

Wolfgang Hugemann*, Frank Lange**

Neue Untersuchungsergebnisse

zum Bremsverhalten

von Motorradfahrern

Zusammenfassung

Der Aufsatz stellt die Ergebnisse einer Versuchsreihe vor, in der 18 Motorradfahrer die Aufgabe gestellt wurde, aus vorgegebener Fahrgeschwindigkeit innerhalb kürzester Strecke bis zum Stillstand abzubremesen. Dabei wird die Bandbreite des Bremsvermögens verschiedener Fahrer ermittelt. Die Ergebnisse werden im Hinblick auf eine Anwendung in der forensischen Unfallrekonstruktion diskutiert.

Summary

This paper presents the results of an investigation on the braking-performance of 18 motorcyclists. The experimentees were set with the task of decelerating their motorcycles from a given velocity to stillstand within the smallest distance possible. By means of the tests the breaking-skill of different motorcyclists is evaluated. The results are discussed with regard to the application in forensic accident-reconstruction.

1 Einleitung

Das Bremsverhalten eines Pkw-Fahrers läßt sich bei vorhandenem Spurbild in engen Grenzen rekonstruieren. Sowohl bei der Wahl der Blockierverzögerung als auch bei dem unterstellten Anstiegsverhalten der Verzögerung kann sich der Sachverständige auf eine Reihe von Untersuchungen stützen, so daß wenig Diskussionsspielraum verbleibt. Der Ablauf einer Panikbremsung bewegt sich bei allen Fahrern in einem einheitlichen Verhaltensmuster, bei dem das Bremspedal mit nahezu unkontrollierter Kraft betätigt wird, bis zumindest die Räder der Vorderachse in den Blockierzustand versetzt werden. Das Anstiegsverhalten der Verzögerung ist hauptsächlich durch mechanische Vorgänge wie den Druckanstieg im Bremssystem bestimmt.

Für den Zweiradfahrer ist die Notbremssituation hingegen ungleich komplexer. Bei der Aufgabe, seine Fahrgeschwindigkeit auf gegebener Wegstrecke möglichst weit zu reduzieren, kann er sich nicht blindlings auf die Eigenstabilität seines Fahrzeugs verlassen, da diese auf den Kräftefeldern der sich drehenden Räder beruht. Der Zweiradfahrer ist auch in der Notsituation zu kontrolliertem Verhalten gezwungen, da ein blockiertes Vorderrad unweigerlich zum Sturz führt. Das Anstiegsverhalten der Verzögerung und ihr Maximalwert werden damit nicht durch mechanische Vorgänge, sondern durch die (Brems-) Fertigkeit des Fahrers bestimmt, sind also viel stärker durch die Individualität des Fahrers geprägt als bei der Vollbremsung mit einem Pkw.

Auch wenn die Abwehrzeiten nachweisbar lang sind, werden von Zweirädern oftmals nur kurze Blockierspuren gezeichnet. Längere Spurzeichnungen stammen in der Regel vom Hinterrad des Fahrzeugs, wobei oftmals kurz vor der Kollision eine doppelte Spurzeichnung mit zusätzlich überbremsen Vorderrad beobachtet wird.

Die vorliegende Untersuchung soll helfen, das Verzögerungsverhalten von Zweiradfahrern auf der Grundlage umfangreicher Messungen besser als bisher eingrenzen zu können.

2 Vorgehensweise

In zwei früheren Veröffentlichungen [1, 2] wurde, auf der Grundlage von etwa 40 einzelnen Bremsversuchen, eine Systematik zur Beschreibung

*Dipl.-Ing. Wolfgang Hugemann, Sachverständiger im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstr. 101, 4400 Münster-Wolbeck
**Cand.-Ing. Frank Lange, Lönssstr. 1, 3057 Neustadt 1

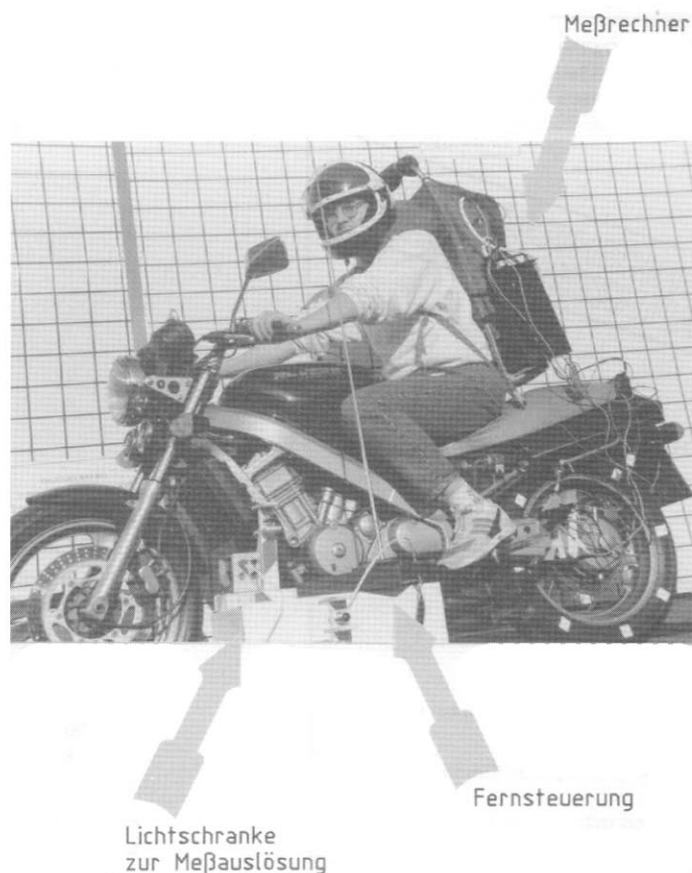


Bild 1 Lichtbild von den Komponenten des Versuchsaufbaus
Fig. 1 Photograph showing the components of the measuring equipment

des Bremsverhaltens von Zweiradfahrern entwickelt. Aufbauend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit [3] am Institut für Kraftfahrwesen der Universität Hannover (Prof. Dr. Ing. habil R. Weber) weitere Versuche mit verbesserter Meßtechnik durchgeführt.

Mit einem Kollektiv von 18 Fahrer(inn)en wurden auf 15 verschiedenen schweren Motorrädern insgesamt 74 Einzel-Bremsungen durchgeführt. Wie die genannten Zahlenwerte bereits nahelegen, wurden die Bremsversuche, von drei Ausnahmen abgesehen, jeweils mit der eigenen Maschine unternommen. Nur so konnte sichergestellt werden, daß die Fahrer voll an das Bremsverhalten des Motorrades adaptiert waren. Das Fahrerkollektiv umfaßte dabei das gesamte Spektrum möglicher Fahrerfahrung (unter 20.000 bis über 130.000 Gesamtkilometer). Die Versuche erfolgten etwa in der Mitte der Fahrsaison bei trockenem Wetter auf asphaltiertem Untergrund. Die Aufgabe bestand stets darin, aus zunächst konstanter Fahrgeschwindigkeit von etwa 50 km/h auf minimaler Strecke zum Stillstand zu kommen.

3 Meßtechnik

Die Forderung, daß die Bremsversuche jeweils auf der eigenen Maschine unternommen werden sollten, machte eine mobile Meßtechnik erforderlich, vgl. Bild 1. Bei den Versuchen kam ein Meßwerterfassungssystem zum Einsatz, das die Fahrer in einem Gestellrucksack bei sich trugen. Die Sensorik umfaßte zwei Beschleunigungssensoren, ein Fadenpotentiometer, das die Eintauchbewegung an der Vorderradgabel erfaßte und eine Reflexionslichtschranke, die die Drehbewegung des Hinterrades abtastete. Die Messung wurde beim Durchfahren einer Lichtschranke per Fernsteuerung automatisch getriggert, die Fahrer waren also in der Wahl des Bremsbeginns weitestgehend frei. Die Positionierung der Beschleunigungssensoren wurde anfänglich mehrfach geändert. Am geeignetsten erwies sich eine Montage an der Vorderradgabel und auf der Hinterradschwinge kurz hinter ihrer Lagerung im Hauptrahmen. Der an der Vorderachse montierte Beschleunigungsaufnehmer diente dabei zur Festlegung des Bremsbeginns, da er auf die am Vorderrad einwirkende Bremsmomente äußerst empfindlich rea-

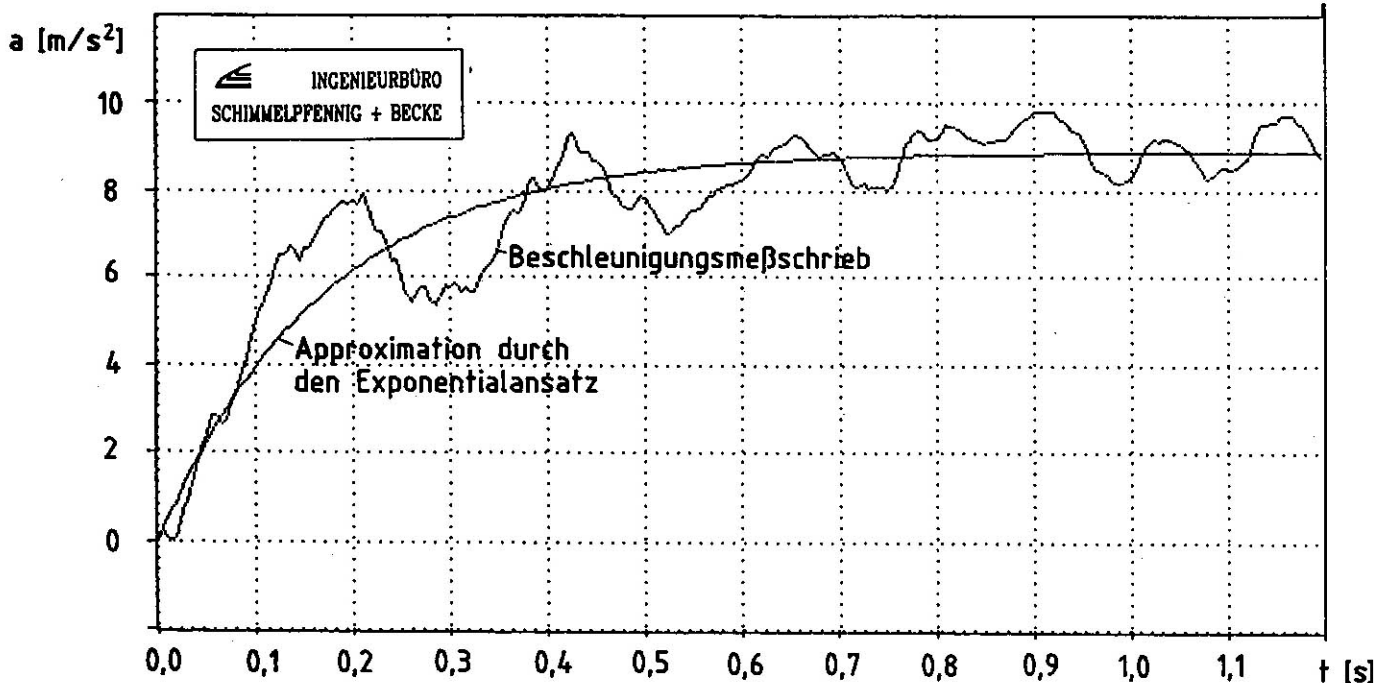


Bild 2 Beschleunigungs-Meßschrieb und Approximation durch den Exponentialansatz

Fig. 2 Original acceleration plot and approximation by an exponential function

gierte. Der zweite Beschleunigungsaufnehmer hingegen erfaßte die Schwerpunktsverzögerung des Zweirades, wobei er durch den gewählten Montageort von der Nickbewegung des Zweirades weitestgehend unbeeinflusst blieb. Das Erfassen der Eintauchbewegung an der Vorderadgabel ermöglichte die Kompensation von bei der Beschleunigungsmessung einkoppelnden Komponenten der Erdbeschleunigung. Über die Reflexlichtschranke konnte die Drehbewegung des Hinterrades erfaßt und damit Rückschlüsse auf die Regelstrategie des Fahrers an der Hinterachse gezogen werden.

4 Auswertung

Bewirkte die Tiefpaßcharakteristik des Motometers in den vorausgegangenen Versuchen [1] einen verhältnismäßig ausgeglichenen Verlauf der Beschleunigung, so stiftet die größere zeitliche Auflösung der elektronischen Beschleunigungsaufnehmer zunächst eher Verwirrung, vgl. Bild 2. Bei der Strukturierung der Meßergebnisse erwies sich der bereits entwickelte Exponentialansatz [2] als sehr hilfreich. Der Verzögerungsverlauf kann demnach durch die Funktion

$$a(t) = a_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (1)$$

beschrieben werden. Der statische Übertragungsbeiwert a_0 ist mit dem Maximalwert der Verzögerung identisch. Die Zeitkonstante T beschreibt das Anstiegsverhalten der Verzögerung. Große Werte der Zeitkonstanten entsprechen einem allmählichen Anstieg der Verzögerung, kleine Werte der Zeitkonstanten einem steilen Anstieg.

Für jeden aufgezeichneten Beschleunigungsmeßschrieb wurden die Parameter a_0 und T der Musterfunktion Gl. (1) derart angepaßt, daß maximale Übereinstimmung erreicht wurde. Der Begriff »maximale Übereinstimmung« wurde dabei mathematisch durch das Gütefunktional

$$\begin{aligned} G(a_0, T) &= \left| \int_0^{t_e} [a_{\text{mess}}(t) - a_0 (1 - e^{-\frac{t}{T}})] dt \right| \\ &= \left| \int_0^{t_e} [a_{\text{mess}}(t) - a(t)] dt \right| \end{aligned} \quad (2)$$

repräsentiert. Bewußt wurde dabei die einfache, vorzeichenbehaftete, lineare Bewertung des Abstandes gewählt. In diesem Fall ist die Differenz zwischen der tatsächlichen und der mit dem Exponentialansatz berechneten Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_e am geringsten. Alternativ kam auch das »klassische« quadratische Gütefunktional [4]

$$G^*(a_0, T) = \int_0^{t_e} [a_{\text{mess}}(t) - a(t)]^2 dt \quad (3)$$

zum Einsatz, das für eine geschlossene mathematische Behandlung geeigneter ist. Die Unterschiede zwischen den auf Grundlage unterschiedlicher Gütefunktionalen bestimmten Parameterkombinationen a_0 und T sind in der Regel gering.

5 Ergebnisse

5.1 Anstiegsverhalten und Maximalwert der Verzögerung

Ein kurzer Bremsweg wird durch einen möglichst hohen Maximalwert der Verzögerung und einen möglichst steilen Verzögerungsanstieg erreicht. Für den einzelnen Fahrer sind diese beiden Forderungen nicht gleichzeitig zu erfüllen. Die Grenzen der individuellen Leistungsfähigkeit führen dazu, daß mit einem Anstieg der Maximalverzögerung auch ein Anstieg der Schwellzeit verbunden ist, Bild 3. Bei gegebener Bremsausgangsgeschwindigkeit gibt es jeweils eine Kombination der beiden Parameter a_0 und T , die zum minimalen Bremsweg führt.

Abhängig von der Fahrerfahrung ließen sich die Probanden vier Gruppen von jeweils vier bis fünf Fahrern zuordnen. Das Bild 4 zeigt den statischen Endwert der Verzögerung unterteilt nach den vier Gruppen. Aufgetragen sind jeweils die Mittelwerte für den schlechtesten und besten Fahrer sowie für die gesamte Gruppe. Mit wachsender Fahrerfahrung ist ein Anstieg des Verzögerungsniveaus und eine Nivellierung des Leistungsunterschiedes zwischen den einzelnen Fahrern zu beobachten.

Der Wert der Zeitkonstanten, Bild 5, ist demgegenüber von der Fahrerfahrung nahezu unabhängig. Hier ist mit wachsender Fahrerfahrung zunächst eine geringfügige Abnahme der Zeitkonstanten zu verzeichnen. Bei langjähriger Fahrerfahrung wird die Zeitkonstante dann zugunsten eines höheren Maximalwertes der Verzögerung vergrößert. Wie Modellrechnungen zeigen, ist dies bei der im Versuch gestellten Aufgabe die richtige Regelstrategie. Auch bei den Zeitkonstanten ist, ähnlich wie bei den Maximalverzögerungen mit steigender Fahrerfahrung eine Ni-

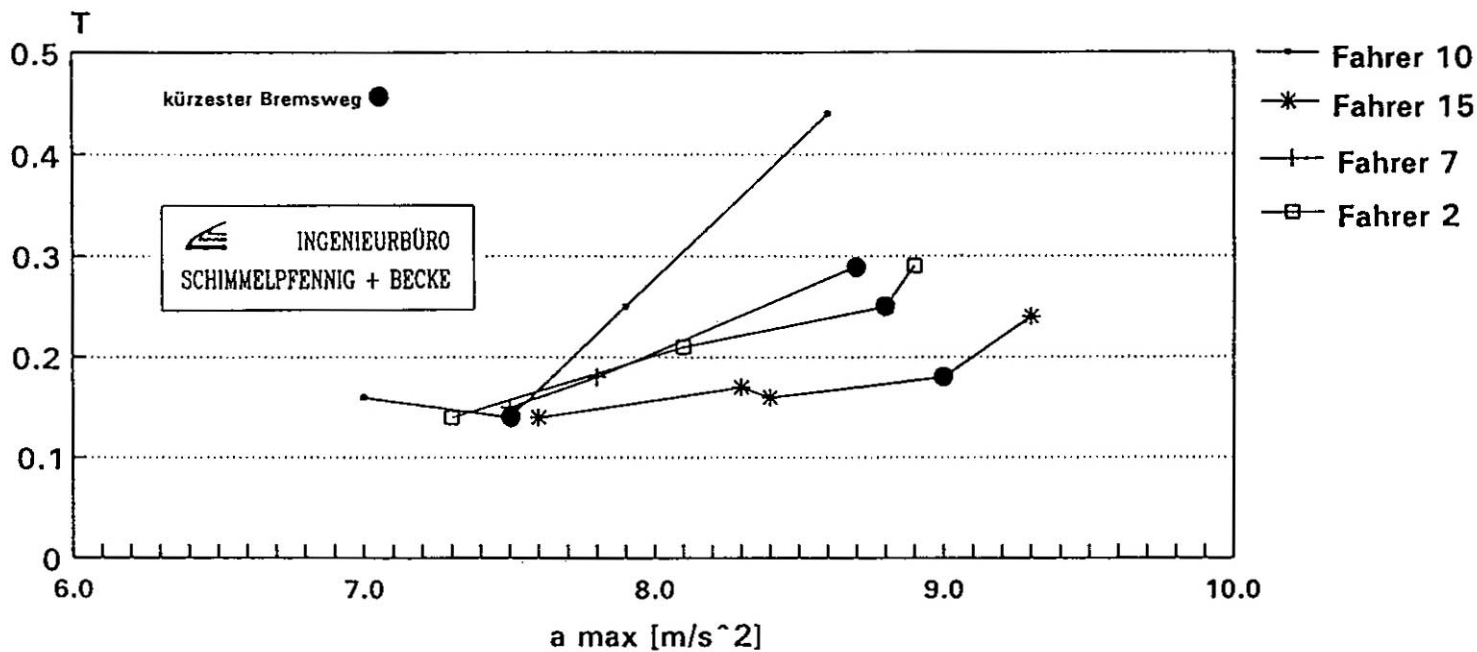


Bild 3 Wechselseitige Abhängigkeit von Maximalverzögerung und Zeitkonstante für verschiedene Versuchspersonen

Fig. 3 Interdependence of maximum deceleration and time constant for different experimentees

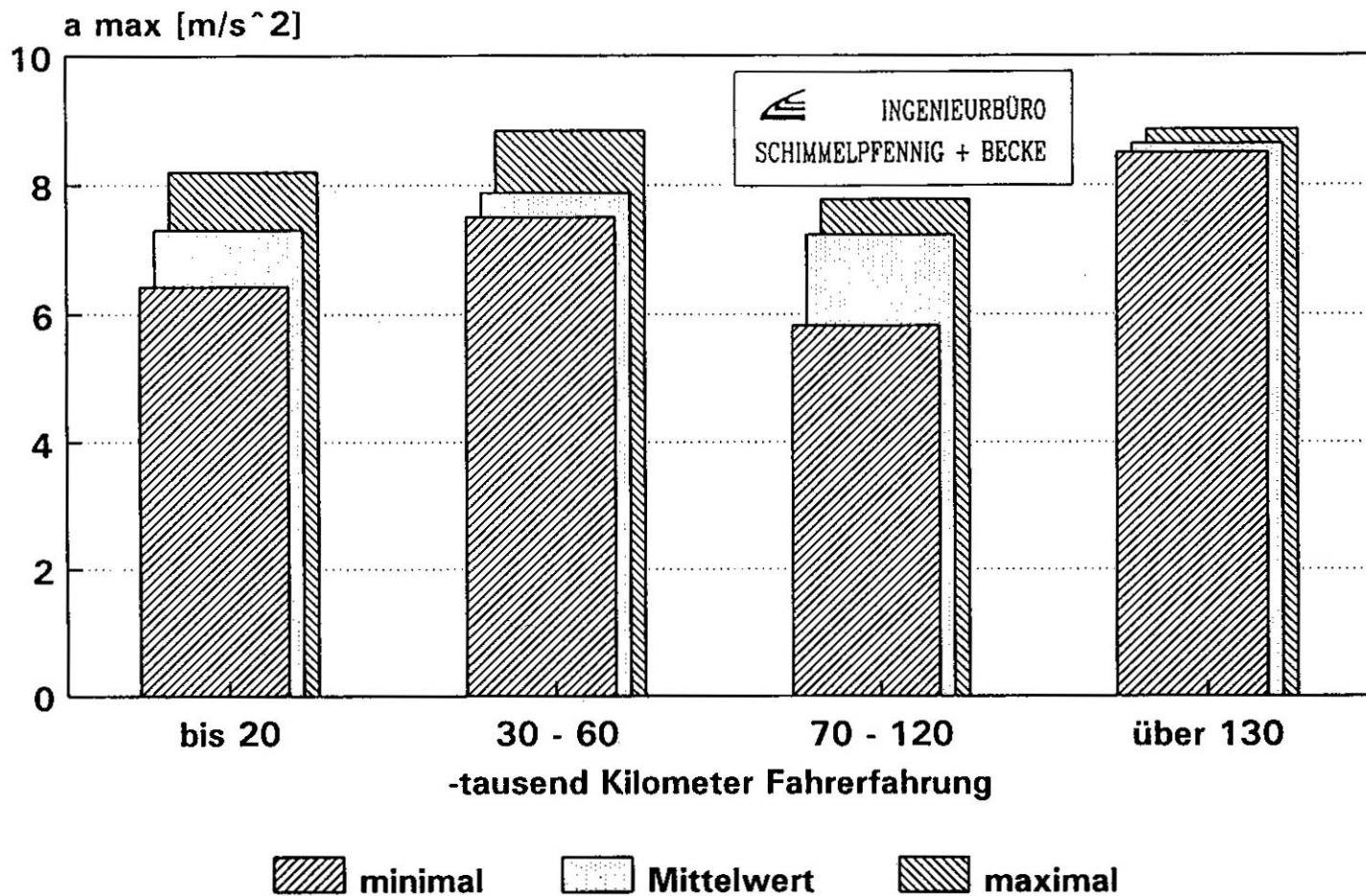


Bild 4 Einfluß der Fahrerfahrung auf die Maximalverzögerung

Fig. 4 Influence of driving-experience on the maximum deceleration

T-Faktor

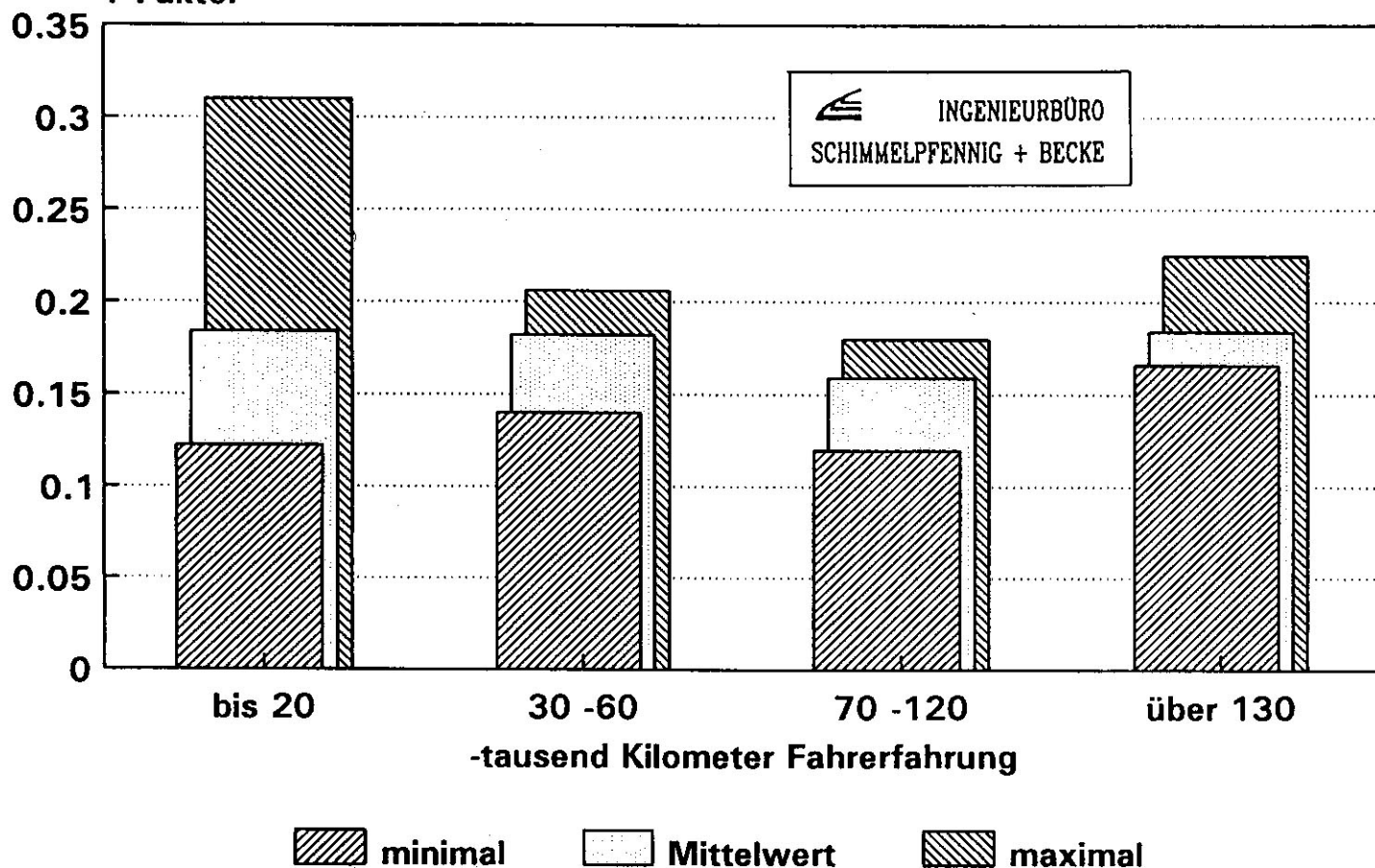


Bild 5 Einfluß der Fahrerfahrung auf die Zeitkonstante

Fig. 5 Influence of driving-experience on the time-constant

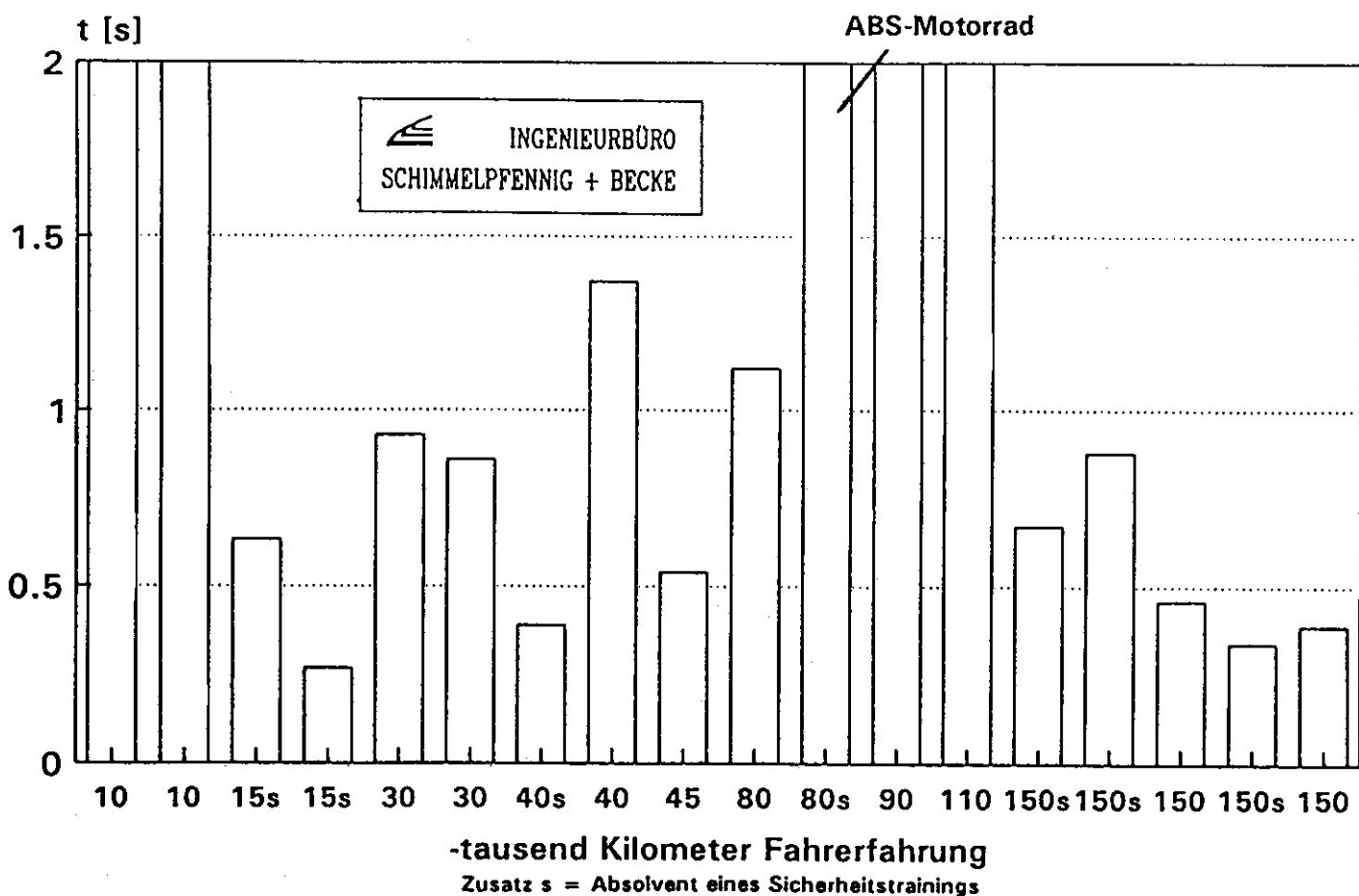


Bild 6 Mittlere Zeitdauer vom Bremsbeginn bis zum Blockieren des Hinterrades

Fig. 6 Mean time-interval between start of deceleration and blocking of rear-wheel

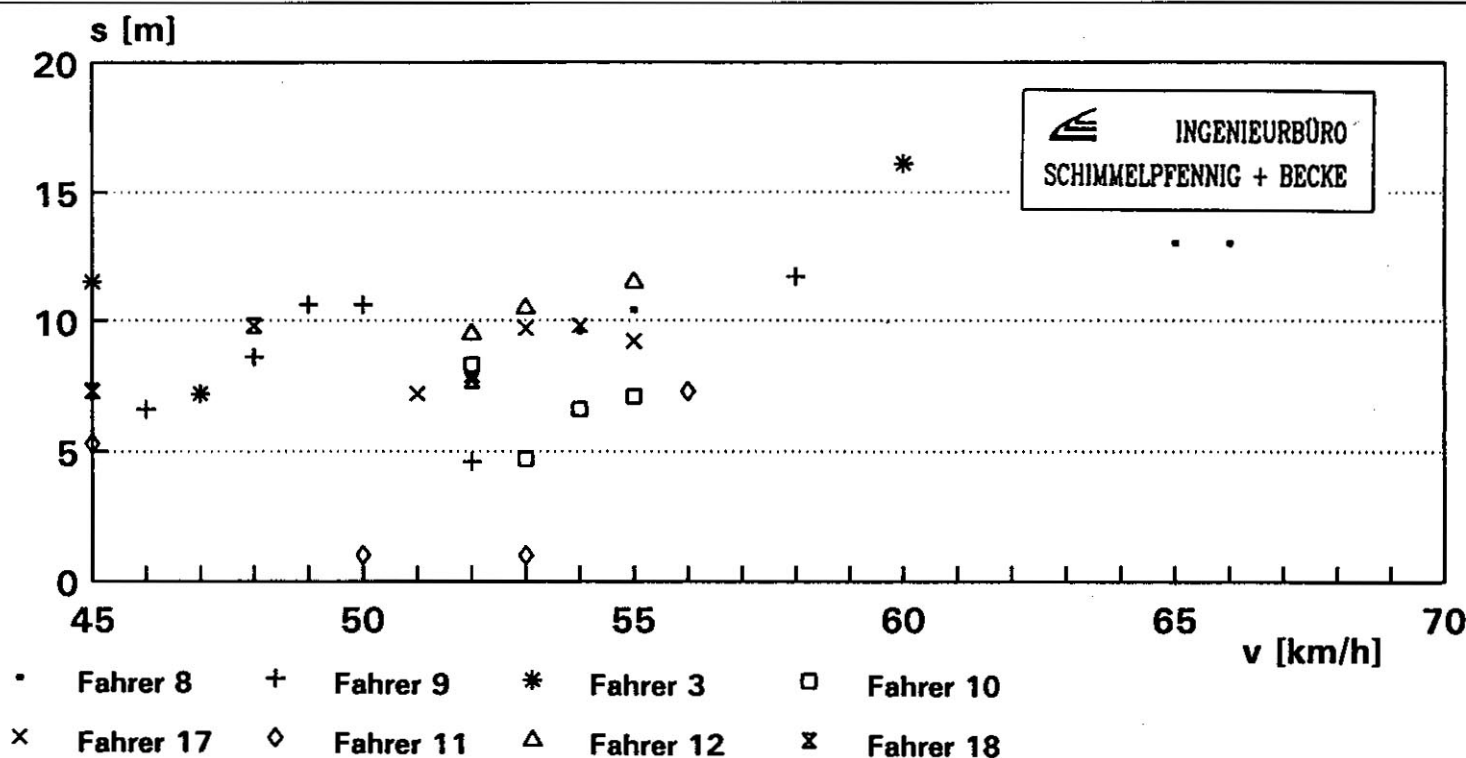


Bild 7 Länge der Blockierspur in Abhängigkeit vor der Bremsausgangsgeschwindigkeit

Fig. 7 Length of tire-mark versus original velocity

Ausgangsgeschwindigkeit	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h
Bremsweg					
Obergrenze	5,0 m	8,4 m	12,7 m	17,8 m	23,8 m
Untergrenze	8,0 m	13,4 m	20,0 m	27,9 m	37,1 m
Anhalteweg					
Obergrenze	10,0 m	15,1 m	21,0 m	27,8 m	35,5 m
Untergrenze	13,0 m	20,0 m	28,3 m	37,9 m	38,7 m
mittlere Verzögerung					
Obergrenze	6,9 m/s ²	7,3 m/s ²	7,6 m/s ²	7,8 m/s ²	7,9 m/s ²
Untergrenze	4,3 m/s ²	4,6 m/s ²	4,8 m/s ²	5,0 m/s ²	5,1 m/s ²

Obergrenze: $a_0 = 9 \text{ m/s}^2$, $T = 0,15 \text{ s}$ Untergrenze: $a_0 = 6 \text{ m/s}^2$, $T = 0,3 \text{ s}$

Bild 8 Ober- und Untergrenze von Brems- und Anhalteweg aus verschiedenen Geschwindigkeiten

Fig. 8 Upper and lower limit of breaking- and stopping distance for different velocities

vellierung des Leistungsunterschiedes zwischen verschiedenen Fahrern festzustellen.

5.2 Hinterradblockierspur

Bei einer Vollbremsung mit einem Zweispurfahrzeug setzt die Spurzeichnung der Vorderräder am Ende der Bremsschwellphase ein, wenn das Vollverzögerungsniveau nahezu erreicht ist. Die Schwellzeit, innerhalb der die Bremsverzögerung annähernd linear ansteigt, ist mit 0,2 s Dauer relativ kurz.

Zumindest längere Blockierspuren eines Zweirades stammen hingegen vom Hinterrad. Durch die getrennten Betätigungseinrichtungen für Vor-

der- und Hinterradbremse gibt es keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Verzögerungsniveau und einsetzender Spurzeichnung. Bei Zweirädern ist die dynamische Radlastverlagerung infolge des kurzen Radstandes erheblich größer als bei Pkw. Bei hohen Verzögerungen wird der Grad der Abbremsung beim Zweirad deshalb nahezu ausschließlich durch das Bremsmoment an der Vorderachse bestimmt. Speziell bei sportlich ambitionierten Fahrern kommt dem Einsatz der Hinterradbremse deshalb im normalen Fahrbetrieb untergeordnete Bedeutung zu, der Fahrer konzentriert sich voll auf die wesentlich leistungsfähigere Vorderradbremse. Der Einsatz der Hinterradbremse führt bei Vollverzögerung aufgrund der enormen Entlastung des Hinterrades nahezu

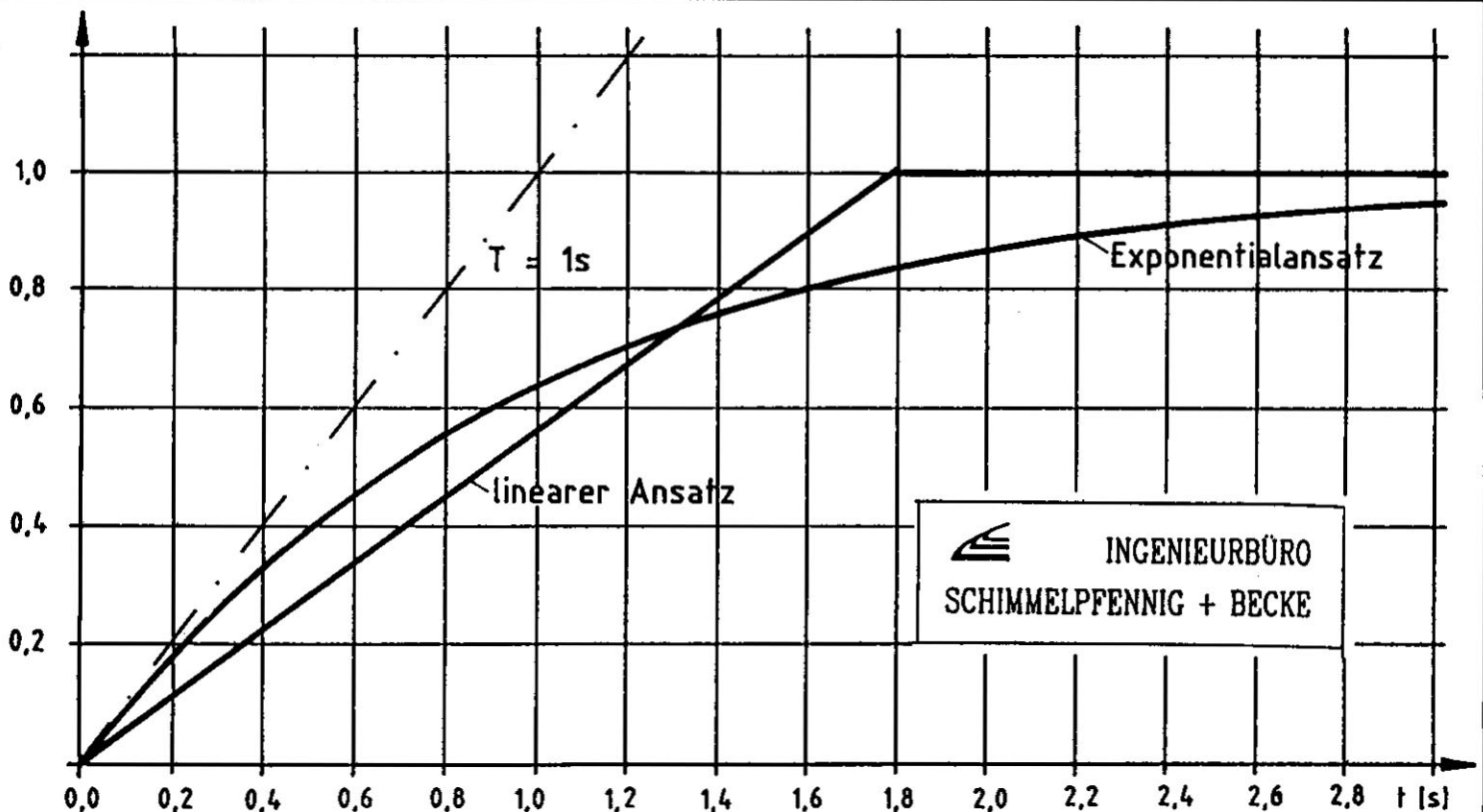


Bild 9 Exponentiell abnehmender und linearer Anstieg im direkten Vergleich

Fig. 9 Direct comparison of exponential degressive and linear rising

zwangsweise zum Blockierzustand. Nur in Extremsituationen rechtfertigt die geringfügige Erhöhung des Verzögerungsniveaus die damit verbundenen Einbußen an Fahrstabilität. Im Rahmen von Sicherheitstrainings wird deshalb bewußt der Einsatz der Hinterradbremse trainiert, um das zusätzliche Verzögerungspotential in Extremsituationen ausnutzen zu können.

Das Bild 6 zeigt die mittlere Zeitspanne zwischen Bremsbeginn und Blockieren des Hinterrades für die einzelnen Fahrer. Auch hier lassen sich drei Gruppen mit unterschiedlichen Regelstrategien erkennen. Die Fahrer der ersten Gruppe bringen das Hinterrad bereits am Anfang des Bremsvorgangs in den Blockierzustand. Den Gegenpol bilden die Mitglieder der zweiten Gruppe, die ihr Zweirad bis zum Stillstand abbremsen, ohne daß das Hinterrad blockiert. Die Regelstrategie in der dritten Gruppe liegt zwischen den beiden Extremen, die Hinterradbremse wird in dieser Gruppe erst zum Einsatz gebracht, wenn die Fahrgeschwindigkeit so weit reduziert ist, daß ein eventueller Sturz weniger Risiken birgt.

Das Bild 7 illustriert, daß unter dieser Voraussetzung keine eindeutige Abhängigkeit zwischen der Länge der Blockierspur und der Bremsausgangsgeschwindigkeit bestehen kann.

6 Vergleich mit früheren Versuchsergebnissen

Der Schwankungsbereich der in den Versuchen ermittelten Parameter liegt für die Maximalverzögerung a_0 bei 6,0 bis 9,0 m/s² für die Zeitkonstante T bei 0,15 bis 0,30 s. In früheren Versuchen [1, 2] waren für die Maximalverzögerung Werte von 6,8 bis 10,0 m/s² und für die Zeitkonstante Werte von 0,32 bis 0,60 s ermittelt worden. Was den Wert der Maximalverzögerung betrifft, so ist die Diskrepanz offensichtlich darin begründet, daß die Bremsverzögerung in den früheren Versuchen mit einem Motometergerät ermittelt wurde, so daß kein vollständiger Ausgleich des Nickwinkels möglich war. Die höheren gemessenen Werte der Bremsverzögerung beruhen auf einem teilweisen Einkoppeln der Erdbeschleunigung in die Verzögerungsmessung.

Gravierender sind jedoch die Abweichungen bei der ermittelten Zeitkonstanten. Bei der retrospektiven Wertung der früheren Versuchsreihe mußte festgestellt werden, daß damals offensichtlich ein Instruktionsfehler vorlag, indem die Probanden lediglich dazu aufgefordert wurden, eine möglichst hohe Bremsverzögerung zu erreichen. Das Bild 2 zeigt,

daß das Erreichen einer möglichst hohen Bremsverzögerung mit einem gleichzeitigen Ansteigen der Schwellzeit T verbunden ist. Die Aufgabe, aus gegebener Ausgangsgeschwindigkeit einen möglichst geringen Bremsweg zu erreichen, veranlaßt den Fahrer im Idealfall hingegen dazu, die optimale Gesamtkombination der Parameter a_0 und T zu wählen.

7 Schlußfolgerungen

7.1 Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse

Bei der Verwendung der Versuchsergebnisse im Rahmen der forensischen Unfallrekonstruktion drängt sich die Frage auf, inwieweit die bei den Bremsversuchen gewonnenen Erkenntnisse auf die Unfallsituation übertragbar sind. So konnten die Probanden in den Versuchen beispielsweise den Bremspunkt frei wählen und waren sicherlich nicht bereit, ein Sturzrisiko einzugehen. Streß entstand ausschließlich durch die Prüfungssituation, verbunden mit dem Bestreben, die eigene Bremsfertigkeit unter Beweis zu stellen. Im Gegensatz dazu wird dem Zweiradfahrer die Unfallsituation überraschend aufgezwungen, die (Brems-) Leistung muß gegebenenfalls unter Todesangst erbracht werden.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß die Streßreaktionen des Körpers, wie beispielsweise erhöhter Adrenalinausstoß, gerade dazu dienen, die Leistungsfähigkeit in Extremsituationen zu erhöhen. Während Situationsstreß bei kognitiven Leistungen negative Effekte haben kann [5], ist bei Regelaufgaben auch eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit denkbar. Hier ist noch Klärungsbedarf vorhanden.

Wenig Zweifel bestehen sicherlich an der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse bei der Ermittlung des zumutbaren Brems- bzw. Anhalteweges aus zulässiger Höchstgeschwindigkeit.

7.2 Brems- und Anhalteweg

Die bei den Versuchen ermittelten Werte für a_0 und T gelten strenggenommen nur für eine Bremsausgangsgeschwindigkeit von annähernd 50 km/h. Bei der praktischen Anwendung ist die Übertragbarkeit bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten im Bereich von 30 bis 70 km/h gegeben. Das Bild 8 zeigt Ober- und Untergrenzen des Bremsweges aus Höchstgeschwindigkeiten im erwähnten Bereich.

Bei der Berechnung des Anhalteweges ist zu berücksichtigen, daß der

Exponentialansatz die Bremsung ab dem Zeitpunkt des Verzögerungsbeginns beschreibt. Von der mittleren Reaktionsdauer von 0,85 ist deshalb die Spurzeichnungsschwelldauer (eines Pkw), die im statistischen Mittel etwa 0,2 s beträgt, zu subtrahieren. Insgesamt ergeben sich die ebenfalls in Bild 8 genannten Anhaltewege aus zulässiger Höchstgeschwindigkeit.

7.3 Berechnung der Ausgangsgeschwindigkeit

Bei der Rekonstruktion eines Zweiradunfalls ist der Sachverständige vor die Aufgabe gestellt, die Ausgangsgeschwindigkeit eines Zweirades, anknüpfend an die (leidlich) bekannte Kollisionsgeschwindigkeit zu ermitteln. In den meisten Fällen kann er seine Berechnung dabei auf eine Hinterradblockierspur des Zweirades stützen.

Es wäre lebensfremd, würde man in diesen Fällen lediglich eine Bremsung am Hinterrad unterstellen, ist in der täglichen Fahrpraxis doch eher der alleinige Einsatz der Vorderradbremse die Regel. Zugunsten des Zweiradfahrers ist allerdings zunächst davon auszugehen, daß unter dem Streß einer sich aufbauenden Unfallsituation die Vorbehalte gegen den Einsatz der Hinterradbremse außer Kraft gesetzt sind, die Spurzeichnung des Hinterrades also kurz nach dem Beginn des Bremsvorgangs einsetzt. Im Gegensatz zur Bremsung mit einem Pkw ist zugunsten des Zweiradfahrers davon auszugehen, daß die Spurzeichnung des Hinterrades bereits während der Bremsschwellphase bei dem etwa 0,7-fachen des Maximalwertes einsetzt.

Unter dieser a priori Annahme kann die Ausgangsgeschwindigkeit dann beispielsweise mit dem Exponentialansatz ermittelt werden. Ein entsprechendes Programm wird vom Ingenieurbüro Schimmelpfennig und Becke zum Nettopreis von 199 DM vertrieben. Anschließend ist die a priori Annahme in jedem Fall über eine Zuordnung der Fahrvorgänge zu prüfen, um zumindest längere Bremswege ohne Spurzeichnung ausschließen zu können.

Obwohl sich der Exponentialansatz bei der theoretischen Beschreibung der Versuchsergebnisse als der Problemstellung angemessen erwiesen hat, kann für die tägliche Praxis der Unfallrekonstruktion hilfsweise auch

mit einem linearen Anstieg der Verzögerung gerechnet werden, Bild 9. Das zeitliche Ende des Anstieges liegt dann etwa beim 1,8-fachen der Zeitkonstanten des Exponentialansatzes.

8 Zusammenfassung

Die vorgestellte Versuchsreihe zeigt erneut, daß der Bremsvorgang mit einem Zweirad prinzipiell nicht in derart engen Grenzen zu fassen ist wie der Bremsvorgang mit einem Pkw. Anhand der Versuche ist jedoch eine verlässliche Eingrenzung der verbleibenden Bandbreite im Hinblick auf forensische Zwecke möglich. Aus der Auswertung der Versuche ergeben sich unter anderem abgesicherte Aussagen über den zumutbaren Bremsweg aus zulässiger Höchstgeschwindigkeit.

Literaturnachweis

- [1] Schmedding K., Weber M.: Verzögerungswerte von Zweirädern. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 28 (1990), S. 320 – 322
- [2] Weber M., Hugemann W.: Die Geschwindigkeitsrückrechnung bei Motorradbremsungen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 28 (1990), S. 260 – 263 u. S. 290 – 292
- [3] Lange F.: Bremsverzögerungen von Motorrädern bei Abwehrbremsungen, Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen der Universität Hannover, 1992
- [4] Isermann R.: Prozeßidentifikation. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1974
- [5] Hoyos C., Zimolong B.: Ingenieurpsychologie. Verlag für Psychologie, Göttingen, Toronto, Zürich 1990