

Michael Weber*, Wolfgang Hugemann**

Die Geschwindigkeitsrückrechnung bei Motorradbremsungen

Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem das Bremsverhalten von Motorradfahrern realistisch beschrieben wird. Es wird aufgezeigt, daß aufgrund der langen Schwellzeiten bei Motorradbremsungen eine Geschwindigkeitsrückrechnung mit angenommenen mittleren Verzögerungen nicht sinnvoll ist. Die mathematische Aufbereitung des vorgestellten Exponentialansatzes führt auf einfach zu handhabende Lösungsgrafiken und Rechenformeln.

Summary

This paper presents a mathematical procedure by means of which the braking-behavior of motocyclists can be described in a realistic way. It is pointed out that because of the long rising time of the deceleration a description in terms of mean values of deceleration is not to be recommended. The mathematical elaboration of the presented exponential function leads to diagrams and formulas which are easy to handle.

1 Einleitung

Im Gegensatz zu zweispurigen Fahrzeugen besitzen Motorräder in der Regel getrennte Bremsanlagen für Vorder- und Hinterrad. Wird bei einer Vollbremsung vom Fahrer auf die Betätigung der Vorderradbremse verzichtet, liegt das Verzögerungsniveau nur halb so hoch wie bei einem Pkw und es ergeben sich doppelt so lange Bremswege. Geht man davon aus, daß die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf die Anhaltewege moderner Pkw ausgelegt sind, dann dürfte ein nur mit dem Hinterrad abgebremstes Zweirad innerorts nur etwa 40 km/h und außerorts 75 km/h fahren. Diese Zahlenbeispiele veranschaulichen die juristische Brisanz der Frage, ob bei einem Verkehrsunfall die Vorderradbremse eingesetzt wurde oder nicht.

Um das Bremsverhalten von Motorradfahrern zu untersuchen, wurden von uns eine Reihe von praktischen Versuchen durchgeführt, die in [1] veröffentlicht sind. Diese Messungen zeigen einen prinzipiell vergleichbaren Verlauf der Verzögerung über der Zeit bei allen durchgeführten Versuchen. Die Vorderradbremse wurde ausnahmslos eingesetzt.

In dieser Veröffentlichung wird, aufbauend auf den Versuchsergebnissen, ein mathematischer Ansatz entwickelt und ein Verfahren

vorgestellt, um eine hinreichend genaue Eingrenzung der bei der Bremsung abgebauten Geschwindigkeit zu ermöglichen.

2 Ablauf eines Bremsvorgangs im Versuch

In [1] wurden Versuche vorgestellt, die das Anstiegsverhalten und die maximalen Verzögerungswerte eines Fahrer/Fahrzeug-Kollektivs beschreiben. Allen Meßaufschrieben ist eine lange Schwelldauer gemeinsam; der Verzögerungszuwachs über der Zeit nimmt mit zunehmendem Verzögerungsniveau ab und es stellt sich allmählich ein Höchstwert ein, der von Fahrer zu Fahrer verschieden ist. In **Bild 1** ist das sich ergebende Verzögerungsband für Fahrer mit durchschnittlicher bis hoher Fahrerfahrung aufgetragen. Hier liegt die maximal erreichte Verzögerung zwischen rund 7 und 10 m/s².

Wie aus der forensischen Praxis bekannt ist, ereignen sich Kollisionen in der Regel in den ersten 2 s nach dem Verzögerungsbeginn. Damit übt der beschriebene, allmähliche Verzögerungsanstieg einen starken Einfluß auf den tatsächlichen Geschwindigkeitsabbau aus.

3 Regelkreismodell zum Bremsverhalten von Motorrädern

Der im Vergleich zur Pkw-Blockierbremsung langsame Anstieg der Verzögerung in den Bremsversuchen läßt sich mit Hilfe eines Regelkreismodells gemäß **Bild 2** erklären. Im Gegensatz zur Pkw-Blockierbremsung stellt das Erreichen einer hohen Bremsverzögerung mit einem Zweirad eine anspruchsvolle Regelaufgabe für den Regler »Mensch« dar. Die Regelaufgabe besteht darin, den angestrebten Sollwert der Verzögerung a_0 in möglichst kurzer Zeit zu erreichen. Eine Veränderung der Bremsverzögerung wird durch mechanische Stellbewegung an Bremshebel und Fußpedal erreicht, wobei der Erfolg der Stelleingriffe über die auf den Fahrer einwirkende Bremsverzögerung kontrolliert werden kann. Mit zunehmender Erfahrung kann vom Fahrer die Reibschlußausnutzung am Vorderrad auch über akustische Signale (Pfeifen an der Bremscheibe, Reifengeräusche) erfaßt werden. Da Vorder- und Hinterradbremse bei Motorrädern getrennt betätigt werden, enthält das Modell zwei getrennte Regelkreise für die Kraftschlußausnutzung an Vorder- und Hinterrad, in die der Kradfahrer mit unterschiedlichen Regelkonzepten eingreifen kann. In beiden Regelkreisen finden sich sog. Begrenzer, da der maximale Reibschlußbeiwert (Gleitreibwert) an keinem der beiden Räder überschritten werden kann. Vorder- und Hinterradregelkreis sind über ein nichtlineares Netzwerk gekoppelt, das die dynamische Radlastverlagerung darstellt.

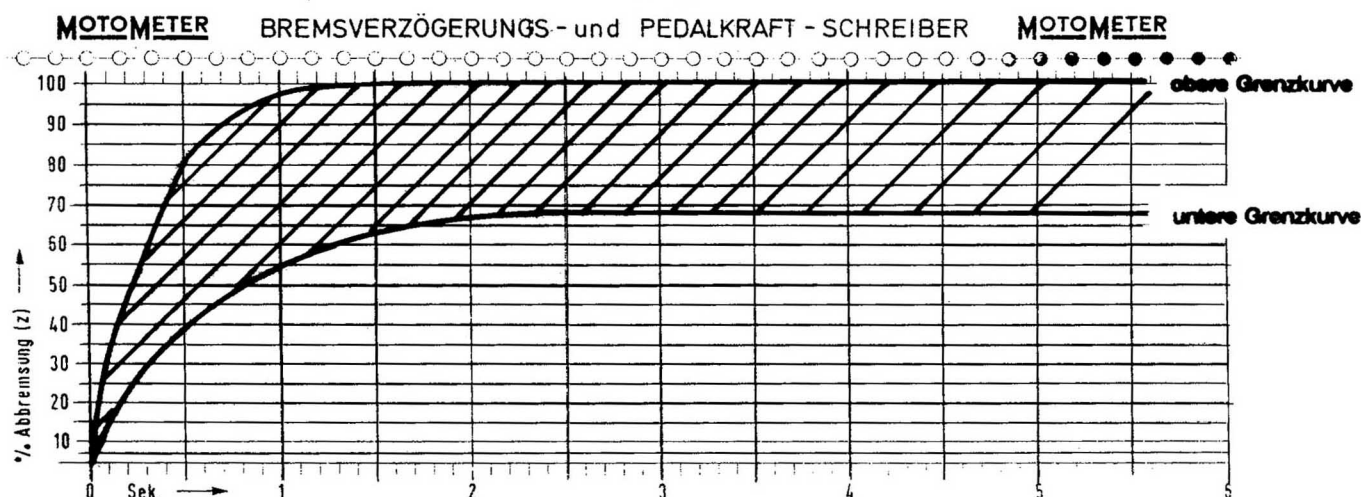


Bild 1 Gemessene Bremsverzögerung schwerer Motorräder, (42 Messungen), Fahrerfahrung: mittel bis hoch, getrennte Bremsanlagen vorne und hinten

*Dipl.-Ing. Michael Weber, Sachverständiger im Ingenieurbüro Schimmelpfennig und Becke, Münsterstr. 101, 4400 Münster

**Dipl.-Ing. Wolfgang Hugemann, Sachverständiger im Ingenieurbüro Schimmelpfennig und Becke, Münsterstr. 101, 4400 Münster

ober Grenzkurve: $a(t) = 10 (1 - \exp^{-\frac{t}{0,32}})$

unter Grenzkurve: $a(t) = 6,8 (1 - \exp^{-\frac{t}{0,6}})$

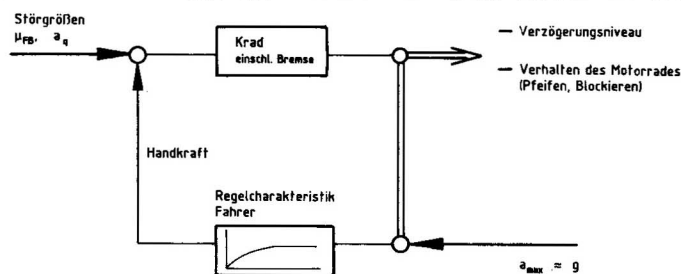


Bild 2 Regelkreis bei der Motorradbremsung

Den Begrenzern in den Regelkreisen kommt bei der Beschreibung des Streckenverhaltens eine entscheidende Bedeutung zu, da sie den Punkt markieren, an dem das jeweilige Rad in den Blockierzustand übergeht. Während das Hineinfahren in die Stellbegrenzung beim Hinterradregelkreis einen relativ geringen Einfluß auf die Fahrstabilität hat, ist das Erreichen der Begrenzung im Vorderradregelkreis mit dem sofortigen Verlust der Fahrstabilität verbunden und muß deshalb unter allen Umständen vermieden werden.

Zum Erreichen einer hohen Gesamtverzögerung geht der Fahrer in der Regel sinnvollerweise so vor, daß er möglichst schnell den Hinterradregelkreis in die Begrenzung fährt. Der Hinterradregelkreis wird dadurch »lahmgelegt«; der Reibschlußbeiwert am Hinterrad bleibt konstant und der Fahrer kann sich voll auf die kritische Regelaufgabe am Vorderrad konzentrieren. Verzichtet man auf eine genaue Beschreibung der kurzen Zeitspanne innerhalb derer beide Regelkreise geregelt werden, so kann man sich in der Beschreibung des Regelverhaltens auf einen einzigen Regelkreis gemäß Bild 3 beschränken.

Die Regelstrecke besteht in dem vereinfachten Modell nur aus einem proportionalen Übertragungselement, d.h. es wird davon ausgegangen, daß der Wert der Verzögerung linear proportional zur aufgebrachten Handkraft ist. Da das Erreichen der Begrenzung mit dem völligen Verlust der Fahrstabilität verbunden ist, wurde sie in das vereinfachte Regelmodell nicht übernommen.

Im Gegensatz zu üblichen technischen Reglern ist der Mensch ein adaptiver Regler, d.h. er paßt sich automatisch dem Streckenverhalten an und bewältigt die Regelaufgabe mit der Zeit zunehmend besser. In dem Modell drückt sich das dadurch aus, daß mit zunehmender Fahrpraxis der Sollwert a_0 ansteigt und sich das System dem Sollwert schneller nähert.

Das Ziel der Bremsversuche bestand aus regelungstechnischer Sicht nun darin, das Übertragungsverhalten des Systems Fahrer/Krad zu ermitteln. Dabei wurde dem System ein fester Sollwert, nämlich maximale Bremsverzögerung, vorgegeben. Die sogenann-

te Sprungantwort des Systems wurde mittels des Motometergerätes aufgezeichnet. Aus dem Verlauf der Sprungantwort kann man ein Systemmodell erstellen und die Werte der darin enthalten Parameter ermitteln. Die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens, das als parametrische Identifikation mittels determinierter Testsignale bezeichnet wird, ist begrenzt, da sich auf diesem Wege nur relativ einfache Systemmodelle erstellen lassen.

Da wir das Übertragungsverhalten der Regelstrecke im vorliegenden Fall als linear proportional voraussetzen, läßt sich aus dem identifizierten Verhalten der Gesamtstrecke auch das Regelverhalten des Fahrers ableiten.

Die Motometerschriebe zeigen, daß das Gesamtsystem »verzögernd-nachgebendes« Verhalten zeigt und damit durch die Übertragungsfunktion

$$G_{(s)} = \frac{1}{1 + ST} \quad (1)$$

beschrieben werden kann. Die Regler-Übertragungsfunktion G_R berechnet sich dann zu

$$G_{R(s)} = \frac{1}{G_{S(s)}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{1} - 1} \quad (2)$$

Mit dem Übertragungsverhalten der Strecke

$$G_{S(s)} = K_S \quad (3)$$

ergibt sich für das Regelverhalten des Krad-Fahrers

$$G_{R(s)} = \frac{1}{K_S} \cdot \frac{1}{ST} = \frac{K_I}{S} \quad (4)$$

Als Regelcharakteristik des Fahrers erhält man somit integrierendes Verhalten. Mit dieser Regelstrategie ist der Fahrer in der Lage, den vorgegebenen Sollwert exakt zu erreichen. Mit zunehmender Erfahrung wächst der Proportionalwert K_I des Reglers, was größere Stellausschläge und damit eine schnellere Annäherung an den angestrebten Sollwert zur Folge hat. Das stellt im Rahmen der einfachen Systemidentifikation ein akzeptables Modell für das adaptive Regelverhalten des Menschen beim Abbremsen von Zweirädern dar. Die funktionale Abhängigkeit der Verzögerung von der Zeit läßt sich also nicht nur empirisch aus den Messungen ableiten, sondern auch theoretisch untermauern.

4 Ablauf einer Panikbremsung

Es stellt sich jedoch die Frage, ob das unter Versuchsbedingungen nachgewiesene Regelverhalten auf die Paniksituation vor einem

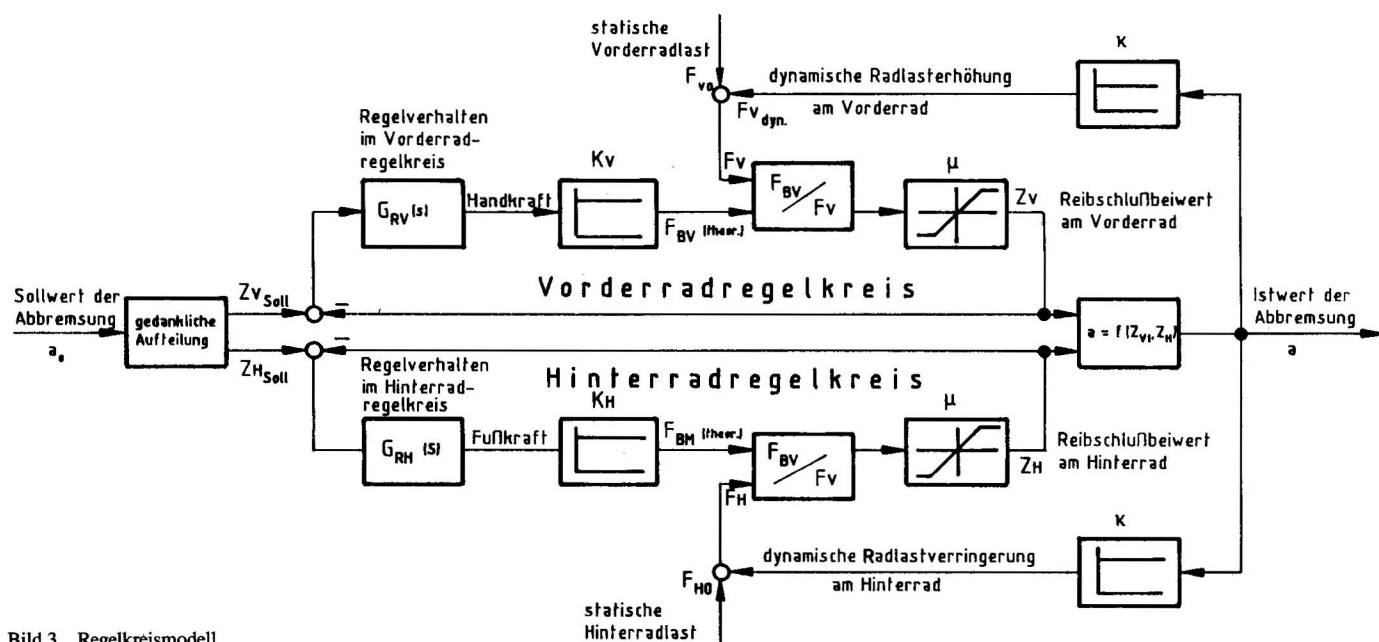


Bild 3 Regelkreismodell

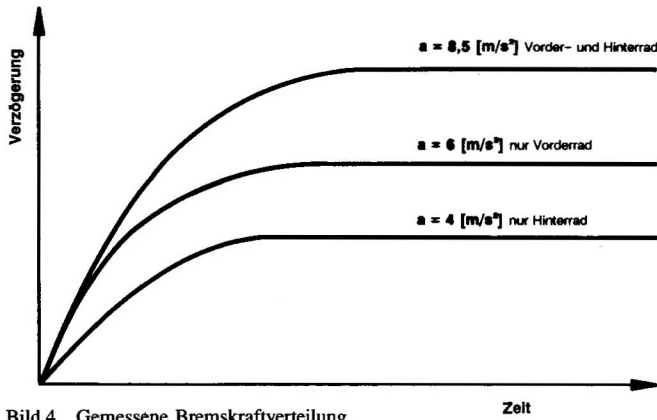


Bild 4 Gemessene Bremskraftverteilung

Verkehrsunfall übertragen werden kann. Ob die Vorderradbremse überhaupt eingesetzt wurde, läßt sich aus dem Spurenbild nur dann ableiten, wenn Brems/Blockierspuren von beiden Rädern vorhanden sind. Liegt dagegen nur eine Spurzeichnung des Hinterrades oder sogar überhaupt keine Spurzeichnung in der sich aus weg-/zeitmäßigen Überlegungen ergebenden Bremsdauer vor, so wird sich eine Bremsbetätigung und insbesondere eine Betätigung der Vorderradbremse nicht eindeutig nachweisen lassen.

Die Auswertung von Zweiradkollisionen zeigt aber in überraschend vielen Fällen auf den letzten Metern vor der Kollision Blockierspuren des Vorderrades, die oftmals noch vor dem Aufprall sturzauslösend sind. Für diese Fälle läßt sich also der Beweis führen, daß die Vorderradbremse von Motorradfahrern auch in Paniksituationen eingesetzt wird.

In **Bild 4** sind die mit einer BMW R 100 beim Einsatz der Vorder- und Hinterradbremse und beim kombinierten Einsatz der beiden Bremsen von einem Durchschnittsfahrer erreichten Verzögerungswerte aufgetragen. Dieser Bremsversuch zeigt anschaulich das sich aus der dynamischen Achslastverlagerung ergebende unterschiedliche Verzögerungsniveau beim Einsatz der Vorder- und Hinterradbremse. Das erreichbare Niveau mit der Hinterradbremse ist verhältnismäßig gering und liegt nur wenig über dem durch Betätigung der Handbremse erzielbaren Verzögerungsniveau bei Pkw. Deshalb setzt der Kradfahrer in »normalen« Fahr Situationen überwiegend die Vorderradbremse ein, die zudem leichter dosierbar ist und nicht bereits bei geringen Verzögerungen zum Blockieren neigt. Wie außerdem Gespräche mit Motorradfahrern zeigen, wird der kombinierte Einsatz von beiden Bremsen mit dem Ziel optimaler Abbremsung zumindest von den sportlich ambitionierten Fahrern ständig trainiert. Auch hier laufen ähnlich wie beim Pkw-Fahrer Handlungsmuster im Automatismus ab, die in der Regel auch in einer Paniksituation zum Einsatz kommen.

Bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen sollte vom Sachverständigen auf die Problematik hingewiesen werden. Wie die Rechtsprechung hoher Gerichte zeigt, besteht z.Zt. ein Bestreben, hier ähnlich wie bei der Eingrenzung der Reaktionsdauer das theoretisch mögliche Toleranzband auf realitätsnahe Werte zu reduzieren. Die vorliegende Veröffentlichung soll ein Beitrag zu dieser Diskussion darstellen.

5 Diskussion verschiedener Lösungsansätze

Zur Beschreibung des tatsächlichen Bremsverhaltens im Versuch wurden zunächst verschiedene Ansätze diskutiert. Der »Hyperbelansatz«, der sich für die Geschwindigkeitsrückrechnung auf nasser Fahrbahn bewährt hat [2], läßt sich nicht hinreichend genau dem tatsächlichen Verzögerungsverlauf anpassen. Eine Auflösung nach der Zeit läßt sich für die Wegfunktion nicht durchführen. Mit dem hyperbolischen Ansatz ist die zweite Integration nur durch eine Reihenentwicklung darstellbar. Dieser Ansatz wurde deshalb verworfen.

Als dritte Möglichkeit kann der Verzögerungsverlauf durch eine Exponentialfunktion folgender Form beschrieben werden.

$$a(t) = - \frac{dv}{dt} = a_0 (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (5)$$

T = Anstiegsverhalten

a_0 = stationärer Verzögerung

Die Größe T beschreibt das Anstiegsverhalten der Verzögerung. Sie ist im wesentlichen von der Fahrerfahrung des Fahrers abhängig. Das erreichbare Maximum der Verzögerung a_0 wird von der Reibpaarung Motorradreifen/Fahrbahnoberfläche, der konstruktiven Gestaltung der Bremsanlage und von der Fahrerfahrung beeinflusst. Als Anhaltswert können die in [1] veröffentlichten Versuchswerte dienen. Für die in Bild 1 beschriebene Versuchsreihe wurden die Größen T und a_0 bestimmt:

T = 0,32 (steil) bis 0,6 s (flach)

a_0 = 6,8 m/s² bis 10 m/s²

Mit diesen Werten lassen sich die Meßaufschriebe in Bild 1 durch die o.g. Exponentialfunktion [5] exakt reproduzieren.

In **Bild 5** sind die Funktionsverläufe der Verzögerung $a(t)$ über der Bremsdauer für Werte von T zwischen 0,2 s und 0,8 s angegeben. In diesem Intervall liegen alle von uns durch Versuche festgestellten Verläufe. In der Tabelle 6 sind die Wertepaare für sämtliche gemessenen Zweiradtypen aufgelistet. Die vorgestellten Werte können noch durch weitere Versuche abgesichert und ergänzt werden.

Die Integration der Gl. [5] führt auf den Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit, wobei der Zeitpunkt $t = 0$ zu Beginn der Abbremsung liegt. Zu diesem Zeitpunkt besitzt das Motorrad die Ausgangsgeschwindigkeit v_0 .

$$v_0 \int_0^t dv = \int_0^t a(t) \cdot dt \quad (6)$$

$$v(t) = -a_0 T \left(\frac{t}{T} + e^{-\frac{t}{T}} - 1 \right) + v_0 \quad (7)$$

$$\text{Mit } \bar{a}(t) = \frac{v(t) - v_0}{t} \quad (8)$$

erhält man den mittleren Verzögerungsverlauf über der Zeit. Für die aus Bild 1 ermittelte untere Grenzkurve wurde diese Funktion in **Bild 6** grafisch dargestellt. Es wird deutlich, daß die mittlere

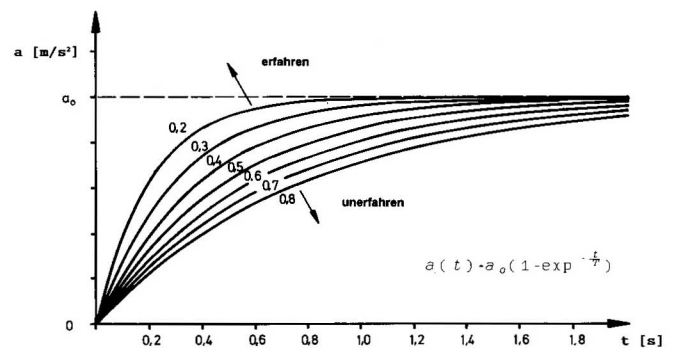


Bild 5 Anstiegsverhalten T beim Exponentialansatz

Art	untere Grenze		obere Grenze	
	a_u [m/s ²]	T_u [s]	a_o [m/s ²]	T_o [s]
schwere Kräder	6,8	0,6	10	0,32
Anfänger	4,7	0,3	6	0,25
Integralbremse	8,5	0,4	10	0,22
Kleinkrafträder	5,3	0,25	9,3	0,3
Gespanne (Seitenwagen ungebremst)	4,3	0,5	5,3	0,2

Bild 6 Anhaltswerte aus den Versuchen

Verzögerung $a(t)$ für geringe Bremszeiten deutlich unter der momentan wirkenden Verzögerung $a(t)$ liegt. So ergibt sich bei einer Bremsdauer von 1 s nur eine mittlere Verzögerung von 3,5 m/s², obwohl die maximale Verzögerung bei 6,8 m/s² liegt.

Die Gleichung [7] zeigt aber, daß der tatsächliche Verzögerungsverlauf von der im Rahmen der Unfallrekonstruktion erst zu ermittelnden Bremsanfangsgeschwindigkeit abhängt. Da außerdem die Bremszeit in Gleichung [7] nicht bekannt ist, führt diese Gleichung allein nicht zum Ziel.

Die zweite Integration ergibt den Weg-/Zeitverlauf der Abbremsung

$$s_{(t)} = \int_0^t v_{(t)} \cdot dt \tag{9}$$

$$s_{(t)} = v_o \cdot t - a_o \left(\frac{1}{2} t^2 - T^2 \cdot e^{-\frac{t}{T}} + T^2 - T \cdot t \right) \tag{10}$$

Die Gl. [7] und [10] sind leider nicht nach der Zeit auflösbar. Damit kann eine geschlossene Lösung für den Geschwindigkeitsverlauf über der Strecke nicht angegeben werden. Eine Verarbeitung der Gleichungen mit Hilfe eines Rechners oder grafischer Verfahren ist jedoch möglich. Im folgenden werden beide Lösungen vorgestellt.

Fortsetzung folgt ■

Veranstaltungshinweis Crash-Tests im Hinblick auf Versicherungsbetrügereien

Weiterbildungsseminar am 10.5.1990 in Münster
Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke.
Das Auftreten von Zweitkollisionen und die dazugehörigen Beschädigungen zeigen, daß es nicht damit getan ist, die Schäden an einem Fahrzeug im statischen Zustand zuzuordnen. Durch Rekonstruktion des Unfallablaufs ist die Dynamik der Fahrzeuge bei der Kollision nachzuvollziehen. So mancher »Versicherungsbetrug« ist dann schließlich keiner mehr.
Bei Streifkollisionen entlang einer Fahrzeugseite bedarf die Zuordnung von Streifschäden einer kritischen Bewertung. Bei entsprechend vorgeführten Versuchen wurde demonstriert, daß sich durch Wankbewegungen der Fahrzeugaufbauten wellenförmige Streifschäden ausbilden können. Auch können kreuzende Kontaktpuren entstehen, wenn beispielsweise beim Übergang von weichen Kontaktzonen (Türfläche) auf harte Bereiche (A- oder B-Säule)



Bild 1 VW-Golf 44 km/h, 100% Überdeckung auf das Heck des stehenden Trabant