

Fachhochschule Köln

Fachbereich Fahrzeugtechnik

DIPLOMARBEIT

**Vergleich statistischer Auswerteverfahren der experimentell ermittelten
Reaktionszeiten von PKW-Fahrern im Straßenverkehr**

von

Hans Derichs

Matr.-Nr. 11001426

Referent : Prof. Dr.-Ing. Klaus Becker
Korreferent : Dipl.-Ing. Wolfgang Hugemann,
Ing.- Büro Morawski und Hugemann,
Leverkusen

Sommersemester 1998

Dieses PDF wurde im Nachhinein aus dem Worddokument der Arbeit erzeugt. Wegen des abweichenden Druckertreibers stimmt das Layout nicht 100%ig mit dem Original überein, weil es an einigen Stellen angepasst werden musste. Der Text selbst wurde jedoch nicht verändert.

Die unveränderte, kostenlose Weitergabe der PDF-Datei ist gestattet. Werden Diagramme aus der Arbeit als Anlage im Gutachten verwendet, so ist die vollständige Angabe der Literaturstelle unumgänglich.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Hugemann, Ing.-Büro Morawski und Hugemann in Leverkusen für die tatkräftige und kompetente Unterstützung, sowie für das Korrekturlesen bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ing. Klaus Becker für die Betreuung der Diplomarbeit bedanken.

ERKLÄRUNG

Ich versichere, daß ich diese Diplomarbeit selbständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate gekennzeichnet habe.

Aachen, 2. Juli 1998

Hans Derichs

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Reaktionszeiten allgemein	2
2.2	Blickzuwendung	4
2.3	Kontrast	6
2.4	Blendung	7
2.5	Adaptation	9
2.6	Reaktionszeiten im Straßenverkehr	9
2.6.1	Empfehlungen des Verkehrsgerichtstages	9
2.6.2	Versuch von Cohen	11
2.6.3	Versuch von Summala	12
2.7	Statistische Kennzahlen	13
2.7.1	Modalwert	13
2.7.2	Mittelwert μ	14
2.7.3	Varianz σ^2	14
2.7.4	Schiefe χ	15
2.7.5	Standardabweichung σ	16
2.7.6	Median	17
2.7.7	Perzentil	18
2.7.8	Ausfallrate	18
2.8	Häufigkeitsverteilungen und Verteilungsdichtefunktionen	19
2.8.1	Die Gaußverteilung	25
2.8.2	Die Weibull-Verteilung	27

2.8.3	Die Exponentialverteilung	31
2.8.4	Die Gammaverteilung	32
2.9	Anpassen von Verteilungsdichtefunktionen an empirisch ermittelte Häufigkeitsverteilungen	33
2.9.1	Momentenmethode	33
2.9.2	Verlustmethode	36
2.10	Statistischer t-Test	37
3	Auswertung des Altexperiments	40
3.1	Versuchsaufbau	40
3.2	Statistische Kenngrößen	43
3.2.1	Poolen	43
3.2.2	Einzelauswertung	45
3.2.3	Vergleich	47
3.3	Häufigkeitsverteilung	49
3.4	Momentenmethode	52
3.5	Verlustmethode	53
3.6	Auswertung mit Blickzuwendung	55
4	Eigene Versuche	59
4.1	Versuchsaufbau	59
4.2	Versuchsdurchführung	64
4.3	Versuchspersonen	67
5	Versuchsauswertung	72
5.1	Statistische Kenngrößen	73

5.2	Häufigkeitsverteilung	76
5.3	Momentenmethode	77
5.4	Verlustmethode	80
5.5	Umsetzzeit	82
5.6	t-Test des Alterseinflusses	82
6	Schlußfolgerung für den Straßenverkehr	84
7	Zusammenfassung	88
8	Literaturverzeichnis	90
9	Formelzeichen	92
A	Anhang	95
A.1	Ergebnisse von Cohen	95
A.2	Versuch von Summala	97
A.3	PASCAL-Programm	99
A.4	Totzeit	109

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 2-1: Modell des Reaktionsvorgangs nach Donders</i>	3
<i>Abbildung 2-2: Abhängigkeit Reaktionszeit von Kontrast und Blickrichtung /6/</i>	7
<i>Abbildung 2-3: Streulichtentstehung im Auge</i>	8
<i>Abbildung 2-4: Empfehlungen des 20. Deutschen Verkehrsgerichtstages</i>	10
<i>Abbildung 2-5: Asymmetrie in Abhängigkeit der Schiefe</i>	16
<i>Abbildung 2-6: Einfluß der Standardabweichung</i>	17
<i>Abbildung 2-7: Linkssteile Verteilung mit Mittelwert, Modalwert und Median</i>	18
<i>Abbildung 2-8: Ausfallrate</i>	19
<i>Abbildung 2-9: Dichtefunktion und Verteilungsfunktion</i>	22
<i>Abbildung 2-10: Stabdiagramm</i>	22
<i>Abbildung 2-11: Balkendiagramm</i>	22
<i>Abbildung 2-12: Kreisdiagramm</i>	23
<i>Abbildung 2-13: Stichprobenumfang $n=10$</i>	24
<i>Abbildung 2-14: Stichprobenumfang $n=20$</i>	24
<i>Abbildung 2-15: Stichprobenumfang $n=40$</i>	24
<i>Abbildung 2-16: Stichprobenumfang $n=80$</i>	24
<i>Abbildung 2-17: Standardnormalverteilung $N(0,1)$</i>	27
<i>Abbildung 2-18: Normalverteilung $N(77 ; 5,5)$</i>	27
<i>Abbildung 2-19: Normalverteilung $N(108 ; 5,5)$</i>	27
<i>Abbildung 2-20: Normalverteilung $N(77 ; 9)$</i>	27
<i>Abbildung 2-21: Dichtefunktion der Weibull-Verteilung mit verschiedenen Parametern</i>	30
<i>Abbildung 2-22: Verteilungsfunktion der Weibull-Verteilung mit verschiedenen Parametern</i>	30
<i>Abbildung 3-1: Fragebogen</i>	42
<i>Abbildung 4-1: Empfangseinheit</i>	59
<i>Abbildung 4-2: Sendeeinheit</i>	60
<i>Abbildung 4-3: Rückansicht des vorausfahrenden Fahrzeugs</i>	61
<i>Abbildung 4-4: Transistorschaltung für den Drucksensor</i>	62
<i>Abbildung 4-5: Open/Short Schaltung</i>	63
<i>Abbildung 4-6: Personendaten Gruppe A</i>	69
<i>Abbildung 4-7: Personendaten Gruppe A (Fortsetzung)</i>	70
<i>Abbildung 5-1: Intra- und interpersonelle Streuung der Personen 1 bis 8</i>	72

Abbildung 5-2: Intra- und interpersonelle Streuung der Personen 9 bis 15 _____73

Tabellen

<i>Tabelle 3-1: Kenngrößen der gepoolten Daten</i>	44
<i>Tabelle 3-2: Einzelauswertung</i>	45
<i>Tabelle 3-3: Durchschnittliche Merkmalsausprägungen</i>	46
<i>Tabelle 3-4: Merkmalsausprägungen</i>	47
<i>Tabelle 3-5: Vergleich Poolen und Einzelauswertung</i>	48
<i>Tabelle 3-6: Häufigkeitsverteilung</i>	50
<i>Tabelle 3-7: Parameter der Weibull-Verteilung</i>	52
<i>Tabelle 3-8: Parameter der Gammaverteilung</i>	52
<i>Tabelle 3-9: Parameter zeitverschobene Weibull-Verteilung</i>	52
<i>Tabelle 3-10: Parameter der Weibull-Verteilung</i>	54
<i>Tabelle 3-11: Parameter der Gamma-Verteilung</i>	54
<i>Tabelle 3-12: Parameter der zeitverschobenen Weibull-Verteilung</i>	54
<i>Tabelle 3-13: Funktionswerte der Verlustfunktion</i>	54
<i>Tabelle 3-14: Modell von Burckhardt</i>	56
<i>Tabelle 3-15: Anpassung über Verlustminimierung</i>	56
<i>Tabelle 4-1: Personendaten Gruppe B</i>	71
<i>Tabelle 5-1: statistische Kenngrößen der Einzelauswertung</i>	74
<i>Tabelle 5-2: Merkmalsausprägungen</i>	74
<i>Tabelle 5-3: Statistische Kenngrößen der gepoolten Daten</i>	75
<i>Tabelle 5-4: Gegenüberstellung der statistischen Kenngrößen</i>	75
<i>Tabelle 5-5: Verlustfunktion gepoolt / Einzelauswertung</i>	78
<i>Tabelle 5-6: Parameter der Weibull-Verteilung nach Ansatz I</i>	78
<i>Tabelle 5-7: Parameter zeitverschobene Weibull-Verteilung Ansatz I</i>	78
<i>Tabelle 5-8: Parameter der Gammaverteilung Ansatz I</i>	78
<i>Tabelle 5-9: Verlustfunktion Ansatz I</i>	80
<i>Tabelle 5-10: Parameter der Weibull-Verteilung Ansatz II</i>	80
<i>Tabelle 5-11: Parameter der zeitverschobenen Weibull-Verteilung Ansatz II</i>	80
<i>Tabelle 5-12: Parameter Gammaverteilung Ansatz II</i>	80
<i>Tabelle 5-13: Verlustfunktion Ansatz II</i>	81
<i>Tabelle 5-14: Umsetzzeit</i>	82
<i>Tabelle 5-15: t-Test Daten</i>	82

<i>Tabelle 6-1: Verlustfunktion der zeitverschobenen Weibull-Verteilung.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabelle 6-2: Statistische Kenngrößen Altexperiment und neues Experiment.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabelle 6-3: Gegenüberstellung der Verlustfunktionen</i>	<i>86</i>
<i>Tabelle 6-4: 2%- und 98%- Perzentil.....</i>	<i>87</i>

Diagrammverzeichnis

<i>Diagramm 3-1: Häufigkeitsverteilung (Histogramm)</i>	51
<i>Diagramm 3-2: Anpassung der Verteilungsfunktionen mit Hilfe der Momentenmethode</i>	53
<i>Diagramm 3-3: Anpassung der Parameter über die Verlustminimierung</i>	55
<i>Diagramm 3-4: Doppelte Weibull-Verteilung</i>	57
<i>Diagramm 5-1 : Histogramm der Häufigkeitsverteilung</i>	77
<i>Diagramm 5-2: Anpassung der Verteilungsfunktionen über Momentenansatz</i>	79
<i>Diagramm 5-3: Anpassung der Verteilungsfunktionen über Verlustminimierung</i>	81
<i>Diagramm 6-1: Histogramm ohne Person 1 und 3</i>	86

1 Einführung

Die Reaktionszeit von Fahrzeuglenkern ist eine für die Rechtssprechung und Unfallrekonstruktion wichtige Kenngröße. Sie stellt keine konstanten Wert dar, sondern unterliegt vielmehr intrapersonellen sowie interpersonellen Schwankungen. Für die Rechtssprechung und die Unfallrekonstruktion sind die oberen und unteren Grenzwerte dieser Streuung interessant. Bei bisherigen Untersuchungen der Reaktionszeit von Fahrzeuglenkern wurde bei der Auswertung der Daten die Annahme getroffen, daß die Reaktionszeit normalverteilt oder weibullverteilt sind. So wurde bei der Auswertung der Daten, die zur Empfehlung des 20. Deutschen Verkehrsgerichtstags führten, vorausgesetzt, daß die Reaktionszeiten dem Gesetz der doppelten Weibull-Verteilung unterliegen. Bei der Auswertung der Daten wurden allerdings keine Alternativen zur Weibull-Verteilung überprüft. So sollen im ersten Teil dieser Arbeit die damaligen Daten nach den in dieser Arbeit beschriebenen Methoden und mit alternativen Verteilungsfunktionen ausgewertet werden.

Im zweiten Teil der Arbeit werden dann in einem eigenen Versuch die Reaktionszeiten von Pkw-Fahrern im Straßenverkehr ermittelt. Dies soll mit Hilfe des Nachfahrversuchs erfolgen. Bei dem Versuch geht es darum, die kürzest möglichen Reaktionszeiten der Pkw-Fahrer zu ermitteln. Diese Daten sollen ebenfalls statistisch ausgewertet werden. Ergänzend zu den Reaktionszeiten sollen die Umsetzzeiten der Pkw-Fahrer ermittelt werden. Über eine Kontrollgruppe mit Versuchspersonen höheren Alters soll geprüft werden, ob das Alter der Versuchspersonen einen statistisch signifikanten Einfluß auf die Länge der Reaktionszeiten hat.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Reaktionszeiten allgemein

Die Begriffe Reaktionsverhalten beziehungsweise Reaktionsdauer sind typische Produkte des psychologischen Laboratoriums. Sie orientieren sich an den Forderungen der experimentellen Methode, alle Variablen und Bedingungen bis auf die interessierende unabhängige Variable konstant zu halten und sodann die Wirkung der unabhängigen Variablen auf ein oder mehrere abhängige Variablen zu untersuchen /1/.

Bei Experimenten in Laboratorien können die äußeren Einflüsse wie beispielsweise Kontrast, räumliche Umgebung, Beleuchtung und Tageszeit konstant gehalten werden. Da dies bei Experimenten außerhalb des Laboratoriums nicht möglich ist, lassen sich auch die in Laborexperimenten erzielten Ergebnisse nicht ohne weiteres auf reale Situationen übertragen. Nach experimentellen Messungen im Labor beträgt die Reaktionszeit des Menschen:

nach akustischen Reizen 160 ... 190 ms,

nach visuellen Reizen 220 ... 250 ms /2/.

Diese Werte gelten jedoch nur für Einfachreaktionen. Im psychologischen Labor wird zwischen drei unterschiedlichen Reaktionstypen unterschieden. Nach Donders /3/ werden diese eingeteilt in Donders Typ A, Donders Typ B und Donders Typ C.

- Donders Typ A (Einfachreaktion)

Bei Einfachreaktionen muß der Proband auf jedes ihm plötzlich angebotenes Signal mit einer einzigen gelernten Handlung reagieren.

- Donders Typ B (Mehrfachwahlreaktion)
-

Bei Mehrfachwahlreaktionen hat der Proband die Aufgabe, zwischen verschiedenen dargebotenen Reizen zu unterscheiden und je nach dargebotenem Reiz eine spezielle Handlung auszuführen. Beispielsweise hat ein Pkw-Fahrer bei plötzlich auftretender Gefahr die Wahl zwischen Bremsen oder Ausweichen.

- Donders Typ C (Go-NoGo-Reaktion)

Im Fall der Go-NoGo-Reaktion hat der Proband auf zwei unterschiedliche Signale die Aufgabe unterschiedlich zu antworten und zwar soll er bei einem Signal eine bestimmte Handlung ausführen und bei dem anderen Signal nichts tun.

Die Abbildung 2.1 zeigt das Modell des Reaktionsvorgangs nach Donders.

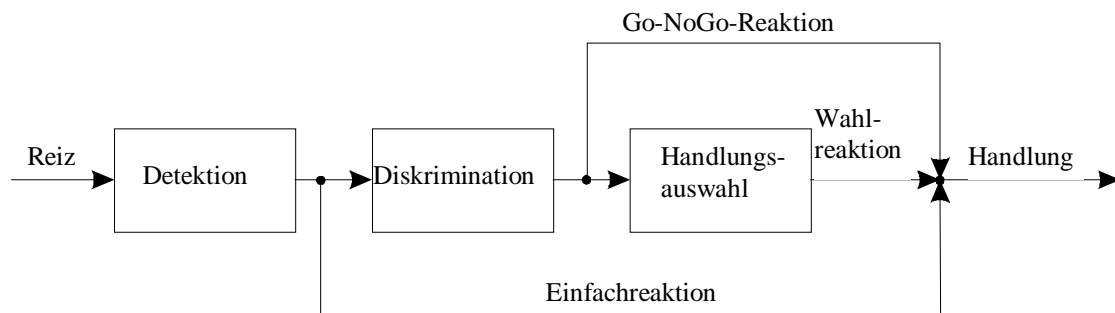


Abbildung 2-1: Modell des Reaktionsvorgangs nach Donders

Wie die obige Abbildung zeigt, muß die Einfachreaktion nach Donders` Modell die schnellste Reaktion sein. Für die Einfachreaktion ist also lediglich eine Detektion des Signals notwendig um die vorgeschriebene Handlung auszuführen. Für die Go-NoGo-Reaktion kommt noch die Reizdiskrimination, also eine einfache Unterscheidung des Signals, hinzu. Es wird eine Entscheidung darüber gefällt, ob eine Handlung notwendig ist oder nicht. Bei der Mehrfachwahlreaktion kommt zur Reizdiskrimination noch die Handlungsauswahl, Zuordnung Signal → Handlung, hinzu. Die Anzahl der bei der Mehrfachwahlreaktion auftretenden Reize ist nicht

beschränkt. Das Hick-Heymann-Gesetz beschreibt die Abhängigkeit der Reaktionszeit t_R von der Anzahl W der Wahlalternativen

$$t_R = a + b \cdot \log_2(W).$$

Hierin stellen a und b Konstanten dar, $\log_2(N)$ ist der Logarithmus zur Basis Zwei von der Anzahl der Wahlmöglichkeiten.

Im Straßenverkehr treten im Normalfall Reaktionen nach Donders Typ B, also Mehrfachwahlreaktionen, auf. Es sind allerdings auch Einfachreaktionen denkbar beispielsweise bei Kollisionsfahrten auf Autobahnen. Dort wird man das Aufleuchten der Bremslichter des Vordermannes sofort mit der Reaktion Gaswegnahme und Bremsen beantworten.

2.2 Blickzuwendung

Das menschliche Auge hat auf der Netzhaut rund 140 Millionen Stäbchen und 7 Millionen Zäpfchen [7]. Die Stäbchen sind farbunempfindlich, jedoch wesentlich lichtempfindlicher als die Zäpfchen. Die Zäpfchen und Stäbchen sind nicht gleichmäßig über der Netzhaut verteilt. Gegenüber der Pupille befindet sich eine Grube in der Netzhaut, welche man auch als *fovea centralis* bezeichnet. Die Fovea ist mit einem Raumwinkel von nur 1° sehr klein und enthält nur Zapfen. Die Zapfen der Netzhautgrube sind einzeln an je eine Sehnervenfasern geschaltet und stellen somit das Gebiet der höchsten Sehschärfe, den Bereich des fovealen (zentralen) Sehens dar. Daher muß, um ein Objekt wirklich scharf sehen zu können, eine Blickzuwendung dafür sorgen, daß es in der Netzhautgrube abgebildet wird. Dieser Vorgang wird als Fixation bezeichnet; das Objekt wird fixiert.

Wird ein Objekt, zum Beispiel eine Person am Straßenrand, nicht foveal, sondern peripher wahrgenommen, so ist zur Fixierung dieses Objektes eine Augenbewegung notwendig. Diese Blickzuwendung wird auch als Sakkade bezeichnet. Durch den kleinen

Raumwinkel (1°) der Fovea, braucht ein Objekt nur $0,5^\circ$ links oder rechts von der Hauptblickrichtung abzuweichen, um es nur noch peripher wahrnehmen zu können. Weicht ein Objekt mehr als 5° von der Hauptblickrichtung ab, so wird zu dieser Sakkade auch noch eine Korrektursakkade benötigt. Die Größe einer Sakkade liegt im Normalfall zwischen $4''$ und 15° . Blickrichtungsänderungen von mehr als 15° kommen normalerweise zustande, indem Augen und Kopf zusammen bewegt werden /8/.

Eine Korrektursakkade läßt sich so erklären, daß bei einer Sakkade, die größer als 5° ist, das menschliche Auge über das Ziel hinaus schießt oder die Bewegung nicht groß genug war. Das Objekt wurde also noch nicht foveal erfaßt. Es wird eine weitere Sakkade zur Fixierung benötigt, die sogenannte Korrektursakkade.

Während der sakkadischen Blicksprünge wird der Bildeindruck des Außenraums im Auge beziehungsweise im Gehirn partiell unterdrückt. Diese sogenannte sakkadische Suppression wird erst kurze Zeit nach dem Ende des Blicksprungs wieder voll aufgehoben. Die ursprüngliche Sehschärfe wird also erst kurze Zeit, etwa 50 ms, nach dem Einstellen der neuen Blickrichtung wieder erreicht.

Soll ein sich bewegendes Objekt, welches bereits fixiert wurde, verfolgt werden, so wird in diesem Fall von einer Blickfolgebewegung gesprochen. Diese Blickfolgebewegungen verlaufen anders als Sakkaden. Das interessierende Objekt bleibt ständig im Bereich des fovealen Sehens, wobei auch Kopf und Körperbewegungen ausgeglichen werden. Sie beginnen nach einer Latenzzeit von 0,15 ... 0,2 s, was sich zwangsläufig auf die Reaktionszeit auswirkt. Die Geschwindigkeit ist mit $30^\circ/\text{s}$ sehr hoch.

Die mittlere Geschwindigkeit von Sakkaden weist sehr starke Schwankungen auf. Die untere Grenze liegt bei etwa $100^\circ/\text{s}$ und die obere Grenze bei etwa $700^\circ/\text{s}$ /9/. Das Mittel für die Geschwindigkeit einer Sakkade beträgt $300^\circ/\text{s}$. Bei einem Blicksprung von 5° entspräche dies einer Dauer von etwa 20 ms. In Literaturstellen wird die Blickzuwendung teilweise nach der folgenden Formel berechnet, was einer Geschwindigkeit von $125^\circ/\text{s}$ entspräche:

$$S = 2 \cdot \alpha + 30$$

S: Dauer der Sakkade in ms

α : Blickwinkel in Grad.

Die Blickzuwendung erfolgt nicht beliebig schnell, sondern erst nach einer Latenzzeit von etwa 100 ms.

Die Dauer der Fixation liegt im Mittel bei etwa 0,2 ... 0,4 s, wobei ein Wert von 80 ms pro Fixation nicht unterschritten werden kann. Die Fixationshäufigkeit liegt im Mittel bei drei Fixationen pro Sekunde. Das Maximum, welcher allerdings nur sehr selten erreicht wird, liegt bei sechs Fixationen pro Sekunde /7/.

2.3 Kontrast

In Laborexperimenten konnte festgestellt werden, daß die Reizintensität einen Einfluß auf die Reaktionszeit darstellt /4, 5/. Für visuelle Reize besteht die Intensität hauptsächlich in dem Kontrast des Zielreizes zur Umgebung. Es läßt sich eindeutig sagen, daß je kleiner der Kontrast, desto länger die Reaktionszeit. Der Kontrast K ist abhängig von der Objektleuchtdichte L_0 und der Umgebungsleuchtdichte L_u .

$$K = \frac{L_0 - L_u}{L_u}$$

Um einen Gegenstand überhaupt noch wahrnehmen zu können, muß sein Kontrast größer als der vom Menschen noch wahrnehmbare Schwellenkontrast sein. Da die Leuchtdichte eines Objektes unter anderem von der Beleuchtungsdichte und dem Reflexionsgrad des Objektes abhängt, kann beispielsweise ein Objekt bei Scheinwerferlicht verschieden gut wahrgenommen werden. So wird bei Dunkelheit und ansonsten gleichen Bedingungen ein hell gekleideter Motorradfahrer früher als ein dunkel gekleideter Motorradfahrer erkannt. Da der Kontrast neben der Objektleuchtdichte auch von der Um-

gebungsleuchtdichte abhängig ist, ist es leicht verständlich, daß bei direkter Sonneneinstrahlung und ansonsten konstanter Objektleuchtdichte der Kontrast eines Objektes geringer und somit schlechter erkennbar als ohne Sonneneinstrahlung wird.

In der folgenden Abbildung 2-2 ist die Abhängigkeit der Reaktionszeit von Kontrast und Blickrichtung gezeigt. Wobei das zu betrachtende Objekt direkt in der Blickrichtung lag (foveal) oder 5° außerhalb der Blickrichtung lag (peripher).

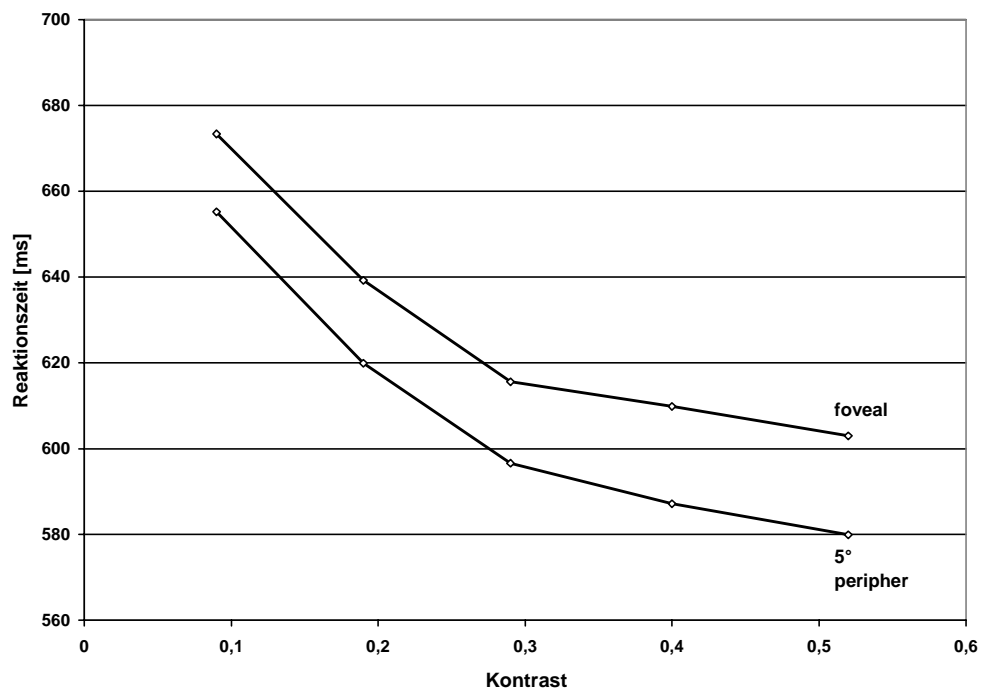


Abbildung 2-2: Abhängigkeit Reaktionszeit von Kontrast und Blickrichtung /6/

2.4 Blendung

Die Blendung stellt eine Beeinträchtigung der Sehleistung dar und hat somit auch einen Einfluß auf die Reaktionszeit. Sie entsteht durch eine inhomogene Leuchtdichtever-

teilung oder zu hohe Leuchtdichte im Gesichtsfeld, welche durch Adaptation (Kapitel 2.5) nicht mehr kompensiert werden kann.

Bewirkt die Blendung eine Verminderung der Sehleistung, so spricht man von physiologischer Blendung. Die psychologische Blendung verursacht lediglich das unangenehme Gefühl des Geblendetseins. Im Regelfall treten beide Arten der Blendungen gemeinsam auf.

Die Wirkungsmechanismen der physiologischen Blendung sind seit langem bekannt und beruhen auf dem im Auge durch Streuung entstehendem Streulicht. Das Streulicht überlagert sich auf der Netzhaut als äquivalente Schleierleuchtdichte L_V dem dort abgebildeten Bild und führt somit zur Kontrastminderung.

$$K = \frac{L_0 - L_u}{L_u + L_V}$$

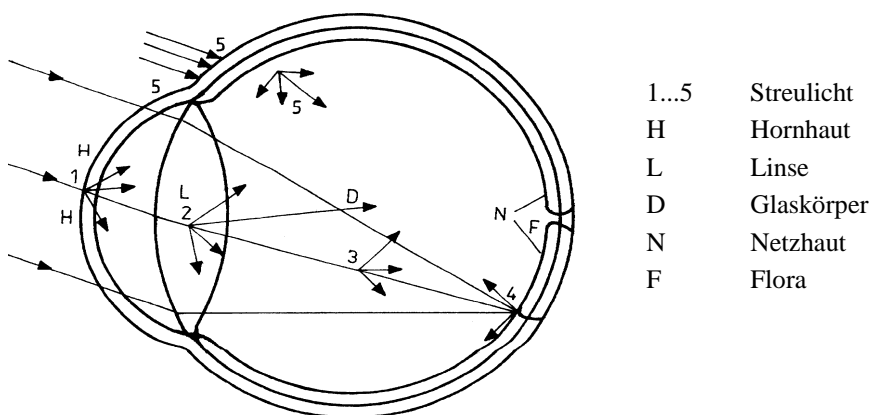


Abbildung 2-3: Streulichtentstehung im Auge

Dagegen sind die Wirkmechanismen der psychologischen Blendung nicht bekannt. Damit fehlen allgemeingültig formulierte Gesetzmäßigkeiten /7/.

2.5 Adaptation

Unter Adaptation wird die Anpassung des Sehorgans an unterschiedliche Lichtverhältnisse oder Sehaufgaben verstanden. Die Adaptation wird durch verschiedene Mechanismen bewirkt, beispielsweise Vergrößern oder Verkleinern der Pupillenweite, Übergang vom Zäpfchen- zum Stäbchensehen, die Empfindlichkeitsänderung der Zäpfchen und Stäbchen sowie nervöse Prozesse in der Netzhaut /7/. Bei Dunkelheit findet beispielsweise ein Übergang vom Zäpfchen- zum Stäbchensehen statt und der Pupillendurchmesser wird vergrößert. Dieser Vorgang erfolgt jedoch nicht plötzlich, sondern kontinuierlich. Die für den Straßenverkehr notwendige Sofortadaptation, beispielsweise bei der Begegnung zweier Fahrzeuge in der Dunkelheit, Fahrten in der Dämmerung oder Einfahren in einen Tunnel bei hellem Tageslicht, ist auf nervöse Vorgänge in der Netzhaut zurückzuführen. Bei den nervösen Vorgängen in der Netzhaut gibt es keine Kopplung zwischen beiden Augen.

2.6 Reaktionszeiten im Straßenverkehr

Seit Anfang der 30er Jahre wird bei der juristischen Beurteilung von Straßenverkehrsunfällen stereotyp eine Reaktionszeit von maximal 1 s, meist 0,7 s unterstellt. Erst gegen Ende der 70er Jahre wurde diese gängige Praxis in Frage gestellt, da neuere Untersuchungen zeigten, daß es keineswegs stereotype Reaktionszeiten geben kann. Diese müßten vielmehr variabel sein und eindeutig von der jeweiligen Verkehrssituation abhängen.

2.6.1 Empfehlungen des Verkehrsgerichtstages

Beim alljährlichen AVO / GUVU - Seminar 1979 in Köln, das unter dem Motto „Die Bedeutung der Reaktionsdauer für Unfallrekonstruktion, Unfallursachenermittlung und

Verkehrsrechtsprechung“ stand, wurde das Thema, des 1978 am lichttechnischen Institut der TU - Berlin stattgefundenen Kolloquiums, „Reaktionszeiten von Kraftfahrern“ aufgegriffen. Dr. Dr. Spiegel, Präsident des deutschen Verkehrsgerichtstages, regte anlässlich seines Abschlußreferates „Die Bedeutung des Seminars für die tägliche Praxis des Verkehrsrichters“ an, eine Kommission zu bilden, welche die Ergebnisse des Seminars zu Empfehlungen für die Organe der Rechtspflege verarbeiten sollte. Die Arbeit der Kommission, deren Mitglieder Dr.-Ing. M. Burckhardt als Ingenieur, Prof. Dr. Engels (Ausrichter des AVO/GUVU - Seminars, Ingenieur), Prof. Dr. Hartmann (Institut für Medizinische Optik, München), Dr. Dr. Spiegel als Jurist und Prof. Dr. Klebelsberg aus Innsbruck waren, hat 1982 zu den Empfehlungen des 20. Deutschen Verkehrsgerichtstages zu den Reaktionszeiten eines Kraftfahrers geführt. Diese Empfehlungen sind heute allgemein gängige Praxis.

In der folgenden Abbildung sind die Empfehlungen des 20. Deutschen Verkehrsgerichtstages zur Reaktionszeit von Kraftfahrern festgehalten.

	Perzentil	2 %	50 %	98 %
	(alle Angaben in Sekunden)			
Blickzuwendung		0,32	0,48	0,55
Korrektursakkade		0,09	0,13	0,15
Informationsverarbeitung		0,22	0,45	0,58
Umsetzen		0,15	0,19	0,21
Schwelldauer		0,17	0,22	0,24
Summen				
Basisreaktionsdauer		0,58	0,86	0,99
+ Blickzuwendung < 5 °		1,02	1,34	1,48
+ Blickzuwendung > 5 °		1,11	1,47	1,62

Abbildung 2-4: Empfehlungen des 20. Deutschen Verkehrsgerichtstages

Die Grundlage zur Ermittlung der Reaktionszeiten im Straßenverkehr bildete eine Diplomarbeit (im folgenden „alte Daten“ genannt), in welcher im Nachfahrversuch die Zeit zwischen dem Aufleuchten der Bremslichter des Vordermannes und dem Berühren des eigenen Bremspedals gemessen wurde (siehe Kapitel 3). Sollte die spezielle Unfallsituation eine Blickzuwendung erforderlich machen, so beruhen die Empfehlungen des Verkehrsgerichtstages bezüglich der dann zu veranschlagenden Reaktionsdauer auf der Addition der aus anderen Experimenten bekannten Blickzuwendung zur Basisreaktionsdauer.

Die Empfehlungen gehen davon aus, daß eine Notbremsreaktion nur dann erfolgt, wenn die Gefahrenquelle eindeutig erkannt wurde. Hierzu ist gegebenenfalls eine Fokussierung der Gefahrenquelle, also eine Blickzuwendung nötig. Im Gegensatz dazu wurde in Laborversuchen festgestellt, daß zwar der Faktor „Objektcontrast“ eine bedeutsame Einflußvariable darstellt, der Faktor „Position des Objektes im Gesichtsfeld“ erwies sich jedoch als unbedeutend, zumindest dann, wenn es um die Aufgabe ging, ein Objekt lediglich zu detektieren. Bezogen auf den Nachfahrversuch bedeutet dies, daß die Probanden, welche die Aufgabe hatten, auf das Aufleuchten der Bremslichter sofort mit dem Antippen des eigenen Bremspedals zu reagieren, keine Blickzuwendung benötigen, um zu reagieren.

In den Kapiteln sind weitere Experimente aufgeführt, die ebenfalls das Ziel hatten, die Reaktionszeit von Kraftfahrern für Notbremssituationen zu erfassen.

2.6.2 Versuch von Cohen

Bei den Versuchen von Cohen /10/ wurden in einem Versuchsfahrzeug 32 rote Leuchtdioden auf der Windschutzscheibe verteilt. Jede dieser 32 Leuchtdioden wurde über einen Computer angesteuert. Der Computer brachte eine einzelne der 32 Leuchtdioden zufällig nach Zeit und Ort zum Leuchten. Mit Hilfe von Fotozellen, welche die Helligkeit der Umgebung maßen, wurde die Intensität der Leuchtdioden so gesteuert, daß

sich unabhängig von der Helligkeit des Hintergrundes immer der gleiche Kontrast einstellte.

Am Lenkrad des Versuchsfahrzeuges war ein Metallring angebracht. Dieser sollte nach Aufleuchten einer der Dioden so schnell wie möglich berührt werden. Mit Aufleuchten einer Diode wurde gleichzeitig ein Zeitnehmer gestartet. Sobald der Ring berührt wurde, wurde der Zeitnehmer gestoppt und die Reaktionszeit entnommen. Reaktionszeiten unter 51 ms wurden als Fehlmessungen interpretiert und ignoriert. Werte über 4 s wurden als Nichtregistrierung des Aufleuchtens notiert. Die Blickrichtung der Probanden wurde mit einem NAC IV Eye-Mark-Recorder aufgezeichnet, so daß der Winkel zwischen Blickrichtung und aufleuchtender Diode ermittelt werden konnte. Die Versuche wurden innerorts, auf Landstraßen und auf Autobahnen in der Schweiz durchgeführt. Die Probanden, alles Schweizer Polizisten, wurden dazu angehalten, auf das Aufleuchten der Leuchtdioden so schnell wie möglich mit dem Berühren des Metallringes zu reagieren.

Beim Aufleuchten von Dioden, die nur 10° oder weniger von der aktuellen Blickrichtung abwichen, wurde eine Reaktionszeit von 942 ms im Mittel erreicht. Der 95%-Wert lag bei 2041 ms (nur 5% der Reaktionszeit waren langsamer). Bei einem Winkel von 30° oder mehr stieg die durchschnittliche Reaktionszeit auf 1648 ms und der 95%-Wert auf 3479 ms. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang zu finden.

2.6.3 Versuch von Summala

In den Versuchen von Summala /11/ sollte durch das plötzliche Öffnen der Fahrertür eines am Straßenrand geparkten Fahrzeugs zufällig vorbeikommenden Fahrern ein Lenkmanöver aufgezwungen werden. Die Position und die Geschwindigkeit des herannahenden Fahrzeuges wurde mit acht Paaren Infrarot-Photozellen gemessen. Das Öffnen der Türe wurde durch Mikroschalter registriert und stellte gleichzeitig den Start des Versuchs dar. Durch die Photozellen wurde das Ausweichmanöver festgehalten

und mit Hilfe von Formeln konnte dann der Beginn des Lenkmanövers und somit die Reaktionszeit ermittelt werden. Das Ausweichmanöver begann im Schnitt nach einer Reaktionszeit von 1,5 s. Im Anhang sind der Versuchsaufbau und die verwendeten Formeln zu finden.

2.7 Statistische Kennzahlen

Die statistischen Kennzahlen können ein Bild über die Form und die Lage einer Verteilung liefern. Sie geben also den Charakter einer Verteilung wieder. So beschreibt die Lage des Medians ($x_{0,5}$), des arithmetischen Mittels (μ) und des Modalwertes (\hat{x}) zueinander die Asymmetrie einer Verteilung. Es gelten die folgenden Beziehungen zwischen Lage der Parameter und der Asymmetrie

- $\mu = \hat{x} = x_{0,5}$ symmetrisch
- $\mu < x_{0,5} < \hat{x}$ rechtssteil
- $\hat{x} < x_{0,5} < \mu$ linkssteil.

Ebenso ist die Schiefe ein Maß für die Asymmetrie der Verteilung. Die Schiefe läßt sich direkt an den experimentell ermittelten Daten berechnen (siehe 2.5.3). Auf diese Art und Weise lassen sich schnell die Verteilungsdichtefunktionen aussortieren, die den Anforderungen an die Symmetrie nicht gerecht werden können.

2.7.1 Modalwert

Der Modalwert \hat{x} ist derjenige Wert, der am häufigsten vorkommt. Bei klassierten Daten (siehe Kapitel 2.8 ab Seite 19) wird von modalen Klassen gesprochen. Die Modalwerte sind dann jeweils die Klassenmitten. Hat eine empirische Verteilung nur einen Modalwert, heißt sie unimodal, bei zwei Modalwerten bimodal usw. Multimodale Verteilungen treten häufig bei Mischungen verschiedener

Grundgesamtheiten auf, so z.B. bei Stichproben von Werkstücken, die auf unterschiedlichen Maschinen gefertigt wurden.

2.7.2 Mittelwert μ

Die gebräuchlichste Maßzahl der statistischen Kennzahlen ist der Mittelwert, auch arithmetisches Mittel genannt. Der Mittelwert bildet das erste zentrale Moment einer Verteilung.

Für den diskreten Fall gilt

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i .$$

Für den kontinuierlichen Fall

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt .$$

2.7.3 Varianz σ^2

Die Varianz bildet das zweite zentrale Moment der Verteilung. Für den diskreten Fall gilt

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2 .$$

Der kontinuierliche Fall wird nach

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \mu)^2 \cdot f(t) dt$$

berechnet.

2.7.4 Schiefe χ

Die Schiefe ist das dritte zentrale Moment einer Verteilung. Es gilt

$$\chi = \frac{n}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot \sigma^3} \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^3$$

für den diskreten Fall und

$$\chi = \frac{1}{\sigma^3} \int_0^{\infty} (t - \mu)^3 \cdot f(t) dt$$

für den kontinuierlichen Fall.

Die Schiefe ist, wie die Lage des Medians, arithmetischen Mittels und Modalwertes zueinander, ebenfalls ein Maß für die Asymmetrie einer Verteilung. Es gelten hier die folgenden Zusammenhänge zwischen dem Wert der Schiefe und der Asymmetrie:

- $\chi > 0$ die Verteilung ist linkssteil
- $\chi = 0$ die Verteilung ist symmetrisch
- $\chi < 0$ die Verteilung ist rechtssteil.

In Abbildung 2-5 ist die Auswirkung der Schiefe auf das Aussehen der Verteilungsdichtefunktion zu sehen.

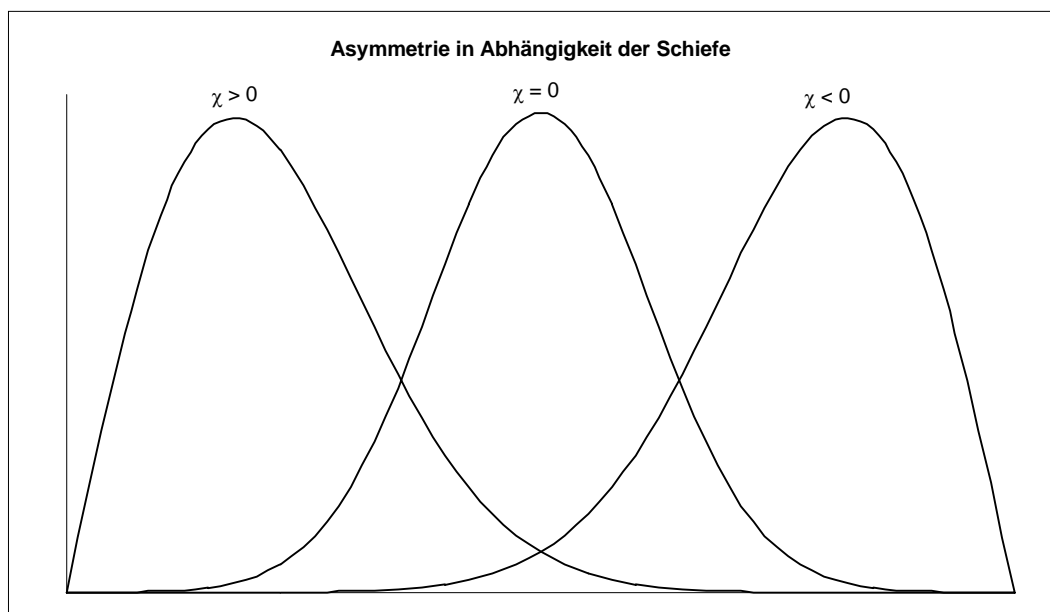


Abbildung 2-5: Asymmetrie in Abhängigkeit der Schiefe

2.7.5 Standardabweichung σ

Die Standardabweichung σ wird auch oft als Streuung bezeichnet und ist das wichtigste Streuungsmaß. Es ist die positive Wurzel der Varianz, also

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} .$$

Liegt ein großer Anteil der Meßwerte in unmittelbarer Nähe des Mittelwertes, so ergibt sich ein kleiner Wert für die Streuung. Die Meßwerte streuen also wenig um den Mittelwert. In Abbildung 2-6 ist zu erkennen, wie sich verschiedene Streuungen auf das Aussehen der Verteilungsdichtefunktion auswirken.

**Aussehen der Verteilungsdichtefunktion mit verschiedenen
Werten für die Standardabweichung**

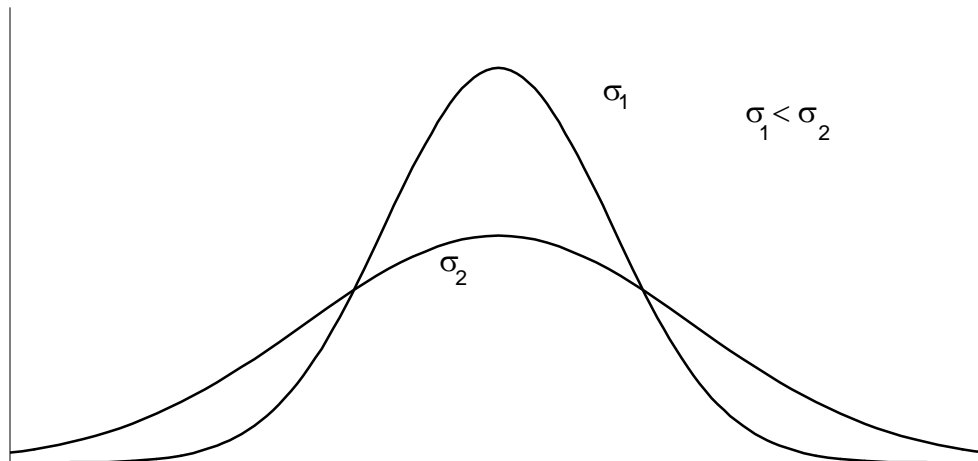


Abbildung 2-6: Einfluß der Standardabweichung

2.7.6 Median

Der Median, er wird auch 50 % - Perzentil oder Zentralwert genannt, ist der Wert einer Verteilung, von dem alle übrigen Werte in der Art und Weise abweichen, daß die Summe der Absolutbeträge der Abweichungen ein Minimum ergibt. Es ist also der Wert, der eine Häufigkeitsverteilung halbiert. Es liegen rechts und links von diesem Wert gleich viele Meßwerte. Die Berechnung des Medians ist davon abhängig, ob es sich um eine gerade oder ungerade Anzahl von Meßwerten handelt.

Für eine gerade Anzahl von n Meßwerten gilt

$$x_{0,5} = \frac{x_{(n/2)} + x_{(n/2+1)}}{2}.$$

Für eine ungerade Anzahl von Meßwerten gilt

$$x_{0,5} = x_{(n+1/2)}.$$

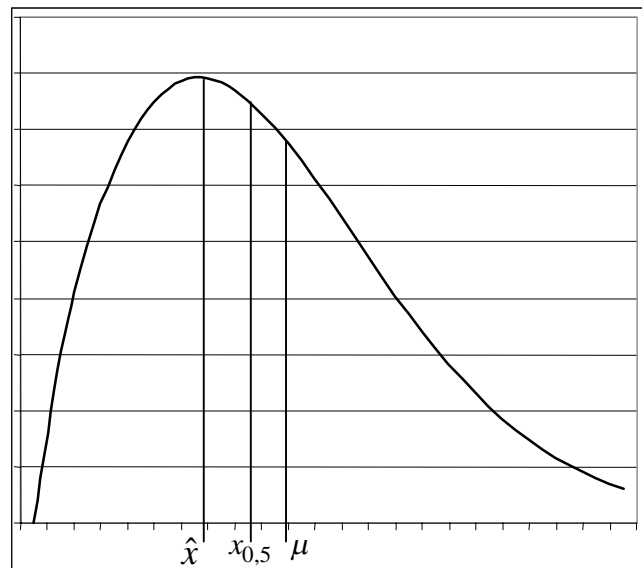


Abbildung 2-7: Linkssteile Verteilung mit Mittelwert, Modalwert und Median

2.7.7 Perzentil

Mit Hilfe der Perzentile kann man für eine Verteilungsfunktion den Wert der Abszisse berechnen für den gilt, daß das angegebene Perzentil unter diesem Abszissenwert liegt. Das Perzentil x_p ist derjenige Wert auf der x -Achse, der von einem Anteil P ($1 \geq P \geq 0$) der Daten nicht überschritten wird. Beispielsweise möchte man bei der Lebensdauerbeurteilung wissen, nach welcher Zeit t wieviel Prozent der Bauteile ausgefallen sind.

2.7.8 Ausfallrate

Die Definition der Ausfallrate lautet wie folgt

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

$f(t)$: Dichtefunktion

$F(t)$: Verteilungsfunktion.

Bei der Lebensdauerbetrachtung von Bauteilen, kann man in dem Diagramm der Ausfallrate ablesen, wieviel der noch funktionstüchtigen Bauteile in nächster Zeit ausfallen werden. Bezogen auf die Reaktionszeit bedeutet das, welcher Anteil der Personen, die noch nicht reagiert haben, im nächsten Sekundenbruchteil reagieren wird.

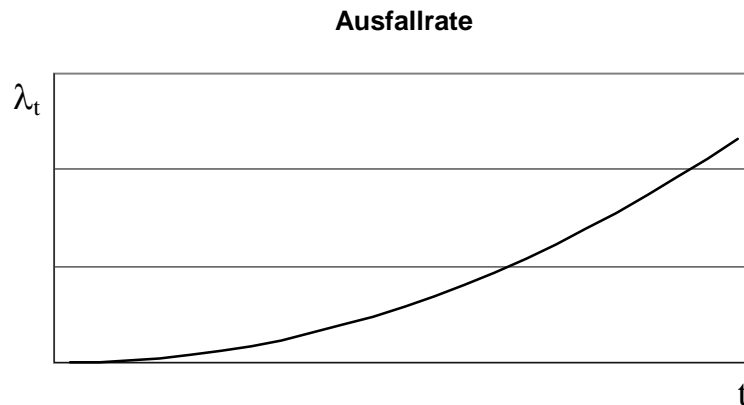


Abbildung 2-8: Ausfallrate

2.8 Häufigkeitsverteilungen und Verteilungsdichtefunktionen

Bei der Durchführung von Untersuchungen wie beispielsweise der Qualitätsprüfung oder die Ermittlung von Reaktionszeiten wird einer Grundgesamtheit N eine Stichprobe vom Umfang n entnommen. Bei jedem Element der Stichprobe können Merkmale festgestellt werden. Dabei soll jedes Merkmal eindeutig durch eine Zahl oder eine sonstige Größe, den Beobachtungswert (Merkmalsausprägung) x_i ($i=1, \dots, n$) erfaßt werden können. Es wird unterschieden zwischen quantitativen, also durch eine Zahl meßbaren Merkmalen (z.B. Zeitdauer oder Länge einer Welle) und qualitativen, also durch eine Eigenschaft beschreibaren Merkmalen wie beispielsweise die Farbe eines Bauteils. Weiter wird unterschieden zwischen diskreten und stetigen Merkmalen. Bei diskreten Merkmalen sind die Beobachtungswerte abzählbar und werden durch

ganze Zahlen beschrieben. Stetige Merkmale hingegen besitzen unendlich viele Ausprägungen wie beispielsweise die Länge einer Welle, die jeden beliebigen Wert in einem Intervall annehmen kann.

Die Beobachtungswerte x_i ($i=1, \dots, n$) zu einem Merkmal, hier die Reaktionszeit, werden erfaßt und in einer Urliste festgehalten. Werden die Beobachtungswerte x_i der Größe nach geordnet und zu jedem *auf tretenden* Beobachtungswert x_i ($i=1, \dots, k$) angegeben wie oft dieser auftritt, so spricht man von der absoluten Häufigkeit n_i .

Um einen Vergleich mit anderen Experimenten anstellen zu können, werden die relativen Häufigkeiten verwendet. Die relative Häufigkeit bildet sich aus dem Quotient der absoluten Häufigkeit n_i und der Anzahl der Stichproben n .

$$h_i = \frac{n_i}{n}$$

Bei einer großen Ansammlung von empirischen Daten oder bei einer nicht ausreichenden Häufung von Beobachtungswerten kann es sinnvoll sein, aufeinanderfolgende Beobachtungswerte zu einer Klasse zusammenzufassen. Das zusammenfassen von Merkmalsausprägungen in eine gemeinsame Klasse wird als Klassifizierung bezeichnet.

Beispiel: Messung der Durchmesser von Wellen

Nr. der Klasse	Klassengrenzen	Absolute Häufigkeit
1	1015 ... 1020	2
2	1020 ... 1025	5
3	1025 ... 1030	18
4	1030 ... 1035	32
5	1035 ... 1040	35
6	1040 ... 1045	20
7	1045 ... 1050	8

Bei der Bildung von zu vielen Klassen bleibt die Häufigkeitsverteilung unübersichtlich. Bei zu wenigen Klassen geht die charakteristische Verteilungsform verloren. Für die Klassenbreite wird im Normalfall eine konstante Größe verwendet, man spricht dann von äquidistanter Klassenbreite. Der Repräsentant einer Klasse ist die Klassenmitte (Klassenmittelwert). Die Klassenuntergrenze \tilde{x}_{i-1} und die Klassenobergrenze \tilde{x}_i werden meist so gewählt, daß die Klassenmitte ein vielfaches von 2, 5 oder 10 ist.

Die Summe aller relativen Häufigkeiten in einer statistischen Erhebung ist stets 1. Die grafische Darstellung der summierten (kumulierten) Häufigkeiten wird als Summenkurve bezeichnet. Sie wird auch als Verteilungsfunktion bezeichnet. In der grafischen Darstellung kann genau abgelesen werden, wie viele Werte über oder unter einem bestimmten Merkmalswert gezählt wurden. Bei kontinuierlichen Verteilungen ist die Summenhäufigkeit gleich der Stammfunktion der Dichtefunktion.

Beispiel Exponentialverteilung:

Dichtefunktion: $f(x) = a \cdot e^{-a \cdot x}$

Verteilungsfunktion:
$$F(x) = \int_0^x f(t) \cdot dt$$
$$= 1 - e^{-a \cdot x}$$

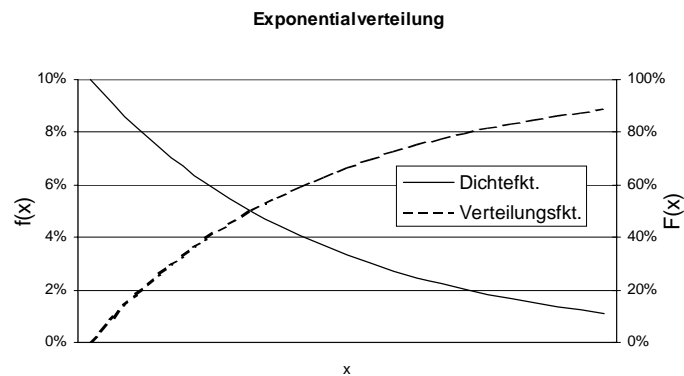


Abbildung 2-9: Dichtefunktion und Verteilungsfunktion

Um statistisch aufbereitete Daten anschaulich darstellen zu können, wird die grafische Darstellung verwendet. Die grafische Darstellung von Häufigkeiten kann auf verschiedene Arten erfolgen. Bei der Darstellung im Stabdiagramm entspricht die jeweilige Häufigkeit der Stablänge. Im Balkendiagramm (Histogramm) wird die Häufigkeit durch die Größe der Fläche der einzelnen Säulen dargestellt. In einem Kreisdiagramm entspricht die Fläche eines Kreisabschnittes der Häufigkeit. Die folgenden Abbildungen zeigen die drei genannten Darstellungsmöglichkeiten.

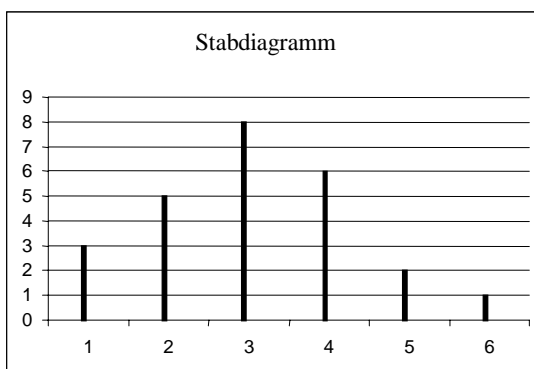


Abbildung 2-10: Stabdiagramm

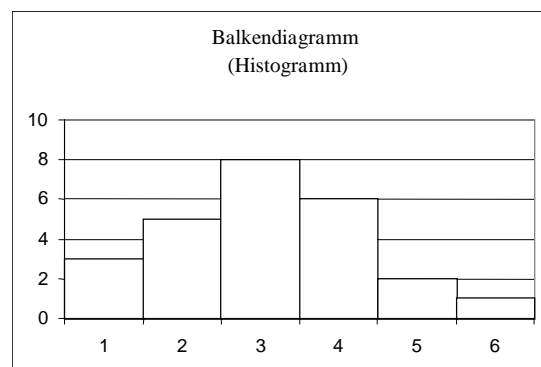


Abbildung 2-11: Balkendiagramm

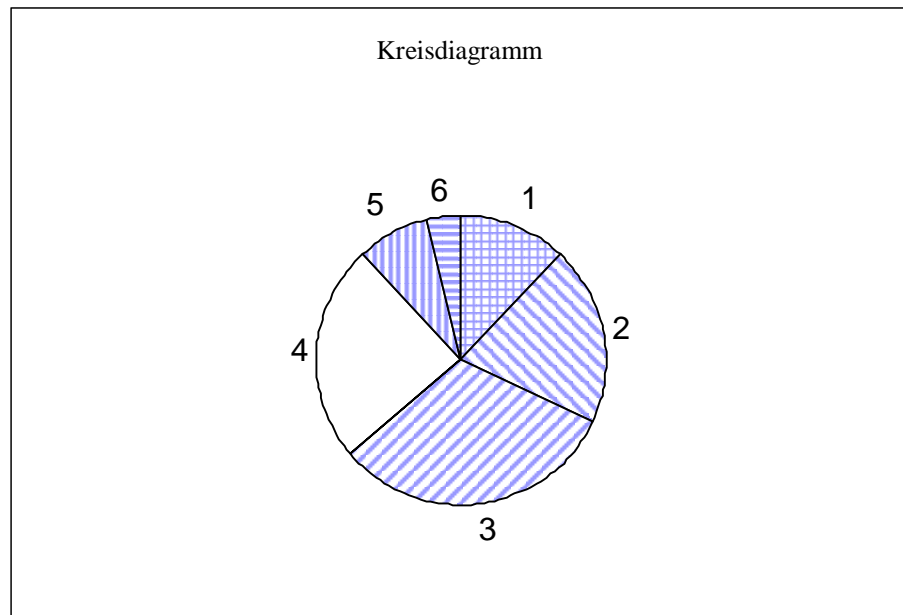


Abbildung 2-12: Kreisdiagramm

Bei empirischen Untersuchungen kann zunächst der Istzustand der Stichprobe dargestellt werden. Die empirischen Daten sollen möglichst das Verhalten einer unbekanntem Grundgesamtheit darstellen. Es wird also aus einem Stichprobenbefund auf die unbekanntem Menge geschlossen (Induktionsschluß). Beim Induktionsschluß wird erwartet, daß sich die Menge so verhält, wie es die Stichprobe gezeigt hat. Das heißt, die Stichprobe muß die Grundgesamtheit repräsentieren.

Der Induktionsschluß ist durch das „Gesetz der großen Zahlen“ möglich, welches erstmals von Bernoulli formuliert wurde. Das Gesetz der großen Zahlen besagt: Je mehr Einzelercheinungen beobachtet werden können, desto mehr kristallisiert sich die den Erscheinungsformen zugrundeliegende Form heraus; desto weniger fallen zufällige Abweichungen von der Norm ins Gewicht /12/.

Es kann daraus entnommen werden, daß mit zunehmender Anzahl von Versuchen oder zunehmender Stichprobengröße n sich die relative Häufigkeit für das Eintreten eines

Ereignisses dem Wert, den man die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten dieses Ereignisses zuspricht nähert. Mathematisch sieht dies wie folgt aus:

$$P(E) = \frac{n_E}{n} \text{ für } n \rightarrow \infty$$

mit P = Wahrscheinlichkeit

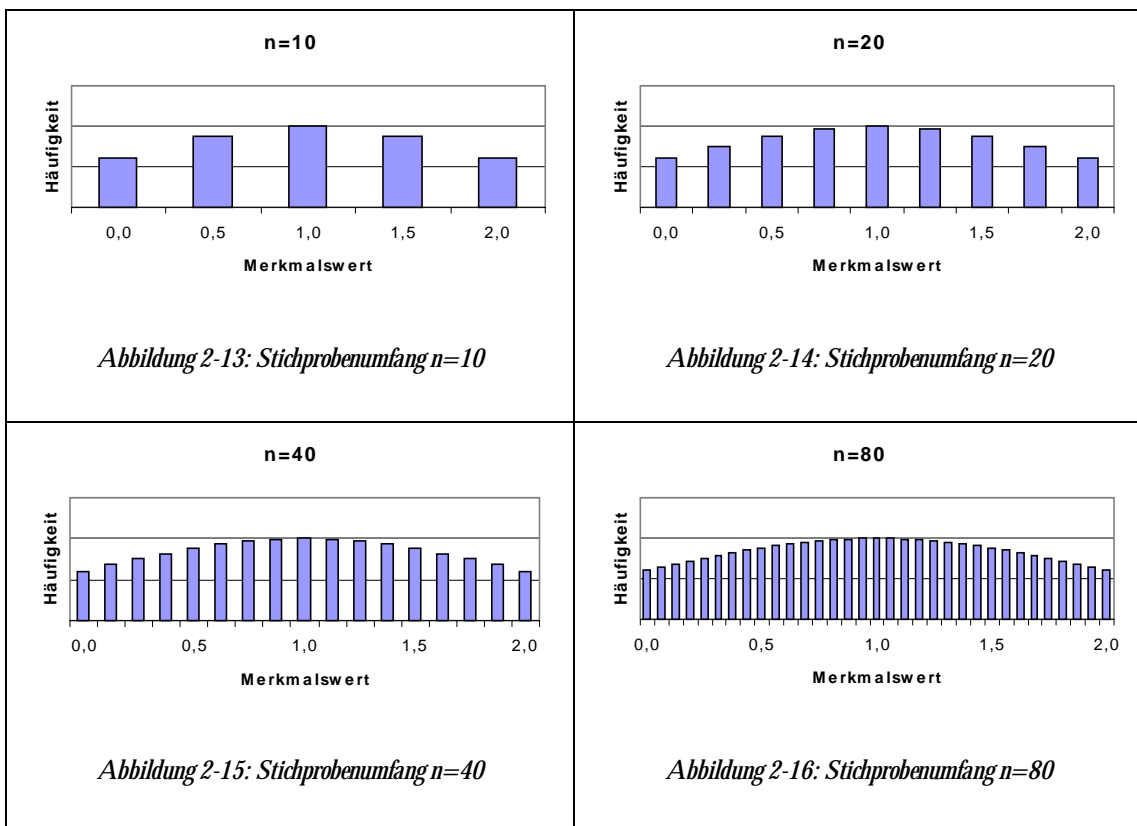
E = Ereignis

n_E = Häufigkeit mit der das Ereignis E auftritt

n = Umfang der Stichprobe

Die so eingeführte Wahrscheinlichkeit P ist das theoretische Gegenstück der empirischen Häufigkeit.

In den folgenden Abbildungen wird der Einfluß der Stichprobenmenge auf das Aussehen der Häufigkeitsverteilung gezeigt.



Beim Vergleich der Abbildungen kann man erkennen, wie sich die Häufigkeitsverteilung mit steigendem n immer besser der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion anpaßt. In den Abbildungen 2-7 bis 2-10 ist dies die Dichte der Normalverteilung. Eine Funktion wird als Dichtefunktion $f(x)$ oder Wahrscheinlichkeitsdichte (kurz: Dichte) bezeichnet, wenn die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Zufallsvariable X zwischen zwei Werten $x_1 = a$ und $x_2 = b$ liegt, gleich der Fläche zwischen der Abszisse und der Kurve über dem Intervall ist.

Soll nun ausgehend von einer Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen werden, so muß für die Auswertung folgendes berücksichtigt werden:

- Genügend große Anzahl von Meßwerten (Stichproben)
- Geeignete Anzahl von Klassen und geeignete Wahl der Klassengröße
- Erstellen der Häufigkeitsverteilung.

Mit Hilfe der Häufigkeitsverteilung und der Parameter der Verteilung kann dann eine geeignete theoretische Verteilung gefunden werden, die die vorliegende Häufigkeitsverteilung ausreichend beschreibt.

2.8.1 Die Gaußverteilung

Die Gaußverteilung (Normalverteilung) besitzt folgende Eigenschaften:

- Arithmetisches Mittel, Modalwert und Median fallen zu einem Wert zusammen. Dieser Wert teilt die Wahrscheinlichkeitsdichte in zwei gleich große Hälften.
 - Symmetrie in bezug auf den Modalwert der Dichtefunktion.
 - Eingipfligkeit und zwei Wendepunkte.
-

- Die Kurve verläuft sowohl gegen $-\infty$ wie auch gegen $+\infty$ asymptotisch gegen Null.

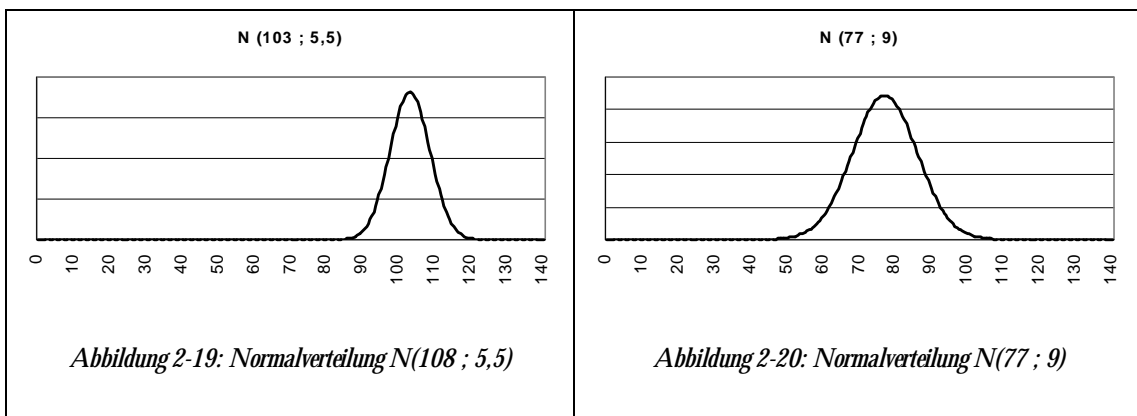
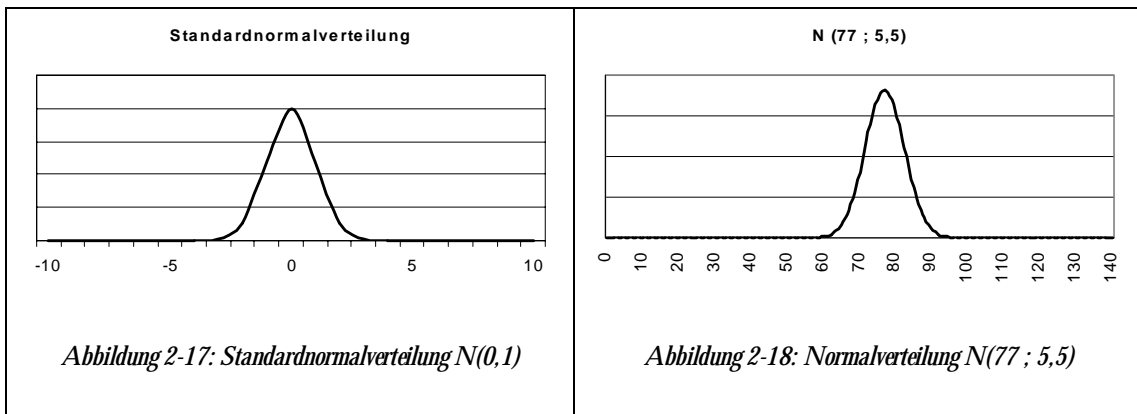
Die Normalverteilung besitzt eine große praktische Bedeutung, da viele Systeme die charakteristische Symmetrie und glockenförmige Gestalt einer Normalverteilung zeigen. So sind zum Beispiel Meßfehler in Laborversuchen oder die Durchmesser von Kugellagern häufig angenähert normalverteilt. In der Qualitätssicherung wird bei Variablenprüfung dem Qualitätsmerkmal im allgemeinen eine Normalverteilung zugrunde gelegt.

Die Normalverteilung wird durch die beiden Parameter Mittelwert μ und Standardabweichung σ vollständig beschrieben. Die übliche Schreibweise ist $N(\mu, \sigma)$, wobei N für Normalverteilung steht. Für die Standardnormalverteilung gilt $N(0, 1)$. Die Standardnormalverteilung ist somit symmetrisch zur $x=0$ Achse. Die Standardabweichung der Normalverteilung ist immer der Abstand der Wendepunkte vom Mittelwert. Was bedeutet, daß die Wendepunkte der Standardnormalverteilung bei $x=1$ und $x=-1$ liegen.

Die mathematische Form der Gaußverteilung sieht wie folgt aus:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} .$$

Die folgenden Abbildungen zeigen die Normalverteilung mit verschiedenen Parametern.



2.8.2 Die Weibull-Verteilung

Die Weibull-Gnedenko-Verteilung, kurz mit Weibull-Verteilung bezeichnet, spielt bei der Untersuchung der Lebensdauer von Bauteilen eine große Rolle. Daher sind die Parameter dieser Verteilung auf Lebensdauerbegriffe bezogen. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion lautet

$$f(t) = \frac{B}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^{B-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^B}.$$

Für die Verteilungsfunktion gilt

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

Wobei die Parameter folgende Bedeutung haben

- t die statistische Variable, also die Zeit,
- T die charakteristische Lebensdauer als Maßstabsparameter,
- B Weibull-Steigung, Maß für den Anstieg der Ausfallrate,
- t_0 der Zeitpunkt, an dem die Ausfälle beginnen, also ein Lageparameter,
- $F(t)$ Ausfallwahrscheinlichkeit, d. h. die Wahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Bauelement bis zum Zeitpunkt t auszufallen.

Ein Parameter $t_0 > 0$ ist dann erforderlich, wenn die volle Beanspruchung erst nach einer gewissen Zeit einsetzt. t_0 bedeutet dann eine Mindestlebensdauer. Für Bauteile kann es auch notwendig sein $t_0 < 0$ zu setzen und zwar dann, wenn die Beanspruchung schon vor dem eigentlichen Einsatz beginnt, z.B. beim Transport. Bei den Berechnungen von Burckhardt /13/ wurde der Parameter t_0 gleich Null gesetzt, was folgende Vereinfachung der Funktion nach sich zieht.

Dichtefunktion mit $t_0 = 0$:

$$f(t) = \frac{B}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{B-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^B}$$

Verteilungsfunktion mit $t_0 = 0$:

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

Der charakteristische Merkmalswert für $T = t$ ergibt:

$$F_t = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^B} = 1 - e^{-1} = \frac{e-1}{e} = 0,6321$$

Um die Weibull-Verteilung auf das Problem der Reaktionszeit übertragen zu können, ist es notwendig, die auf die Lebensdauer bezogenen Parameter auf die Reaktionszeit zu übertragen.

- $F(t)$ die Wahrscheinlichkeit, daß die Bremsreaktionsdauer des betrachteten Kollektivs unter t liegt,
- T der charakteristische Merkmalswert, der angibt, welche Bremsreaktionsdauer in 63,21 % aller Fälle unterschritten wird,
- B der Weibull-Exponent, der die Streuung der Meßwerte charakterisiert,
- $f(t)$ die Wahrscheinlichkeitsdichte, welche die Wahrscheinlichkeit angibt, Bremsreaktionsdauern anzutreffen, die im Intervall zwischen t und $(t + dt)$ liegen.

In Kapitel 3 erfolgt die Auswertung der alten Daten durch die Weibull-Verteilung, einmal mit dem Parameter $t_0 = 0$ und einmal mit einem von Null verschiedenen Wert. Der Parameter t_0 bedeutet eine Parallelverschiebung auf der Merkmalsachse. Da die Reaktionszeiten nicht bei Null beginnen, ist hier nicht einzusehen, warum bei bisherigen Auswertungen der Parameter t_0 gleich Null gesetzt wurde.

In den folgenden Abbildungen sind Weibull-Verteilungen mit verschiedenen Parametern dargestellt.

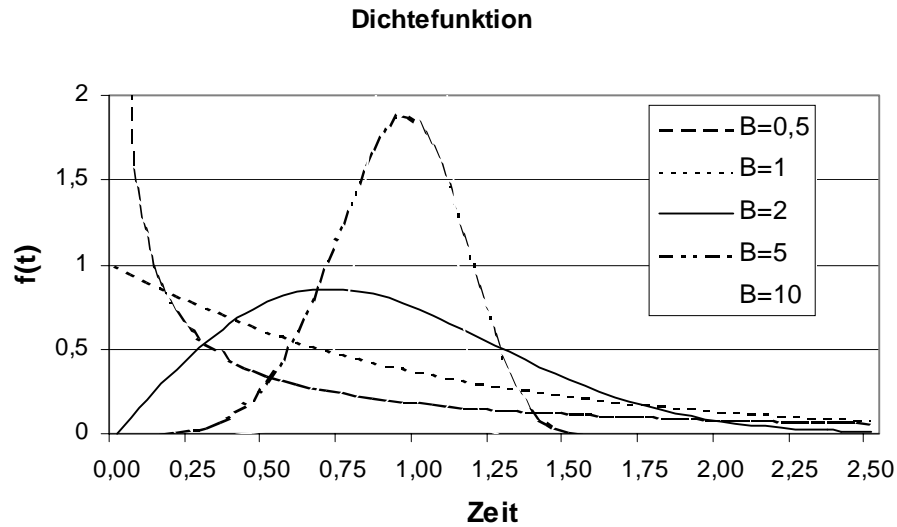


Abbildung 2-21: Dichtefunktion der Weibull-Verteilung mit verschiedenen Parametern

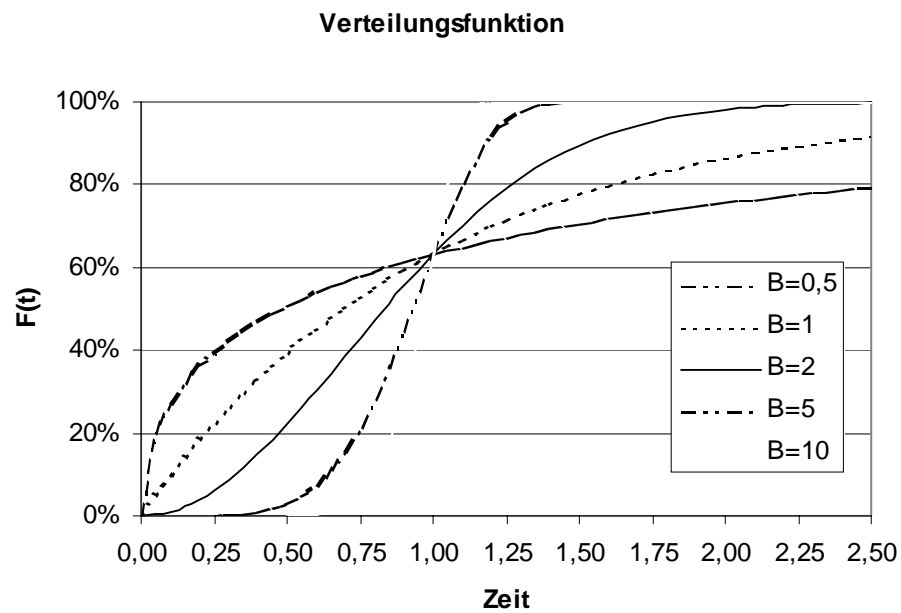


Abbildung 2-22: Verteilungsfunktion der Weibull-Verteilung mit verschiedenen Parametern

Die Ausfallrate λ_t der Weibull-Verteilung berechnet sich zu

$$\lambda_t = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$
$$\lambda_t = \frac{B}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^{B-1} .$$

Für $t_0 = 0$ folgt

$$\lambda_t = \frac{B}{T} \cdot \left(\frac{t}{T} \right)^{B-1} .$$

2.8.3 Die Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung entspricht der Weibull-Verteilung für den Sonderfall $B = 1$ und $t_0=0$.

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$$
$$f(t) = \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} .$$

Die Ausfallrate λ_t der Exponentialverteilung ist konstant. Deshalb beschreibt diese Verteilung insbesondere reine Zufallsausfälle:

$$\lambda_t = \frac{1}{T} .$$

Der Versuchsstart wird mit Hilfe der Zufallsvariable des Personal Computers und der Exponentialverteilung errechnet:

$$\begin{aligned}
 y &= F(t) \\
 y &= 1 - e^{-\frac{t}{T}} \\
 t &= F^{-1}(y) \\
 1 - y &= e^{-\frac{t}{T}} \\
 \ln(1 - y) &= -\frac{t}{T} \\
 t &= -\ln(1 - y) \cdot T \quad .
 \end{aligned}$$

Der Parameter y ist hier eine gleichverteilte Zufallsvariable, welche Werte zwischen Null und eins annehmen kann. Der Parameter T ist die mittlere Wartezeit. Da die Ausfallrate der Exponentialverteilung konstant ist, kann der Proband aus der seit dem letzten Versuch verstrichenen Zeit keine Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit des neuerlichen Versuchs ziehen.

2.8.4 Die Gammaverteilung

Die Gammaverteilung hat bei der Lebensdauerbetrachtung den Vorteil, daß sie eine gewisse Alterung der Bauelemente einschließt. Sie dient dort als statistisches Modell zur Lebensdauerbetrachtung von Systemen, welche dynamischen Beanspruchungen unterworfen sind. Für die Dichtefunktion gilt:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < 0 \\ \frac{\lambda^\alpha \cdot t^{\alpha-1}}{(\alpha-1)!} \cdot e^{-\lambda \cdot t} & \text{für } 0 \leq t \leq \infty \end{cases}$$

Für nicht ganzzahliges α ist $(\alpha-1)!$ durch die Gammafunktion $\Gamma(\alpha)$ zu ersetzen. Für Reaktionszeiten gilt $t > 0$. Wird λ durch $1/T$, α durch B ersetzt und für die Zeitverschiebung die Variable t_0 eingeführt, so bildet sich die zeitverschobene Gamma-
verteilung

$$f(t) = \frac{T^{-\alpha} \cdot t^{\alpha-1}}{(\alpha-1)!} e^{-\frac{t}{T}}$$
$$= \frac{1}{(B-1)!T} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T}\right)^{B-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T}\right)}$$

mit den Parametern:

T die charakteristische Zeit

t_0 Lokationsparameter

B Formparameter.

2.9 Anpassen von Verteilungsdichtefunktionen an empirisch ermittelte Häufigkeitsverteilungen

Die Verteilungsdichtefunktion sollte in der Lage sein, die wichtigsten Eigenschaften der experimentell ermittelten Häufigkeitsverteilung wiederzugeben. Diese sind die Lage des Modalwertes, die Breite des Gipfels (Standardabweichung) und das unterschiedliche Anstiegsverhalten links und rechts des Modalwertes (Schiefe).

Das Anpassen der Verteilungsfunktion an die Häufigkeitsverteilung kann auf zweierlei Arten erfolgen, entweder über die Momentenmethode oder mit Hilfe der Verlustfunktion.

2.9.1 Momentenmethode

Bei der Momentenmethode wird der mathematische Zusammenhang zwischen den ersten Momenten einer Verteilung (Mittelwert, Varianz und Schiefe) und den Parametern einer Verteilung verwendet. In den folgenden Gleichungen ist der Zusammenhang zwischen Momenten und Parametern der zeitverschobenen Gammaverteilung zu erkennen.

$$\begin{aligned}\mu &= B \cdot T + t_0 \\ \sigma &= \sqrt{B} \cdot T \\ \chi &= \frac{2}{\sqrt{B}}\end{aligned}$$

Werden die tatsächlichen Größen μ , σ und χ durch die Schätzwerte $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ und $\hat{\chi}$ ersetzt, welche sich direkt aus den experimentell ermittelten Daten berechnen lassen, so ergeben sich nach Umformen die folgenden Gleichungen für die Parameter der Verteilungsfunktion:

$$\begin{aligned}B &= \frac{4}{\hat{\chi}^2} \\ T &= \frac{1}{2} \cdot \hat{\sigma} \cdot \hat{\chi} \\ t_0 &= \hat{\mu} - \frac{2 \cdot \hat{\sigma}}{\hat{\chi}} .\end{aligned}$$

wobei $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ und $\hat{\chi}$ die ersten drei zentralen Momente der experimentell ermittelten Verteilung darstellen. Sie lassen sich über die Beziehungen für den diskreten Fall berechnen, z.B. Mittelwert:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i .$$

Einfacher als das Schätzen der Parameter für die Gammaverteilung ist das Schätzen der Parameter für die Gaußverteilung. In der Gaußverteilung entsprechen die Parameter direkt den ersten beiden zentralen Momenten. Sie können also direkt an den experimentell ermittelten Daten berechnet werden.

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \\ \hat{\sigma}^2 &= \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{\mu})^2 .\end{aligned}$$

Bei anderen Ansätzen für die Verteilungsfunktion kann sich der Rechengang bedeutend schwieriger darstellen. Die Berechnung der Parameter für die Weibull-Verteilung erfordert schon etwas mehr Aufwand. Das Berechnen erfolgt nach dem von /14/ vorgeschlagenem Schema.

1. Schritt: Dekadische Logarithmen $\log t_i$ der Einzelwerte ermitteln und daraus den arithmetischen Mittelwert $\overline{\log t}$ berechnen.

$$\overline{\log t} = \frac{\sum_{i=1}^n \log t}{n}$$

2. Schritt: Abweichung von $\log t_i$ vom arithmetischen Mittel $\overline{\log t}$ berechnen.

3. Schritt: Abweichung aus Schritt 2 quadrieren.

4. Schritt: Die Standardabweichung der logarithmierten Merkmalswerte nach der Formel

$$S_{\log t_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log t_i - \overline{\log t})^2}{n-1}}$$

berechnen.

5. Schritt: Die Weibull-Steigung berechnen.

$$B = \frac{0,5570}{S_{\log t_i}}$$

6. Schritt: Den Logarithmus des charakteristischen Merkmalswert T nach der Beziehung

$$\log T = \overline{\log t} + \frac{0,2507}{B}$$

berechnen.

7. Schritt: Delogarithmieren

$$T = 10^{\log T} .$$

2.9.2 Verlustmethode

Die Verlustmethode benutzt zur Anpassung der Verteilungsfunktion beispielsweise die Daten der Häufigkeitsverteilung. Zur Anpassung kann ebensogut die Ausfallrate verwendet werden. Die Parameter der Verteilungsfunktion werden so angepaßt, daß sie die Häufigkeitsverteilung möglichst gut wiedergeben. Das mathematische Maß für „möglichst gut“ drückt sich in der Minimierung der definierten Verlustfunktion aus:

Verlustfunktion:
$$g = \sum_{i=1}^m |h_i - f(t_i) \cdot \Delta T|$$

Verlustfunktion minimal für $g \rightarrow 0$.

In obiger Formel steht m für die Anzahl der Klassen, h_i ist der Anteil der Meßwerte die auf die Klasse i entfallen, t_i ist der Zeitmittelwert der Klasse i und ΔT ist die Klassenbreite. Die Betragsbildung dient dazu, positive und negative Abweichungen von der Häufigkeitsverteilung gleichermaßen zu bewerten.

Sind die Parameter der Funktion $f(t)$ so angepaßt worden, daß der Wert der Verlustfunktion minimiert wurde (gegen Null geht), so gelten sie als bestmögliche Schätzung.

Die praktische Umsetzung des Verfahrens erfolgt mit Hilfe des Solvers, einer in Microsoft Excel eingebaute Funktion. Der Microsoft Excel Solver verwendet zur nichtlinearen Optimierung den nichtlinearen Optimierungscodex GRG2 (Generalized Reduced Gradient), der von Leon Lasdon, University of Texas in Austin, und Allan Waren, Cleveland State University, entwickelt wurde.

In den Dialogfeldern des Solver können Nebenbedingungen angegeben werden, welche bei der Lösung des Problems eingehalten werden müssen.

Bei nichtlinearen Problemen kann es nötig sein, den Versuch nach Beendigung mit neuen Anfangswerten durchführen zu lassen. Dies ist insbesondere dann hilfreich, wenn Solver eine Lösung gefunden hat, die erheblich von den Erwartungen abweicht.

Anstatt die Dichtefunktion $f(t)$ an die Häufigkeit h_i anzupassen ist es auch möglich, die Summenfunktion $F(t)$ an die Summenhäufigkeit H_i anzupassen oder es werden die Parameter über die Ausfallrate angepaßt. Für jede Möglichkeit der Anpassung ergeben sich verschiedene Größen für die Parameter.

2.10 Statistischer t-Test

Sollen zwei Gruppen von Daten miteinander verglichen werden, so kann dies mit den Mittelwerten geschehen. Die Fragestellung soll lauten, ob der Unterschied in den Mittelwerten zweier Gruppen ein reines Zufallsprodukt ist oder ob er ein Ausdruck von Lageunterschieden beider Gruppen ist.

Bei den statistischen Prüfverfahren wird von der Annahme (Hypothese) ausgegangen, daß die beiden unterschiedlichen Stichproben der gleichen Grundgesamtheit angehören. Diese Hypothese wird als Nullhypothese H_0 bezeichnet. Mit Hilfe der Prüfverfahren kann über Annahme oder Ablehnung der aufgestellten Nullhypothese entschieden werden. Wird die Nullhypothese angenommen, so bedeutet dies nicht, daß die Hypothese auch richtig ist. Sie wird lediglich einer Alternativhypothese H_1 vorgezogen. Es besteht also die Möglichkeit eines Irrtums. Folgende zwei mögliche Irrtümer werden unterschieden:

- 1.) Die Nullhypothese H_0 wird abgelehnt, obwohl diese richtig ist. Dieses wird als Fehler erster Art bezeichnet.
-

- 2.) Die Nullhypothese H_0 wird angenommen, obwohl diese falsch ist. Dieses wird als Fehler zweiter Art bezeichnet.

Um den Fehler erster Art möglichst klein zu halten, werden bei diesen Prüfverfahren eine Irrtumswahrscheinlichkeit α vorgegeben. Je kleiner die Irrtumswahrscheinlichkeit ist, um so größer wird die statistische Sicherheit und somit der Annahmebereich der Hypothese.

Soll festgestellt werden, ob das Alter der Probanden einen Einfluß auf die Reaktionszeit hat, wird die Hypothese über die Differenz zwischen den Mittelwerten zweier voneinander unabhängiger Normalverteilungen überprüft.

Da, im Gegensatz zu den Reaktionszeiten, die Mittelwerte der Reaktionszeiten aller Personen in der Regel normalverteilt sind, kann dieses Prüfverfahren angewendet werden.

Ausgehend von zwei Stichproben:

1. Stichprobe: x_{11}, \dots, x_{1n} vom Umfang n_1 , dem empirischen Mittelwert $\hat{\mu}_1$, der empirischen Varianz $\hat{\sigma}_1^2$ aus einer normalverteilten Grundgesamtheit mit dem unbekanntem Mittelwert μ_1 sowie der unbekanntem Varianz σ_1^2 ,
2. Stichprobe: x_{21}, \dots, x_{2n} vom Umfang n_2 , dem empirischen Mittelwert $\hat{\mu}_2$, der empirischen Varianz $\hat{\sigma}_2^2$ aus einer normalverteilten Grundgesamtheit mit dem unbekanntem Mittelwert μ_2 sowie der unbekanntem Varianz σ_2^2 ,

ist die Hypothese $H_0(\mu_1=\mu_2)$ über die unbekanntem Mittelwerte μ_1 und μ_2 der beiden Grundgesamtheiten unter Zugrundelegen einer Irrtumswahrscheinlichkeit α zu prüfen.

Die Nullhypothese ist dann nicht abzulehnen, wenn für die Testgröße

$$a = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_d} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}$$

mit

$$s_d = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_1^2 \cdot (n_1 - 1) + \hat{\sigma}_2^2 \cdot (n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}}$$

gilt

$$|a| = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} < t(m, \alpha)$$

mit

$$m = n_1 + n_2 - 2.$$

Für diesen t-Test sind die erforderlichen $t(m, \alpha)$ – Werte für verschieden m und verschieden Irrtumswahrscheinlichkeiten α tabelliert und können den entsprechenden Tabellen entnommen werden.

3 Auswertung des Altexperiments

3.1 Versuchsaufbau

Einem vorausfahrenden Fahrzeug A folgt ein Fahrzeug B, dessen Fahrer das Aufleuchten der Bremsleuchten an Fahrzeug A mit einem möglichst schnellen Antippen seines Bremspedals beantwortet /15/. Der Abstand der beiden Fahrzeuge entspricht etwa dem normalen Sicherheitsabstand.

Mit dem Aufleuchten der Bremslichter des Fahrzeugs A wird ein Zeitnehmer eingeschaltet, der durch Betätigen des Bremspedals in Fahrzeug B gestoppt wird. Die auf der Uhr angezeigte Zeit entspricht der gemessenen Fahrerreaktionszeit. Die Übermittlung der Schaltsignale erfolgt über einen Sender in Fahrzeug B und einen Empfänger in Fahrzeug A /15/.

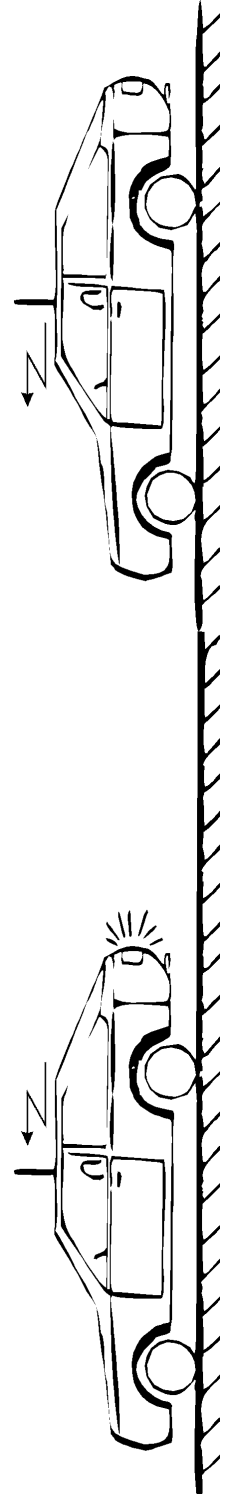
Die Fahrerreaktionszeit wird auf einer Fahrstrecke mit etwa 40 km Länge ermittelt. Um Falschmessungen durch vorhersehbare Situationen ausschließen zu können und um einen möglichen Auffahrunfall durch hinterher fahrende Fahrzeuge zu verhindern, besteht die Meßstrecke vorrangig aus wenig befahrenen Landstraßen. Wegen des zweiten oben aufgeführten Grundes und zur Schonung der Reifen des Fahrzeuges der Versuchspersonen sind diese dazu angehalten, auf das Aufleuchten der Bremslichter möglichst schnell mit einem leichten Antippen des Bremspedals zu reagieren. Das Antippen des Bremspedals wird vor Versuchsstart im Stand geübt, so daß sich der jeweilige Proband auf den auszuübenden Druck eingewöhnen kann. Die Meßstrecke wird mit insgesamt 41 Versuchspersonen durchfahren. Dabei sind etwa 100 Messungen pro Person angestrebt worden.

Fahrzeug A

Fahrzeug B

Insasse: Experimentator

Insasse: Proband



Das Ablesen des Zeitnehmers wird von einem Protokollführer, der in Fahrzeug A mitfährt, übernommen. Der Zeitabstand zwischen den einzelnen Messungen wird teils vom Fahrer und teils vom Protokollführer bestimmt. Die Probanden sind über die Zeitabstände zwischen den Messungen nicht unterrichtet. Um Überraschungseffekte zu erzielen, wird während starker Beschleunigung die Bremse betätigt und es sind bis zu fünf Bremsungen innerhalb kürzester Zeit durchgeführt worden, was allerdings kaum eine Verlängerung der Reaktionszeit nach sich zog.

Um später Rückschlüsse ziehen zu können, ob zwischen den Reaktionszeiten der jeweiligen Versuchspersonen und den Merkmalen der Versuchspersonen ein Zusammenhang besteht, hatte jeder Proband nach der Messung einen Testbogen auszufüllen. Die folgende Abbildung zeigt einen solchen Fragebogen.

Geschlecht	m
Alter	27 Jahre
Beruf	Student
jährliche Fahrstrecke	15000 km
Fahrpraxis	2 Jahre
Art der benutzten Kfz	Pkw / Krad
Fahrzeugtyp	Renault T 6 TI
Benutzen Sie häufig fremde Fahrzeuge?	nein
Seit wann benutzen Sie Ihr Fahrzeug?	2 Jahre
Welcher Fahrweise bedienen Sie sich?	20% schnell 70% normal 10% langsam
Welche Strecke fahren Sie mit Ihrem Fahrzeug?	15000 km
Wo fahren Sie üblicherweise?	Überland
Wie fühlen Sie sich heute?	gut

Abbildung 3-1: Fragebogen

Bei der Durchführung der Testfahrten traten hauptsächlich folgende zwei Fehlerformen auf:

1. Zeitnehmer im Empfängerteil blieb nicht stehen,
2. Zeitnehmer blieb nur für kurze Zeit stehen und lief dann weiter, so daß ein sicheres Ablesen nicht möglich war.

Erfolgte die Reaktion des Probanden in weniger als 50 ms, so wurden die Meßwerte nicht notiert. Dies kam zum Beispiel dann vor, wenn aus der gegebenen Situation im Straßenverkehr eine Bremsung vorhersehbar war (z.B. Halten an einer roten Ampel), der Fuß also schon vom Gaspedal war und vor dem Bremspedal gehalten wurde.

Für die Auswertung des Altexperimentes wurden uns die Originalprotokolle zur Verfügung gestellt. Die Anzahl der gültigen Messungen beträgt 3845.

3.2 Statistische Kenngrößen

Die Ermittlung der statistischen Kenngrößen soll hier auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Die erste Vorgehensweise besteht darin die Reaktionszeiten aller Versuchspersonen gemeinsam auszuwerten. Dieser Vorgang wird als „Poolen“ bezeichnet. Die zweite Art der Ermittlung der statistischen Kenngrößen besteht darin, daß die Kenngrößen für jede Person einzeln ermittelt werden. Die so ermittelten Werte werden arithmetisch gemittelt. Die auf diese Art und Weise ermittelten Werte sollen gegenübergestellt und verglichen werden.

3.2.1 Poolen

Die Reaktionszeiten aller 41 Personen (alte Daten) werden in einen Topf geworfen, also gepoolt. Anhand der gepoolten Daten werden die statistischen Kenngrößen nach den in Kapitel 2 aufgeführten Regeln ermittelt. In der folgenden Tabelle sind alle berechneten statistischen Kenngrößen aufgeführt.

arithmetisches Mittel:	667 ms
Modalwert:	580 ms
2%-Perzentil:	380 ms
5%-Perzentil:	430 ms
Median:	630 ms
95%-Perzentil:	1100 ms
98%Perzentil:	1281 ms
Standardabweichung:	177 ms
Schiefe:	1,080

Tabelle 3-1: Kenngrößen der gepoolten Daten

3.2.2 Einzelauswertung

Person:	Anzahl der	arithmetisches	Standard-	Standard-	Schiefe:	Median:	Perzentil			
	Messungen						Mittel:	fehler-	abweichung	2%
1	95	852	87	232	0,96	770	576	590	1299	1382
2	122	675	61	152	0,94	650	480	521	977	1030
3	139	821	70	267	1,32	710	530	550	1361	1440
4	137	839	72	207	0,43	800	549	618	1280	1308
5	133	519	45	128	1,56	490	320	358	750	884
6	113	626	59	146	1,25	580	445	470	940	998
7	62	568	72	68	0,87	560	433	500	708	738
8	102	662	66	152	2,02	630	450	491	939	1070
9	147	579	48	129	2,35	550	429	450	805	981
10	126	619	55	97	0,26	620	425	473	800	825
11	109	524	50	116	0,16	550	320	344	700	745
12	108	662	64	109	2,27	630	541	554	870	1043
13	100	731	73	84	0,68	710	610	630	871	931
14	84	1285	140	366	1,63	1180	867	920	1997	2209
15	83	526	58	99	0,26	520	316	350	705	770
16	120	652	60	112	0,99	630	438	489	850	952
17	100	693	69	94	1,31	680	570	580	911	961
18	32	798	141	140	0,72	780	600	628	1023	1099
19	72	655	77	126	1,92	625	514	536	848	1064
20	93	643	67	183	0,32	610	310	330	964	1082
21	44	889	134	217	0,73	890	583	596	1180	1339
22	62	566	72	104	1,44	555	432	450	757	866
23	126	787	70	92	0,72	780	670	680	920	1040
24	74	1044	121	230	1,29	1020	698	760	1450	1722
25	99	466	47	106	1,28	430	350	360	674	751
26	75	487	56	116	1,93	470	320	347	780	860
27	71	561	67	119	1,47	550	414	425	790	896
28	88	586	62	69	-0,05	580	475	484	697	723
29	64	646	81	154	1,88	595	480	510	967	1012
30	70	654	78	144	1,90	610	500	520	882	1096
31	100	511	51	65	0,80	500	390	410	660	670
32	82	657	73	113	3,37	650	525	550	820	850
33	91	704	74	162	1,02	700	464	490	1040	1162
34	90	502	53	40	0,52	490	438	450	570	584
35	85	533	58	82	0,91	520	390	406	688	760
36	104	692	68	113	1,11	680	465	553	916	998
37	110	1010	96	180	0,16	1025	642	685	1343	1426
38	107	538	52	90	1,92	520	412	430	717	822
39	86	767	83	114	0,42	760	548	630	955	1062
40	59	645	84	145	1,90	610	482	490	882	967
41	81	743	83	170	0,64	730	462	550	960	1132
Σ	41	3845								
Durchschnitt:	94	681	73	137	1,16	657	484	516	933	1030

Tabelle 3-2: Einzelauswertung

Die Daten aus Tabelle 3-2 entsprechen den Versuchspersonen 1 bis 41. Es wurden für jede Versuchsperson die Kenngrößen ermittelt und in der jeweiligen Zeile notiert. In der untersten Zeile ist der Mittelwert der darüberliegenden Zeilen berechnet worden.

In Spalte 3 ist auf Anhieb zu erkennen, daß das arithmetische Mittel von drei Personen erheblich vom Durchschnitt aller Personen abweicht. Es handelt sich hierbei um die Personen 14, 24 und 37. Bei den drei genannten Versuchspersonen gibt es, wie aus den Befragungen entnommen werden kann, keine gemeinsame Merkmalsausprägung, welche auf die überdurchschnittlich langen Reaktionszeiten schließen lassen könnte. In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte einiger Merkmalsausprägungen aller Versuchspersonen aufgelistet.

Durchschnittsalter:	31	Jahre
Fahrerfahrung:	12	Jahre
Fahrweise:		
Schnell:	27	%
Normal:	59	%
Langsam:	13	%
jährliche Fahrstrecke:	20780	km
eigenes Fahrzeug:		
im Besitz	1,7	Jahre
Kilometerleistung	26359	km

Tabelle 3-3: Durchschnittliche Merkmalsausprägungen

Den Durchschnittswerten der Merkmalsausprägungen aus obiger Tabelle werden im folgenden die Testpersonen 14, 24 und 37 gegenübergestellt, um zu prüfen, ob es irgendeinen Zusammenhang zwischen einer Merkmalsausprägung und den überdurchschnittlich langsamen Reaktionszeiten gibt.

	Durchschnitt	Person 14	Person 24	Person 37	
Alter	31	57	24	20	Jahre
Fahrerfahrung	12	42	5	2	Jahre
Fahrweise:					
Schnell	27	0	20	20	%
Normal	59	100	60	70	%
Langsam	13	0	20	10	%
Fahrl. pro Jahr eigenes Fahrz.	20780	15000	5000	15000	km
im Besitz	1,7	0,5	3	1	Jahre
Kilometerleistung	26359	3000	15000	15000	km

Tabelle 3-4: Merkmalsausprägungen

Bei der Versuchsperson 14 könnten die langen Reaktionszeiten damit zusammenhängen, daß die Person sich noch nicht richtig an das relativ neue Fahrzeug gewöhnt hatte. Dafür spricht die kurze Zeit von einem halben Jahr in dem der Proband das Fahrzeug besitzt und die geringe Fahrleistung von 3000 km bis zum Zeitpunkt der Tests. Bei Proband 24 könnte es die geringe jährliche Fahrleistung von 5000 km sein, die auf die langsamen Reaktionszeiten schließen lassen könnten. Bei der Versuchsperson 37 könnten die langen Reaktionszeiten mit der relativ kurzen Fahrerfahrung von 2 Jahren zusammenhängen. Wie aus der obigen Tabelle abgelesen werden kann, gibt es zwar keine gemeinsame Merkmalsausprägung, die auf die verlängerten Reaktionszeiten hinweisen würden, jedoch lassen sich Abweichungen von der Durchschnittsperson feststellen. Anmerkend sei noch gesagt, daß es aber auch Personen gibt wie beispielsweise Person 6 oder Person 22, deren Merkmalsausprägungen in mindestens einem Punkt vom Durchschnitt abweichen und trotzdem keine verlängerten Reaktionszeiten hatten.

3.2.3 Vergleich

Der Vergleich der Kenngrößen, die durch Poolen und durch Einzelauswertung ermittelt worden sind, soll zeigen, ob es einen Unterschied macht, auf welche Art und Weise die Daten ermittelt wurden. In der folgenden Tabelle sind die Kenngrößen festgehalten.

	arithmetisches Mittel	Standardabweichung	Schiefe	Modalwert	Median	2%	5%	95%	98%
Durchschnitt aller Personen	681	137	1,16	611	657	484	516	933	1030
gepoolte Daten	667	177	1,08	580	630	380	430	1100	1281

Tabelle 3-5: Vergleich Poolen und Einzelauswertung

In obiger Tabelle ist zu erkennen, daß alle Werte Unterschiede aufweisen. Der Unterschied beim arithmetisches Mittel kommt dadurch zustande, daß pro Person unterschiedliche viele Meßwerte zur Verfügung stehen. So fließen beim Poolen die Probanden mit vielen Messungen stärker ein, beim Mitteln aber werden sie den anderen Personen gleichgestellt. In beiden Fällen ist die Schiefe größer Null, was bedeutet, daß es sich um eine linkssteile Verteilung handeln muß. Diese Aussage wird durch die Erfüllung der Bedingung Modalwert < Median < arithmetisches Mittel unterstützt. Die Werte des 2 % - und 5 % - Perzentil der gepoolten Daten liegen unter denen der Durchschnittsdaten und die Werte des 95 % - und 98 % - Perzentil der gepoolten Daten liegen über denen der Durchschnittsdaten. Somit läßt sich sagen, daß man bei der Anwendung der gepoolten Daten auf der sicheren Seite steht. Denn die Werte der gepoolten Daten beinhalten auch die Werte der Durchschnittsdaten.

Als weitere Vergleichsmöglichkeit sind an dieser Stelle einmal die von Schiemann /15/ ermittelten Werte aufgeführt.

- $t_{99\%} \approx 1,40$ s
- $t_{50\%} \approx 0,62$ s
- $t_{2\%} \approx 0,37$ s

Die von Schiemann ermittelten Werte stimmen also mit den gepoolten Werten überein. Die geringen Abweichungen dürften darin zu suchen sein, daß die von Schiemann ge-

fundenen Werte nicht berechnet, sondern aus seinem Diagramm abgelesen wurden. Der 99 % - Wert beträgt bei den gepoolten Daten 1,39 s.

3.3 Häufigkeitsverteilung

In die Ermittlung der Häufigkeitsverteilung flossen alle 3845 Meßwerten ein. Die Klassenbreite wurde wie in /16/ auf 50 ms festgelegt. Die Klasseneinteilung wurde so gewählt, daß der Repräsentant einer Klasse, hier die Klassenmitte, immer einen glatten Wert wie zum Beispiel 300 ms, 350 ms usw. entspricht. In Tabelle 3-6 sind die Klasseneinteilungen und die zugehörigen Anzahlen der Meßwerte, also die absolute Häufigkeit und die relative Häufigkeit aufgeführt

Klassenmitte	absolute Häufigkeit	relative Häufigkeit
0	0	0,00%
50	0	0,00%
100	1	0,03%
150	1	0,03%
200	0	0,00%
250	0	0,00%
300	6	0,16%
350	38	0,99%
400	87	2,26%
450	168	4,37%
500	353	9,18%
550	465	12,09%
600	518	13,47%
650	512	13,32%
700	419	10,90%
750	312	8,11%
800	227	5,90%
850	160	4,16%
900	109	2,83%
950	81	2,11%
1000	72	1,87%
1050	65	1,69%
1100	65	1,69%
1150	42	1,09%
1200	23	0,60%
1250	27	0,70%
1300	26	0,68%
1350	17	0,44%
1400	15	0,39%
1450	6	0,16%
1500	4	0,10%
1550	4	0,10%
1600	3	0,08%
1650	4	0,10%
1700	1	0,03%
1750	2	0,05%
1800	1	0,03%
1850	1	0,03%
1900	2	0,05%
1950	1	0,03%
2000	3	0,08%

Tabelle 3-6: Häufigkeitsverteilung

Die graphische Darstellung der Daten aus Tabelle 3-6 ist in dem folgenden Histogramm zu erkennen.

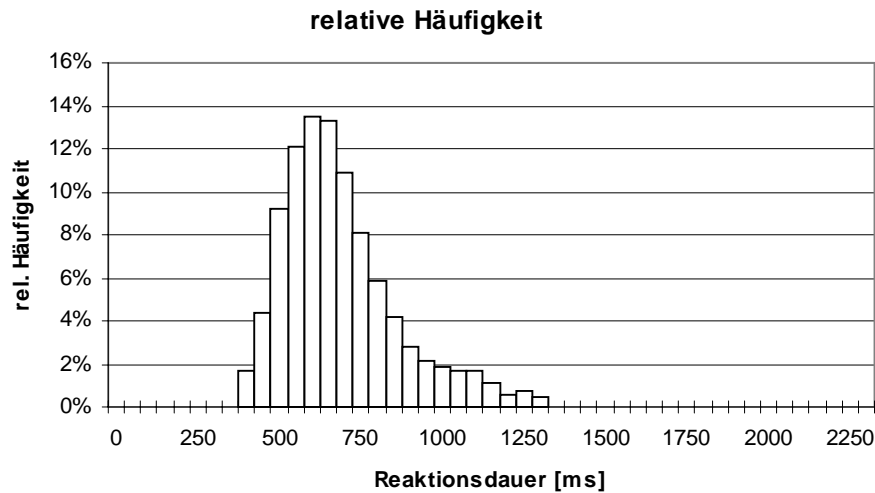


Diagramm 3-1: Häufigkeitsverteilung (Histogramm)

Die Aufgabe besteht nun darin, eine Verteilungsdichtefunktion zu finden, welche die Häufigkeitsverteilung aus Diagramm 3-1 möglichst gut wiedergibt.

Dies soll im folgenden mit der Weibull-Verteilung, der zeitverschobenen Gammaverteilung und der zeitverschobenen Weibull-Verteilung versucht werden. Zur Anpassung der Verteilungen soll einmal die Momentenmethode verwendet werden und zum anderen soll das Anpassen der Verteilungsfunktion mit Hilfe der Verlustminimierung durchgeführt werden. Die Funktion, welche mit den angepaßten charakteristischen Daten die empirisch gewonnene Häufigkeitsverteilung mit nur geringen Abweichungen nachzeichnet, kann dann als die beschreibende Verteilungsdichtefunktion angegeben werden.

3.4 Momentenmethode

An die experimentell ermittelte Häufigkeitsverteilung sollen nun mit Hilfe der Momentenmethode die Weibull-, die Gamma-, und die zeitverschobene Weibull-Verteilung angepaßt werden. Die Parameter werden mit Hilfe der in Kapitel 2.9.1 beschriebenen Momentenmethode berechnet.

Parameter der Weibull-Verteilung	
Weibull-Steigung (B)	4,612
char. Merkmalswert (T)	735,68

Tabelle 3-7: Parameter der Weibull-Verteilung

Parameter der Gamma-Verteilung	
Gestaltparameter (n)	3,429
charakteristische Zeit (T)	95,43
Lageparameter (t_0)	339,99

Tabelle 3-8: Parameter der Gammaverteilung

Parameter der zeitverschobenen Weibull-Verteilung	
Weibull-Steigung (B)	1,375
Lageparameter (t_0)	381,15
Skalenparameter ($T-t_0$)	324,83
inverser Skalenparameter	0,00308

Tabelle 3-9: Parameter zeitverschobene Weibull-Verteilung

In dem folgenden Diagramm sind die Verteilungen eingezeichnet. Zum Vergleich ist das Histogramm ebenfalls eingezeichnet.

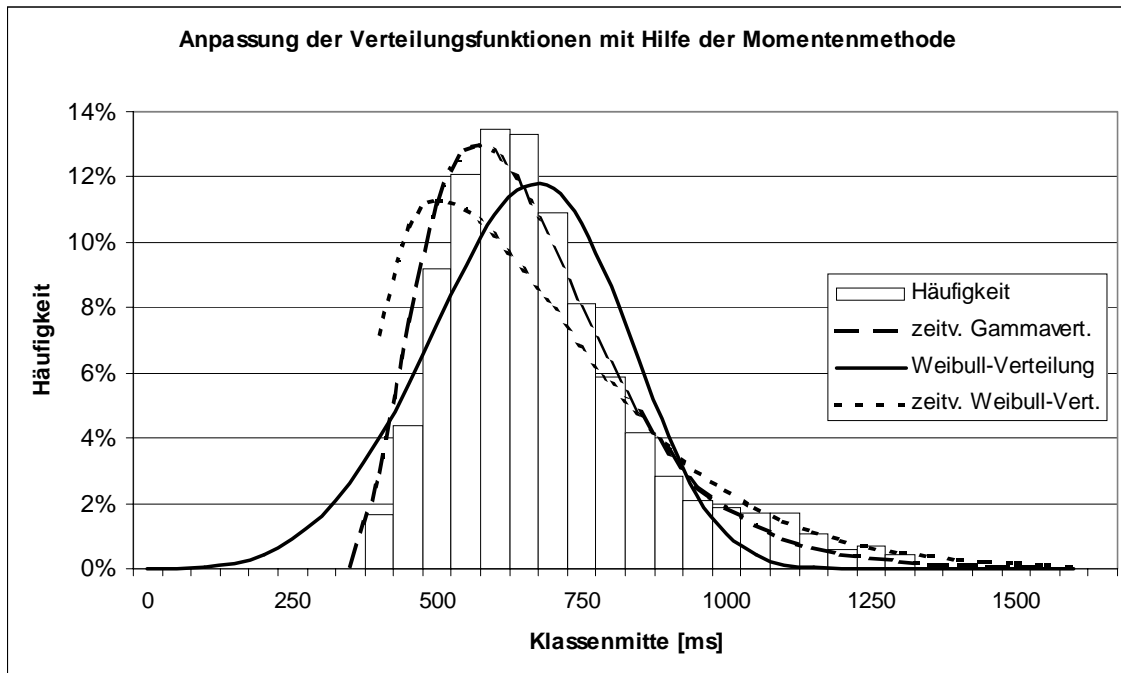


Diagramm 3-2: Anpassung der Verteilungsfunktionen mit Hilfe der Momentenmethode

In Diagramm 3-2 ist zu erkennen, daß sich die Gammaverteilung der Häufigkeitsverteilung recht gut anpaßt. Wird für die drei Verteilungen einmal die Verlustminimierung berechnet, so ergibt sich für die Weibull-Verteilung ein Wert von 0,344, für die zeitverschobene Weibull-Verteilung 0,318 und für die zeitverschobene Gamma-Verteilung ein Wert von 0,176. Der optische Eindruck täuscht hier also nicht, die zeitverschobene Gammaverteilung bildet hier die Häufigkeitsverteilung am besten ab.

3.5 Verlustmethode

Nach dem in Kapitel 2.9.2 erläuterten Verfahren sollen dieselben Verteilungen wie in Kapitel 3.4 angepaßt werden. In Tabelle 3-10 bis Tabelle 3-12 werden die Parameter der Funktionen gezeigt.

Parameter der Weibull-Verteilung	
Weibull-Steigung (B)	4,950
char. Merkmalswert (T)	701,00

Tabelle 3-10: Parameter der Weibull-Verteilung

Parameter der Gamma-Verteilung	
Gestaltungsparameter (n)	7,298
charakteristische Zeit (T)	58,49
Lageparameter (t_0)	243,98

Tabelle 3-11: Parameter der Gamma-Verteilung

Parameter der zeitverschobenen Weibull-Verteilung	
Weibull-Steigung (B)	1,897
Lageparameter (t_0)	381,153
Skalenparameter (T- t_0)	324,831
inverser Skalenparameter	0,00308

Tabelle 3-12: Parameter der zeitverschobenen Weibull-Verteilung

In der folgenden Tabelle sind die Funktionswerte der Minimierung dargestellt, welche die obigen Parameter nach sich zogen.

Funktionswerte der Verlustfunktion	
Weibull - Verteilung	0,281
zeitverschobene Gammaverteilung	0,137
zeitverschobene Weibull - Verteilung	0,178

Tabelle 3-13: Funktionswerte der Verlustfunktion

Das folgende Diagramm zeigt den Verlauf der Kurven nach der Optimierung durch die Verlustminimierung.

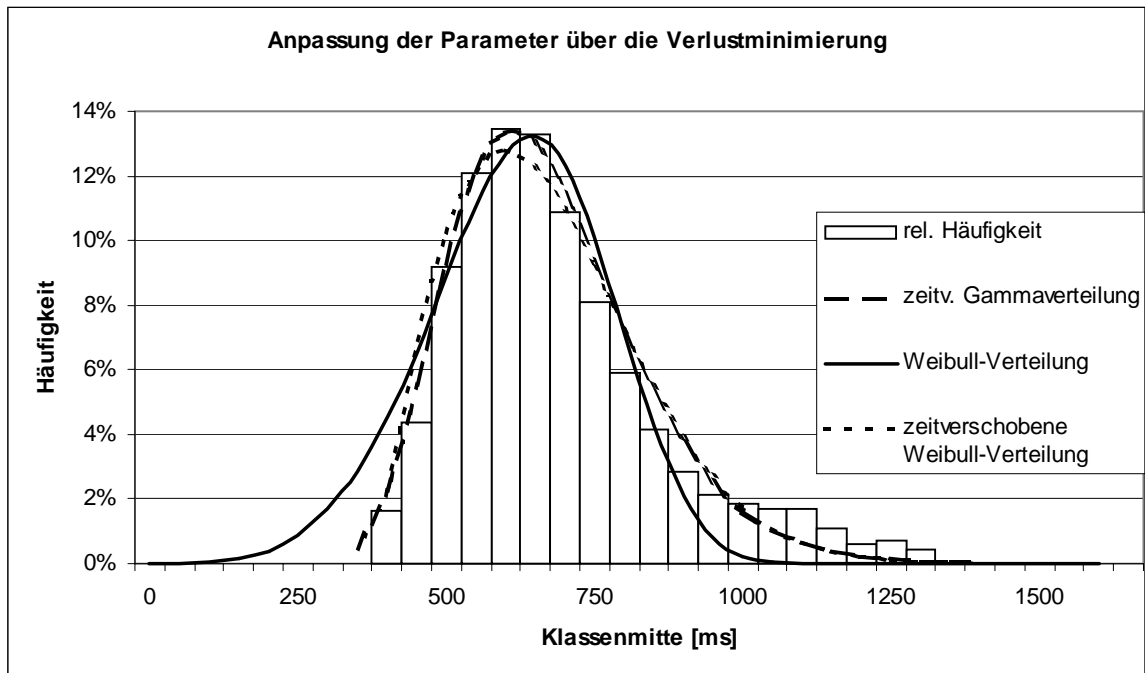


Diagramm 3-3: Anpassung der Parameter über die Verlustminimierung

Es ist zu erkennen, daß die zeitverschobene Gammaverteilung die Häufigkeitsverteilung der empirischen Daten besser nachzeichnet als die Weibull-Verteilung. Dies wird auch durch die Werte in Tabelle 3-13 bestätigt. Da dem Modell von Burckhardt jedoch eine doppelte Weibull-Verteilung zugrunde liegt, soll diese im folgenden Kapitel angepaßt werden. Dies erfolgt einmal mit den Parametern von Burckhardt und einmal über die Verlustminimierung.

3.6 Auswertung mit Blickzuwendung

Das Modell von Burckhardt zur Auswertung der empirisch gewonnenen Daten von Schiemann beruht auf einer Zusammenführung von zwei Weibull-Verteilungen, wobei die erste Verteilung die Reaktionen ohne Blickzuwendung und die zweite die Reaktionen mit benötigter Blickzuwendung darstellen. Im folgenden soll der Versuch unternommen werden, die Daten des Altexperiments in gleicher Weise anzunähern. Für die

erste der beiden Weibull-Verteilungen wurden die Parameter von Burckhardt verwendet. Die Parameter der zweiten Weibull-Verteilung wurden nach dem in Kapitel 2.9.2 gezeigten Verfahren der Minimierung der Verlustfunktion mit Hilfe des Solvers bestimmt. In den folgenden Tabellen sind die Parameter der Verteilungsfunktionen zu erkennen. Hierin sind T_1 und B_1 die Parameter der ersten Weibull-Verteilung und T_2 und B_2 die Parameter der zweiten. Der Parameter \varnothing gibt den Anteil der ersten Verteilung an der gesamten Weibull-Verteilung an.

Modell von Burckhardt	
Anteil der ersten Verteilung (\varnothing)	0,84
Merkmalswert T_1	640
Steigung B_1	6,94
Merkmalswert T_2	1120
Steigung B_2	7,93
Verlustfunktion	0,3575

Tabelle 3-14: Modell von Burckhardt

Anpassung durch Verlustminimierung	
Anteil der ersten Verteilung (\varnothing)	0,75
Merkmalswert T_1	671,04
Steigung B_1	6,09
Merkmalswert T_2	1010,94
Steigung B_2	4,55
Verlustfunktion	0,1293

Tabelle 3-15: Anpassung über Verlustminimierung

Die Graphen der beiden Verteilungsfunktionen sind in dem folgenden Diagramm zu erkennen.

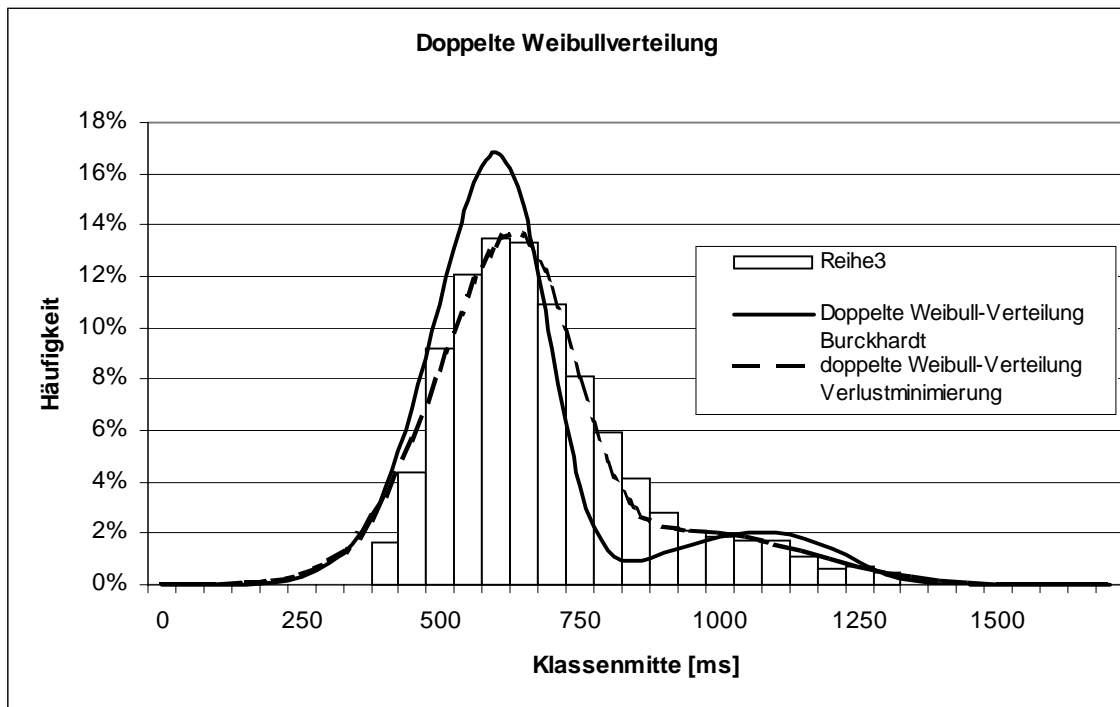


Diagramm 3-4: Doppelte Weibull-Verteilung

In dem Diagramm 3-4 ist zu erkennen, daß die Anpassung der Verteilungsfunktion mit Burckhardts Parameteransatz weniger gut gelungen ist. Dagegen paßt sich die doppelte Weibull-Verteilung mit den durch die Verlustminimierung bestimmten Parametern sehr gut der Häufigkeit an. Wobei allerdings zu beachten ist, daß die Verteilungsfunktionen rechtssteil sind.

Generell läßt sich sagen, daß sich Verteilungen mit vielen Parametern, bei der doppelten Weibull-Verteilung sind es 5 Parameter, immer besser an die empirische Verteilung anpassen lassen. Sofern die Verteilungsfunktion der Realität, also den empirischen Daten entsprechen kann. Bei einem Vergleich zwischen verschiedenen Verteilungsfunktionen sollten daher immer die Anzahl der Parameter angegeben werden.

4 Eigene Versuche

4.1 Versuchsaufbau

Reaktionszeit und Umsetzzeit werden im Nachfahrbetrieb ermittelt. Der Fahrer des nachfolgenden Wagens (der Proband) soll das Aufleuchten der Bremslichter des Fahrzeug I so schnell wie möglich mit dem Antippen des eigenen Bremspedals beantworten. Mit dem Aufleuchten der Bremslichter des Fahrzeug I wird der Counter einer PC-Karte in Gang gesetzt und beim Loslassen des Gaspedals und beim Berühren des Bremspedals jeweils ausgelesen. Die auf diese Art und Weise erhaltenen Zeiten t_1 und t_2 werden wie folgt definiert:

t_R Reaktionszeit

$t_U = t_2 - t_1$ Umsetzzeit

Das Übermitteln der Signale erfolgt über einen Sender in Fahrzeug II und einem Empfänger in Fahrzeug I.

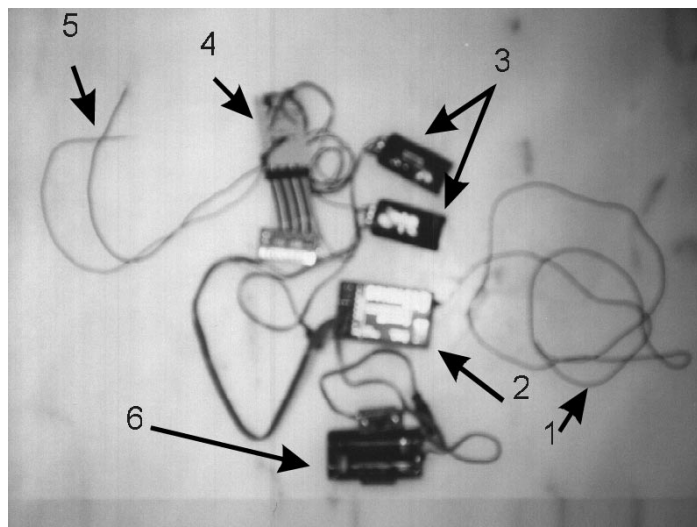


Abbildung 4-1: Empfangseinheit

Die Abbildung 4-1 zeigt die Empfängereinheit. Im Einzelnen sind dies:

- 1) Wurfantenne
- 2) Empfänger
- 3) Multiswitch
- 4) Verbindung zur PC-Karte
- 5) Anschlußkabel für das Bremslicht
- 6) Spannungsversorgung

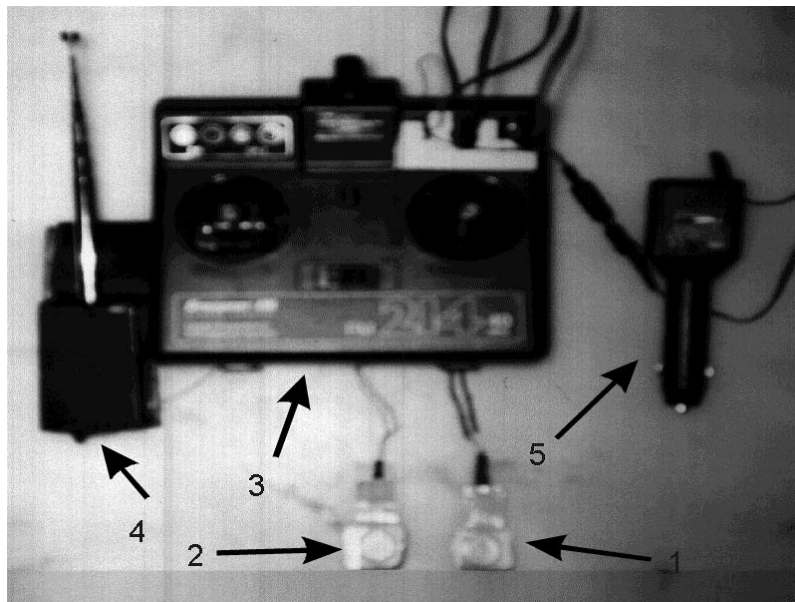


Abbildung 4-2: Sendeeinheit

In Abbildung 4-2 sind die Sendeeinheit und die Pedalkontakte zu erkennen.

- 1) Sensor für Gaspedal
 - 2) Sensor für Bremspedal
 - 3) Fernsteuerung
 - 4) Antenne für Sender
-

5) Spannungsversorgung



Abbildung 4-3: Rückansicht des vorausfahrenden Fahrzeugs

Abbildung 4-4 zeigt das Fahrzeug, welches für die gesamte Versuchsdauer als Fahrzeug I zur Verfügung stand.

Die Übertragung der Schaltsignale erfolgt mit einer gewöhnlichen Modellbau-Funkfernsteuerung (Graupner Jr FM214 40 MHz Digital-Proportional) mit zugehörigem Empfänger. Die Ermittlung der Totzeit der Fernsteuerung wurde mit Hilfe eines Speicheroszillographs (Gould Advance 20 MHz Oscilloscope DSO 1602) ermittelt. Die Totzeit beträgt 80 ms. Im Anhang ist das x-y-Diagramm der Totzeitermittlung zu finden. An die Fernsteuerung kann wahlweise eine externe Spannungsversorgung über die Bordsteckdose oder ein Akkupack als Spannungsquelle angeschlossen werden. Als Pedalkontakte dienen Drucksensoren mit der Typbezeichnung FSR151 der Firma Conrad Electronic. Die Drucksensoren haben je nach aufgebrachtener Normalkraft einen veränderlichen Widerstand. Der Widerstand beträgt bei 10 g etwa $2\text{ M}\Omega$ und fällt dann linear auf ca. $1\text{ k}\Omega$ bei 10 kg ab. Die

Möglichkeit, daß Bremssignal des folgenden Fahrzeuges am Bremslichtschalter abzugreifen, schied von vornherein aus, da es von Hersteller zu Hersteller Unterschiede in der Realisierung des Bremslichtschalters gibt, z.B. Bremslichtschalter am Bremspedal oder Bremslichtschalter am Bremszylinder. Dies würde jedoch die ermittelten Werte je nach Bauart des Schalters beeinflussen. Bei den Drucksensoren ist die Beeinflussung durch den Bremslichtschalter ausgeschlossen. Die Drucksensoren mit einer Dicke von 0,3 mm werden mit Hilfe von Klebestreifen an den Pedalen befestigt und von keiner Testperson als störend oder hinderlich empfunden. Ein Nachteil der Sensoren ist die relativ kleine Größe. Aus diesem Grund wurden im Verlaufe der Testfahrten die Anzahl von einem Sensor pro Pedal auf zwei Sensoren pro Pedal erhöht. Die folgende Abbildung zeigt die Transistorschaltung, welche nötig ist, um mit den Drucksensoren die Kanäle der Fernsteuerung zu schalten.

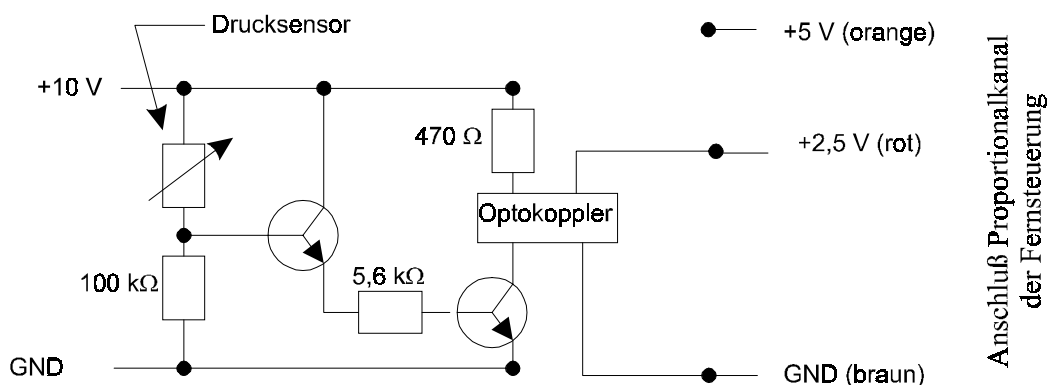


Abbildung 4-4: Transistorschaltung für den Drucksensor

Der Empfänger wird mit einem Akkupack als Spannungsversorgung betrieben. An den Kanälen 3 und 4 des Empfängers sind je ein digitaler Schalter der Firma Multiplex angeschlossen. Bei Schaltung eines der Kanäle über die Fernsteuerung wird der entsprechende digitale Schalter geschlossen. Liegt auf keinem der beiden Kanäle ein Signal an, so sind die Schalter geöffnet. Die Ausgänge des Multiswitch sind ebenso wie die Leitungen von dem Relais der Bremslichter über Abbildung 4-5 an die PC-

Karte angeschlossen. Bei dem Relais handelt es sich um ein einfaches Schaltrelais, welches den Kontakt bei Aufleuchten der Bremslichter schließt (Schließer).

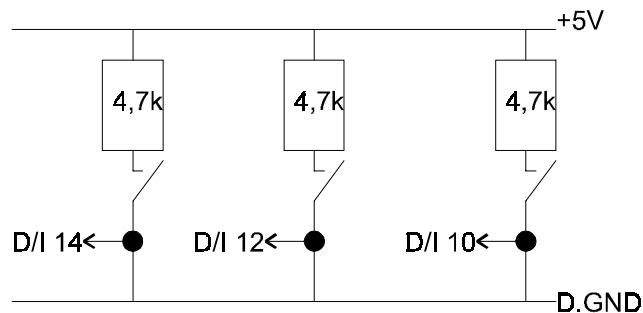


Abbildung 4-5: Open/Short Schaltung

Bei der PC-Karte handelt es sich um eine multifunktionale digitale I/O-Karte der Fa. Advantec (PCL 818L). Die obige Schaltung aus Abbildung 4-5 ist notwendig, um sicherzustellen, daß bei geöffnetem Schalter der Signalpegel auf GND gezogen wird. Das Programm zur Steuerung der Karte ist in der Programmiersprache PASCAL geschrieben und ist im Anhang zu finden. Das Programm schreibt die Daten nach jedem Versuchsdurchgang auf die Festplatte. Um den Fahrer des vorausfahrenden Fahrzeugs zu entlasten und um eventuelle Regelmäßigkeiten in den Abständen der Bremsungen auszuschließen, wird der Zeitpunkt des Versuchsbeginns innerhalb des Programms mit einer Exponentialverteilung bestimmt. Der Parameter der Exponentialverteilung ist die mittlere Wartezeit, mit einem Wert von 30 Sekunden. Als zusätzliche Begrenzung wird der Parameter maximale Wartezeit eingeführt. Die Aufforderung an den Fahrer des vorausfahrenden Fahrzeugs, den Versuch zu Starten wurde akustisch durch einen Piepton realisiert. Ebenso wurde das Ende des Versuchs akustisch gemeldet. Für die Übermittlung des Versuchsende gibt es drei verschiedene Möglichkeiten:

- 1) auch nach längerer Zeit kein Piepton: Proband hat nicht reagiert, bzw. das Signal wurde nicht empfangen. Der Versuch läuft weiter.
- 2) Tiefer Piepton: Proband stand mit dem Fuß auf dem Gaspedal und hat reagiert, die Zeit wird gestoppt.

- 3) Tiefer Ton gefolgt von einem hohen Ton: Der Proband hat zwar reagiert, jedoch war der Fuß nicht auf Gas bzw. das Signal für Gaswegnahme wurde nicht empfangen.

Mit Hilfe der Signaltöne ist der Experimentator immer über den Fortgang des Versuchs informiert, ohne auf den Bildschirm schauen zu müssen.

4.2 Versuchsdurchführung

Das Experiment ermittelt die Reaktionszeiten der Einfachreaktion. Reaktionszeitexperimente verfolgen per Definition das Ziel, die kürzeste mögliche Antwortzeit der Probanden zu ermitteln. Diese Forderung ist beim Fahrzeugfolgebetrieb weitestgehend erfüllt. Der Proband soll auf das Aufleuchten der Bremslichter des Experimentators sofort mit dem Antippen des eigenen Bremspedals reagieren. Es reicht also bereits das Antippen des Bremspedals aus, um den Versuch zu beenden. Der Proband muß keine Vollbremsung durchführen. Es reicht bereits das Antippen des Bremspedals aus, weil die Versuche im realen Straßenverkehr durchzuführen sind und eine Vollbremsung dazu führen würde, daß der Proband sich extrem stark auf den rückwärtigen Verkehr konzentrieren müßte. Außerdem würden sich kaum Testpersonen finden lassen, welche an einer Testserie mit eigenem PKW teilnehmen, bei der mehr als 100 Vollbremsungen durchzuführen wären. Um für den Probanden möglichst keine Störreize wirksam werden zu lassen wurde der in /16/ beschriebene Forderungskatalog übernommen:

- Messungen nur bei Tageslicht durchführen,
 - Keine weiteren Personen im Fahrzeug der Testperson,
 - Keine Störung durch die Testeinrichtung,
 - Kein Autoradio,
 - Benutzung eines Fahrzeugs mit Fahrpraxis,
-

- Der Proband durfte während der Testfahrt nicht rauchen,
- Unterbrechung der Versuche bei dicht folgendem Verkehr.

Für den letzten Punkt gilt, daß der Fahrer des vorausfahrenden Fahrzeugs den rückwärtigen Verkehr zu beobachten hat und gegebenenfalls das akustische Signal für den Versuchsbeginn ignoriert und auf einen späteren Zeitpunkt verlegt.

Unter den erwähnten Bedingungen und Voraussetzungen wird es dem Probanden ermöglicht, sofort und ungehemmt reagieren zu können. Um möglichst realitätsgetreue Werte zu erhalten, ist es vonnöten, die Bremsungen in möglichst unregelmäßigen Abständen durchzuführen. Dies wird, wie im vorigen Kapitel beschrieben, durch den exponentialverteilten Versuchsbeginn erreicht. Zusätzlich sollten Bremsungen, welche durch das Verkehrsgeschehen voraus zu sehen sind, ausgeschlossen werden. Da die Fahrstrecke zum größten Teil aus wenig befahrenen Landstraßen ohne Signalanlagen besteht, ist auch diese Bedingung weitestgehend erfüllt. Um voraussehbare Bremsungen komplett auszuschließen, wurden Meßwerte, die kleiner als 50 ms waren gestrichen.

Es wird angestrebt, bei jeder Testfahrt mehr als 100 gültige Werte zu erhalten. Die Tests sind mit 19 Frauen und Männern durchgeführt worden. Bei den Fahrzeugen der Probanden handelt es sich um Pkw.

Bei der Teststrecke handelt es sich um eine Strecke von etwa 40 km Länge. Wobei die Strecke relativ eben ist, um möglichst viele Werte mit Umsetzzeit zu erhalten. Die Durchführung der Versuche wird beim Durchfahren von Ortschaften nicht unterbrochen.

Vor Versuchsbeginn werden die Probanden über die Aufgabenstellung und den Fordeungskatalog informiert und auch darüber aufgeklärt, daß ein Antippen der Bremse genügt. Im Stand werden mit Hilfe einer Testschleife im PASCAL-Programm Versuche durchgeführt. So können sich die Testpersonen an den mindestens auszuübenden

Druck gewöhnen und die optimale Lage der Drucksensoren auf Gas- und Bremspedal ermittelt werden. Die Probanden werden instruiert, während der Fahrt einen ausreichenden Sicherheitsabstand einzuhalten. Aus Gründen der Übertragungssicherheit sollte allerdings ein maximaler Abstand nicht überschritten werden. Über den zu erwartenden Abstand zwischen den einzelnen Messungen wurden die Probanden nicht informiert.

Der Fahrer des vorausfahrenden Fahrzeugs hat die Aufgabe, bei dem Signalton zum Versuchsstart sich zu vergewissern, daß der Proband ungehindert das Bremspedal antippen kann und den Versuch dann zu starten. Bei zu dicht auffahrendem Nachfolgeverkehr sollten die zwei Fahrzeugführer ihre Wagen anhalten, um den nachfolgenden Verkehr vorbeizulassen. Da der Experimentator über die akustischen Signale stets darüber informiert ist, ob das Signal zur Übertragung ankommt oder gestört ist, kann er bei auftretenden Problemen den Versuch unterbrechen und die Störung beheben. Meist bestand die Übertragungsstörung darin, daß die Sensoren auf den Pedalen verrutschten und der Proband die Sensoren nicht mehr traf.

Vor und nach der Durchführung der Tests werden die Personen dazu angehalten, einen kleinen Fragenkatalog auszufüllen. Bei den Fragen handelt es sich im wesentlichen um persönliche Daten, Fahrgewohnheiten und Fahrzeugdaten. Es wurde aber auch nach der Einschätzung der eigenen Reaktionszeit vor und nach dem Versuch gefragt.

Trotz sorgfältiger Versuchsvorbereitung und –durchführung kam es zu Fehlmessungen. Folgende Fehler waren zu verzeichnen:

- I. An einer Ampel stehend wurde das Startsignal vom Rechner gegeben und sofort die Zeit gestoppt, da beide Fahrzeuglenker mit dem Fuß auf der Bremse standen.
 - II. Die Umsetzzeit wurde nicht registriert, weil der Proband den Drucksensor nicht traf oder mit dem Fuß nicht auf dem Gaspedal war.
-

- III. Das Versuchsende wurde nicht erkannt, weil
- a) Der Proband nicht reagierte.
 - b) Der Proband reagierte, aber den Sensor nicht berührte.
 - c) Der Proband reagierte, die Signalübertragung jedoch gestört war.

Für die statistische Auswertung kommen nur Werte in Frage, welche im Intervall [50ms;2500ms] liegen. So können die Fehler durch die Fehlerquellen I und III nachträglich weitestgehend eliminiert werden. Bei Nichtregistrierung der Umsetzzeit, also Fehlerquelle II, werden die Werte für die Reaktionszeit, sofern sie im vorhin angegebenen Intervall liegen, verwendet.

4.3 Versuchspersonen

Die ausgewählten Versuchspersonen lassen sich generell in zwei Gruppen einteilen. Die Personen der ersten Gruppe, im folgenden Gruppe A genannt, liegen in der Altersklasse 18 bis 33 Jahre. Die Personen der zweiten Gruppe (Gruppe B), im folgenden Kontrollgruppe genannt, sind älter als 51 Jahre. Es wurde eine Kontrollgruppe mit höherem Alter ausgewählt, um feststellen zu können, ob das Alter von Fahrzeuglenkern einen Einfluß auf die Reaktionszeit hat. In Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 auf Seite 69 und Seite 70 sind die Merkmale aller Versuchspersonen aufgeführt.

Die Gruppe A besteht aus 15 Personen mit insgesamt 1226 Messungen. Die Kontrollgruppe B besteht aus 4 Personen mit 413 Meßwerten. Die Ermittlung der Reaktionszeiten wird nur mit den Meßwerten der Gruppe A durchgeführt, da die Kontrollgruppe lediglich zur Überprüfung des Alterseinfluß dient.

Die Personen 6 und 7 sagten nach Beendigung der Messungen, daß sie sich durch die starke Sonneneinstrahlung gestört fühlten. Dies ist nachvollziehbar, da bei direkter Sonneneinstrahlung auf die Bremslichter der Kontrast dieser im Gegensatz zu normalem Tageslicht erheblich abnimmt (Kapitel 2.2), oder die Testperson durch die Sonnenstrahlen geblendet wird (Kapitel 2.4). In beiden Fällen wird das Erkennen der Bremslichter erheblich erschwert.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Geschlecht	m	w	m	w	m	m	m	m
Alter	28	26	19	23	29	28	26	31
Beruf	Betonbauer	Studentin	Schüler	Studentin	Tierbau	-	Sozialpädagoge	Zugführer
Fahrpraxis	5	5	1	4	11	10	8	13
Jahresfahrleistung	30000	10000	-	5000	10000	2500	-	12500
Fahrzeugart	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw
Fahrzeugtyp	Chrysler	VW Golf	VW Polo	VW Golf	Opel Kadett	Ford Mondeo	Peugeot 205	Seat
Benutzung seit	2	2	1	4	3	2	4	1
km-Stand	-	25000	70000	65000	115000	15000	62000	-
Benutzung fremder Fahrzeug	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
schnell	40	40	20	10	10	20	50	30
normal	60	40	60	70	70	40	40	60
langsam	0	20	20	20	20	40	10	10
üblicher Fahrort	Stadt, BAB	Stadt	Stadt	Stadt	Stadt, Land	St, Land, BAB	Stadt, BAB	Stadt
Gefühlslage	gut	gut	gut	gut	gut	mittel	gut	gut
Ein-sch., der Reaktion	mittel	mittel	mittel	mittel	schnell	mittel	schnell	mittel
		Nachher						
Gefühlslage	gut	gut	gut	gut	gut	mittel	gut	gut
Ein-sch., der Reaktion	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	schnell	mittel
Störungen	-	-	-	-	-	-	Sonne	-

Abbildung 4-6: Personendaten Gruppe A

Nr.	9	10	11	12	13	14	15
Geschlecht	m	m	w	m	m	m	m
Alter	31	28	28	26	31	30	31
Beruf	Programmierer	Student	Hausfrau	Werkzeugmacher	Student	Dipl.-Ing.	Dipl.-Ing.
Fahrpraxis	12	10	7	7	13	14	15
Jahresfahrleistung	40000	10000	7500	15000	-	-	-
Fahrzeugart	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw
Fahrzeugtyp	Volvo	Opel Kadett	VW Golf	VW Polo	VW Golf	Ford Sierra	Ford Sierra
Benutzung seit	2	7	3	3	1	2	3
km-Stand	150000	105000	46000	60000	-	140000	140000
Benutzung fremder Fahrzeug	nein	ja	ja	nein	-	ja	ja
schnell	50	40	30	40	40	10	10
normal	50	60	40	40	40	80	80
langsam	0	0	30	20	20	10	10
üblicher Fahrort	BAB	Stadt, BAB	Stadt	Land	-	-	-
Gefühlslage	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Einsch. der Reaktion	schnell	mittel	mittel	schnell	schnell	schnell	schnell
Nachher							
Gefühlslage	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Einsch. der Reaktion	schnell	mittel	mittel	schnell	schnell	schnell	schnell
Störungen							

Abbildung 4-7: Personendaten Gruppe A (Fortsetzung)

Nr	1	2	3	4
Geschlecht	m	w	m	w
Alter	54	52	67	51
Beruf	Kaufm. Angestellter	Sekretärin	Rentner	Hausfrau
Fahrpraxis	36	29	48	7
Jahresfahrleistung	5000	6000	6000	8000
Fahrzeugart	Pkw	Pkw	Pkw	8
Fahrzeugtyp	Alfa 75	Alfa75	A4	Clio
Benutzung seit	6	2	1	6
km-Stand	50000	50000	10000	55000
Benutzung fremder Fahrzeuge	nein	nein	ja	nein
Fahrweise	schnell	50	10	10
	normal	30	50	60
	langsam	20	0	30
üblicher Fahrort	Stadt	Berufsverkehr	Stadt	Stadt
Gefühlslage	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Einschätzung der Reaktionszeit	schnell	schnell	schnell	normal
Nachher				
Gefühlslage	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Einschätzung der Reaktionszeit	schnell	schnell	schnell	normal
Störungen				

Tabelle 4-1: Personendaten Gruppe B

5 Versuchsauswertung

Die Reaktionszeiten der Versuchspersonen weisen, wie erwartet, eine Streuung auf. Es gibt also keinen festen Wert für die Reaktionszeit. Die Streuung tritt sowohl für ein und dieselbe Person (intrapersonell) sowie zwischen verschiedenen Personen (interpersonell) auf. Die folgenden Diagramme zeigen die interpersonelle und intrapersonelle Streuung der Reaktionszeiten. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die 15 Versuchspersonen in zwei Gruppen (1-8 und 9-15) aufgeteilt.

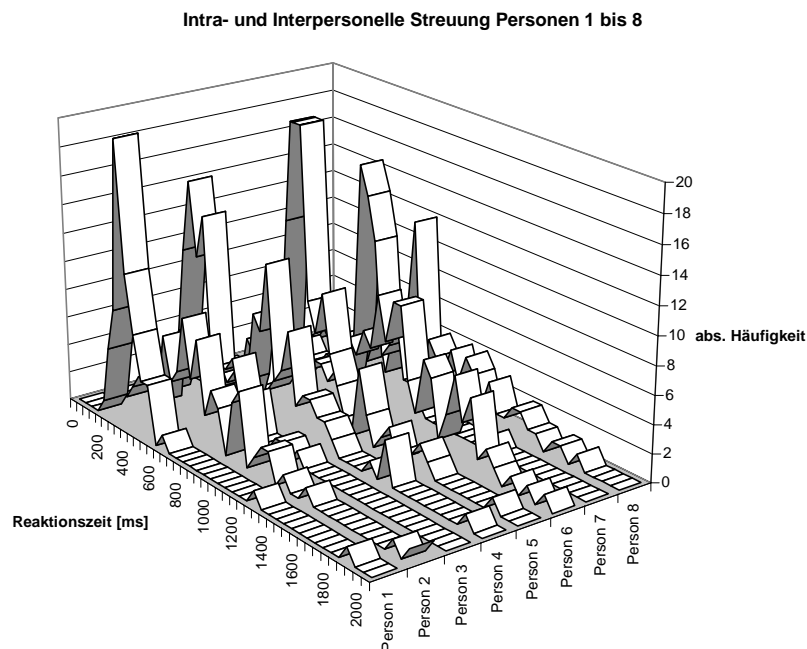


Abbildung 5-1: Intra- und interpersonelle Streuung der Personen 1 bis 8

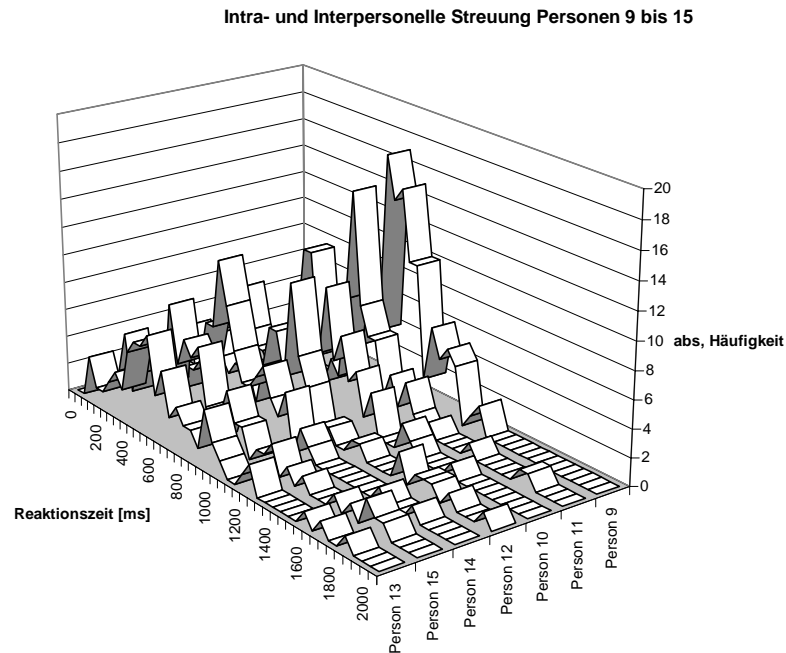


Abbildung 5-2: Intra- und interpersonelle Streuung der Personen 9 bis 15

In den beiden Diagrammen ist zu erkennen, daß der größte Teil der Reaktionszeiten der Versuchspersonen 1 und 3 schneller sind als die der anderen Versuchspersonen. Die Reaktionszeiten der übrigen Versuchspersonen haben eine deutliche Anhäufung der Meßwerte bei einer Reaktionszeiten von ungefähr 600 ms bis 800 ms. Deutlich sind auch die intrapersonellen Schwankungen der einzelnen Probanden zu erkennen, wobei bei einigen Personen eine recht breite Streuung zu beobachten ist.

5.1 Statistische Kenngrößen

Die folgende Tabelle zeigt die statistischen Kenngrößen, die für jede Person einzeln an den jeweiligen Meßwerten ermittelt wurden. In der letzten Zeile stehen die arithmetisch gemittelten Werte (Schnitt).

Person:	Anzahl der gültigen Messungen	arithmetisches Mittel [ms]	Standard- fehler	Standard- abweichung [ms]	Schiefe:	Median [ms]	Perzentil [ms]			
							2%	5%	95%	98%
1	70	610	73	614	2,330	379	248	271	2316	2370
2	67	725	89	403	1,855	658	185	243	1370	2011
3	87	535	57	432	3,467	415	224	264	1064	2321
4	67	794	97	405	2,054	685	242	325	1464	2194
5	115	746	70	307	2,430	653	278	498	1353	1490
6	113	1114	105	416	0,539	1069	319	471	1830	2228
7	71	775	92	387	2,907	675	371	535	1808	2178
8	74	1006	117	477	1,023	895	231	449	2137	2225
9	124	858	77	282	0,378	835	240	404	1355	1577
10	98	757	76	464	1,737	698	89	183	1698	2340
11	56	907	121	326	3,032	792	624	686	1591	1840
12	65	814	101	503	1,341	771	60	184	1795	2283
13	68	663	80	402	1,594	557	102	174	1498	1793
14	77	682	78	329	1,848	602	183	311	1102	1712
15	74	706	82	491	1,412	575	108	119	1760	1971
Σ	1226									
Schnitt	82	779	88	416	1,863	684	234	341	1609	2036

Tabelle 5-1: statistische Kenngrößen der Einzelauswertung

Aus obiger Tabelle ist abzulesen, daß der Median der Personen 1, 3, 6 und 8 relativ stark vom Durchschnitt aller Mediane abweicht. Die folgende Tabelle zeigt die Daten der obengenannten Personen und stellt diese zum Vergleich mit den Durchschnittsdaten dar, um feststellen zu können, ob es einen Zusammenhang zwischen den Merkmalen der Personen und den Reaktionszeiten gibt.

	Durchschnitt	Person 1	Person 3	Person 6	Person 8	
Alter	28	28	19	28	31	Jahre
Fahrfahrung	9	5	1	10	13	Jahre
Fahrweise:						
Schnell	30	40	20	20	30	%
Normal	55	60	60	40	60	%
Langsam	15	0	20	40	10	%
Fahrh. pro Jahr eigenes Fahrz.	13067	30000	6500	2500	12500	km
im Besitz	2,7	2	1	2	1	Jahre
Kilometerleistung	70571	-	70000	15000	15000	km

Tabelle 5-2: Merkmalsausprägungen

Bei Person 6 könnten die langsamen Reaktionen mit der geringen Kilometerleistung und der seltenen Benutzung des Autos zusammenhängen. Die schnellen Reaktionszeiten der ersten Versuchsperson könnten durch die vielen Autobahnkilometer auf stark befahrenen Autobahnen ihren Ursprung haben. Ansonsten gibt es keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen einem der Merkmale und den überdurchschnittlich schnellen beziehungsweise langsamen Reaktionen.

Die Auswertung aller Reaktionszeiten führte zu den statistischen Kenngrößen der gepoolten Daten und sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

arithmetisches Mittel	788 ms
2% - Perzentil	179 ms
5% - Perzentil	259 ms
Median	707 ms
95% - Perzentil	1688 ms
98 % - Perzentil	2225 ms
Standardabweichung	441 ms
Schiefe	1,528

Tabelle 5-3: Statistische Kenngrößen der gepoolten Daten

In der folgenden Tabelle sind die statistischen Kenngrößen der Einzelauswertung den statistischen Kenngrößen der gepoolten Daten gegenübergestellt.

	arithmetisches Mittel	Standard-abweichung	Schiefe	Median	Perzentil			
					2%	5%	95%	98%
Einzelauswertung	779	416	1,863	684	234	341	1609	2036
gepoolte Daten	788	441	1,528	707	179	259	1688	2225

Tabelle 5-4: Gegenüberstellung der statistischen Kenngrößen

In Tabelle 5-4 kann man erkennen, daß die Perzentile der gepoolten Daten die Perzentile der Einzelauswertung einschließen. Der Unterschied beim arithmetischen Mittel kommt dadurch zustande, daß pro Person unterschiedliche viele Meßwerte zur Verfügung stehen. So fließen beim Poolen die Probanden mit vielen Messungen stärker ein,

beim Mitteln aber werden sie den anderen Personen gleichgestellt. Daher kommt es zu Abweichungen bei den beiden arithmetischen Mittelwerten. Die Schiefe, welche an den unbeschnittenen Daten berechnet wurde, ist für beide Auswertungen größer Null, es handelt sich also auch bei diesem Experiment um eine linkssteile Verteilung.

Durch die Berechnung der Kennwerte mit Hilfe der Mittelwerte der Personen fallen die Ausreißer nicht so sehr ins Gewicht wie beim Poolen der Daten.

Für die Rechtssprechung sind die Grenzwerte der Verteilung von besonderem Interesse. So wird bei Unfällen ohne Spurzeichnung vom Fahrzeug des Angeklagten die längstmögliche Reaktion unterstellt. Bei Unfällen mit Spurzeichnung wird die kürzestmögliche Reaktionszeit zugrunde gelegt.

Bei der Festlegung der Perzentile wird davon ausgegangen, daß der untere Wert nicht gezielt unterschritten werden kann. Die Überschreitung des oberen Wertes ist auf Unachtsamkeit oder eine andere nicht zu akzeptierende Leistungsschwäche zurückzuführen.

5.2 Häufigkeitsverteilung

Die Häufigkeitsverteilung wurde mit insgesamt 1226 Meßwerten, welche von 15 verschiedenen Personen stammen, durchgeführt. Die Klassenbreite wurde auf 50 ms festgelegt. In dem folgenden Diagramm ist das Histogramm der Häufigkeitsverteilung dargestellt.

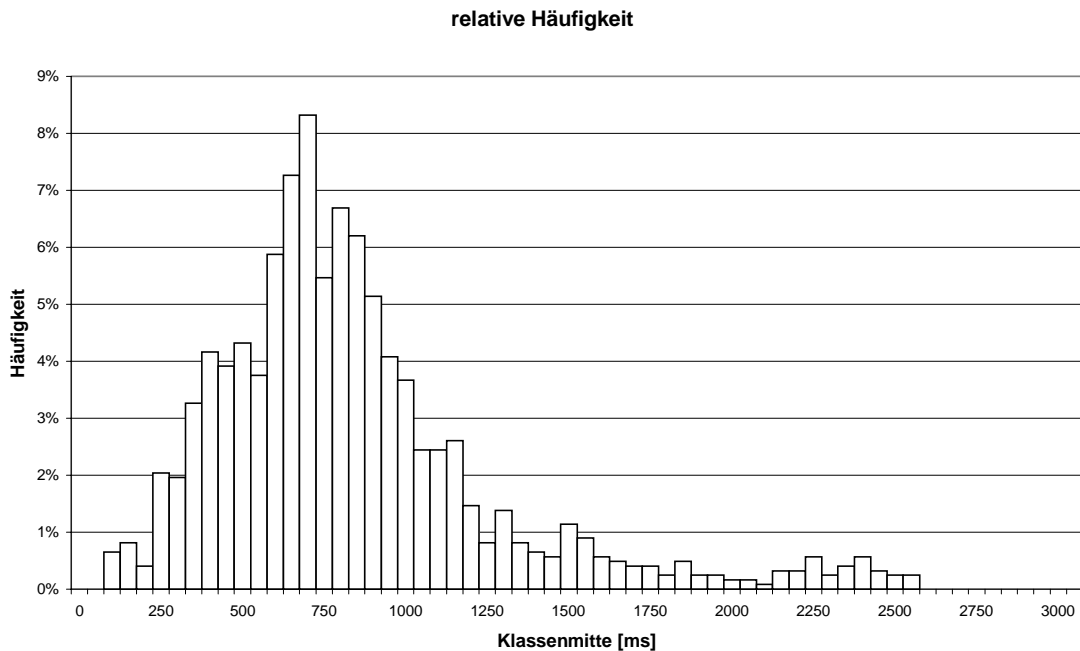


Diagramm 5-1 : Histogramm der Häufigkeitsverteilung

In dem Histogramm ist erkennbar, daß der größte Teil der Meßwerte zwischen 250ms und 1150ms liegen. Der für Reaktionszeitexperimente typische lange Schwanz der Verteilung ist ebenfalls gut zu erkennen. Wie in dem vorangegangenen Kapitel bereits gezeigt wurde, handelt es sich um eine linkssteile Verteilung.

5.3 Momentenmethode

In diesem Kapitel werden der in Diagramm 5-1 dargestellten Häufigkeitsverteilung die Weibull-Verteilung, die zeitverschobene Weibull-Verteilung und die zeitverschobene Gammaverteilung mit den nach der Momentenmethode ermittelten Parameter angepaßt. Zur Berechnung der Parameter wurden die am 2%-Perzentil und am 98%-Perzentil beschnittenen statistischen Kenngrößen der gepoolten Daten verwendet. Bei der Verwendung der statistischen Kenngrößen aus der Einzelauswertung konnten durch den Momentenansatz nicht so gute Ergebnisse erzielt werden wie mit den

gepoolten Daten. Zur Verdeutlichung sind in der folgenden Tabelle einmal die Werte der Verlustfunktion für die zeitverschobene Gammaverteilung und die Weibull-Verteilung deren Parameter einmal mit den Kenndaten der Einzelauswertung und zum anderen mit den Kenndaten aus den gepoolten Daten berechnet wurden.

	Verlustfunktion	
	gepoolt	Einzelauswertung
Weibull-Verteilung	0,245	0,386
Gammaverteilung	0,279	0,454

Tabelle 5-5: Verlustfunktion gepoolt / Einzelauswertung

Im folgenden wird die Anpassung der Parameter mittels Momentenmethode Ansatz I und die Anpassung mittels Verlustfunktion Ansatz II genannt.

Die folgenden Tabellen zeigen die Parameter der jeweiligen Verteilungsfunktionen.

Parameter der Weibull-Verteilung nach Ansatz I	
Weibull-Steigung (B):	2,78
char. Merkmalswert (T):	847,87

Tabelle 5-6: Parameter der Weibull-Verteilung nach Ansatz I

Parameter der zeitverschobenen Weibull-Verteilung nach Ansatz I	
Weibull-Steigung (B)	1,66
Lageparameter (t_0)	165,64
charakteristische Zeit ($T-t_0$)	675,92

Tabelle 5-7: Parameter zeitverschobene Weibull-Verteilung Ansatz I

Parameter der Gammaverteilung Ansatz I	
Gestaltparameter (B)	2,38
charakteristische Zeit (T)	241,56
Lageparameter (t_0)	194,52

Tabelle 5-8: Parameter der Gammaverteilung Ansatz I

Das folgende Diagramm zeigt die Funktionen der Verteilungen und das Histogramm der Häufigkeitsverteilung.

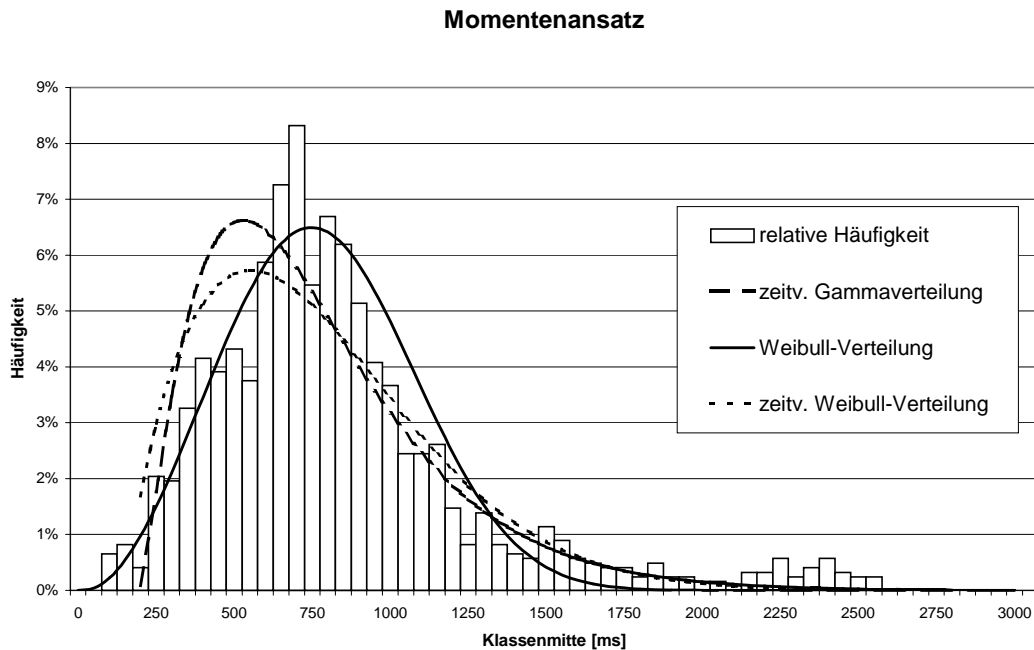


Diagramm 5-2: Anpassung der Verteilungsfunktionen über Momentenansatz

Wie in dem obigen Diagramm zu erkennen, handelt es sich bei der zeitverschobenen Gammaverteilung und der zeitverschobenen Weibull-Verteilung um linkssteile Verteilungen. Für die Weibull-Verteilung ist dies nicht erkennbar. Die exakte Berechnung der Schiefe ergibt aber auch für diese Verteilungsdichtefunktion einen Wert größer Null, so daß es sich auch hier um eine linkssteile Verteilung handelt.

Um feststellen zu können, welche der drei Funktionen die Häufigkeitsverteilung am besten beschreibt, wird die Verlustfunktion verwendet. Die Verteilung mit dem kleinsten Funktionswert der Verlustfunktion kann als die günstigste, die Häufigkeitsverteilung am besten beschreibende, Verteilung bezeichnet werden.

Verlustfunktion Ansatz I	
Weibull-Verteilung	0,344
zeitverschobene Weibull-Verteilung	0,278
zeitverschobene Gammaverteilung	0,279

Tabelle 5-9: Verlustfunktion Ansatz I

In obiger Tabelle ist zu erkennen, daß die zeitverschobene Weibull-Verteilung für den Momentenansatz die günstigste Verteilungsfunktion ist.

5.4 Verlustmethode

Die Parameter der Weibull-Verteilung, der zeitverschobene Weibull-Verteilung und der Gammaverteilung werden hier so berechnet, daß der Wert der Verlustfunktion jeweils ein Minimum annimmt.

Parameter der Weibull-Verteilung Ansatz II	
Weibull Steigung (B):	2,42
Charakteristische Zeit (T):	762,72

Tabelle 5-10: Parameter der Weibull-Verteilung Ansatz II

Parameter der zeitverschobenen Weibull-Verteilung nach Ansatz II	
Weibull-Steigung (B)	2,10
Lageparameter (t)	129,14
charakteristische Zeit (T-t ₀)	662,92

Tabelle 5-11: Parameter der zeitverschobenen Weibull-Verteilung Ansatz II

Parameter der Gammaverteilung Ansatz II	
Gestaltparameter (B)	4,57
charakteristische Zeit (T)	162,14
Lageparameter (t ₀)	10,00

Tabelle 5-12: Parameter Gammaverteilung Ansatz II

Die Kurven der drei Verteilungen mit den in den Tabellen 5-9 bis 5-11 stehenden Parametern sind in dem folgenden Diagramm zu sehen.

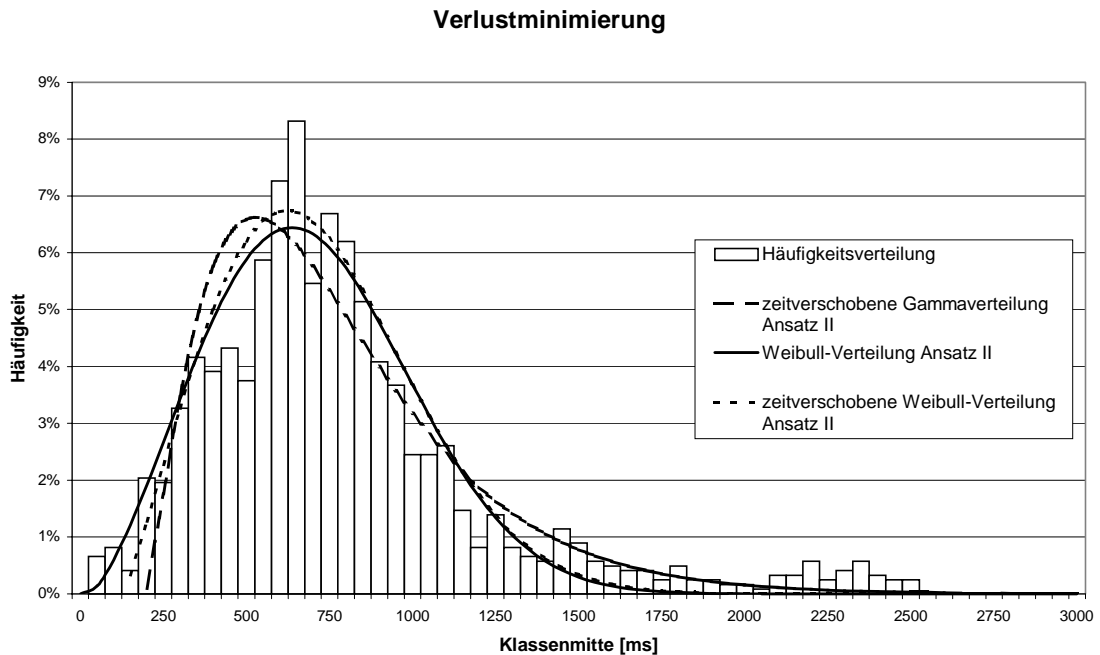


Diagramm 5-3: Anpassung der Verteilungsfunktionen über Verlustminimierung

Auch hier sind alle drei Verteilungen in der Lage den linkssteilen Charakter der empirischen Daten wiederzugeben.

In der folgenden Tabelle sind die Werte der Verlustfunktion gegenübergestellt.

Verlustfunktion Ansatz II	
Weibull-Verteilung	0,245
zeitverschobene Weibull-Verteilung	0,250
zeitverschobene Gammaverteilung	0,235

Tabelle 5-13: Verlustfunktion Ansatz II

Nach Durchführung der Verlustminimierung an allen drei Verteilungsfunktionen zeigt sich, daß die zeitverschobene Gammaverteilung mit den durch die Verlustminimierung gewonnenen Parametern die empirische Häufigkeitsverteilung am besten beschreibt

und dies, obwohl die zeitverschobene Weibull-Verteilung mit 5 Parameter, einen Parameter mehr als die zeitverschobene Gammaverteilung hat. Dies läßt den Schluß zu, daß die zeitverschobene Gammaverteilung trotz weniger Parameter als die günstigste, das Problem beschreibende Verteilungsfunktion bezeichnet werden kann.

5.5 Umsetzzeit

Für die Umsetzzeit des Fußes vom Gaspedal zum Bremspedal standen für eine sinnvolle Auswertung zu wenige Daten zur Verfügung. Aus diesem Grund soll hier nur der Mittelwert und der Median gezeigt werden.

Umsetzzeit	
arithmetisches Mittel	277 ms
Median	209 ms

Tabelle 5-14: Umsetzzeit

5.6 t-Test des Alterseinflusses

Es ist zu überprüfen, ob die beiden Stichproben aus Grundgesamtheiten mit gleichem Mittelwert stammen, wenn mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%, also $\alpha=0,05$ gerechnet wird.

Die folgende Tabelle zeigt die zur Berechnung von a benötigten Werte.

	Stichprobe 1	Stichprobe 2
Mittelwert	779	861
Anzahl (n)	15	4
Varianz	22052	5306

Tabelle 5-15: t-Test Daten

Für a ergibt sich somit folgender Wert:

$$s_d = \sqrt{\frac{s_1^2 \cdot (n_1 - 1) + s_2^2 \cdot (n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}}$$
$$= \sqrt{\frac{22052 \cdot (15 - 1) + 5306 \cdot (4 - 1)}{15 + 4 - 2}} = 138,192$$

$$|a| = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} = \frac{|779 - 861|}{138,192} \cdot \sqrt{\frac{15 \cdot 4}{15 + 4}} = 1,0545$$

Nach Tafel IV in /17/ folgt für $\alpha=0,05$ und $m=17$ der Tafelwert $t(17 ; 0,05) = 2,11$. Da nun $|a| < t(17 ; 0,05)$ ist die Nullhypothese $H_0 (\mu_1=\mu_2)$ anzunehmen, daß heißt die beiden Stichproben entstammen einer Grundgesamtheit mit gleichen Mittelwerten.

Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % konnte gezeigt werden, daß das Alter der Probanden keinen signifikanten Einfluß auf die Reaktionszeiten hat.

6 Schlußfolgerung für den Straßenverkehr

Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, sind für die strafrechtliche Würdigung weniger Median oder Mittelwert von Interesse, sondern vielmehr die in Betracht zu ziehenden Grenzen. Die Festlegung dieser Grenzen ist Aufgabe der Rechtsprechung.

In Tabelle 5-4 werden daher verschiedene der in Frage kommenden Perzentile dargestellt, um der juristischen Wertung nicht vorzugreifen. Der 20. Deutsche Verkehrsgerichtstag wählte für seine Empfehlungen das 2%- und 98% -Perzentil. Die Werte wurden allerdings nicht aus den experimentell ermittelten Werten berechnet, sondern aus der parametrisch angepaßten Verteilungsfunktion. Da die Perzentile verteilungsfreie Maße darstellen, ist nicht einzusehen, warum sie nicht direkt an den Meßdaten ermittelt wurden. In Kapitel 3 konnte gezeigt werden, daß die Anpassung der Verteilungsfunktion mit den Parametern von Burckhardt noch deutlich verbessert werden konnte.

	Verlustfunktion
Modell von Burckhardt	0,3575
Parameteransatz durch Verlustminimierung	0,1293

Tabelle 6-1: Verlustfunktion der zeitverschobenen Weibull-Verteilung

Dies ist ein weiterer Grund dafür, daß die Berechnung der Perzentile an der parametrisch angepaßten Verteilungsfunktion mehr als unglücklich ist.

In der folgenden Tabelle sind die statistischen Kenngrößen des Altexperiments und die der eigenen Versuche gegenübergestellt.

		arithmetisches Mittel	Standard-abweichung	Schiefe	Modalwert	Median	Perzentil			
							2%	5%	95%	98%
eigenes Experiment	Einzelauswertung	779	416	1,863	623	684	234	341	1609	2036
	gepoolte Daten	788	441	1,528	650	707	179	259	1688	2225
altes Experiment	Einzelauswertung	681	137	1,160	611	657	484	516	933	1030
	gepoolte Daten	667	177	1,080	580	630	380	430	1100	1281

Tabelle 6-2: Statistische Kenngrößen Altexperiment und neues Experiment

Wie schon in Kapitel 5.2 festgestellt wurde, werden die Perzentile der Einzelauswertung von den Perzentilen der gepoolten Daten eingeschlossen. Aus diesem Grund befindet man sich bei der Anwendung der gepoolten Daten auf der „sicheren Seite“. Der große Unterschied zwischen den oberen Perzentilen des alten und des eigenen Experiments liegt darin begründet, daß bei dem eigenen Experiment ein sehr großer Anteil an langsamen Reaktionszeiten vorliegt. Generell kann gesagt werden, daß bei den neuen Experimenten eine erheblich größere Streuung der Meßwerte vorliegt. Die Abweichung der Mediane beträgt lediglich 4%.

Die Häufigkeitsverteilung des neuen Experiments zeigt im Bereich zwischen 350ms und 550ms eine deutliche Stufe, siehe Diagramm 5-3, um dann auf die modale Klasse bei 650ms anzusteigen. Nach der Theorie von Burckhardt wäre dies durch eine Blickzuwendung der Probanden zu erklären. Bei den neuen Messungen ist die Anhäufung von Meßwerten allerdings auf die überdurchschnittlich schnellen Reaktionen der Versuchspersonen 1 und 3 zurückzuführen. Wird eine Häufigkeitsverteilung ohne diese beiden Personen erstellt, so ergibt sich eine Häufigkeitsverteilung ohne eine solche ausgeprägte Stufe. Das folgende Diagramm zeigt die Häufigkeitsverteilung ohne die schnellen Reaktionen der Personen 1 und 3.

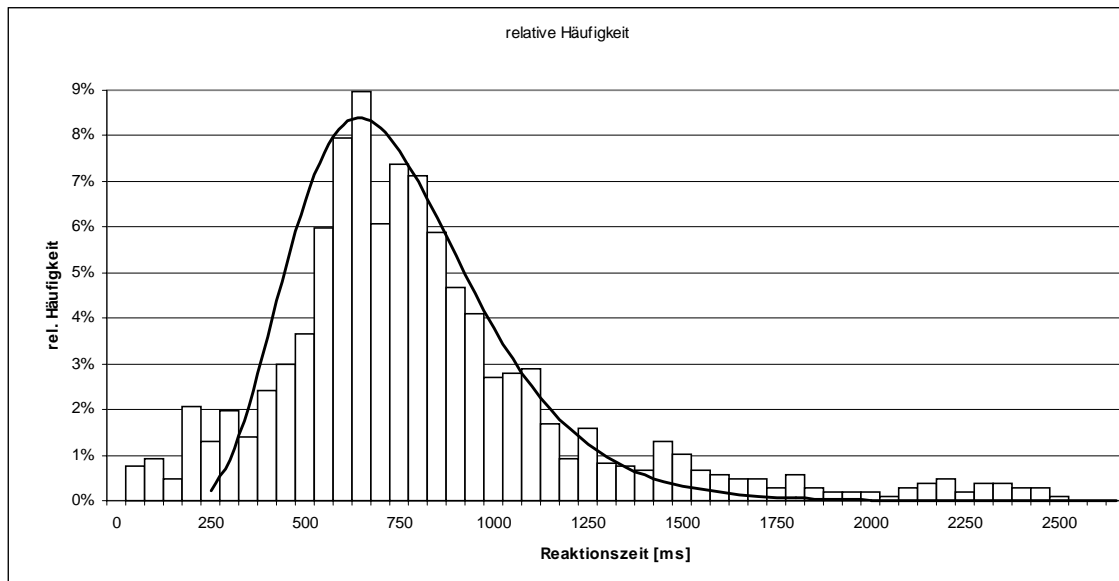


Diagramm 6-1: Histogramm ohne Person 1 und 3

Dies legt die Vermutung nahe, daß für eine solche simple Aufgabe wie in den Experimenten keine Blickzuwendung notwendig ist. Unterstützt wird diese Vermutung durch eine Diplomarbeit /18/, in welcher mit Hilfe einer Blickregistrierkamera die Auswertung von Reaktionszeiten von Fahrzeuglenkern erfolgte. Dort wurde festgestellt, daß die Beschreibung des Reaktionsverhalten von Autofahrern durch Aufteilung in Anteile mit und ohne Blickzuwendung nicht der Realität entspreche.

Bei der Anpassung der Verteilungsfunktionen stellte sich heraus, daß die zeitverschobene Gammaverteilung nach Parameteransatz II, als die beste angepaßte Verteilungsfunktion angegeben werden kann.

Verlustfunktion	Ansatz I	Ansatz II
Weibull-Verteilung	0,344	0,245
zeitverschobene Weibull-Verteilung	0,278	0,256
zeitverschobene Gammaverteilung	0,279	0,235

Tabelle 6-3: Gegenüberstellung der Verlustfunktionen

Ein großer Vorteil der zeitverschobenen Gammaverteilung besteht vor allem darin, daß sie die längeren Reaktionszeiten, also den Schwanz der Häufigkeitsverteilung, besser als die anderen Verteilungen darstellen kann.

Mit Hilfe des statistischen Prüfverfahrens, dem t-Test, konnte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit unter 5% gezeigt werden, daß das Alter der Probanden keinen statistisch signifikanten Einfluß auf die Reaktionszeiten hat.

Die ermittelten Reaktionszeiten sollen letztlich noch einmal den Werten gegenübergestellt werden, die vom 20. Deutschen Verkehrsgerichtstag empfohlen wurden.

	$t_{2\%}$	$t_{98\%}$
Empfehlungen des 20. Deutschen Verkehrsgerichtstages	0,370 s	0,79 s
Auswertung der eigenen Daten	0,179 s	2,225 s

Tabelle 6-4: 2%- und 98%- Perzentil

Zu erkennen ist, daß der Wert am oberen Perzentil der neuen Auswertung etwa 2,5 mal größer ist als der vom 20. Deutschen Verkehrsgerichtstag empfohlene. Ein Grund für diesen Unterschied ist darin zu sehen, daß die langsamen Reaktionen bei Burckhardts Auswertungen gezielt eliminiert wurden. Nimmt man hier den Wert der laut Burckhardt mit Blickzuwendung gilt, so erhält man für das obere Perzentil den Wert $t_{98\%}=1,33$ s. Zum Vergleich dazu sind hier einmal die Werte des 5 %- und des 95 %- Perzentils des eigenen Experiments aufgeführt $t_{5\%}=0,259$ s und $t_{95\%}=1,688$ s. Vergleicht man die Werte des eigenen Experimentes mit den Werten die Cohen in seinen Versuchen ermittelte ($t_{95\%} = 2,041$ s und $t_{50\%} = 0,942$ s), so ist festzustellen, daß die Werte nicht unrealistisch hoch sind.

7 Zusammenfassung

Bei der Auswertung der Meßdaten des Altexperiments konnte gezeigt werden, daß das Ermitteln der Perzentile an der parametrisch angepaßten doppelten Weibull-Verteilung, im Gegensatz zur Berechnung direkt an den Meßwerten, zu kürzeren Reaktionszeiten führt. Dies liegt vor allem in der Annahme, daß sich die Verteilung der Reaktionszeiten im Nachfahrversuch aus einem Anteil mit und einem Anteil ohne Blickzuwendung zusammensetzen würden. Diese Annahme konnte jedoch bisher nicht durch Versuche belegt werden. Bei der Annahme, daß die Reaktionszeiten im Nachfahrversuch ohne Blickzuwendung seien, ergeben sich für die Perzentile der Reaktionszeiten zum Teil erheblich längere Zeiten. Die Empfehlungen des 20. Deutschen Verkehrsgerichtstags geben für die Reaktionszeit plus Umsetzzeit eine Dauer von $t_{2\%} = 0,36$ s und $t_{98\%} = 0,78$ s an. Berechnet man diese Werte direkt an den Meßdaten so ergeben sich die Werte $t_{2\%} = 0,38$ s und $t_{98\%} = 1,28$ s. Weiterhin konnte gezeigt werden, daß die Parameter der doppelten Weibull-Verteilung noch erheblich verbessert werden konnten.

Wird vorausgesetzt, daß für die Versuchsaufgabe keine Blickzuwendung notwendig ist, so erübrigt sich auch der Ansatz der Addition zweier Verteilungen. Die Häufigkeitsverteilung kann dann durch die zeitverschobene Gammaverteilung mit drei Parametern am besten beschrieben werden, wobei die Parameter der Verteilung über die Verlustminimierung berechnet werden.

Mit Hilfe zweier Personengruppen mit verschiedenen Altersklassen konnte gezeigt werden, daß das Alter der Probanden mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit unter 5% keinen Einfluß auf die Reaktionszeit hat. Diese Feststellung sollte durch eine größere Anzahl Testpersonen überprüft werden, da die arithmetischen Mittelwerte beider Gruppen immerhin 100 ms voneinander abweichen.

Bei den Meßwerten des eigenen Experimentes wurde eine erhebliche Streuung und ein großer Anteil von langsamen Reaktionszeiten festgestellt. Es ergaben sich die Werte $t_{2\%} = 0,179$ s und $t_{98\%} = 2,225$ s. Der Wert zum oberen Perzentil liegt etwa 1 s oberhalb des im Altexperiment ermittelten Wertes (sofern man das 98%-Perzentil des Altexperiments direkt aus den Meßwerten bestimmt), allerdings liegt das 95%-Perzentil 353 ms unter dem 95%-Perzentil von Cohen. Diese Diskrepanz bedarf noch der Klärung. Aus diesem Grund sollten auf Grundlage dieser Arbeit noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um für die statistische Auswertung eine noch größere Datenmenge zur Verfügung stellen zu können und somit eine sichere statistische Aussage, bezüglich der Reaktionszeit, treffen zu können.

Für eine umfangreiche statistische Auswertung der Umsetzzeit standen leider nicht genügend Meßwerte zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden hier lediglich das arithmetische Mittel von 277 ms und Median von 209 ms ermittelt. Bei manchen Versuchspersonen wurden trotz mehrmaliger neuer Anordnung der Sensoren auf dem Gaspedal die Zeiten bis zur Gaswegnahme nicht gestoppt. Dies und die scheinbar hohen Reaktionszeiten, die zwar nur relativ selten auftreten, führen zu der Annahme, daß die Wahl der Sensoren zur Ermittlung der Fußkontakte nicht sehr gelungen war.

Trotzdem konnte mit der vorliegenden Arbeit gezeigt werden, daß die bisherigen Reaktionszeiten zu kurz bemessen sind. Im Interesse aller an Unfällen beteiligten Personen, sollten daher die Perzentile der Reaktionszeiten überdacht und überarbeitet werden.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ Graf Hoyos, C.: Reaktionsverhalten des Kraftfahrers: Bedingungen und Abhängigkeiten. In: *Der Verkehrsunfall* (1980), S. 147 –150
- /2/ Sacher, F.: Reaktionszeit – Reaktionsdauer, Sprachverwirrung und Begriffsmißbrauch. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* (1994), S. 62-66
- /3/ Donders, F.C.: *Over de Snelheid van psychische Processen*. Onderzoekking gedaan in het Physiologisch Laboratorium der Utrechtsche Hoogeschool, 1089 – 1869. Tweede Reeks, II, 92 – 120. Englische Übersetzung von Koster, W.C.: *On The Speed Of Mental Processes*. Acta Psychologica; 30 (1969), Seite 412-431.
- /4/ Zöllner, H.; Hugemann, W.: Notbremsreaktionen beim Dämmerungssehen: eine experimentelle Studie unter simulierten Bedingungen. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* (1995) S. 209-214
- /5/ Rönitzsch, H.: Die Kontrastabhängigkeit der Reaktionszeit von Fahrzeugführern. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* (1993) S. 264-268
- /6/ Hugemann, W.; Zöllner, H.: Notbremsreaktionen bei Dämmerungssehen und niedrigen Objektkontrasten. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* (1996) S. 243-214
- /7/ Eckert, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Berlin München : Verlag Technik, 1993
- /8/ Borhill, T.; Stork, K.: Sakkadische Augenbewegung. Seite 68 ff.
-

-
- /9/ Möhler, W.: *Untersuchungen zur visuellen Wahrnehmung des Straßenraums und dessen Einfluß auf das Fahrverhalten*. RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen, Mitteilung Nummer 25/1988
- /10/ Cohen, A. S.: The latency of simple reaction on highways: A field study. In: *Public Health Reviews* (1987) S. 291–310
- /11/ Summala, H.: Driver / Vehicle Steering Response Latencies. In: *Human Factors* (1981), Seite 683-692
- /12/ Bode, E.: *Grundwissen Statistik*. München; Basel: Ernst Reinhardt Verlag, 1977
- /13/ Burckhardt, M.; Burg, H.; Gnadler, R.; Näumann, R.; Schiemann, G.: Die Brems-Reaktionsdauer von PKW-Fahrern. In: *Der Verkehrsunfall* (1981) S. 224-236
- /14/ Burckhardt, M.: *Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen*. Köln : Verlag TÜV Rheinland GmbH (1985)
- /15/ Schiemann, G.: *Experimentelle Untersuchung zur Reaktions- bzw. Verzugsdauer von Fahrzeuglenkern*. Karlsruhe, Universität, Diplomarbeit
- /16/ Stopp, F.: *Lehr- und Übungsbuch Mathematik*. Band IV. Leipzig Köln: Fachbuchverlag, 1992
- /17/ Haag, H.: *Untersuchung zur Reaktions- bzw. Verzugsdauer von Fahrzeuglenkern bei trockenen und nassen Fahrbahnen*. Karlsruhe, Universität, Diplomarbeit
-

9 Formelzeichen

α	Blickwinkel in Grad, Irrtumswahrscheinlichkeit
χ (Chi)	Schiefe
ΔT	Klassenbreite
μ, \bar{x}	Arithmetischer Mittelwert
$\hat{\mu}$	Empirischer Mittelwert
$\hat{\sigma}^2$	Empirische Varianz
σ	Standardabweichung bzw. Streuung
σ^2	Varianz
$\lambda(t)$	Ausfallrate
\emptyset	Anteil der ersten Verteilung
a	Testgröße des t-Tests
B	Exponent in der Verteilungsfunktion
f(t)	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
F(t)	Verteilungsfunktion, Summenhäufigkeit
g	Verlustfunktion
h_i	Relative Häufigkeit
H_i	Relative Summenhäufigkeit
H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese

K	Kontrast
L_O	Objektleuchtdichte
L_U	Umgebungsleuchtdichte
L_V	Schleierleuchtdichte
m	Anzahl der Klassen
n	Anzahl aller Meßwerte, Stichprobenumfang
n_E	Häufigkeit mit der das Ereignis E auftritt
n_i	Absolute Häufigkeit
N	Grundgesamtheit aus der die Stichprobe stammt
$P_{(E)}$	Wahrscheinlichkeit für Ereignis E
S	Sakkadendauer
t_p	Wert des p-ten Perzentils
t_R	Reaktionszeit
t_U	Umsetzzeit
t_0	Zeitliche Verschiebung der Verteilungsfunktionen
T	Charakteristische Zeit der Verteilungsfunktionen
W	Anzahl der Wahlalternativen
\hat{x}	Modalwert
$x_{0,5}$	Median
x_i	Beobachtungswert
\tilde{x}_{i-1}	Untergrenze der i - ten Klasse

\tilde{x}_i Obergrenze der i - ten Klasse

X Zufallsvariable

A Anhang

A.1 Ergebnisse von Cohen

Die folgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau von Cohen. Gut zu erkennen ist die Anordnung der Dioden auf der Windschutzscheibe.



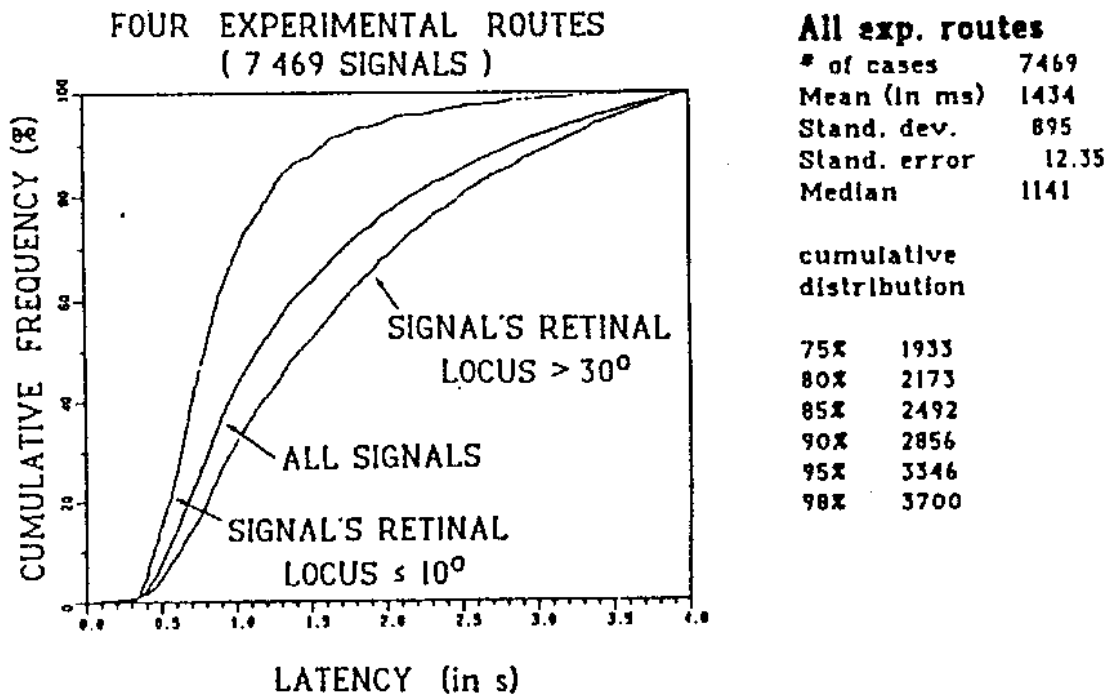


Figure 8. Cumulative frequencies (in percent) of all latencies (in s) and those with a retinal locus of 10° or less vs. 30° or more.

A.2 Versuch von Summala

Bestimmung der Geschwindigkeit auf den Strecken f , g und c .

Berechnung der seitlichen Position des rechten Vorderrads an den Punkten A, B und C mittels trigonometrischer Methoden.

$$d = v \cdot \cot \alpha \cdot t$$

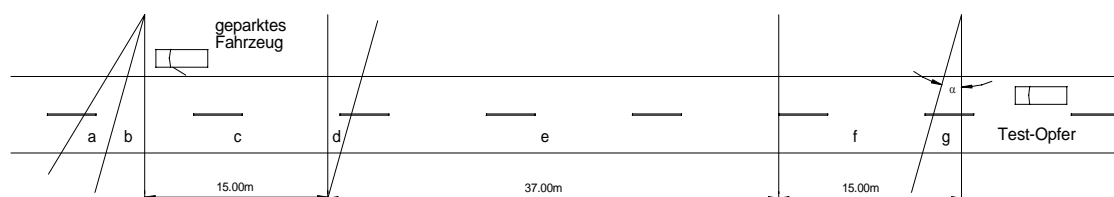
- v Geschwindigkeit des Fahrzeugs
- α Winkel zwischen den Strahlen der Photozellen
- t Zeitintervall (t_d oder t_g)

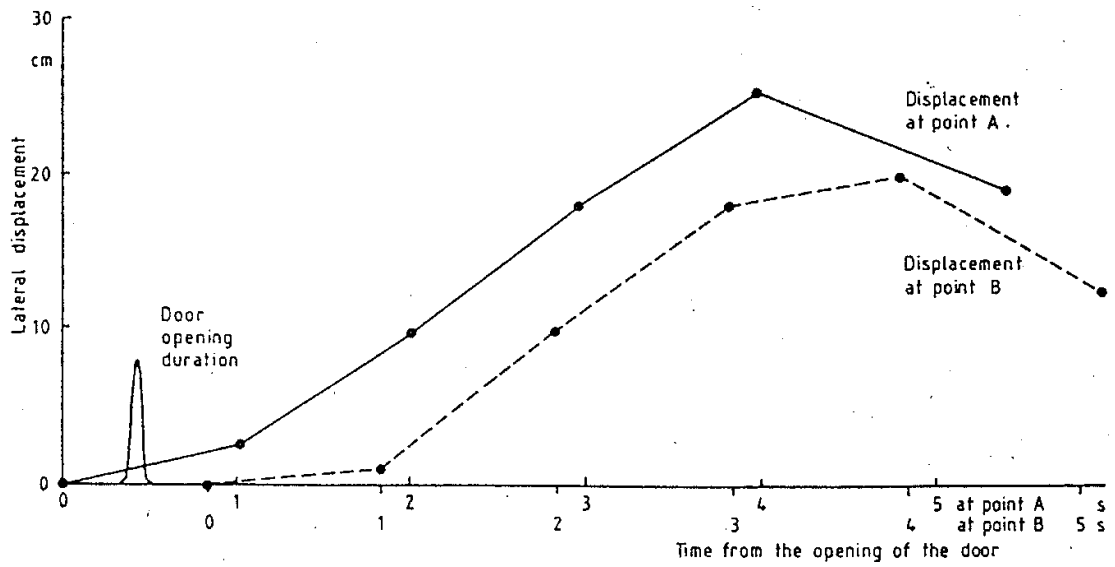
Abweichung γ von der Straßenführung an Punkt A:

$$\tan \gamma = \frac{|(t_a + t_b) \cdot \cot(2 \cdot \alpha) - t_b \cdot \cot \alpha|}{t_a}$$

Seitlicher Abstand des rechten Vorderrades:

$$d = v \cdot (t_b \cdot \cot \alpha \pm t_b \cdot \tan \gamma)$$





A.3 PASCAL-Programm

```

{-----}
{           Messen von Reaktionszeiten mit der PCL816           }
{-----}
{$A+,B-,D+,E+,F+,G+,I+,L-,N+,O+,R+,S+,V+,X+}
{$M 65000,0,0}

program reaktion;
uses dos, crt, Strings;
type  str10 = string[10];
const
{ 1: Adressen -----}
    boardaddr = $220; {Basisadresse des Boards}
{ A/D }
    adlow      = boardaddr + 0; { <= A/D low byte & Channel}
    softadtri  = boardaddr + 0; { => Software A/D-trigger}
    adhigh     = boardaddr + 1; { <= A/D high byte}
    adrange    = boardaddr + 1; { => A/D range control }
    ScanChan   = boardaddr + 2; { <= mux scan channel}
    muxscan    = boardaddr + 2; { => mux scan channel & range control
pointer}
{ D/A }
    dilow      = boardaddr + 3; { <= D/I low byte}
    dolow      = boardaddr + 3; { => D/O low byte}
    DA0Low     = boardaddr + 4; { => D/A 0 low byte}
    DA0High    = boardaddr + 5; { => D/A 0 high byte}
{ interrupt }
    status     = boardaddr + 8; { <= Status}
    clearirq   = boardaddr + 8; { => Clear interrupt request}
    pclctrl    = boardaddr + 9; { <=> control}
    CountEnable = boardaddr + 10; { => Counter enable}
{ Digital}
    dihigh     = boardaddr + 11; { <= D/I high byte}
    dohigh     = boardaddr + 11; { => D/O high byte}
{ Counter }
    count0     = boardaddr + 12;
    count1     = boardaddr + 13;
    count2     = boardaddr + 14;

```

```

    CountCtrl = boardaddr + 15; { => Counter control }
{ 1b: Das Board Control Register (BASE +9) }
    EnableInt = 1 SHL 7; {Enable interrupts}
    IRQ2 = 2 SHL 4; {Board benutzt Interrupt 2}
    IRQ3 = 3 SHL 4;
    IRQ4 = 4 SHL 4;
    IRQ5 = 5 SHL 4;
    IRQ6 = 6 SHL 4;
    IRQ7 = 7 SHL 4;
    EnabledDMA = 1 SHL 2; {Enable DMA data transfer}
    TriSourceExt = 2; {External Trigger}
    TriSourceInt = 3; {Internal Trigger}
{1c: Timer/counter enable register (BASE +10) }
    TRIG0 = 1;    { Pacer controlled by TRIG0;
                  this blocks trigger pulses sent from the pacer to
                  the A/D until TRIG0 is taken high }
    IntClk = 2;  {connects Counter 0 internally to a 100 kHz clock source }
{ 2: Counter ----- }
{ 2a: Schreiben }
    Select0 = $0;
    Select1 = $1 SHL 6;
    Select2 = $2 SHL 6;
    ReadBack = $3 SHL 6;
    CounterLatch = $0;
    rwLSB      = $1 SHL 4;
    rwMSB      = $2 SHL 4;
    rwBoth     = $3 SHL 4;
    Mode0 = $0;
    Mode1 = $1 SHL 1;
    Mode2 = $2 SHL 1;
    Mode3 = $3 SHL 1;
    Mode4 = $4 SHL 1;
    Mode5 = $5 SHL 1;
{ 2b: Lesen }
{3: Interrupt-controller -----}
    intcontrol1 = $20; {Interrupt control register}
    intcontrol2 = $21; {Interrupt control register}
    intlevel    : byte = 5;
    keybintlevel = 1;

const

```

```
    datensegment : word = $6000;
    datenoffset  : word = 0;
    CStart: Word = 50000;
    Frequenz: Word = 10000;

VAR      channel      : byte;
    minchannel   : byte;
    maxchannel   : byte;
    oldmask     : byte;
    mask        : byte;
    anzahl      : word;
    sampling    : word;
    frequency   : real;
    OldIntVector : pointer;
    adsample    : boolean;
    ende        : boolean;
    Messwert    : array[1..20000] of word ;

procedure portdelay;
Var
    i: Longint;
begin
    for i := 1 to 50 do;
end;

{ Initiallisierung -----}
procedure init;
const
    {Im Modus 3 (Square Wave Generator) wechselt OUT jeweils beim
    Nulldurchgang und der Counter beginnt wieder mit dem Startwert.
    Der Startwert teilt also die Frequenz des CLK-Signals
    entsprechend herunter. Der Startwert sollte gerade sein, damit
    die Frequenz so exakt wie moeglich heruntergeteilt wird.}

    Count0Start: Word = 50000;
    Count1Start = 20;
    Count2Start = 50;
var
    dummy : byte;

begin
    anzahl:=0;
```

```
dummy := port[adhigh];
fillchar(Messwert, sizeof(Messwert), 0);
port[clearirq] := 0;
portdelay;
{ Startwert fuer counter 0 setzen }
port[Countctrl] := Select0 + rwBoth + Mode3;
portdelay;
port[count0] := lo(Count1Start);
portdelay;
port[count0] := hi(Count1Start);
portdelay;
{ Startwert fuer die Zufallszahlen setzen }
randomize;
end;

{ Ein Byte als Bit-Wert ausgeben -----}
function bit(b : byte) : str10;

var i : integer;
    bitstr : str10;
begin
    for i:=0 to 7 do
        begin
            if ((byte(1 shl i) and b) = (byte(1 shl i))) then
                bitstr[8-i]:='1'
            else bitstr[8-i]:='0';
        end;
    bitstr[9]:=' ';
    bitstr[0]:=#9;
    bit:=bitstr;
end;

Procedure Beep(Frequenz:Integer);
Var
    i: LongInt;
Begin
    Sound(Frequenz);
    For i := 1 to 500000 Do;
        NoSound;
    End;
```

```
Procedure Beep2(Frequenz:Integer);
Var
    i: LongInt;
Begin
    Sound(Frequenz);
    For i := 1 to 50000 Do;
        NoSound;
    End;

{ Erzeugt exponentialverteilte Zufallszahlen, T ist die mittlere Zeit ----}
function Expo(T:real): real;
Var
    u,Zeit: real;
Begin
    u := random;
    Zeit:= -ln(1-u) * T;
    Expo:= Zeit;
End;

{ Wartet auf das GO!-Signal des Fahrers -----}
procedure Go;
Begin
    repeat until KeyPressed;
    while KeyPressed do ReadKey; {Erst das Auslesen leert den Puffer }
End;

{ Gibt das Signal zum Bremsen -----}
Procedure VersuchStart;
Const
    MittlereWarteZeit = 20.0;
    MaxWarteZeit = 0;
var
    Hour, Minute, Second, Sec100: Word;
    StartZeit, EndZeit, WarteZeit, SollZeit: Real;
    i: Longint;
Begin
    Writeln('Taste zum Versuchsbeginn');
    repeat
        until keypressed;
    GetTime(Hour, Minute, Second, Sec100);
    StartZeit := 3600 * Hour + 60 * Minute + Second + 0.01 * Sec100;
```

```
SollZeit := Expo(MittlereWarteZeit);

Repeat
    GetTime(Hour, Minute, Second, Sec100);
    EndZeit := 3600 * Hour + 60 * Minute + Second + 0.01 * Sec100;
    WarteZeit := EndZeit - StartZeit;
Until (WarteZeit > SollZeit) or (Wartezeit > MaxWarteZeit);

{Jetzt Bremssignal (Piepton) für den Versuchsleiter geben}
Beep(3000);
End;

{ Counter Starten -----}
procedure Startcount;
Const
    Count1Start = 50000;
Begin
    { Startwert fuer counter 0 setzen }
    port[Countctrl] := Select0 + rwBoth + Mode3;
    portdelay;
    port[count0] := lo(Count1Start);
    portdelay;
    port[count0] := hi(Count1Start);
    portdelay;
End;

{ Wartet auf das Aufleuchten der Bremslichter -----}
procedure WarteAufBremslicht;
var
    Bremsen: Byte;
begin
    Bremsen := 0;
    writeln('Warte auf Start');
    {Das Bremssignal liegt auf Kanal 5 (=$10)}
    repeat
        Bremsen := port[dilow] AND $10;
    until (Bremsen =0);
    {beep(1000);}
end;

{ Counter Auslesen -----}
```

```
function ReadCount: Word;
var
    Temp: Word;
Begin
    { Latch-Kommando abschicken }
    port[Countctrl] := Select0;
    { Einen Moment warten, bis der Wert gültig ist }
    portdelay;
    { Jetzt Zählerstand auslesen, erst LSB, dann MSB }
    temp := port[count0];
    ReadCount := Temp + port[count0] SHL 8;
End;

{ Auf die Reaktion warten -----}
procedure ReaktionsAntwort(var FussVomGasZeit, Bremszeit: Double);
label 100;
const
    Frequenz = 200000;
var
    Bremsen: Byte;
    I : Longint;
    Firstread: Word;
    Zaehlerstand: Word;

begin
    Bremsen := 0;
    i := 0;
    FussVomGasZeit := 0;
    FirstRead := 60000;

    { Der Zaehler startet immer von 50000. Die Zaehlfrequenz ist 100 kHz, so
      dass der Zaehler alle halbe Sekunde einen Umlauf hat, d.h. wieder
      bei 500000 anfaengt. Die Zahl der Umlaeufe wird ueber "i"
      erfasst.

      Gas ist an den Kanal 3 (=$4), Bremsen an den Kanal 1 (=$01)
      angeschlossen. Erst schauen, ob der Fuss auf dem Sensor am
      Gaspedal liegt. Wenn ja, dann zunaechst auf das Abheben vom
      Gaspedal warten. Wenn nicht, dann dierekt auf das Bremsen Warten
    }

```

```
if (port[dilow] And $04) <> 0 then Goto 100;
writeln('Warte auf Gas weg');
repeat
    Zaehlerstand := ReadCount;
    If FirstRead < Zaehlerstand then Inc(i);
    Firstread := Zaehlerstand;
until (port[dilow] And $04) <> 0;

FussVomGasZeit := ((I+1) * 50000 - Zaehlerstand) / Frequenz;
100:
writeln('Warte auf Bremsen');
repeat
    Zaehlerstand := ReadCount;
    If FirstRead < Zaehlerstand then Inc(i);
    Firstread := Zaehlerstand;
until (port[dilow] And $01) = 0;
Bremszeit := ((I+1) * 50000 - Readcount) / Frequenz;
Beep(1000);
end;

{ MAIN PROGRAM -----}
var
    GaswegCount, BremsCount: Word;
    GaswegZeit, Bremszeit: Double;
    Versuchszeit, AktuelleZeit, Startzeit: Double;
    Hour, Minute, Second, Sec100: Word;
    Day, Month, Year, DayOfWeek: Word;
    i, j, AnzahlMessungen, ohneumsetzen: integer;
    iLong: Longint;
    F: Text;
    VPName: String[50];
    TestVersuch : String;
    filename: String;
    filenameStamm :String;
    vorhanden : pathstr;
    zahlstr : string[4];
    label 100;

begin
{----- Abfragen nach Test oder Versuchsbeginn START-----}
    Write ('(t)est oder (v)ersuch ?');
```

```
Readln(TestVersuch);
If TestVersuch = 't' then
    Repeat
        Writeln(port[dilow]);
        if port[dilow] <> 255 then Beep2(250);
    Until keypressed;
{----- Abfragen für Test oder Versuchsbeginn ENDE -----}
Writeln;
Writeln;
Writeln ('-----');
{Zunaechst einen noch unbenutzten Dateinamen finden }
filenameStamm := 'RT';
filename := FilenameStamm + '001.txt';
vorhanden:=filename;
i:=0;
repeat
    begin
        vorhanden:=fsearch(filename,'');
        if vorhanden<>' ' then
            begin
                inc(i);
                STR(i,Zahlstr);
                j:=length(Zahlstr);
                case j of
                    1 : Zahlstr:='00'+Zahlstr;
                    2 : Zahlstr:='0'+Zahlstr;
                end;
                filename := filenameStamm + Zahlstr + '.TXT';
            end;
    end;
until vorhanden='';
init;
assign(f,filename);
Rewrite(f);
Write ('Name der Versuchsperson: ');
Readln (VPName);
GetDate(Year,Month,Day,DayOfWeek);
GetTime(Hour, Minute, Second, Sec100);
StartZeit := 3600 * Hour + 60 * Minute + Second;
{ Datei-Header schreiben START}
Writeln (f, 'Versuchsperson: ', VPName);
```

```
Writeln (f, 'Datum:           ', Day , '.' , Month:2 , '.' , Year);
Writeln (f, 'Startzeit:       ', Hour , ':' , Minute:2);
Writeln (f);
Writeln (f, 'V.-Zeit | Gas weg | Bremsen');
writeln (f, '-----');
{ Datei-Header schreiben ENDE}
AnzahlMessungen:=0;
repeat
    if KeyPressed then If (Readkey ='e') then goto 100;
    VersuchStart;
    WarteAufBremslicht;
    StartCount;
    ReaktionsAntwort(GasWegZeit, Bremszeit);
    GetTime(Hour, Minute, Second, Sec100);
    AktuelleZeit := 3600 * Hour + 60 * Minute + Second;
    Versuchszeit := AktuelleZeit - StartZeit;
    append(f);
    writeln          (Versuchszeit:5:0,' ', Gaswegzeit:5:3, ' ',
Bremszeit:5:3);
    writeln(f, ' ',Versuchszeit:5:0,' ', Gaswegzeit:5:3, '
', Bremszeit:5:3);
    close(f);
    If GasWegZeit =0 then
        Begin
            Beep (500);
            ohneumsetzen:=ohneumsetzen+1;
        end;
    AnzahlMessungen:=AnzahlMessungen +1;
    Writeln('Anzahl der Messungen: ',Anzahlmessungen);
    Writeln('Anzahl ohne Umsetzzeit: ',ohneumsetzen);
until false;
100:
end.
```

A.4 Totzeit

Die folgende Abbildung zeigt die Totzeit zwischen Antippen des Drucksensors und dem Öffnen des digitalen Schalters.
