

Ralf Krause*

Anfahrbeschleunigungen im alltäglichen Straßenverkehr

Zusammenfassung

In dieser Untersuchung wurden Anfahrvorgänge von Pkw ausgewertet. Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann eine verbesserte Abstufung für Anfahrbeschleunigungen von abbiegenden und geradeausfahrenden Pkw vorgenommen werden. Bei abbiegenden Fahrzeugen konnte festgestellt werden, dass das Beschleunigungsniveau außerorts über dem innerorts anzusiedeln ist. Für den Geradeausverkehr lässt sich ein näherungsweise homogenes Anfahrverhalten aufzeigen.

Summary

In contrast to earlier publications that mostly investigated the starting behaviour of know test persons, the results presented in this paper originate from the observations of normal day traffic. The observations comprise 181 starting manoeuvres of passenger cars.

1 Einleitung

Wie die Veröffentlichungen [1, 2, 3, 4] beschäftigt sich auch diese Arbeit mit dem Thema Anfahrbeschleunigungen von Pkw. Während bei den zuvor erwähnten Abhandlungen das Veröffentlichungsdatum einige Jahre zurückliegt (und damit die Aktualität der Messungen zu hinterfragen ist) oder die Ergebnisse auf Versuchen mit Probanden basieren, entstammen die hier dokumentierten Ergebnisse dem alltäglichen Straßenverkehrsgeschehen. Es wurden 181 Anfahrbeschleunigungen von geradeausfahrenden und abbiegenden Pkw gemessen.

Das wesentliche Ziel der Auswertung lag darin, für die Praxis geschwindigkeitsabhängige Beschleunigungen zu ermitteln. Die Frage, welche Geschwindigkeit ein Pkw nach einer definierten Anfahrstrecke aufweist, kann mit den in den **Diagrammen 1 bis 4** ausgewiesenen Beschleunigungswerten hinreichend beantwortet werden.

2 Versuchsaufbau

Die Messungen wurden in drei verschiedenen Kreuzungsbereichen aufgenommen. Neben zwei innerstädtischen Kreuzungen (Kurvenradien 10 und 14 m) wurde auch ein sehr ausgedehnter Kreuzungsbereich (Radius ≈ 23 m) im Verlauf einer Bundesstraße einbezogen (Stopp-Straße). Die Kreuzungsbereiche wurden speziell präpariert: Unmittelbar vor und hinter den Haltelinien waren in Meter-Abständen parallele Hilfslinien aufgetragen.

*Dipl.-Ing. Ralf Krause, Sachverständiger im Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstraße 101, 48155 Münster



Bild 1 Stillstandsposition ($t_0 = 0$ s)



Bild 2 Position VW Passat nach 6,3 m ($t_{6,3} = 2,64$ s)



Bild 3 Position VW Passat nach 11,3 m ($t_{11,3} = 3,52$ s)



Bild 4 Position VW Passat nach 16,3 m ($t_{16,3} = 4,28$ s)



Bild 5 Position VW Passat nach 21,3 m ($t_{21,3} = 5,04$ s)

Ausgehend von den Haltelinien wurden dann in Abständen von 5 m weitere Hilfslinien fixiert. Anhand der Hilfslinien war es nun möglich, die genaue Position eines Fahrzeugs im Anfahrvorgang zu erfassen.

Die Weg-Zeit-Erfassung, das heißt die Verknüpfung der einzelnen Streckenabschnitte mit den zugehörigen Zeitspannen, erfolgte durch die Aufzeichnung der Fahrvorgänge mit Hilfe einer Videokamera. Im weiteren konnten die Filmsequenzen / Anfahrbewegungen mit einem Videoschnittgerät analysiert werden. Ein Beispiel dokumentieren die oben gezeigten Bilder. Die Sequenzen belegen, dass sich anhand dieser Methode relativ einfach Weg und Zeit miteinander in Beziehung setzen lassen.

Bei dieser Studie wurden nur die Anfahrvorgänge von Rechtsabbiegern oder Geradeausfahrern aufgezeichnet. Bei den Linksabbiegern konnte ein sehr unterschiedliches bzw. nicht allgemein darstellbares Anfahrverhalten festgestellt werden (abhängig vom entgegenkommenden Verkehr). Für die Praxis sollte daher der anzusetzende Anfahrvorgang den individuellen Gegebenheiten angepasst werden.

Um die Fahrer nicht zu irritieren (und dadurch ungewollt Einfluss auf ihr Fahrverhalten zu nehmen), wurde unbemerkt aus Häusern gefilmt, die unmittelbar an den Kreuzungsbereich angrenzten. Dabei bot sich auch der Vorteil eine bessere Perspektive für die spätere Auswertung zu erhalten.

3 Ermittelte Anfahrbeschleunigungen

Das Ziel dieser Auswertung lag darin, praxisnahe Anfahrbeschleunigungen zu bestimmen und das sonst gebräuchliche Annahmespektrum zu überprüfen. Zu beachten war dabei, dass geschwindigkeitsabhängige Beiwerte ermittelt werden sollten, in denen auch das Problem des nichtlinearen v-t-Verlaufes hinreichend berücksichtigt wurde (s. hierzu auch Abschnitt 4.2).

Die in den Diagrammen 1 bis 4 ausgewiesenen Anfahrbeschleunigungen gelten für den jeweils zurückgelegten Streckenabschnitt. Alle Werte beziehen sich auf Anfahrvorgänge aus dem Stand. Um die aufgeführten, verschiedenen Dispersionsmaße einordnen zu können, bietet es sich an, zumindest Abschnitt 4.1 zu lesen. Der Abschnitt 4.2 beschreibt den Weg zum Ziel und ist damit von untergeordneter Bedeutung.

Während für die Messreihen "Geradeausverkehr" innerorts und außerorts nahezu die gleiche Ergebnisbandbreite vorlag, konnten für die "Abbieger" Abweichungen festgestellt werden. Daher wurden die Messwerte für den Geradeausverkehr zusammengefasst (Diagramm 1) und die Anfahrvorgänge der Abbieger in den Diagrammen 2 (außerorts) und 3 (innerorts) separat dargestellt. Zusätzlich bietet das Diagramm 4 eine Zusammenfassung aller Abbieger-Anfahrbeschleunigungen.

Wie zu erwarten ist, kann zunächst eine kontinuierliche Abnahme der Beschleunigung mit zunehmender Wegstrecke für alle Diagramme festgestellt werden. Für die Anfahrstrecke von 5 m (Geradeausfahrer / Diagramm 1) konnte für das 50. Perzentil eine Beschleunigung von etwa 2 m/s^2 berechnet und für 25 m lediglich noch ein Wert von $1,5 \text{ m/s}^2$ bestimmt werden!

Signifikant ist auch die Differenz des generellen Beschleunigungsniveaus zwischen geradeausfahrenden (5 m: $1,7 \dots 2,3 \text{ m/s}^2 \rightarrow 20.$ bis 80. Perzentil / Diagramm 1) und abbiegenden (5 m: $1,3 \dots 1,9 \text{ m/s}^2 \rightarrow 20.$ bis 80. Perzentil / Diagramm 4) Pkw.

Die Unterschiede für die Abbieger inner- und außerorts lassen sich damit begründen, dass der Fahrzeugführer innerorts noch auf querenden Radverkehr oder auf Fußgänger zu achten hat. Einen weiteren Grund für das geringere Niveau liefert möglicherweise die Fahrphysik: Auf Grund der engradigeren Abbiegelinien im innerstädtischen Bereich ($R_i \approx 10 \text{ m}$ und $R_i \approx 14 \text{ m}$ im Gegensatz zu denen außerorts $R_a \approx 23 \text{ m}$) führen höhere Geschwindigkeiten (resultierend aus höheren Anfahrbeschleunigungen) zu größeren

Querbewegungen, die der "Normalfahrer" im Regelfall mit einer gefühlsmäßigen Abneigung aufnimmt [5].

Die Anfahrbeschleunigungen außerorts wurden im Kreuzungsbereich einer Bundesstraße (Höchstgeschwindigkeit 100 km/h) aufgezeichnet. Bei der Annäherung an den Kreuzungsbereich gelten für den bevorrechtigten Verkehr Annäherungsgeschwindigkeiten von zunächst 70 km/h und im unmittelbaren Kreuzungsbereich von 50 km/h . Die Fahrzeugführer, die von den untergeordneten Straßen kommen, müssen ein Stoppschild passieren. Neben der eigentlichen Untersuchung der Anfahrbeschleunigungen konnte auch gleichzeitig beobachtet werden, dass etwa 60 % aller Fahrer das Stoppschild überrollten. Ein Großteil der Fahrzeugführer, die stoppen, mußten auch halten, da Querverkehr kreuzte.

4 Versuchsauswertung

In diesem Kapitel werden die mathematischen Werkzeuge erklärt. Aus der Vielzahl der Versuche lassen sich Bandbreiten und Tendenzen filtern, bei denen es statistische Gesichtspunkte zu berücksichtigen gilt. Die verschiedenen Dispersionsmaße und ihre Vor- und Nachteile werden im nachfolgenden Kapitel 4.1 beschrieben und erklärt.

Auf Grund des nichtlinearen Geschwindigkeit-Zeit-Verlaufes müssen die gemessenen Parameter s (Weg) und t (Zeit) unter Einsatz von Approximationsfunktionen angenähert werden. Mit Hilfe der Ausgleichsrechnung lassen sich dann geschwindigkeitsabhängige Anfahrbeschleunigungen ermitteln. Für das Feld der Ausgleichsrechnung bieten das Gradientenverfahren und das Newtonsche Näherungsverfahren übersichtliche Lösungswege (Abschnitt 4.2).

4.1 Statistische Kennwerte

Allgemein informiert eine Tabelle oder eine graphische Darstellung über die Verteilung eines Merkmals in einem Kollektiv von Messwerten. Statistische Kennwerte haben die Funktion, über spezielle Eigenschaften der Merkmalsverteilung Auskunft zu geben. Von besonderem Interesse sind zunächst einmal die Maße, die alle Messwerte zusammenfassend charakterisieren: Die Maße der zentralen Tendenz (Medianwert, arithmetisches Mittel) sowie Kennwerte durch die die Unterschiedlichkeit oder Variabilität des Merkmals innerhalb des Kollektivs repräsentiert wird (Dispersionsmaße).

Für die vorliegende Untersuchung werden verschiedene Kennwerte verwendet. Das arithmetische Mittel ist das gebräuchlichste Maß zur Kennzeichnung der zentralen Tendenz innerhalb einer Verteilung.

Ein Nachteil des arithmetischen Mittelwertes ist jedoch, dass er stark durch Extremwerte beeinflusst wird. Dieser Sachverhalt soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden. Der arithmetische Mittelwert (5 m: $1,75 \text{ m/s}^2$) im Diagramm 2 (Anfahrbeschleunigungen; Abbieger; außerorts) liegt zunächst deutlich über dem Median (5 m: $1,7 \text{ m/s}^2$). Die Betrachtung der Einzelwerte innerhalb der 5 m-Kategorie hilft die Diskrepanz zu erklären: insgesamt liegen drei Anfahrbeschleunigungen vor, die oberhalb von $2,7 \text{ m/s}^2$ liegen. Diese Ausreißer hebeln den Mittelwert für diese Position nach oben und belegen damit wie empfindlich die Mittelwertbildung auf Extremwerte reagiert.

Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass sich die Standardabweichung für diese Verteilung nicht als Dispersionsmaß implementieren läßt, da sie nur auf eine Normalverteilung anzuwenden ist.

Daher betrachtet man häufig nur einen eingeschränkten Streubereich wie z.B. nur 80 % aller Werte (Interdezilabschnitt). Dieser Bereich ist durch die Werte begrenzt, die die unteren 10 % (das 10. Perzentil) bzw. die oberen 10 % (das 90. Perzentil) der Verteilung abschneiden. Um eine größere Bandbreite zu präsentieren, wurden die nachfolgenden Perzentile in die Grafiken eingebunden: 10., 20., 50., 80. und 90..

Der Median entspricht einem Wert, der die Anzahl der Messwerte

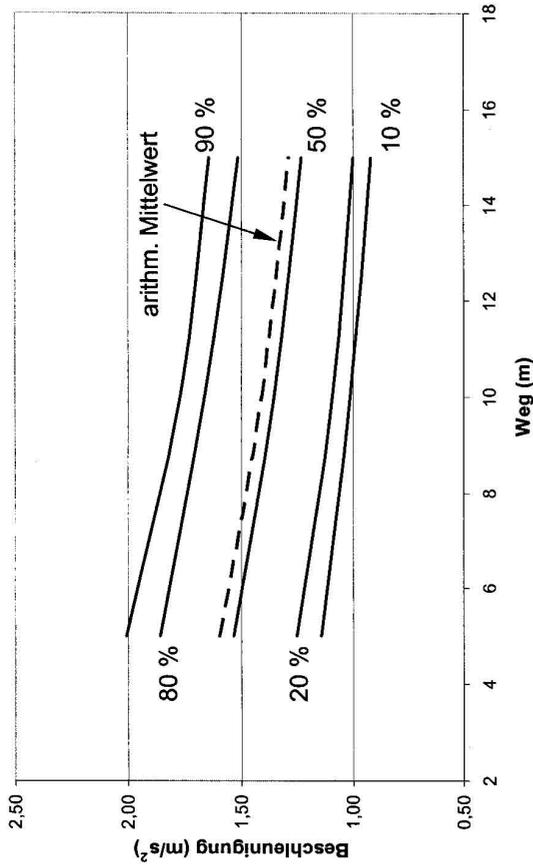


Diagramm 3 : Anfahbeschleunigungen Abbieger (innerorts)

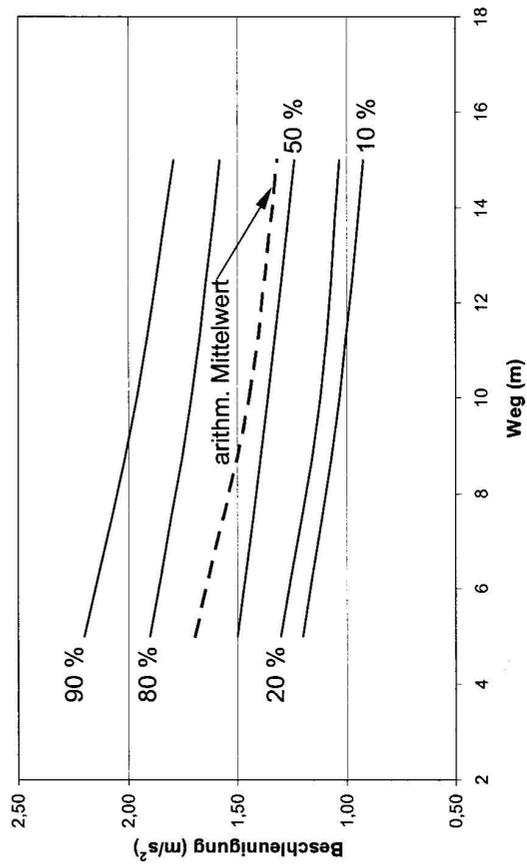


Diagramm 4 : Anfahbeschleunigungen Abbieger

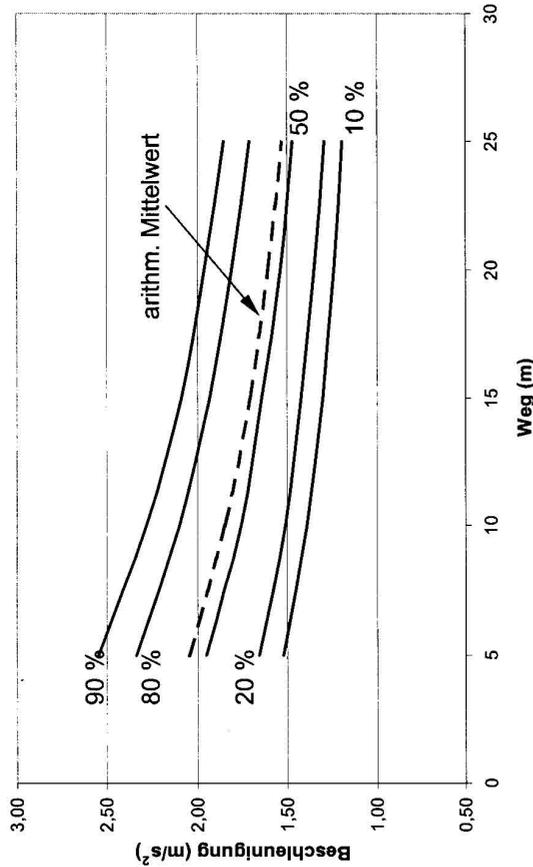


Diagramm 1 : Anfahbeschleunigungen Geradeausverkehr

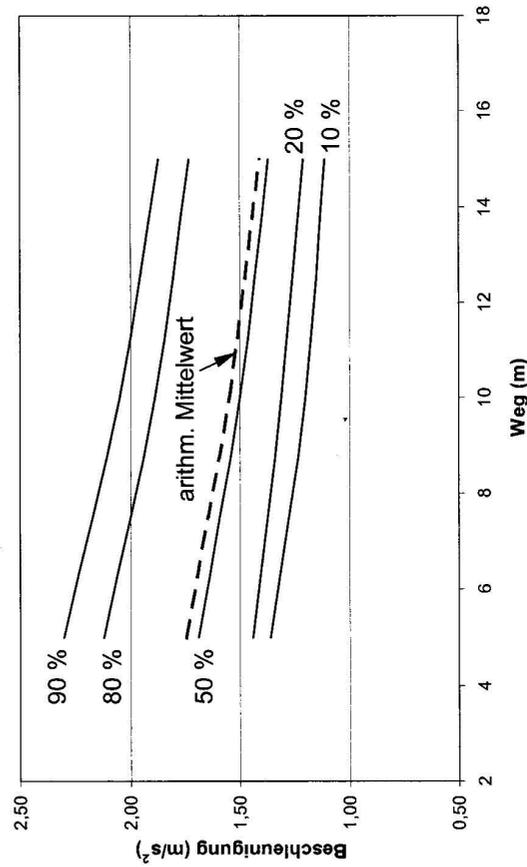


Diagramm 2 : Anfahbeschleunigungen Abbieger (außerorts)

Legende :

- Perzentile (10. / 20. / 50. / 80. / 90.)
- - - arithmetischer Mittelwert

halbiert (50. Perzentil). Dabei ist die Anzahl der Fälle oberhalb wie unterhalb des Median identisch.

Die Lage des arithmetischen Mittelwertes oberhalb des Median deutet eine linkssteile Verteilung an, was auf den ersten Blick verwunderlich erscheint. Im Zuge einer ersten Überlegung erwartet man eine rechtssteile Ausprägung, da die Leistungsgrenze der Pkw rechtsseitig zu einer Abgrenzung führen könnte. Eine andere Argumentation liefert eine mögliche Begründung für den vorliegenden Verlauf: Selbst bei sehr vorsichtigen Verkehrsteilnehmern grenzt eine Anfahrbeschleunigung zwischen $1,0 \text{ m/s}^2$ und $1,2 \text{ m/s}^2$ den unteren Bereich ab.

4.2 Mathematische Approximation

Auf Grund des nichtlinearen v-t-Verlaufes lassen sich die mit Hilfe der Videokamera gemessenen Parameter s (Weg) und t (Zeit) nicht durch eine konstante Beschleunigung beschreiben. Eine daraus resultierende lineare v-t-Abhängigkeit führt zu höheren Beschleunigungen (und damit auch größeren Geschwindigkeiten) für alle Streckenabschnitte größer 5 m. Bis in diesen Bereich liegt ein quasi-linearer Verlauf vor.

Für den Praxiseinsatz war aber gerade die Frage von Interesse, welche Geschwindigkeit ein Pkw nach einer bestimmten Anfahrstrecke aufweist. Daher sollten Beschleunigungswerte ermittelt werden, mit denen sich dem Fahrzeug für eine definierte Wegstrecke auch die entsprechende Geschwindigkeit zuordnen ließ. Um nun einen Eindruck von den Lösungsmöglichkeiten der formulierten Aufgabenstellung zu erhalten, wurden einige Vorversuche durchgeführt. Dabei wurden (in Anlehnung an den späteren Versuchsaufbau für die Praxis) Anfahrvorgänge über eine Wegstrecke von 25 m mittels einer Kamera aufgezeichnet. Zusätzlich erfolgte an den Streckenpunkten: 5, 15 und 25 m noch eine Geschwindigkeitsmessung (Tabelle 1).

Zeit (s)	Weg (m)	Weg* (m)	v (m/s)	v* (m/s)
2,32	5	4,85	3,52	3,59
4,56	15	15,23	5,75	5,67
6,08	25	24,67	6,75	6,72

* berechnete(r) Weg / Geschwindigkeit

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen u. berechneten s,v-Werte

Für die korrespondierenden Parameter Weg (s) und Zeit (t) mussten nun Funktionstypen s(t) gesucht werden, bei denen das Einsetzen von t_i in die zugehörige Ableitung $s'(t) = v(t)$ eine möglichst konforme Lösung zur gemessenen Geschwindigkeit erbrachte.

Das besondere Problem bestand in der zu erreichenden, hohen Annäherungsgenauigkeit: Integriert man demnach eine Funktion $s_1(t)$ und anschließend eine durch kleine Messfehler "verrauschte" Funktion $s_2(t)$, so unterscheiden sich die zugehörigen Integralfunktionen kaum, die Fehler mitteln sich heraus. Die Ableitungsfunktionen zu $s_1(t)$ und $s_2(t)$ können sich jedoch eklatant unterscheiden, wobei sich die Abweichungen mit jeder weiteren Ableitung potenzieren.

Anhand des zuvor behandelten Sachverhaltes, dass Integrieren glättet und Differenzieren vergrößert, wird verständlich, dass sich schon die vorgegebenen Funktionstypen möglichst gut an die vorhandenen Messwerte annähern müssen, um eine akzeptable Lösung zu erzielen.

Die von den Messpunkten angedeuteten Kurven konnten durch die nachfolgenden nichtlinearen Approximationsfunktionen mit ausreichender Genauigkeit angenähert werden:

$$\text{I. } s(t) = b \cdot \left((t+c) \cdot \ln\left(\frac{t}{c} + 1\right) - t \right) \quad \text{bzw.}$$

$$\text{II. } s(t) = k \cdot t^b \cdot e^{c \cdot t}$$

Beide funktionalen Ansätze erfüllen die Mindestvoraussetzungen $s(t=0) = 0$ und $v(t=0) = 0$. Die gesuchten Variablen (b, c bzw. k, b, c) der zu behandelnden nichtlinearen Optimierungsprozesse konnten in einem ersten Schritt mit Hilfe des Gradientenverfahrens (Methode des steilsten Anstiegs) eingegrenzt werden.

Das Gradientenverfahren lieferte die Startwerte für eine weitere Optimierung durch das Newtonsche Näherungsverfahren. Bei diesem Approximationsschritt werden die partiellen Ableitungen gebildet und gleich Null gesetzt. Da die Anzahl der resultierenden Gleichungen äquivalent zu derjenigen der unbekannt Parameter (b, c bzw. k, b, c) ist, lässt sich die Matrix lösen. Das Ergebnis dieser Iteration liefert hinreichende Genauigkeiten. Somit liefert die Ableitung der Funktionen I. und II. die interessierende Beziehung v(t). Bei den Versuchen zeigte sich, dass die errechneten Geschwindigkeiten der Streckenpunkte 5, 15 und 25 m nur sehr geringe Abweichungen zu den gemessenen aufweisen (s.a. Tabelle 1).

Auf dem zuvor skizzierten Weg erfolgten die Berechnungen für die einzelnen Anfahrbewegungen der Praxis. Für jede Anfahrbewegung wurden somit s-t-Wertepaare gebildet und diese durch die oben genannten Funktionen angenähert. Differenziert man nun die oben beschriebene s(t)-Approximationsfunktion erhält man einen funktionalen Zusammenhang für v(t). Die für die einzelnen Streckenbereiche (5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m) berechneten Geschwindigkeiten wurden in einem abschließenden Schritt durch die zugehörige Zeitspanne ($\Delta t_{5m}, \Delta t_{10m} \dots \Delta t_{25m}$) dividiert und verbunden. Durch das Dividieren wird der gesuchte Beschleunigungswert linearisiert (und damit eine mittlere Beschleunigung generiert), jedoch handelt es sich dabei um einen modifizierten Beiwert, der die tatsächlichen gemessenen Parameter Weg und Zeit unter Einbeziehung der tatsächlichen (näherungsweise berechneten) Geschwindigkeit miteinander verknüpft.

5 Fazit

Das Ziel dieser Auswertung lag darin, realistische Bandbreiten für die Anfahrbeschleunigungen im alltäglichen Straßenverkehrsgeschehen zu ermitteln. Durch mathematische Verknüpfungen konnten geschwindigkeitsabhängige Beschleunigungsbeiwerte ermittelt werden. Anhand der Tabellen lassen sich zwei (erwartete) Tendenzen hervorheben:

1. kontinuierliche Abnahme der Beschleunigung mit zunehmender Wegstrecke und
2. deutliche Niveauabweichungen zwischen abbiegenden und geradeausfahrenden Fahrzeugführern.

Anhand der Tabellen lassen sich für die Praxis Abstufungen für verschiedene Konstellationen vornehmen.

Literaturnachweis

1. Becke, M.; Nackenhorst, U.: Anfahrbeschleunigungen von Personewagen. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 24 (1986, S. 143 bis 146)
2. Godesberger Wissenschaftlicher Arbeitskreis: Anfahrbeschleunigungen für die Praxis. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 10 (1992, S. 252 bis 254)
3. Battiato, L.; Wolff, H.; Nover, W.: Schaltvorgänge und Anfahrbeschleunigungen des Normalfahrers im Innerortsverkehr. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 7/8 (1998, S. 201 bis 212)
4. Eberhardt, W.; Himbert, G.: Beschleunigungsverhalten von Pkw. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* (1988 bis 1994)
5. Schimmelpfennig, K.-H.; Hebing, M.: Geschwindigkeiten bei Kurvenfahrt/Stabilitäts- und Sicherheitsgrenze. *Der Verkehrsunfall* 20 (1982, S. 97 bis 99)