Manfred Becke*, Udo Nackenhorst**

Anfahrbeschleunigungen von Personenwagen

Zusammenfassung
Der Anfahrvorgang, charakterisiert durch die Beschleunigung, spielt in der Verkehrsunfallrekonstruktion eine wichtige Rolle. In dieser Arbeit wird neben Anfahrvorgängen bei maximaler Beschleunigung auch das Anfahrverhalten des Normalfahrers an Kreuzungen untersucht. Die Ergebnisse werden mit Hilfe einer speziellen Ansatzfunktion analytisch beschrieben und in Form anwendungsfreundlicher Schablonen dargestellt.

Summary
The staring phase, characterized by acceleration, plays an important role in the reconstruction of road accidents. In addition to starts with maximum acceleration, this study also deals with the starting behaviour of normal drivers at road junctions. The results are described analytically with the help of a special formulation function and are presented in the form of easy-to-use stencils.

Einleitung

Bei der Analyse von Verkehrsunfällen, speziell solcher im Einmündungsbereich von Kreuzungen, steht der Sachverständige häufig vor der Aufgabe, die Anfahrbeschleunigung von Personenwagen festzulegen.
Die Meßergebnisse bekannter Auto-Tests (z.B. [1]) ermöglichen diesbezüglich nur eine grobe Abschätzung, weil für die meisten Fahrzeugtypen nur Daten (Wertepaar: Geschwindigkeit - Beschleunigungsdauer) im mittleren und oberen Geschwindigkeitsbereich vorliegen. Die für die Belange der Verkehrsunfallrekonstruktion wichtigen Daten im Bereich von 0 bis 30 km/h fehlen vollständig.

Neben dem maximalen Beschleunigungsvermögen eines Fahrzeuges ist das Anfahrverhalten des »Normalfahrers« von besonderem Interesse.

Zur Beschreibung des Geschwindigkeits-Zeit-Verlaufs bei Anfahrvorgängen führten wir Messungen durch, deren Ergebnisse nachfolgend dargelegt sind.

Maximale Anfahrbeschleunigung

Damit die Ergebnisse aus veröffentlichten Auto-Tests um den Anfahrbereich erweitert werden konnten, wurde der Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf an Pkw bei maximaler Beschleunigung gemessen. Die untersuchten Fahrzeuge unterschieden sich in ihrer Leistungscharakteristik. Die Meßergebnisse sind in **Bild 1** wiedergegeben.
Auffällig ist der stark nichtlineare Anstieg der Geschwindigkeits-Zeit-Kurven. Bei konstanter Beschleunigung wären es Geraden; wir sprechen deshalb im folgenden von geschwindigkeitsabhängiger Beschleunigung.

Die Klassifizierung der Fahrzeuge erfolgte nach dem Leistungsgewicht (kg/kW). Mit dem so aufgespannten Fächer lassen sich dann auch für leistungsspezifisch dazwischenliegende Fahrzeuge die entsprechenden Verläufe abschätzen. Eine Ausnahme bilden dabei Fahrzeuge mit automatischem Getriebe, die eine tendentiell andere Leistungsentfaltung aufweisen. In **Bild 2** ist ein solches Fahrzeug einem äquivalenten Pkw mit Schaltgetriebe gegenübergestellt.

*Dipl.-Ing. Manfred Becke
Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle und Kfz-Technik, Ing.-Büro Schimmelpfennig und Becke, Im Bilskamp 2F, 4400 Münster-Wolbeck
**Dipl.-Ing. Udo Nackenhorst, Ing.-Büro Schimmelpfennig und Becke

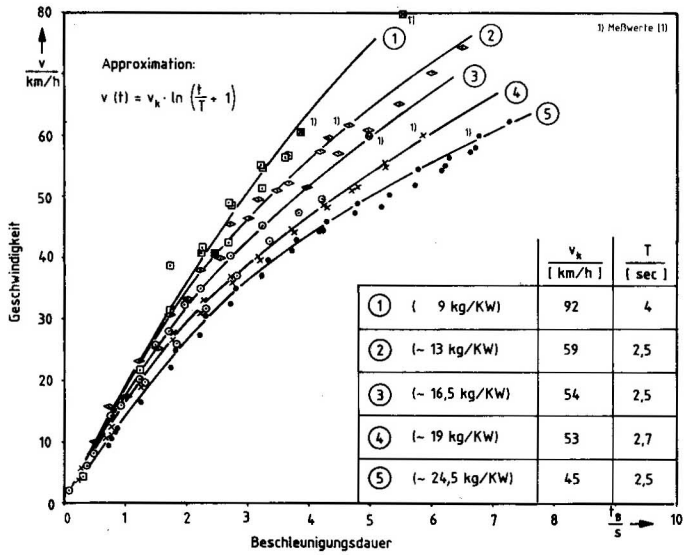


Bild 1 Geschwindigkeits-Zeit-Kurven für max. Anfahrbeschleunigung

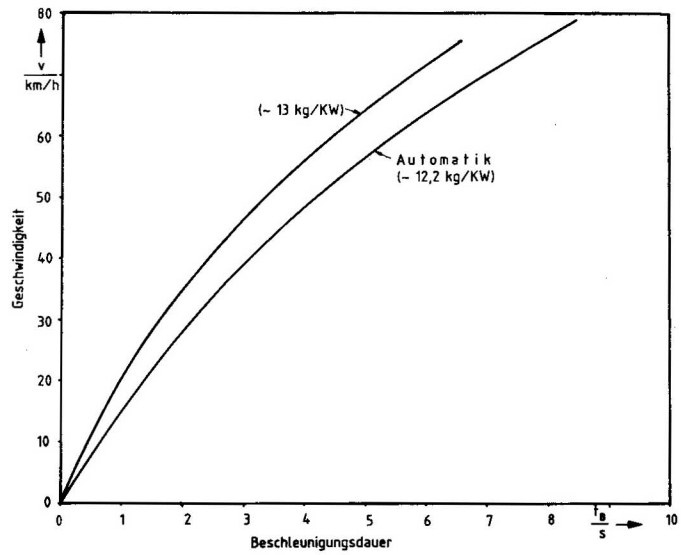


Bild 2 Vergleich mit Fahrzeug mit automatischem Getriebe

Die von den diskreten Meßpunkten angedeuteten Kurven waren zur weiteren Anwendung analytisch zu beschreiben. Dabei mußte die Approximationsfunktion v(t) differenzierbar, integrierbar und explizit nach der Zeit aufzulösen sein. Polynomansätze können die letzte Forderung nicht erfüllen. Hier wurde ein Ansatz nach Gleichung (1) gewählt:

$$v_{(t)} = v_k \cdot \ln\left(\frac{t}{T} + 1\right) \qquad (1)$$

Dabei sind »v_k« und »T« Konstanten, die sich für jedes Fahrzeug mit den Methoden der Ausgleichsrechnung bestimmen lassen.

Aus Gleichung (1) ist dann durch Integrations- und Differentiationsprozesse ein nahezu vollständiger Formelsatz für den Anfahrvorgang mit geschwindigkeitsabhängiger Beschleunigung zu ermitteln. In Tabelle 1 sind diese Formeln denen für konstante Beschleunigung gegenübergestellt. Leider bietet auch Gleichung (1) nicht die Möglichkeit, alle Formeln explizit aufzustellen, insbesondere nicht v (s) analog zu $v = \sqrt{2a_0 s}$ und t (s) analog zu

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a_0}}$$

Aus diesem Grund bietet sich hier die Darstellung der Beziehungen in Form von Schablonen an (**Bild 3**). Mit derartigen Schablonen können die Zusammenhänge dann unmittelbar in ein Zeit-Weg-Diagramm eingetragen werden.

Eine typische Frage: »Wie hoch ist die erzielte Geschwindigkeit

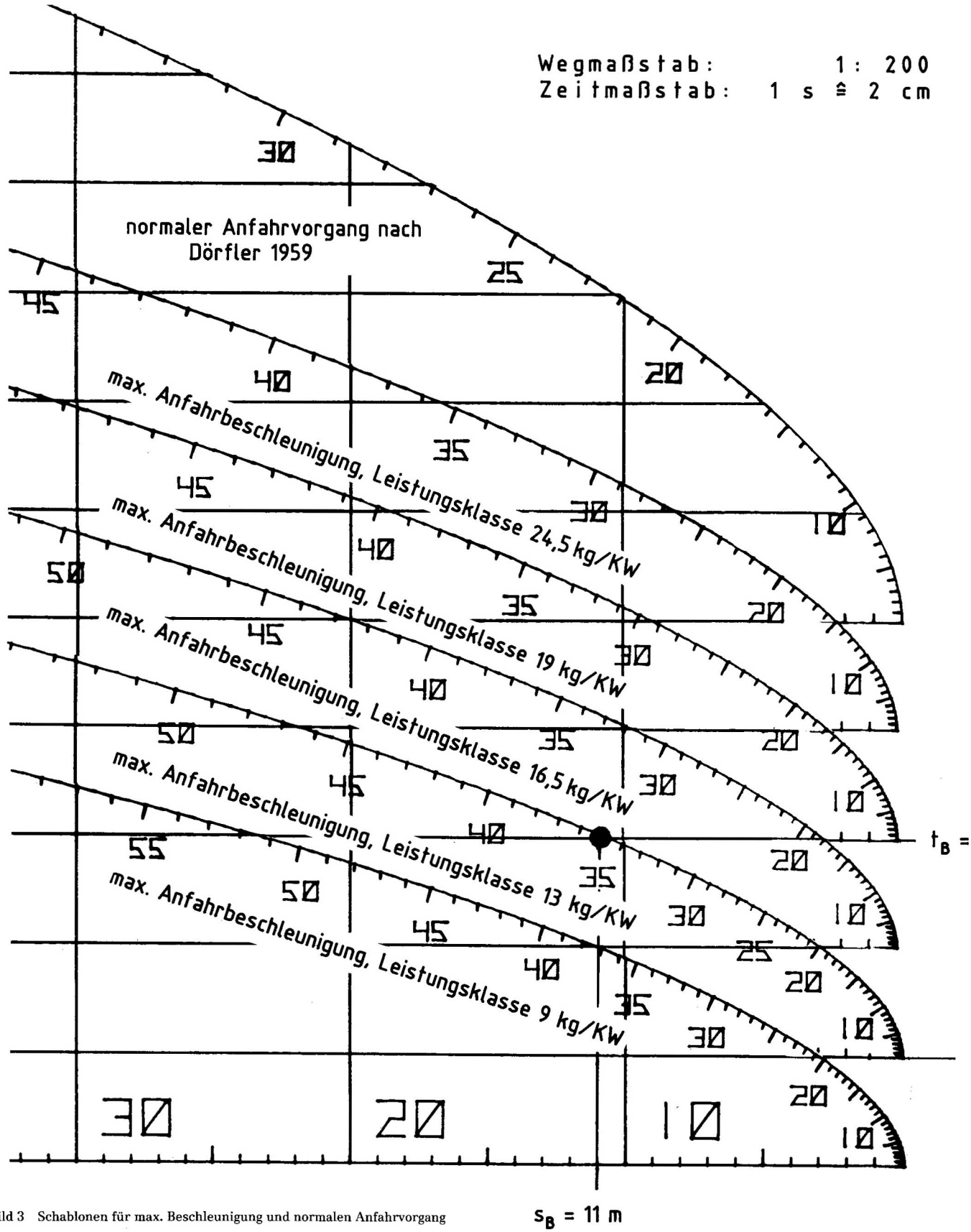


Bild 3 Schablonen für max. Beschleunigung und normalen Anfahrvorgang

nach einer bestimmten Anfahrstrecke?« läßt sich mit diesen Formeln nicht direkt beantworten. Eine Lösung ist allenfalls iterativ zu erwarten.

Wie oben bereits erwähnt, sind die Geschwindigkeits-Zeit-Kurven stark nichtlinear. Das bedeutet aber, daß Rechnungen mit konstanter Anfahrbeschleunigung zwangsläufig zu falschen Ergebnissen führen, wie das nachfolgende Beispiel zeigt:

Aus Auto-Tests sei z.B. der Punkt A ($v = 60$ km/h; $t_b = 4{,}45$ s) bekannt (**Bild 4**). Damit ergibt sich eine mittlere Anfahrbeschleunigung von $\bar{a}_0 = 3{,}75$ m/s². Die entsprechende Gerade ist in Bild 4 eingezeichnet. Für den Anfahrvorgang von 0 bis 35 km/h wird danach ein Weg von

$$s_B = \frac{v^2}{2a} = 12{,}6\ \text{m}$$

zurückgelegt, die Beschleunigungszeit beträgt

$$t_B = \frac{v}{a} = 2{,}6\ \text{s}.$$

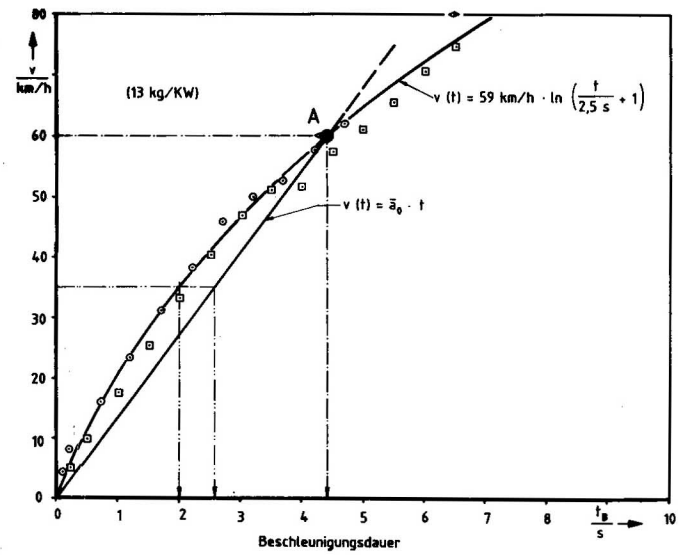


Bild 4 Vergleich mit konstanter Beschleunigung

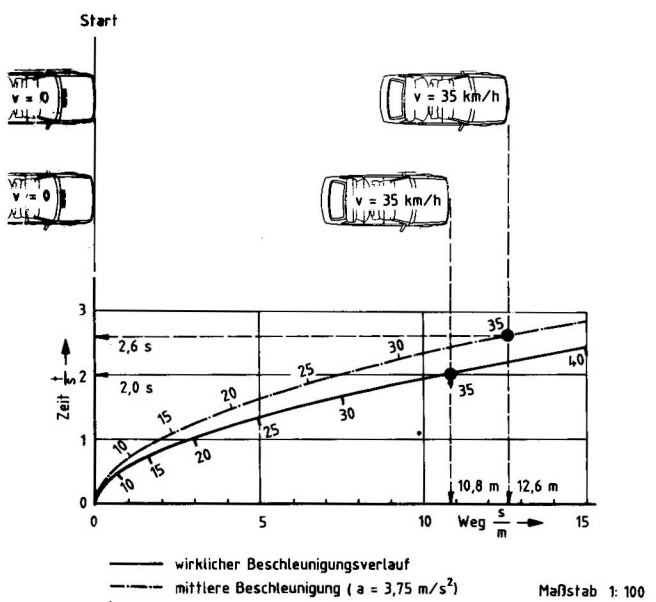


Bild 5 Darstellung im Zeit-Weg-Diagramm

Nach Bild 4 beträgt die wirkliche Beschleunigungsdauer aber nur t_B = 2,0 s. Dieser Wert ist auch der zugehörigen Schablone 13 kg/kW zu entnehmen (Bild 3); der Weg wird zu $s_B \approx 11$ m abgelesen.

Im Zeit-Weg-Diagramm wird der zeit-wegmäßige Unterschied deutlich (**Bild 5**).

Anmerkung:
Die Betrachtung der maximalen Anfahrbeschleunigung zeigt, daß diese entsprechend der Achslastverteilung sehr nahe an der physikalischen Grenze anzusiedeln ist. So wurde in dem genannten Beispiel eines Fahrzeuges mit 13 kg/kW eine Anfahrbeschleunigung von $a_0 \approx 5{,}5$ m/s² gemessen.

Anfahrverhalten an Kreuzungen

Während der erste Teil dieser Ausführungen das Beschleunigungsvermögen verschiedener Personenwagen behandelt, soll jetzt das Anfahrverhalten des »Normalfahrers« im Verkehrsfluß untersucht werden.
Erste Ergebnisse liefern hier die Messungen von Dörfler [2]. Diese Untersuchung liegt aber bereits längere Zeit zurück (1959), so daß deren Gültigkeit für heutige Verkehrsverhältnisse zu überprüfen war.
Zu diesem Zweck wurde das Anfahrverhalten von Versuchsperso-

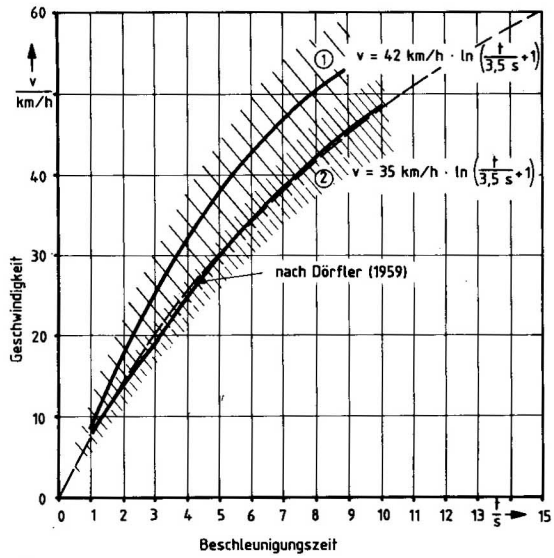


Bild 6 Anfahrvorgänge an lichtsignalgesteuerten Kreuzungen (angestrebte Endgeschwindigkeit v_E = 70 km/h)

	Beschleunigung konstant	Beschleunigung geschwindigkeitsabhängig
Beschleunigung	$a = a_0 = \text{const.}$	$a(v) = \frac{v}{T} \, e^{-\frac{v}{v_K}}$ $a(t) = \frac{v_K}{(t+T)}$
Geschwindigkeit	$v(t) = a_0 \cdot t$ $v(s) = \sqrt{2\, a_0\, s}$	$v(t) = v_K \cdot \ln\left(\frac{t}{T}+1\right)$
Weg	$s(t) = \frac{1}{2} a_0 \cdot t^2$ $s(v) = \frac{v^2}{2 a_0}$	$s(t) = v_K \cdot T \left[\left(\frac{t}{T}+1\right)\cdot \ln\left(\frac{t}{T}+1\right) - \frac{t}{T}\right]$ $s(v) = v_K \cdot T \left[1 + \left(\frac{v}{v_K} - 1\right)\cdot e^{-\frac{v}{v_K}}\right]$
Zeit	$t(v) = \frac{v}{a_0}$ $t(s) = \sqrt{\frac{2\, s}{a_0}}$	$t(v) = T\left(e^{-\frac{v}{v_K}} - 1\right)$

Tabelle 1 Gegenüberstellung der Formelsätze

nen an Kreuzungen gemessen. Die Ergebnisse zeigen, daß das Anfahrverhalten von vielen Einflüssen abhängt. In erster Näherung kann es aber als fahrzeugunabhängig angenommen werden. Auch die angestrebte Endgeschwindigkeit hat bei der Festlegung der Anfahrbeschleunigung nur geringe Bedeutung. Aber der Einfluß der Streckenführung ist dominant. An übersichtlichen Kreuzungen mit klaren Verkehrsverhältnissen wird im Mittel stärker beschleunigt (**Bild 6**).[1])

Die Kurve 1 gilt als Mittelwert für das Überqueren einer großräumigen, ampelgesteuerten Kreuzung und die Kurve 2 für eine Kreuzung, bei der eine schlecht einsehbare, vorfahrtsberechtigte Straße zu überqueren war. Der Streubereich der Einzelmessungen ist mit Hilfe der Schraffur angedeutet.

Zum Vergleich ist auch die von Dörfler für eine vierspurige, ampelgesteuerte Kreuzung gefundene Abhängigkeit eingezeichnet.

Die gemessenen Verläufe wurden wiederum durch Funktionen nach Gleichung (1) angenähert. Für Beschleunigungszeiten bis $t_B \leqq 4s$ ist das Anfahrverhalten aber auch mit konstanter Beschleunigung hinreichend genau zu beschreiben. Die Werte liegen zwischen

$a_0 \approx 1{,}7\ m/s^2$ bis $a_0 \approx 2{,}3\ m/s^2$.

Die Approximation mit geschwindigkeitsabhängiger Beschleunigung gestattet aber wiederum die Anfertigung von Schablonen, die dann bis zu Zeiten von $t_B = 10$ s gültig sind.

Zusammenfassung

Die Rekonstruktion von Unfällen, denen ein Anfahrvorgang unmittelbar vorausging, erfordert detaillierte Kenntnisse zur Beschleunigung. Wichtig ist neben der maximal möglichen Beschleunigung auch das Anfahrverhalten des Normalfahrers.

Für verschiedenen Personenwagen wurden die Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe bei maximaler Beschleunigung gemessen. Weitere Versuche lieferten entsprechende Ergebnisse für das Anfahrverhalten an Kreuzungen.

Mit Hilfe einer speziellen Ansatzfunktion war es möglich, die Ergebnisse analytisch zu formulieren. Da sich mit diesem Ansatz nicht alle gewünschten Formeln explizit darstellen lassen, können die Zusammenhänge numerisch berechnet und in Schablonen dargestellt werden.

1) Die Ergebnisse erheben keinen Anspruch auf statistische Vollständigkeit.

Literaturnachweis

[1] Auto Motor und Sport

[2] Dörfler, W.
»Fahrdynamik an signalgesteuerten Kreuzungen«, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 1965, Heft 38 ■