

Fahrerreaktionszeiten im Straßenverkehr

Wolfgang Hugemann

Reaktionszeit, Verteilungsfunktion

1. Einführung

Die unterstellte Fahrerreaktionszeit hat großen Einfluß auf die Vermeidbarkeit des Unfalls. Nichtsdestoweniger wird sie von deutschen Gerichten als mehr oder weniger konstant angenommen, zumindest seit der Deutsche Verkehrsgerichtstag Anfang der 80er Jahre seine Empfehlungen herausgab. Unsere Experimente zeigen allerdings – ebenso wie andere –, dass die Reaktionszeit bemerkenswert variiert, selbst bei ein und derselben Person unter sehr kontrollierten Versuchsbedingungen.

Wir schließen daraus, dass die Reaktionszeit nur mit statistischen Mitteln beschrieben werden kann, wobei die akzeptable Unter- wie Obergrenze durch ein *Perzentil* zu definieren ist (die Erklärung der Fachbegriffe folgt weiter unten). Bedauerlicherweise beruhen die vom DVG vorgeschlagenen Grenzen nicht auf Perzentilen, die den Rohdaten des zugrundeliegenden Experimentes entnommen sind. Stattdessen wurde die Verteilung der Reaktionszeiten mit einer analytischen *Verteilungsfunktion* approximiert und die Perzentile anschließend aus dieser Näherungsfunktion gewonnen. Mit dieser Vorgehensweise wurden längere Reaktionszeiten ausgeklammert und trugen deshalb nicht zu den Empfehlungen betreffend die Standardreaktionsdauer bei.

Die zugrundeliegenden Rohdaten wurden nun von uns neu interpretiert, wobei sich erwies, dass die ursprüngliche Auswertemethode mathematische Defizite aufwies, die Fehlinterpretationen geradezu provozierte. Es erweist sich, dass die experimentell ermittelte Verteilung ein für Reaktionszeitexperimente typisches Muster zeigt. Wendet man angemessene Auswertetechniken an, so kann die experimentelle Verteilung durch eine einzige Verteilungsfunktion approximiert werden, wobei die früheren Schwierigkeiten gänzlich vermieden werden. Wir schließen daraus, dass das Originalexperiment in anderer Weise zu interpretieren ist: Selbst in denkbar einfachsten Situationen müssen Reaktionszeiten von 1,5 s als ganz normal betrachtet werden.

Um die mathematischen Probleme zu verstehen, die zur früheren Fehlinterpretation der Daten führten, müssen wir einige statistische Methoden einführen, die dem Rekonstrukteur nicht geläufig sind. Diese Qual können wir dem Leser nicht ersparen, denn anders würde er der Argumentation nicht folgen können. Wenn wir uns vor Augen führen, welchen Einfluß dieses Experiment und seine Interpretation auf die Deutsche Rechtsprechung hatte, ist das Problem diese Geistesanstrengung wert. Und da die deutsche Umgehensweise mit Reaktionszeiten großen Einfluß auf Kontinentaleuropa hatte, denken wir, dass es auch gerechtfertigt ist, diesen Aspekten im Rahmen einer europäischen Konferenz nachzugehen.

2. Experimentelle Schwierigkeiten

Die (einzig wahre) menschliche Reaktionszeit gibt es nicht. Das Ergebnis eines Reaktionszeitexperimentes hängt immer von den Testbedingungen ab. Im Straßenverkehr müssen mindestens zwei Reaktionszeiten unterschieden werden:

- Fahrerreaktionen im normalen Straßenverkehr, d.h. in Reaktion auf Ampeln, Verkehrsschilder und Änderungen der Straßenkrümmung
- Fahrerreaktionen beim Unfall, d.h. unter plötzlich auftretender, möglicherweise lebensbedrohender Gefahr.

Da Reaktionszeiten u.a. von der Dringlichkeit der Antwort abhängig sind [Burckhardt 1981], sollten wir diese beiden Reaktionstypen klar auseinanderhalten und festhalten: in diesem Beitrag sprechen wir über letzteren Typ. (Der Originaltitel dieses Beitrags «Fahrerreaktionszeiten **für Abwehrerhandlungen** im Straßenverkehr» wurde von der Tagungsleitung gekürzt.)

Naheliegenderweise ist es nicht einfach, eine (lebens)bedrohende Situation in einem Reaktionszeitexperiment nachzustellen! Es hat verschiedentliche Versuche gegeben, dies dennoch zu tun: Plötzlich hinter Hindernissen auftauchende Versuchspuppen [Burckhardt 1981], auf der Straße liegende Schaumstoffblöcke [Olson 1996], Öffnen der Fahrertüre eines geparkten Fahrzeugs [Summala 1981] oder sogar drohende Kollision mit der lebensgroßen Attrappe eines Pkw [McGhee 2000]. In all diesen Experimenten waren die Versuchspersonen ahnungslos, was die auftauchende Gefahr betraf. Mit diesem Typ von Experimenten gibt es zwei Schwierigkeiten. Selbstverständlich kann man die Versuchspersonen keiner echten Gefahr aussetzen, noch nicht mal realistisch simulierten Gefahren. Man würde Ausweichreaktionen riskieren, die die Versuchspersonen dann tatsächlich verletzen könnten. Das andere Problem besteht darin, dass man die Versuchspersonen nur ein einziges Mal hereinlegen kann, anschließend sind sie gewarnt und würden keine realistischen Werte mehr liefern. Deshalb benötigt man entweder eine große Reihe von Versuchspersonen oder erhält nur wenige Daten. (Alle oben erwähnten Experimente begnügten sich mit letzterem.)

Ein weiteres Problem mit diesem Typ von Experimenten ist, dass der Zeitpunkt des Gefahren Eintritts (oder was die Versuchspersonen dafür halten) meist nicht eindeutig bestimmt werden kann. Nehmen wir das Experiment mit der Fahrzeugattrappe als Beispiel: Die Attrappe wurde durch ein anderes Fahrzeug gezogen. Näherte sich das Versuchsfahrzeug der Kreuzung, so erhielt der Fahrer des Zugfahrzeugs ein Startsignal. Das Zeitintervall zwischen Startsignal und Gasrücknahme wurde dann als Reaktionszeit betrachtet. Diese Zeitspanne enthält die Reaktionszeit des Fahrers des Zugfahrzeugs, sowie die Lose des Zugseils und andere mögliche Verlustzeiten. Auch alle anderen Experimente dieses Typs hatten mit vergleichbaren Schwierigkeiten zu kämpfen.

Neuere Experimente nutzen teilweise Fahrsimulatoren anstelle von Realfahrten. Dies ist eine verführerische Möglichkeit, weil sie situationsspezifische Reaktionszeiten verspricht, dabei aber echte Gefahr und mögliche Verletzungen vermeidet. Das Problem ist, dass schwer zu beurteilen ist, wie weit die Versuchsperson sich in das simulierte Szenario hat hineinsinken lassen. Deshalb ist es vorstellbar, dass sie in der Simulation größere Risiken in Kauf nimmt als im realen Straßenverkehr. Der Aufwand, den man treiben muss, um den Unterschied zwischen Realität und Simulation zu verwischen, kann sehr teuer geraten, ohne dass der Experimentator weiß, ob seine Ergebnisse auf den normalen Straßenverkehr übertragbar sind. Wie bei den Realexperimenten kann man die Versuchspersonen nur ein einziges Mal hereinlegen.

Angesichts dieser Schwierigkeiten kann man seine Ansprüche zurücknehmen und den Versuchspersonen von vornherein mitteilen, welches Reaktionssignal erscheinen wird und wie sie zu reagieren haben. Der Ansatz wurde vom DVG [Burckhardt 1985] und Cohen [Cohen 1987] verfolgt. Im DVG-Experiment mußten die Versuchspersonen auf das Aufleuchten der Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs reagieren, wobei sie ihr eigenes Bremspedal kurz antippen mußten. Cohen bedeckte die Windschutzscheibe mit einer Fülle von LEDs, von denen jeweils eine zufällig angeschaltet wurde. Der Fahrer mußte beim Aufleuchten einer LED einen Schalter betätigen, der am Lenkrad befestigt war. Bei diesen Experimenten gibt es keine Gefahr, der Fahrer wird lediglich vom Ehrgeiz getrieben, zu den besten Teilnehmern zu gehören. Man erhält auf diese Weise eine ganze Reihe von einzelnen Reaktionstests, wobei man allerdings die Testbedingungen nicht gänzlich kontrollieren kann. So weiß man nicht, ob die Konzentration des Fahrers nicht gerade von anderen Aufgaben in Anspruch genommen wird oder wohin er gerade blickt. (Will sagen: Man kann den Blickwinkel, unter dem der Reakti-

onsreiz erscheint, nicht kontrollieren, sofern nicht spezielles Gerät eingesetzt wird. Dieser Punkt erwies sich als eine Quelle von Unwägbarkeiten im DVG-Experiment.)

Letztendlich kann man noch bescheidener werden und kontrollierte Versuchsbedingungen schaffen, wobei man allerdings zur Abstraktion gezwungen ist. Dies ist der Weg, den wir in unseren Experimenten [Zöller 1995, Hugemann 1996] eingeschlagen haben und den auch unzählige andere wählten. Man kann nicht erwarten, dass diese Art von Experimenten numerisch exakte Werte für die Reaktionszeiten am Unfall liefert, aber man kann den unterschiedlich starken Einfluß bestimmter Testparameter unter sehr stabilen Bedingungen studieren.

Wir sehen: Es gibt keinen Königsweg, die Fahrerreaktionszeiten bei Abwehrhandlungen zu bestimmen. Jeder Ansatz hat seine eigenen Vor- und Nachteile und wir können dies akzeptieren, solange wir uns dessen bewußt sind.

3. Das den deutschen Empfehlungen zugrundeliegende Experiment

Die Empfehlungen des DVG beruhen auf einem einzigen Experiment, das durch Abb. 1 veranschaulicht wird. Die Versuchspersonen mußten einem anderen Fahrzeug etwa eine Stunde lang auf einer ruhigen Landstraße folgen. Jedesmal, wenn die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs aufleuchteten, sollte die Versuchsperson ihr eigenes Bremspedal so schnell wie möglich berühren. Als Reaktionszeit galt das Zeitintervall zwischen dem Aufleuchten der Bremslichter und dem Berühren des Bremspedals im Folgefahrzeug. Die Versuchsserie umfasste 41 Probanden, von denen die meisten junge männliche Studenten waren. Die gesamten Versuchsfahrten erteteten 3.846 Einzelreaktionen, d.h. etwa 100 für jeden Teilnehmer

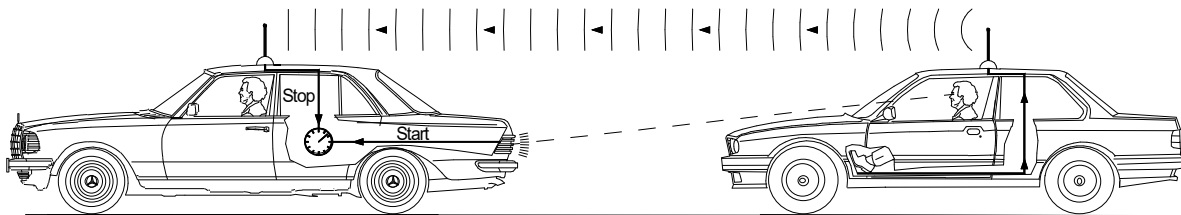
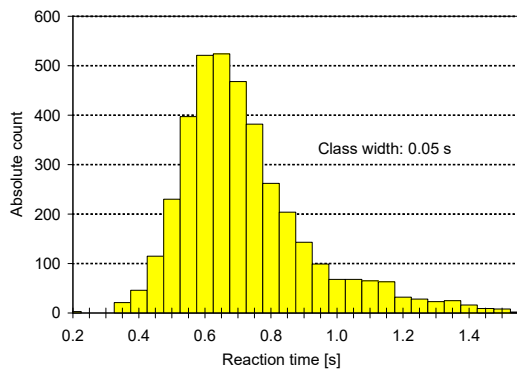
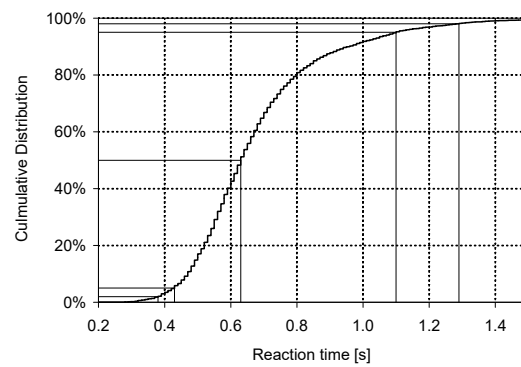


Abbildung 1. Experiment des DVG

Anfang der 80er Jahre, als das Experiment durchgeführt wurde, benutzte man analoge Technik. Die Reaktionszeiten wurden durch den Experimentator, einem jungen Studenten, von Hand auf Versuchsblättern notiert. Diese Original-Versuchsblätter bilden den Anhang zu seiner Diplomarbeit. Die handschriftlich notierten Daten wurden von uns in den Computer gefüttert und erneut ausgewertet. Die Abbildungen dieses Beitrags basieren alle auf diesen digitalisierten Daten. Die Abb. 2 zeigt das Histogramm und die Summenhäufigkeit der gepoolten Reaktionszeiten (die Erklärung der Fachtermini folgt weiter unten).



a) Histogramm



b) Summenhäufigkeit der Reaktionszeiten

Abbildung 2. Reaktionszeiten nach DVG-Daten

Die mathematische Auswertung des Experiments wurde von Burckhardt durchgeführt. Dabei wurde er von einer Expertenrunde unterstützt, deren Teilnehmer den unterschiedlichsten Fachbereichen entstammten (Psychologie, Ophthalmologie, etc.). Die Ergebnisse wurden zunächst durch die Kommission überprüft und dann vom DVG gebilligt. Einige Jahre später publizierte Burckhardt ein komplettes Buch, das die Auswertestrategie im Detail beschrieb [Burckhardt 1985]. Deshalb sprechen wir im folgenden von «Burckhardts Experiment» bzw. dem «DVG-Experiment».

4. Methoden zur statistischen Beschreibung

Die Abb. 2a zeigt das typische Ergebnis eines Reaktionszeitexperiments in Form eines Histogramms. Typischerweise gibt es eine minimale Reaktionszeit, die nicht unterschritten werden kann. Dies begründet sich in den Mindestzeiten für die mentale Verarbeitung und die rein physischen Komponenten der Antwort. Für Zeiten, die geringfügig länger sind als dieses Minimum, werden die meisten Antworten registriert, wir beobachten also die größte Antwortwahrscheinlichkeit. (Die damit verknüpfte Reaktionszeit wird als *Modalwert* der Verteilung bezeichnet.) Reaktionstests, die keine Antwort innerhalb dieses «Standardzeitintervalls» erhalten, bekommen eine verzögerte Antwort – oder überhaupt keine. Da die Reaktionszeit keine obere Schranke besitzt (die Analogie zur unteren Grenze), können diese verzögerten Antworten erst nach langer Zeit eintreffen. Hierdurch entsteht der «lange Schwanz» der Verteilung am rechten Ende. Dieses statistische Verhalten ist typisch für Reaktionszeiten [Luce 1986].

Es muss deutlich herausgestellt werden, dass die Verteilung der Reaktionszeiten nicht allein auf dem Unterschied zwischen den verschiedenen Personen beruhe (*interpersonelle Variation*). Man kann ein und dieselbe Person unter sehr stabilen Bedingungen testen und sie wird innerhalb einer halben Minute ihre Reaktionszeit vom ein auf das andere Mal verdoppeln (*intrapersonelle Variation*). Das Problem der rein statistischen Verteilung ist den Reaktionszeiten immanent, d.h. auch die Reaktionszeit einer einzelnen Person kann nur mit statistischen Mitteln beschrieben werden. Nun, welches sind die richtigerweise anzuwendenden Mittel? Offensichtlich sieht die Verteilung Abb. 2a der Normalverteilung nicht gerade ähnlich. Entsprechend ist die Beschreibung durch Mittelwert und Standardabweichung unangemessen, zumindest unzureichend.

4.1 Summenhäufigkeit, Perzentile und Histogramm

In einem ersten Ansatz können wir die Rohdaten einfach nach aufsteigenden Werten sortieren und dann abzählen, in wie viel Prozent der Fälle die Versuchsteilnehmer innerhalb bestimmter Zeit geantwortet haben. Dies führt dann zu der *Summenverteilung* in Abb. 2b. Die Summenverteilung kann dann durch Zeiten charakterisiert werden, die jeweils in einem bestimmten Prozentsatz der Fälle unterschritten werden. Diese Zeiten nennen sich *Perzentile*. Das 50%-Perzentil wird *Median* genannt, er ersetzt gewissermaßen den Mittelwert im Falle einer nicht-normalen Verteilung. Normalerweise werden die Rohdaten beim 2%- und 98%-Perzentil abgeschnitten: Die Reaktionszeiten unterhalb des 2%-

Perzentils sind höchstwahrscheinlich Fehlreaktionen, diejenigen oberhalb des 98%-Perzentils beruhen meist auf Geistesabwesenheit. Die von der Rechtsprechung akzeptierte Unter- und Obergrenze kann rein anhand von Perzentilen festgelegt werden. Für die Rechtsprechung gibt es keinen Grund, die Daten weitergehend weiter aufzubereiten. Dieser Punkt ist so entscheidend, dass wir den Satz ruhig noch einmal wiederholen können: Für die Rechtsprechung gibt es keinen Grund, die Rohdaten weiter aufzubereiten.

Im Rahmen wissenschaftlicher Arbeit kann es durchaus sinnvoll sein, die Rohdaten weiterzuverarbeiten. Wir können z.B. die Rohdaten klassifizieren, indem wir sie bestimmten Bandbreiten, sogenannten *Klassen* zuordnen, wie wir es in Abb. 2a getan haben. Dies ergibt das *Histogramm* der Verteilung und gibt uns eine etwas präzisere Vorstellung, in welcher Weise die Verteilung von der Normalverteilung abweicht. Das Histogramm von Reaktionszeiten ist typischerweise *linkssteil* und hat einen «Schwanz» langer Reaktionszeiten an der rechten Seite.

4.2 Verteilungsfunktionen

Mit mehr und mehr experimentellen Ergebnissen strebt die Summenhäufigkeit gegen eine kontinuierliche Funktion, die dann jeder Reaktionszeit ein bestimmtes Perzentil zuordnet. Die Funktion, die man durch diesen Grenzübergang erhält, wird *Verteilungsfunktion* $F(t)$ genannt. Ihre Ableitung nennt sich *Wahrscheinlichkeitsdichte* $f(t)$ und ist das kontinuierlich Äquivalent zum Histogramm. Die *Ausfallrate* $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (1)$$

ist von einigem theoretischen Interesse. Sie beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit das durch die Verteilungsfunktion $F(t)$ beschriebene Ereignis die verbliebenen Personen (oder die verbliebenen Bauteile) ereilt. (Die Anwendbarkeit auf Flugzeugunglücke sollte offensichtlich sein.) Angewendet auf Reaktionszeiten beantwortet die Ausfallrate die Frage: Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird eine Person, die bislang noch nicht reagiert hat, dies im nächsten Augenblick tun? Es ist von einigem theoretischen Interesse, ob $\lambda(t)$ mit wachsender Zeit t gegen Null geht oder aber stetig wächst. Werden die Schlafmützen das Signal übersehen oder muss auch der Lahmste irgendwann einmal reagieren?

Es hat zahlreiche Versuche gegeben, die Versuchsdaten von Reaktionszeitexperimenten durch analytische Funktionen $F(t)$ oder $f(t)$ zu beschreiben. Jede der gebräuchlichen Verteilungsfunktionen ist dabei mindestens einmal vorgeschlagen worden [Luce 1986]. Mit Blick auf Abb. 2a können wir die minimalen Anforderungen formulieren, die eine geeignete Verteilungsfunktion erfüllen sollte. Sie sollte zumindest drei Parameter haben, um folgende Eigenschaften der Wahrscheinlichkeitsdichte korrekt wiederzugeben

- die Lage des Maximums
- die Krümmung im Bereich des Maximums
- die relative Steigung links und rechts des Maximums.

4.3 Momente einer Verteilung

In dem Bestreben, die Verteilung durch einzelne charakteristische Werte zu beschreiben, können wir die *Momente* einer Verteilungsfunktion berechnen. Diese werden definiert durch

$$M_n = \int_0^{\infty} t^n f(t) dt \quad (2)$$

Das erste Moment einer Verteilung ist der *Mittelwert* μ , der oftmals subtrahiert wird, um das *zentrale Moment*

$$\underline{M}_n = \int_0^{\infty} (t - \mu)^n f(t) dt \quad (3)$$

zu berechnen. Sofern nicht explizit erwähnt, meint «Moment» normalerweise «zentrales Moment». Das Moment zweiter Ordnung wird *Varianz* genannt, und seine Quadratwurzel die *Standardabweichung* σ . Über das Moment dritter Ordnung läßt sich die *Schiefe* χ berechnen.

$$\chi^3 = \frac{\underline{M}_3}{(\underline{M}_2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\underline{M}_3}{\sigma^3} \quad (4)$$

Im Gegensatz zum Mittelwert und Standardabweichung ist die Schiefe dimensionslos. Eine symmetrische Verteilung (wie die Standardverteilung) hat die Schiefe Null, eine linkssteile Verteilung hat eine positive Schiefe. Das Moment vierter Ordnung wird *Kurtosis* genannt. Die Momente noch höherer Ordnung haben keinen speziellen Namen.

Die am Ende des letzten Abschnitts erwähnten Eigenschaften können nun durch die ersten drei Momente der Verteilung repräsentiert werden. Diese Momente können in einfacher Weise aus den Rohdaten berechnet werden, wozu nur die Integrale durch die entsprechenden Summationen zu ersetzen sind.

4.4 Spezielle Verteilungsfunktionen

4.4.1 Gammaverteilung

Bei unseren Experimenten konnten die Rohdaten mit der Gammaverteilung exzellent angepaßt werden [Zöller 1995, Hugemann 1996].

$$F(t) = \frac{\Gamma\left(B, \frac{t - t_0}{T}\right)}{\Gamma(B)} \quad (5)$$

Zu beachten ist der von uns eingeführte Offset t_0 , der normalerweise nicht enthalten ist. Obwohl die Beschreibung über (unvollständige) Gammafunktionen $\Gamma(B, t)$ erschreckend aussieht, ist sie überraschend einfach zu handhaben. Vor allem sind ihre Parameter explizit mit den Momenten der Verteilung verknüpft:

$$B = \frac{4}{\chi^2} \quad ; \quad T = \frac{1}{2} \sigma \chi \quad ; \quad t_0 = \mu - \frac{\sigma}{2\chi} \quad (6)$$

Die Ausfallrate nähert sich $1/T$ für lange Zeiten t , also einem konstanten Wert. Die minimale Reaktionszeit ist t_0 , da $F(t)$ für Werte $t < t_0$ nicht definiert ist.

4.4.1 Weibull-Verteilung

Burckhardt verwendete die Weibull-Verteilung, um seine Daten zu beschreiben

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^B} \quad (7)$$

Das Charakteristikum der Weibull-Funktion ist ihre einfache Ausfallrate

$$\lambda(t) = \frac{B}{T-t_0} \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{B-1} \quad (8)$$

die für $B > 1$ monoton wächst. Mit fragwürdigen Argumenten entledigte sich Burckhardt des Parameters t_0 um

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^B} \quad (9)$$

zu erhalten. Die beiden verbleibenden Parameter B und T sind recht unschön mit den Momenten der Verteilung verknüpft

$$\mu = T \Gamma\left(\frac{B+1}{B}\right) \quad ; \quad \sigma^2 = T^2 \left[\Gamma\left(\frac{B+2}{B}\right) - \Gamma^2\left(\frac{B+1}{B}\right) \right] \quad (10)$$

(Die Formel für die Schiefe ist noch scheußlicher.) Offensichtlich gibt es keine Möglichkeit, aus diesen Gleichungen eine explizite Formel für die Berechnung von B und T zu gewinnen. Wenn man allerdings den Logarithmus der Reaktionszeit $\ln(t)$ betrachtet, so können beide Parameter aus dessen Mittelwert $\tilde{\mu}$ und Standardabweichung $\tilde{\sigma}$ berechnet werden

$$B = \frac{\pi}{\sqrt{6} \tilde{\sigma}} \quad ; \quad T = e^{\left(\tilde{\mu} + \frac{C}{B}\right)} \quad (11)$$

C ist die Eulersche Konstante (ungefähr 0,5772). Dies war Burckhardts Vorgehensweise.

Die beiden Modellparameter sind gemäß Gleichungen (10) und (11) mit Mittelwert und Varianz der Daten verknüpft. Es gibt keinen weiteren Parameter, um die Schiefe widerzuspiegeln, diese wird einfach durch B und T festgelegt. Die Abb. 3 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte einiger Weibull-Verteilungen mit Mittelwert $\mu = 1$ und verschiedenen Werten für B . T wurde dabei über Gl. (10) entsprechend angepaßt. Normalerweise wird das Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichte kleiner, wenn sich die Verteilung verbreitert, denn es gilt

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = F(t = \infty) = 1 \quad (12)$$

Um den Vergleich zu vereinfachen, wurden die Funktionen in Abb. 3 derart normiert, dass sie den Maximalwert 1 haben. Es zeigt sich, dass Weibull-Verteilungen für $B \gtrsim 3.6$ eine negative Schiefe haben, d.h. rechtsteil sind und damit ungeeignet für die Beschreibung von Reaktionszeiten.

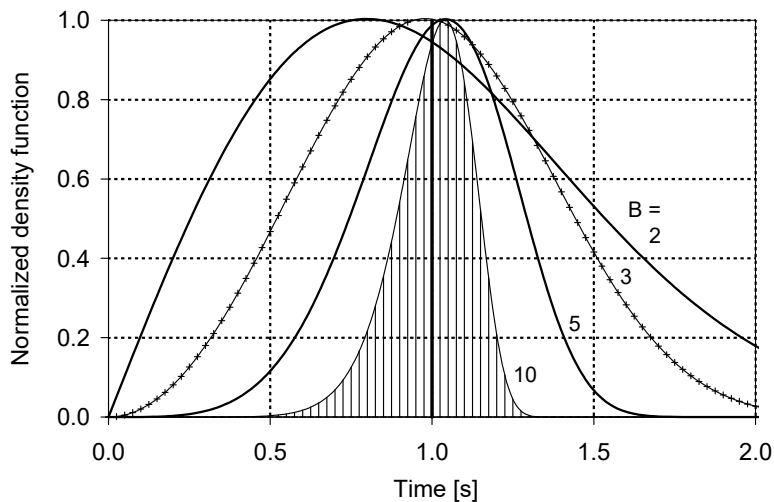


Abbildung 3. Weibull-Verteilungen mit Mittelwert 1 und unterschiedlichen Werten für B

4.4.3 Anpassen der Verteilungsfunktion an die Rohdaten

In den beiden vorangegangenen Abschnitten haben wir gezeigt, wie die Modellparameter mit den Momenten der Verteilung verknüpft sind (und umgekehrt). Damit scheint sich eine einfache Möglichkeit zu eröffnen, die Modellparameter zu gewinnen. Wegen der expliziten Gleichungen ist das Verfahren für die Gammaverteilung sogar besonders einfach. Wir raten dennoch davon ab, in dieser Weise vorzugehen. Das Problem besteht darin, stabile Schätzungen für die höheren Momente der Verteilung aus den Rohdaten zu gewinnen. Da die Abweichung vom Mittelwert der dritten Potenz (oder mehr) bewertet wird, werden einzelne Ausreißer überbetont, was zu falschen Schätzwerten für Schiefe und Kurtosis führt. Deshalb ist dieses Verfahren auf Mittelwert und Standardabweichung beschränkt. Statt uns der höheren Momente zu bedienen, sollten wir die Verteilungsfunktion direkt mittels Minimaxmethoden an die experimentelle Verteilung anpassen.

Um dies zu tun, benötigen wir ein Maß für die Güte der Approximation, die man über verschiedene Verteilungsfunktionen erzielt. Jedwede dreiparametrische Verteilungsfunktion kann den experimentellen Daten angepaßt werden – wie finden wir heraus, welche die beste ist? Es hat einige Diskussionen darüber gegeben, durch welche Darstellung die experimentellen Daten geeignet repräsentiert werden: Ist es die Summenhäufigkeit, das Histogramm oder sogar die Ausfallrate? (Der Gebrauch von Momenten ist in gewisser Weise äquivalent zur Summenhäufigkeit.)

Es zeigt sich [Luce 1986], dass die Summenhäufigkeit ungeeignet ist, die Leistungsfähigkeit verschiedener funktionaler Ansätze zu bewerten: Ihre Verteilungsfunktionen werden alle mehr oder weniger gleich aussehen. Die Wahrscheinlichkeitsdichte gibt eine bessere Vorstellung vom Grad der Übereinstimmung, insbesondere weil verschiedene Funktionen einen unterschiedlichen «Schwanz» aufweisen. Es wäre nur konsequent, einen Schritt weiter zu gehen und sich auf diesen «Schwanz» einzuschießen, indem man die Ausfallraten vergleicht. Obwohl dies theoretisch verlockend erscheint, würde ein derartiger Ansatz den kleinen Teil der Ergebnisse, der für den «Schwanz» verantwortlich ist, überbewerten. Wir denken deshalb, dass der Vergleich zwischen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und Histogramm einen vernünftigen Kompromiß darstellt.

5 Erneute Auswertung der DVG-Daten

5.1 Perzentile der Rohdaten

Wir sagten es bereits: Verteilungsfunktionen sind die Spielwiese der Wissenschaftler, die Rechtsprechung ist mit den Perzentilen gut bedient. Für die Rohdaten lauten sie

Tabelle 1. Perzentile der Rohdaten

<i>Perzentil</i>	<i>Antwortzeit</i>	<i>Reaktionszeit</i>	<i>Abweichung</i>
2%	0,36 s	0,56 s	-0,27 s
5%	0,43 s	0,63 s	-0,20 s
50%	0,63 s	0,83 s	0,00 s
95%	1,10 s	1,30 s	0,47 s
98%	1,29 s	1,49 s	0,66 s

Es ist zu beachten, dass die gemessenen Antwortzeiten keine Schwellzeit enthalten, da die Uhr bereits durch das **Berühren** des Bremspedals angehalten wurde. Gemäß den Empfehlungen des DVG beträgt die Schwellzeit etwa 0,2 s. (Ich persönlich glaube, dass sie für den Normalfahrer länger ist.) Dieser konstante Wert wurde in der dritten Spalte der Tabelle hinzugerechnet, um das zu erhalten, was die Deutsche Rechtsprechung üblicherweise «Reaktionszeit» nennt.

Die letzte Spalte listet die Abweichung vom Median. Es ist typisch für linkssteile Verteilungen, dass die unteren Perzentile nicht so stark vom Median abweichen wie die oberen. Die Frage, wo genau die Grenzen des Akzeptablen liegen, hat daher mehr Einfluß auf die höheren Perzentile. Das 98%-Perzentil liegt bei etwa 1,5 s.

5.2 Weibull weit abgeschlagen

Abb. 4 vergleicht unsere Approximation der Rohdaten (Gamma) mit Burckhardts (Weibull). Die Diskussion, welche der beiden die bessere ist, erübrigt sich wohl. Das Hauptproblem der zweiparametrischen Weibull-Verteilung ist es, dass sie die Schiefe nicht korrekt wiederzugeben vermag. Wir haben deshalb auch versucht, die dreiparametrische Weibull-Verteilung an die Rohdaten anzupassen, um ihr eine faire Chance zu geben. Das Ergebnis ist hier nicht wiedergegeben: Es sah nicht ganz so schlecht aus, aber Gamma war immer noch bedeutend besser.

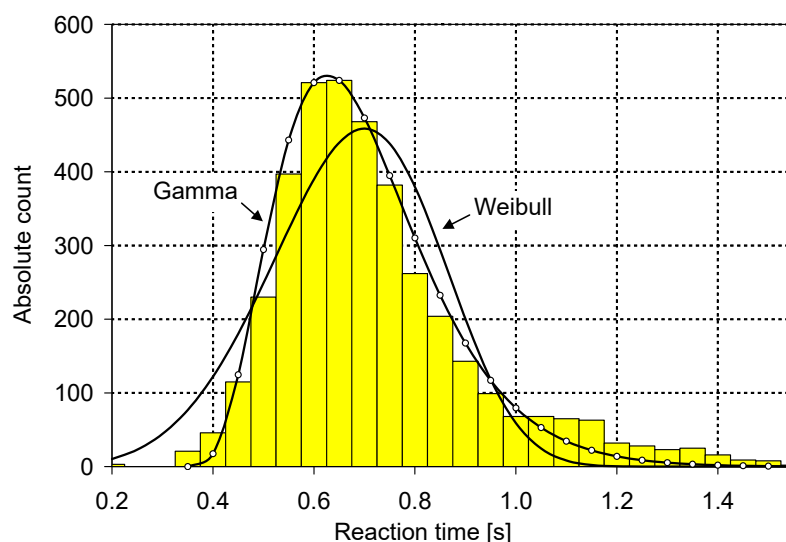


Abbildung 4. Approximation der DVG Daten durch Gamma- und Weibullverteilung

5.3 Rettungsversuch

Statt auf ein dreiparametrisches Modell zu wechseln oder andere Verteilungsfunktionen zu erwägen, wählte Burckhardt einen anderen Erklärungsansatz. Er postulierte, dass die experimentellen Ergebnisse die Überlagerung zweier Verteilungen seien

$$f(t) = \phi f_1(t) + (1 - \phi)f_2(t) \quad (13)$$

$f_1(t)$ repräsentiert die normalen Reaktionen und $f_2(t)$ solche, bei der einer Blickzuwendung bedurfte, um die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs zu fixieren. Dieser Ansatz basierte auf dem Paradigma, dass Menschen nicht auf peripher wahrgenommene Signale reagieren. Dieses Paradigma wurde ebenfalls widerlegt [Hugemann 1996]. Es macht eh nicht viel Sinn: Warum sollte eine derart klar instruierte Versuchsperson nicht auf ein peripher wahrgenommenes Bremslicht reagieren? Doch schauen wir auf Burckhardts Anpassung, Abb. 5: Die vereinte Kraft von fünf Parametern kann Gamma nicht schlagen!

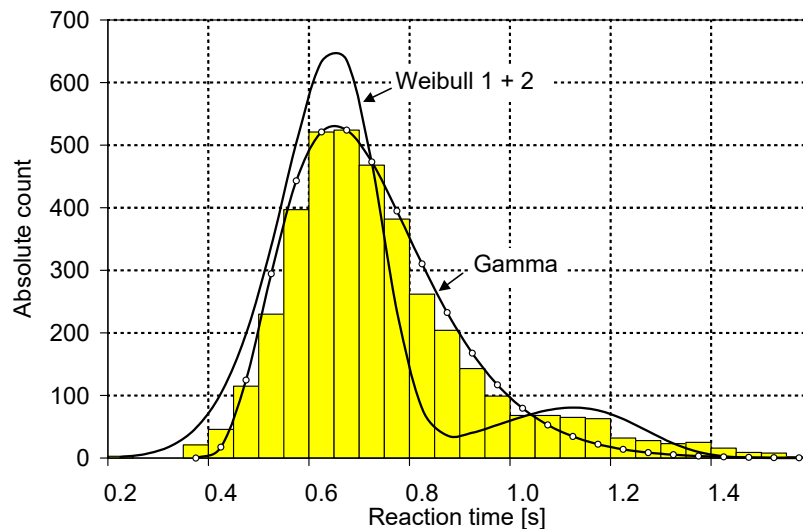


Abbildung 5. Approximation der DVG Daten durch Gamma- und doppelte Weibullverteilung

5.4 Erklärungsversuche

Ich habe nie die Gelegenheit erhalten, Burckhardt direkt zu fragen, wieso er den Ansatz Gl. (13) wählte und andere Konzepte nicht einmal ausprobierte. (Sie werden im gesamten Buch nicht einmal diskutiert.) Ich biete drei Erklärungsmöglichkeiten an:

5.4.1 Weibull ist dem Maschinenbauer geläufig

Wegen der einfachen Ausfallrate eignet sich Weibull hervorragend, um Ermüdungseffekte mechanischer Bauteile zu beschreiben. (Tatsächlich hat Weibull, der selbst Maschinenbauer war, sie zu diesem Zweck entwickelt.) Deshalb ist der Maschinenbauer mit der Weibull-Verteilung wohlvertraut, ebenso mit den zugehörigen mathematischen Werkzeugen. Das Anwenden der Weibull-Verteilung auf Reaktionszeiten war also eine vertraute Insel in einem fremden Arbeitsfeld.

5.4.2 Traditionserhalt

Seit ihren Anfängen hat die Deutsche Rechtsprechung die Sekunde als Standard-Fahrerreaktionszeit verwendet, sie mit der «Schrecksekunde» sogar ihrem Wortschatz zugefügt. Die Rohdaten bewiesen nun das Gegenteil: Sogar in der denkbar einfachsten Situation (oder kann der Leser sich irgendeine klarere Reaktionssituation im normalen Straßenverkehr vorstellen?), liegt ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Fahrerreaktionszeiten über diesem Wert.

Mit Burckhardts Interpretation der Daten war die Welt wieder in Ordnung: Beim Hauptpeak, der den Anteil von Reaktionen ohne Blickzuwendung repräsentiert, fällt das 98%-Perzentil unter 1 s. Wenn man also falsche Blickrichtung als Fahrerfehler auffasst, kann man weiterhin eine Reaktionszeit von maximal 1 s fordern. (Dies ist ein leuchtendes Beispiel dafür, wie Sprache das Denkbare begrenzt [Orwell 1949].)

5.4.3 Er bemerkte es schlechterdings nicht

Burckhardt verwendete die doppelt logarithmische Darstellung für die Verteilungsfunktion, um seine Konzepte zu illustrieren. Gl. (9) kann zu

$$G(t) \doteq \ln(\ln(1 - F(t))) = B \ln(t) - [B \ln(T)] \quad (14)$$

umgeformt werden. $G(t)$ ist also eine lineare Funktion von $\ln(t)$. Die Weibull-Verteilung wird deshalb in einem solchen Diagramm durch eine gerade Linie dargestellt. Wie bereits früher festgestellt wurde, sehen alle Verteilungsfunktionen $F(t)$ etwa gleich aus. Das doppelte Logarithmieren verursacht eine Verzerrung, die der Sache den Rest gibt. Möglicherweise bemerkte Burckhardt deshalb einfach nicht, wie weit er neben der Sache lag.

6 Andere Aspekte des DVG-Modells

Inspiziert durch die beiden Verteilungen, die er in den Daten «fand», entwickelte Burckhardt ein Kaskadenmodell der menschlichen Reaktion, Abb. 6. Nach diesem Modell war $f(t)$ das Ergebnis zweier kaskadierter Prozesse. Die Dichtefunktion $f(t)$ kann also aus den bekannten Dichtefunktionen der Einzelprozesse berechnet werden.

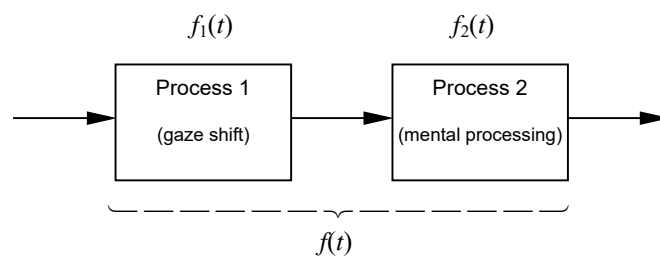


Abbildung 6. Kaskadierung zweier stochastischer Prozesse

Dieses Konzept wurde auf die physischen und mechanischen Aspekte der Reaktionsantwort erweitert, d. h. auf Umsetzzeit, Schwellzeit usw.. Diese führte zu den Empfehlungen gemäß Tab. 2, die man als «Taylorisierung der menschlichen Reaktionszeit» auffassen kann. Die gesamte Reaktionszeit ist das Ergebnis mehrerer Komponenten, die beliebig miteinander kombiniert werden können. Sofern die Reaktionsaufforderung extrafoveal erscheint, ist die Blickzuwendung eine notwendige Komponente der Reaktion. Extrafoveal bedeutet, mehr als $0,5^\circ$ außerhalb der Blickrichtung. (Es scheint niemanden zu kümmern, dass dies auf nahezu alle plötzlich auftauchenden Reize im Straßenverkehr zutrifft.) Sofern die Blickzuwendung mehr als 5° beträgt, wird eine Korrektursakade zugebilligt, da der erste Blicksprung möglicherweise nicht zur präzisen Fixation geführt hat. De facto sind alle Prozesse außer Blickzuwendung und Informationsverarbeitungszeit nahezu konstant, weil untere und obere Perzentile kaum auseinander liegen. Die Summe der betreffenden 2%- und 98%-Perzentile ergibt nicht das ent-

sprechende Perzentil des summarischen Prozesses. Dies ist Absicht, denn die Perzentile der Summenverteilung kaskadierter Prozesse entspricht nicht einfach der Summe der entsprechenden Perzentile der Einzelprozesse.

Tabelle 2. DVG Taylormodell des Reaktionsablaufs

	2%	50%	98%
Blickzuwendung < 5°	0,32 s	0,48 s	0,55 s
Korrektursakkade (for > 5°)	0,09 s	0,13 s	0,15 s
Informationsverarbeitung	0,22 s	0,45 s	0,58 s
Umsetzzeit	0,15 s	0,19 s	0,21 s
Schwellzeit	0,17 s	0,22 s	0,24 s
Basisreaktionsdauer	0,54 s	0,86 s	1,03 s
+ Blickbewegung < 5°	0,86 s	1,34 s	1,58 s
+ Blickbewegung > 5°	0,95 s	1,47 s	1,73 s

Wiederum beging Burckhardt einen mathematischen Fehler als er annahm, dass es sich bei der Verteilungsfunktion des Gesamtprozesses ebenfalls um eine Weibull-Verteilung handele. Wenn die beiden Prozesse nicht korreliert sind, so müssen sämtliche denkbaren Ergebnisse beider Prozesse miteinander kombiniert werden. Deshalb muss die Wahrscheinlichkeitsdichte des Gesamtprozesses über das *Faltungintegral*

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(t - \tau) d\tau \quad (15)$$

berechnet werden. Das Hintereinanderschalten zweier Weibull-Prozesse ergibt also keine Weibull-Verteilung. Abgesehen von diesen mathematischen Fehlern, ist das Kaskadenmodell aber auch theoretisch fragwürdig. Das menschliche Gehirn ist kein Fließband, bei dem der nächste Prozeß gestartet wird, wenn sein Vorgänger beendet ist. Selbst wenn wir akzeptieren, dass vor der bewußten Reaktion eine Blickzuwendung notwendig ist, wird die Anwesenheit einer potentiellen Gefahr – die den Blicksprung auslöst – die Hemmschwelle senken und die Reaktion beschleunigen.

7 Internationaler Gebrauch

Es ist relativ schwierig, den internationalen Gebrauch von Reaktionszeiten in der Rechtsprechung prägnant zusammen zu fassen. Zu allererst sollten wir zwischen Römischem Recht und Anglo-Amerikanischen Recht unterscheiden, denn das erste tendiert zu allgemeineren Regelungen, während sich das zweite auf den Einzelfall fokussiert. Mein Eindruck ist, dass Kontinentaleuropa den deutschen «Standard» mehr oder weniger übernommen hat. Die Unfallanalytiker in Großbritannien und USA lehnen die Idee, den Gebrauch der Reaktionszeit zu standardisieren, jedoch strikt ab. Dies ist sicher auch darauf zurückzuführen, dass die Prozessparteien dort eine solche, von technischen Experten festgelegte Reaktionszeit, niemals (beide) akzeptieren würden.

Im Jahr 1999 nutzte ich ein internationales Email-Forum für eine Umfrage. Ich bekam etliche Antworten aus USA und GB. Die Antworten offenbarten erstaunlich unterschiedliche Werte, wobei sich der Bereich von 0,7 s – 1,5 s erstreckte, «als Startpunkt der Diskussion». Generell bestand die Tendenz, einen Bereich anstelle eines einzelnen Wertes zu betrachten.

In Großbritannien gibt der *National Highway Code* eine Reaktionszeit von 0,68 s an, was den «britischen Mittelwert» etwas erniedrigt. (Der Highway Code ist ein kleines Heft, das die goldenen Fahrregeln zusammenfaßt und von jedem Fahrschüler gelernt werden muss.) Die Empfehlung des Highway Codes basiert auf dem simplen Umstand, dass das Fahrzeug dann pro mph Fahrgeschwindigkeit genau

einen Fuß während der Reaktionszeit zurückgelegt, weil dann $t_r = 1,609 / (3,6 \cdot 0,3048) \text{ s} = 0,68 \text{ s}$. In der letzten Ausgabe wurde dieser Wert auf 0,67 s erniedrigt, was nun 3 m alle 10 mph entspricht. (Britische Version der Übernahme von SI-Einheiten.) Gemäß einer persönlichen Information, die ich durch Richard Lambourn erhielt, werden 1,0 – 1,5 s in Großbritannien favorisiert. Dieser Wert kann auf 0,7 s erniedrigt werden, falls der Fahrer vorgewarnt ist oder, genauso gut, auf 2 s (oder sogar mehr) angehoben werden, falls die Umgebung keine Unfälle vermuten läßt – beispielsweise eine sehr ruhige Autobahn.

Generell ist festzustellen, dass Paul Olsons Buch [Olson 1996] einen großen Einfluß auf den Gebrauch von Reaktionszeiten in englischsprachigen Ländern hat. Es ist tatsächlich eine gute Informationsquelle, wenn man sich mit Fahrerreaktionen bei Unfällen beschäftigt. Die umsichtigen Empfehlungen, die Olson am Ende des Buches gibt, schlagen einen Bereich von 0,75 – 1,5 s in einfach gelagerten Situationen vor.

8 Schlussfolgerungen

Ich unterstütze weiterhin die Idee einer «Normung». (Oder aber auch «Richtlinien», weil dieser Begriff in Anglo-Amerikanischen Ländern auf nicht soviel Widerstände trifft.) Richtlinien sind immer noch besser, als wenn jeder Unfallanalytiker seine eigenen Werte propagiert.

Der DVG wählte den richtigen Ansatz, als er beschloss, Reaktionszeiten statistisch zu betrachten. Die obere Grenze ist jedoch zu rigide gezogen, wie sogar Burckhardts Experiment zeigt. Die Weiterverarbeitung der Rohdaten basierte auf fragwürdigen Argumenten. Die Unzulänglichkeiten der mathematischen Methodik produzierten einen künstlichen Effekt, der nicht zu beobachten ist, wenn man die adäquaten Mittel gebraucht.

Die Rechtsprechung sollte akzeptieren, was die Rohdaten des Experimentes uns sagen: Eine Reaktionszeit von 1,5 s muss auch in der denkbar einfachsten Situation akzeptiert werden, beispielsweise wenn die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs aufleuchten. Dies hat mit Blickzuwendung nichts zu schaffen, tatsächlich sind eine Reihe von Situationen vorstellbar, in denen eine Blickzuwendung nicht zugebilligt werden kann, selbst wenn der Reaktionsreiz peripher auftaucht [Hugemann 1996].

Das vom DVG vorgeschlagene Taylor-Modell der menschlichen Reaktion mag dem Maschinenbauer einleuchtend erscheinen, doch ist das menschliche Gehirn kein Fließband. Die physischen und mechanischen Aspekte der Reaktion mögen auf diese Weise behandelt werden, keinesfalls aber kann man einfach die Blickzuwendungszeit zur Informationsverarbeitungszeit addieren, um das Gesamtergebn zu erhalten.

In den frühen 80er Jahren war die obere Grenze der Reaktionszeiten nicht von derart großem Interesse, weil Fahrzeuge in der Regel Bremsspuren zeichneten und längere Reaktionen deshalb für den Fahrer ungünstig waren. Heutzutage sind Bremsspuren selten geworden (und deutsche Verkehrsunfallskizzen, in denen sie festgehalten werden, noch seltener). In dieser Situation erweisen sich lange Reaktionszeiten als für den Fahrer günstig. (Deutsche Unfallanalytiker haben bislang Glück gehabt, weil anscheinend niemand es den deutschen Anwälten erzählt hat.)

Ganz gleich, welche obere Grenze wir in Zukunft akzeptieren, sollten Unfallanalytiker die Reaktionszeit nicht als konstant betrachten und sie auch nicht dementsprechend behandeln. In zivilen Rechtsstreiten untersucht der Unfallanalytiker meist zwei Szenarien – eines zugunsten des Klägers und eines zugunsten des Beklagten. In diesen Szenarien sollte er die Reaktionszeit entsprechend anpassen.

Das Thema der Fahrerreaktionszeit bei Verkehrsunfällen ist mitnichten beigelegt und bietet noch Raum für weitere Untersuchungen. Leider interessiert sich niemand (abgesehen von Juristen und Unfallanalytikern) für bereits geschehene Unfälle. Deshalb sollten sich diesbezüglich ambitionierte Forscher eine andere Rechtfertigung für ihr Interesse zurechtlegen. Forschungsgelder gibt es allenfalls dann, wenn man den Einfluss der Reaktionszeit auf die Unfallvermeidung untersucht. Taktisch könnte es sinnvoll sein, dabei die Überalterung unserer Gesellschaft in den Mittelpunkt des Interesses zu stellen, denn die Untersuchung deren Einfluss' auf den Verkehr ist derzeit *en vogue*.

Der EVU sollte die Herausforderung annehmen und sich erneut des Themas widmen. Wir benötigen Fakten für eine ernsthafte Diskussion, falls jemand deutschen Rechtsanwälten den Inhalt dieses Beitrags verraten sollte.

Referenzen

- Burckhardt, M., «Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen», Verlag TÜV Rheinland Köln, 1985
- Burckhardt, M.; Burg, H.; Gnadler, R.; Schiemann, G., «Die Bremsreaktionsdauer von Pkw-Fahrern», *Der Verkehrsunfall* 19 (1981), pp. 224 - 227
- Cohen, A.S. : «The latency of simple reaction on highways: A field study, *Public Health Reviews*, 15 (1987), pp. 291-310
- Hugemann, W.; Zöller, H., «Notbremsreaktionen beim Dämmerungssehen und niedrigen Objektkontrasten», *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 34 (1996), pp. 243 - 246 and 307 - 312
- Luce, D., «Response Times», Oxford University Press, New York (1986)
- McGhee, D. V.; Mazzae, E. N.; Baldwin, G.H.S., «Driver Reaction Time in Crash Avoidance Research: Validation of a Driving Simulator Study on a Test Track.» *Proceedings of the 14th Triennial Congress of the International Ergonomics Association and the 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (IEA 2000/HFES 2000), San Diego/USA, (6) 2000*
- Olson, P., «Forensic Aspects of Driver Perception and Response», *Lawyers & Judges Publishing Co, Tuscon, 1996*
- Orwell, G., «Nineteen Eighty-Four. Appendix 'The Principles of Newspeak'», Penguin Books 1949
- Summala, H., "Driver/vehicle steering response latencies." *Human Factors*, 23 (1981), pp. 683-692.
- Zöller, H.; Hugemann, W. «Notbremsreaktionen beim Dämmerungssehen: eine experimentelle Studie unter simulierten Bedingungen», *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 33 (1995), pp. 209 - 214

Ingenieurbüro Morawski + Hugemann

von-Diergardt-Str. 19, 51375 Leverkusen, Germany

phone: +49 - 214 - 860 72 10, fax: +49 - 214 - 860 72 11, e-mail: IB.MuH@t-online.de