeginn
- (II) – Differenzstrecke zwischen erster Spurzeichnung und Blockierspurbeginn
- (III) – Differenzstrecke zwischen Blockierspurbeginn von Vorder- und Hinterachse.

Diese Diagramme ermöglichen es, in Anlehnung an Gleichung (2) die Ausgangsgeschwindigkeit mit einer einfachen Näherungslösung

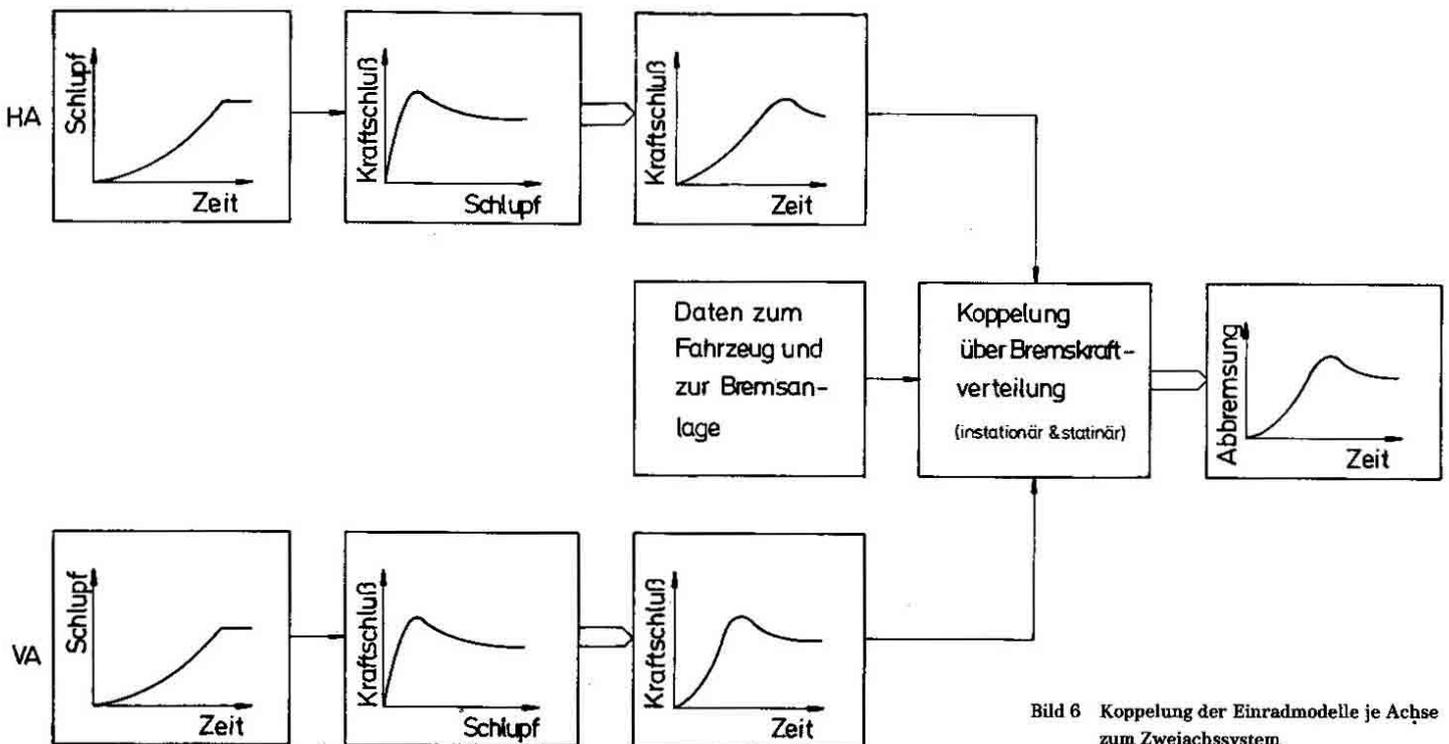


Bild 6 Koppelung der Einradmodelle je Achse zum Zweiachssystem

sung anzugeben. Bei diesem Verfahren muß jedoch darauf geachtet werden, daß die Schwellphase nicht linear sondern sinusförmig an den tatsächlichen Verlauf der Verzögerung angenähert wird [7].

Anwendung des Achskoppelverfahrens in der Praxis

Mit einem Pkw DB 280 TE wurden Bremsversuche durchgeführt. Dabei wurde die Zeitdifferenz festgehalten und das Spurenbild vermessen (Bild 7).

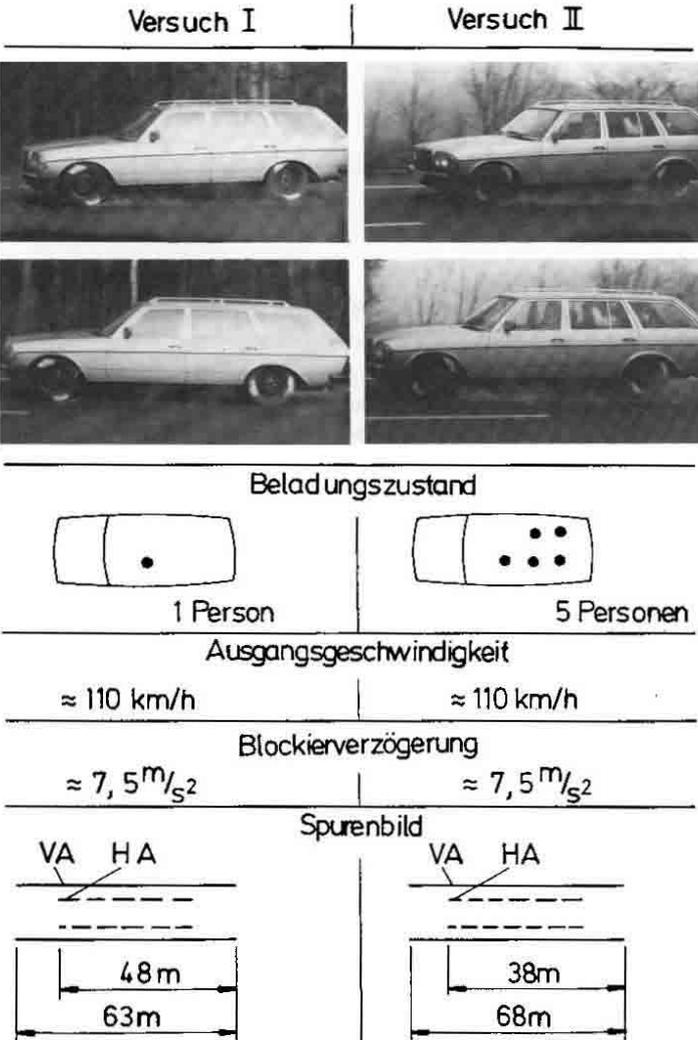


Bild 7 Versuche

Mit diesen Ergebnissen wird in Bild 8 die Vorgehensweise zur Berechnung der Ausgangsgeschwindigkeit auf der Grundlage des Achskoppelverfahrens gezeigt.

Zusammenfassung

Das Achskoppelverfahren ermöglicht eine Geschwindigkeitsrückrechnung nach Spurenbildern, bei der alle spezifischen Daten des Fahrzeugs, die beim Vollbremsvorgang vorliegen, berücksichtigt werden.

Da die mathematische Aufbereitung des Bremsflusses vom Beginn der Betätigung des Fußpedals bis zum Blockieren beider Achsen recht umfangreich ist, wird eine Näherungslösung vorgestellt, die den Sachverständigen in die Lage versetzt, in der gewohnten Art und Weise zu arbeiten.

Voraussetzung für die praktische Anwendung des Achskoppelverfahrens ist jedoch, daß die Hersteller den Unfallanalytikern techni-

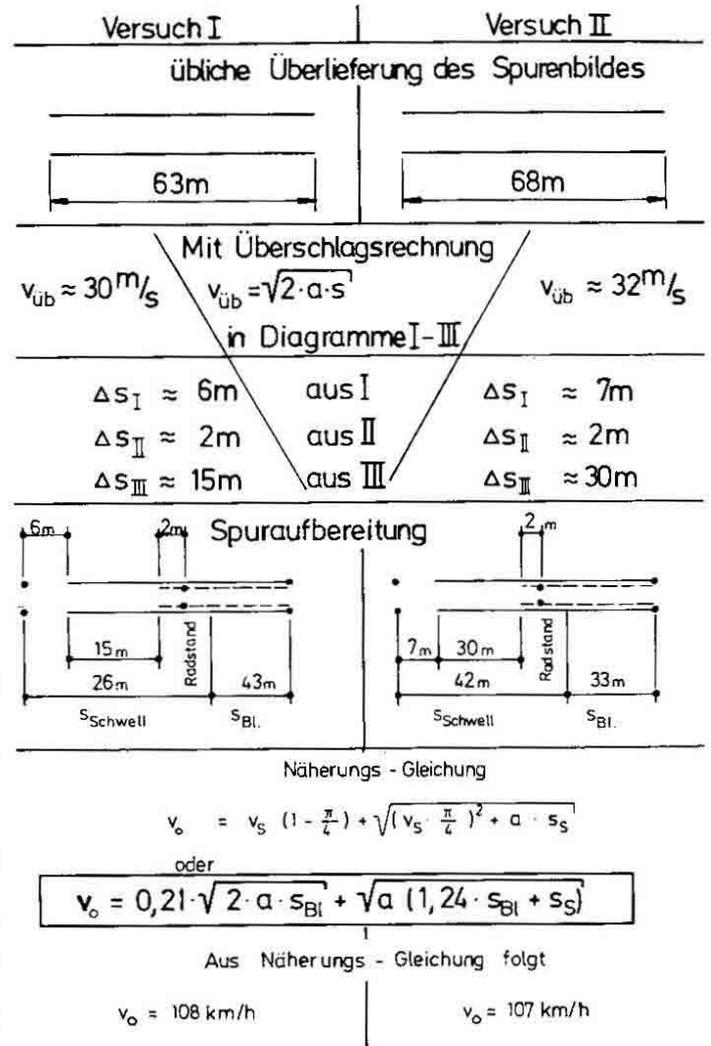


Bild 8 Prinzipdarstellung des Näherungsansatzes

sche Daten von den Bremsanlagen in größerem Umfang zugänglich machen.

Direkt angewandt werden kann das vorgestellte Verfahren bei sehr sorgfältig aufgenommenen Spurenbildern dann, wenn ein getrennter Spurbeginn von Vorder- und Hinterachse festgestellt werden konnte.

Literatur

- (1) Burckhardt, M. (1980): Eine Erweiterung des Bremskraftverteilungsdiagrammes zur raschen Bestimmung der jeweils zugehörigen Pedalkraft. In: der Verkehrsunfall 18. Jg., Heft 2.
- (2) Danner, M. / Halm, J. (1981): Technische Analyse von Verkehrsunfällen, München.
- (3) Mitschke, M. (1981): Bremsmomentenverteilung bei Pkw Unveröffentlichter Vortrag BMFT-Tagung Nov. 1984 in Münster.
- (4) Mitschke, M. (1982): Dynamik der Kraftfahrzeuge - zweite, völlig neubearbeitete Auflage, Band A, Berlin/New York.
- (5) Grandel, J. (1978): Untersuchung des Beginns von Brems Spuren unter verschiedenen Bedingungen auf verschiedenen Fahrbahnlängen. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 258.
- (6) Gerresheim, M. u.a. (1979): Beitrag zum Problemkreis «Geregeltes Bremsen» mit besonderer Berücksichtigung der für das Bremsspurzeichnen wesentlichen Parameter. Deutsche Kraftfahrersforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 261.
- (7) Burckhardt, M. (1979): Der Anhalteweg eines Kraftfahrzeuges bei Berücksichtigung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Kraftschlußbeiwertes. In: Der Verkehrsunfall, 17. Jg., Heft 11.