



Diplomarbeit

Untersuchung der Abhängigkeit der Reaktionszeit
vom Überlappungsgrad der Flächenanteile zweier
Lichtsignale unterschiedlicher Farbe

von

Karsten Klinger

Immatrikulationsnummer: 0937933

Karlsruhe

5. Juli 2002

Hochschullehrer

Prof. Dr. Ing. habil. Siegfried Kokoschka

Betreuer

Dr. Karl Manz

Dr. Dieter Kooß



**Diplomarbeit
für
Herrn cand. el. Karsten Klinger**

**Untersuchung der Abhängigkeit der Reaktionszeit vom Überlappungsgrad der
Flächenanteile zweier Lichtsignale unterschiedlicher Farbe.**

Das rückwärtige Signalbild eines Kraftfahrzeuges besteht aus Lichtsignalen mit teilweise unterschiedlicher Farbkodierung.

Die Signale, die sich in der Farbe unterscheiden, wurden bisher weitgehend durch voneinander getrennte Leuchtenteile realisiert. Somit standen diese Leuchten völlig im Einklang mit den derzeit gültigen Definitionen und Festlegungen einer „einzelnen Leuchte“.

Das moderne Auto-Design fragt jedoch immer öfter nach komplexeren Gestaltungsmöglichkeiten, die mit den zuvor genannten Festlegungen und Gestaltungsmöglichkeiten mehr und mehr in Konflikt geraten.

Mit der Diskussion für die Überarbeitung des Begriffes einer „einzelnen Leuchte“ wurde die Frage aufgeworfen, inwieweit der Grad der Überschneidung von leuchtenden Flächen verschiedener Signalfarben einen Einfluss auf die Reaktionszeit hat. Ziel der Arbeit ist es zu ermitteln, ob eine Mischung verschiedenfarbiger Flächen bzw. die teilweise Überlappung solcher Flächen von zwei Signallichtern am Beispiel der roten Bremsleuchte und des gelben Fahrtrichtungsanzeigers im Vergleich zu einer konventionellen Anordnung mit klar getrennten leuchtenden Flächen zu einer signifikanten Verlängerung der Reaktionszeit führt.

Hierbei sollen die Reihenfolge der Darbietung und verschiedene Intensitätsverhältnisse mit in Betracht gezogen werden. Zur Durchführung der Untersuchung ist ein Versuchsaufbau zu erstellen. Die erhaltenen Ergebnisse sind übersichtlich zu dokumentieren und einer kritischen Betrachtung zu unterziehen.

Aufgabenstellung: 02.01.2002
Abgabetermin: ca. 05.07.2002

Hochschullehrer:

Betreuung:

(Prof. Dr. Ing. habil. Siegfried Kokoschka)

(Dr. Karl Manz)

Hiermit versichere ich, die vorliegende Diplomarbeit selbstständig bearbeitet zu haben. Alles, was von anderen übernommen worden ist, ist entsprechend gekennzeichnet und vollständig im Anhang aufgeführt.

Karlsruhe, den 5. Juli 2002

Karsten Klinger

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	1
2	Stand der Technik und der Gesetze	3
2.1	Aufgaben der Fahrzeugleuchten	3
2.2	Aufbau der Fahrzeugleuchten	3
2.3	Zusammenhang zwischen Lichtstärke und Leuchtdichte	4
2.4	Untersuchungen im Nahbereich	5
2.5	Kodierung von Signalfunktionen	6
2.6	Historische Untersuchungen	8
2.6.1	Untersuchte Signalbilder	8
2.6.2	Diskussion der Ergebnisse von Mortimer	9
2.6.3	Folgerung bezüglich Überlappung	10
2.7	Gesetzeslage	10
2.7.1	Lichtstärke ist festgelegt	10
2.7.2	Keine Regelung für Überlappung	10
3	Versuchsaufbau und Voruntersuchungen	12
3.1	Untersuchungen bei photopischem Sehen	12
3.2	Psychophysikalische Untersuchungen	12
3.3	Ausgangssituation im Straßenverkehr	13
3.4	Untersuchungen im Labor	14
3.5	Verwendete Leuchteneinheiten	14
3.5.1	Versuchsleuchte — LED-Matrix Leuchte	14
3.5.2	Vergleichsleuchte — konventionelle Leuchte	14
3.5.3	Bezeichnungen der Leuchten und Signalmuster	15
3.6	Versuchsumgebung im Labor	15
3.7	Lichtstärkeverteilung bei Fahrzeugleuchten	15
3.7.1	Lichtstärke	15

3.7.2	Verteilung	16
3.7.3	Temperaturabhängigkeit	16
3.8	Messung der Lichtstärkeverteilung der verwendeten Leuchten	17
3.9	Farbwerte für Kraftfahrzeugleuchten	19
3.9.1	Farbortgrenzen	19
3.9.2	Temperaturabhängigkeit bei Leuchtdioden	20
3.10	Messung der Farbwerte der verwendeten Leuchten	20
3.11	Leuchtdichten bei Fahrzeugleuchten	20
3.12	Ansprechzeiten der Leuchten	21
3.12.1	Vergleichsversuch	21
3.12.2	Ermittelter Korrekturwert	23
3.13	Fahrzeugumriß als Fahrzeugersatz	23
3.13.1	Typische Abmessungen von Kraftfahrzeugen	23
3.13.2	Leuchtdichten der Umrißteile	25
3.14	Fahrstand	26
3.14.1	Bedienelemente für die Versuchsperson	26
3.14.2	Adaption der Versuchsperson durch die Umfeldleuchtdichte	27
3.15	Steuergerät und Meßcomputer	27
3.15.1	Kabelverbindungen	27
3.15.2	Innerer Aufbau des Steuergerätes	28
3.15.3	Software des Meßcomputers	29
3.15.4	Messung der Reaktionszeit	29
3.16	Protokoll der Versuchsdurchführung	29
3.16.1	Referenzwerte jeder Durchführung	29
3.16.2	Bereinigte Werte in den Diagrammen	30
3.16.3	Falsche Reaktionen der Versuchspersonen	30
3.16.4	Aussagen der Meßwerte	31
3.17	Überlappung zweier Lichtsignale	35
3.17.1	Beispiel der zeitlichen Abfolge	35
3.17.2	Planung der Experimente	35
3.17.3	Entwurf der Signalbilder	36
3.17.4	Zeitliche Abfolge der Darbietungen	38
3.17.5	Kombinationen der Signalbilder	38
3.17.6	Erwartungen über Veränderung der Reaktionszeit	39
3.18	Statistische Berechnungen	40
3.18.1	Mittelwerte und deren Differenz	40
3.18.2	Signifikanz der Differenz	40
3.18.3	Fehlerrate	41

4	Durchführung der Hauptexperimente	42
4.1	Vorbereitung	42
4.2	Personendaten	42
4.3	Sehtest	43
4.4	Signalbilder	43
4.5	Fahrstand	43
4.6	Reaktionen	43
4.7	Versuchsablauf	44
5	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse	46
5.1	Einfluß der Fehlerquellen	46
5.1.1	Meßgestelle für Leuchtenmessungen	46
5.1.2	Mechanische Stabilität der verwendeten Leuchten	46
5.1.3	Temperaturschwankungen im Meßlabor	47
5.1.4	Spannungsversorgung der LED–Matrix Leuchte	47
5.1.5	Stabilisierungsphase des Lichtstroms	47
5.1.6	Programmierung der LED–Matrix Leuchte	47
5.1.7	Gemessene und berechnete Leuchtdichten	48
5.2	Resultierende Abweichungen	48
5.3	Dargebotene Signalbilder	49
5.3.1	Verwechslungen der Signalfunktionen	49
5.3.2	Sichtbarkeit des Fahrtrichtungsanzeigers in Fall 4	49
5.3.3	Additive Leuchtdichten	50
5.4	Meßdatenaufbereitung	50
5.4.1	Mittelwerte der verschiedenen Meßwertgruppen	50
5.4.2	Irrtumswahrscheinlichkeiten der Hypothesen	51
5.4.3	Signifikante Unterschiede der Mittelwerte	51
5.5	Ergebnisse der Referenzaufgaben	52
5.6	Ergebnisse von Experiment 1	52
5.7	Ergebnisse von Experiment 2	58
5.8	Ergebnisübersicht	64
5.9	Diskussion der Ergebnisse	64
5.9.1	Amerikanische und europäische Signalbilder im Vergleich	64
5.9.2	Bezug der Ergebnisse zu existierenden Leuchten	65
5.9.3	Einfluß des Leuchtdichteverhältnisses auf die Reaktionszeit	65
5.9.4	Einfluß des Überlappungsverhältnisses auf die Reaktionszeit	66
5.10	Schlußfolgerung	66

6	Ausblick	67
6.1	Weitere Untersuchungen	67
6.2	Freier Zugriff auf die Meßdaten	67
6.3	Der Einfluß der Überlappung bei Blendung	67
6.4	Techniken für weitere Experimente	68
6.5	Untersuchungen in angrenzenden Themengebieten	68
6.6	Additive Leuchtdichten	68
6.7	Neue Technologien für innovative Leuchten	68
6.8	Das zukünftige Signalbild	69
A	Anhang	70
A.1	Lichttechnische Größen	70
A.1.1	Lichtstrom	70
A.1.2	Lichtstärke	71
A.1.3	Beleuchtungsstärke	71
A.1.4	Lichtstärkeverteilung	72
A.1.5	Leuchtdichte	72
A.1.6	Sehwinkel	72
A.2	Verwendete Geräte	73
A.3	Verwendete Software	77
A.4	Literaturangaben	78
A.5	Bildernachweis	80
A.6	Tabellenverzeichnis	81
A.7	Abbildungsverzeichnis	81
A.8	Versuchspersonen	83
A.9	Meßwerte	83
A.9.1	Historische Meßwerte	83
A.9.2	Vorversuch	86
A.9.3	Vergleichsversuch	86
A.9.4	Langzeitversuch	91
A.9.5	Farbwerte	92
A.9.6	Leuchtdichten	94
A.9.7	Einzelne Leuchtdioden der LED–Matrix Leuchte	95
A.9.8	Lichtstärken	96
A.9.9	Leuchtende Flächen	97
A.9.10	Berechnete Leuchtdichten	99
A.9.11	Experimente	99

Kapitel 1

Aufgabenstellung

Mit den neuen Technologien zur Lichterzeugung können Fahrzeugleuchten gestaltet werden, die sich von herkömmlichen Leuchten grundlegend unterscheiden. Die Lichtfarbe muß nicht mehr durch eine farbige Abschlußscheibe erzeugt werden, sondern kann direkt durch die Leuchtmittel erzeugt werden. Die Lichtfarbe wird dadurch von der Abschlußscheibe entkoppelt. Aus einer Abschlußscheibe können verschiedenfarbige Signallichter austreten, wenn im Leuchtgehäuse unterschiedliche Leuchtmittel montiert sind.

Diese Arbeit untersucht den Einfluß der Überlappung von zwei Lichtsignalen mit unterschiedlicher Farbe auf die Reaktionszeit.

In Kapitel 2 wird der Stand der Technik vorgestellt. Es wird erklärt, weshalb zur Planung der Versuche die Leuchtdichte benutzt wird. Die Ergebnisse historischer Experimente werden hinsichtlich ihrer Aussagen zur Überlappung untersucht. Dies zeigt auf, daß durch Überlappung die Reaktionszeit verlängert werden kann.

Die gesetzlichen Vorgaben für Rückleuchten werden aufgezeigt. Die Problematik, die durch Überlappung entsteht und in dieser Arbeit untersucht wird, ist nicht im Gesetz berücksichtigt.

Kapitel 3 beschreibt den Versuchsaufbau, der im Labor erstellt worden ist. Der Aufbau besteht aus einem Fahrzeugumriß, an dem zwei Rückleuchten angebracht sind, einem Fahrstand, in dem die Versuchsperson auf dem Fahrersitz Platz nimmt und dem Meßcomputer zur Steuerung des Versuches und der Protokollierung der Meßwerte.

Die durchgeführten Voruntersuchungen werden beschrieben. Sie ermitteln die Besonderheiten der verwendeten Leuchte und dienen zur Verfeinerung der Meßsoftware. Der Versuchsperson werden verschiedene Lichtsignale dargeboten. Sie muß auf die Darbietung reagieren, indem sie unabhängig von dem dargebotenen Signal immer den gleichen Schalter betätigt. Mit dieser Versuchsanordnung wird die Reaktionszeit der Versuchsperson und die unterschiedlichen Ansprechzeiten der Leuchten gemessen.

Darauf werden die Hauptuntersuchungen erläutert. Sie sind in zwei Experimente aufgeteilt. Diese Unterteilung wird in Abschnitt 3.17.2 erläutert. Die Darstellung der Meßwerte wird anhand einiger Beispiele erklärt.

Für die Hauptuntersuchungen ist die Meßsoftware verfeinert worden. Die Versuchsperson muß auf die Darbietung verschiedener Lichtsignale durch Betätigen unterschiedlicher Schalter reagieren. Daher wird mit dieser Versuchsanordnung nicht mehr die reine Reaktionszeit, sondern die Reaktionszeit einschließlich der Entscheidungszeit gemessen. In Abschnitt 4.6, der ein Teil von

1. Aufgabenstellung

Kapitel 4 *Durchführung der Hauptexperimente* ist, wird beschrieben, welche Reaktion auf welche Signaldarbietung zu erfolgen hat.

Kapitel 4 zeigt Schritt für Schritt den Ablauf der Hauptversuche. Dieses Kapitel ist eine Anleitung, mit der die Experimente dieser Untersuchung nach kurzer Einarbeitung geleitet werden können.

In Kapitel 5 werden die durchgeführten Messungen und Versuche kritisch betrachtet. Die verschiedenen Fehlerquellen und ihre Auswirkungen auf die Ergebnisse werden aufgezeigt.

Die Meßergebnisse aller 32 durchgeführten Hauptversuche werden zusammengefügt. Für jeden der zehn untersuchten Fälle der Überlappung wird das Ergebnis der Experimente vorgestellt.

Anschließend werden die Ergebnisse diskutiert. Die Überlappung verschiedenfarbiger Lichtsignale wird mit herkömmlichen Leuchten im europäischen und amerikanischen Verkehrsraum verglichen. Der Einfluß des Leuchtdichteverhältnisses und der flächenmäßigen Überlappung auf die Reaktionszeit wird diskutiert.

Aus den erhaltenen Ergebnissen wird die Schlußfolgerung gezogen, daß bei gutem Design von Fahrzeugrückleuchten keine, oder nur eine minimale Verlängerung der Reaktionszeit erfolgt. Bei schlechtem Design wird die Verlängerung der Reaktionszeit unakzeptabel groß. Signale können übersehen werden.

Kapitel 6 gibt einen Ausblick auf das zukünftige Signalbild der Kraftfahrzeugrückleuchten und regt zu weiteren Untersuchungen zu dem behandelten Thema an.

Der erste Abschnitt im Anhang gibt einen Überblick über wichtige lichttechnische Größen. Darauf folgen die technischen Daten der verwendeten Geräte und die Meßwerte, die für die Planung, den Aufbau und die Durchführung der Experimente benötigt worden sind.

Die Meßprotokolle und Diagramme, die während des Versuchsablaufes erstellt worden sind, sind aufgrund ihres Umfanges in zwei gesonderten Bänden enthalten.

Kapitel 2

Stand der Technik und der Gesetze

2.1 Aufgaben der Fahrzeugleuchten

An jedem Fahrzeug im Straßenverkehr befinden sich am Heck Signaleinrichtungen, die zur Information anderer Verkehrsteilnehmer dienen. Vor allem sollen Fahrer der nachfolgenden Fahrzeuge über Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen des vorausfahrenden Fahrzeuges informiert werden. Laut einer Studie des Battelle-Institutes [BgHJD71] ist dies besonders bei dichtem Straßenverkehr mit Kolonnenbildung wichtig.

Der folgende Fahrzeugführer erkennt die Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen der anderen Fahrzeuge über die Änderung des Seh winkels, unter dem er Teile der Fahrzeuge oder die Fahrzeuge selbst sieht. So wird zum Beispiel der Sehwinkel, unter dem die beiden Außenspiegel des Fahrzeuges gesehen werden, kleiner, wenn sich das Fahrzeug entfernt. Solche Informationen werden als *primäre Merkmale* bezeichnet. Diese Informationsgewinnung muß nicht erst für das Teilnehmen am Straßenverkehr erlernt werden; sie entspricht unseren natürlichen Gewohnheiten.

Da das Fortbewegen im Straßenverkehr jedoch wesentlich schneller stattfindet, als uns naturgegebener Weise möglich ist, muß diese erhöhte Informationsaufnahme durch Hilfsmittel unterstützt werden. Dazu stehen im Straßenverkehr *sekundäre Merkmale* zur Verfügung. Die Bedeutung dieser *zusätzlichen Merkmale* muß für die Teilnahme am Straßenverkehr erlernt werden. Zu diesen Hilfsmitteln zählt das *rückwärtige Signalbild* von Fahrzeugen. Ein Teil des Bildes sind die am Heck angebrachten Leuchten. Sie übermitteln Informationen durch Abstrahlen von Licht.

2.2 Aufbau der Fahrzeugleuchten

Rückleuchten an Kraftfahrzeugen strahlen Licht in die rückwärtige Fahrzeugumgebung ab. Dieses Licht wird durch Leuchtmittel erzeugt. Häufig wird eine Glühlampe zur Lichterzeugung benutzt. Die farbige Kodierung des Signallichtes wird durch einen farbigen Glaskolben oder eine farbige Abschlussscheibe der Leuchte erreicht. In Bild 2.1 sind zwei unterschiedliche Signalleuchten zu sehen, bei denen die Farbkodierung durch die gefärbte Abschlussscheibe realisiert ist.

Heute stehen weitere Leuchtmittel zur Lichterzeugung im Kraftfahrzeug zur Verfügung. Die Glühlampe kann durch Leuchtdioden ersetzt werden. Dies ist links in Bild 2.2 zu sehen. Da Leuchtdioden farbiges Licht abstrahlen, ist keine farbige Abschlussscheibe notwendig. Sie kann durch eine farblose Scheibe ersetzt werden, wie rechts in Bild 2.2 zu sehen.



Bild 2.1: Typische Rückleuchten



Bild 2.2: Rückleuchten mit Leuchtdioden

Meist werden mehrere Leuchtdioden in einem Leuchtgehäuse betrieben, um die erforderliche Lichtstärke zu erzeugen. Wenn Leuchtdioden mit verschiedenen Lichtfarben benutzt werden, kann durch die Ansteuerung der Leuchte die Farbe des aus der Leuchte austretenden Lichtes bestimmt werden. Mit dieser Technik treten Lichtsignale unterschiedlicher Farbe aus der gleichen Fläche der Leuchteneinheit aus. In Bild 2.3 ist eine Leuchte zu sehen, die mit Leuchtdioden für rotes und gelbes Licht bestückt ist.

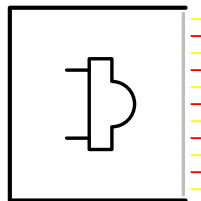


Bild 2.3: Rückleuchte mit vollständiger Überlappung

Anhand der Farbe werden Signalfunktionen untereinander unterschieden. Ein Signallicht mit gelber Farbe stellt einen Fahrtrichtungsanzeiger dar, ein Signallicht mit gleicher Lichtstärke und roter Farbe eine Bremsleuchte. Wenn beide Signallichter gleichzeitig in Betrieb sind, so ergibt sich eine Mischfarbe, die keiner bestimmten Signalfunktion zugeordnet ist.

Die vorliegende Arbeit untersucht, welchen Einfluß diese Mischung der Signallichter auf die Reaktionszeit hat. Die Mischung der Signallichter wird variiert, indem das Leuchtdichteverhältnis der beiden Signalleuchten geändert wird.

2.3 Zusammenhang zwischen Lichtstärke und Leuchtdichte

Mit der Lichtstärke wird die räumliche Lichtverteilung angegeben, mit der Leuchtdichte die örtliche. Sowohl Lichtstärke I als auch Leuchtdichte L hängen direkt von dem Lichtstrom Φ des Leuchtmittels ab. Um die folgenden Erläuterungen zu vereinfachen, wird festgelegt, daß alle vom Leuchtmittel ausgehenden Lichtstrahlen senkrecht auf der Abschlußscheibe auftreffen und diese gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Dies kann technisch annähernd dadurch gelöst werden, indem zwischen Glühlampe und Abschlußscheibe eine entsprechende Linse angeordnet wird. Da nun

alle Strahlen senkrecht eintreffen, können wir in der Formel für die Leuchtdichte die projizierte Fläche A_p durch die Fläche A der Abschlußscheibe ersetzen. Der Raumwinkel ω ist sowohl bei der Leuchtdichte, als auch bei der Lichtstärke gleich, da sowohl der Öffnungswinkel des Gehäuses als auch der Abstand und Blickwinkel des Betrachters dieselben sind.

Mit diesen Überlegungen erhält man aus der Formel der Lichtstärke und der Formel der Leuchtdichte eine Gleichung für den Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen.

$$L = \frac{I}{A} \quad \text{Zusammenhang zwischen Lichtstärke und Leuchtdichte}$$

Dies bedeutet, daß man durch Änderung der Fläche der Abschlußscheibe die Leuchtdichte in einem weiten Bereich variieren kann.

Als Beispiel wird eine zusammengebaute Leuchte aus einer Schlußleuchte mit 12 cd und einer Bremsleuchte mit 60 cd betrachtet. Die Lichtstärken erfüllen die ECE-Regelungen [ECE97, R 7] und auch das Lichtstärkenverhältnis befindet sich mit 5 : 1 in einem akzeptablen Bereich. Wählt man als Fläche für die Schlußleuchte 4 x 12 cm und für die Bremsleuchte 20 x 12 cm, so weisen die Flächen ein Verhältnis von 1 : 5 auf. Mit den gewählten Lichtstärken und den zugehörigen Flächen erhält man mit der obigen Formel, die den Zusammenhang zwischen Lichtstärke und Leuchtdichte beschreibt, sowohl für die Schlußleuchte als auch für die Bremsleuchte eine Leuchtdichte von 2 500 cd/m². In Bild 2.4 ist diese Leuchte mit den entsprechenden Leuchtdichten skizziert.



Bild 2.4: Zwei Rückleuchten mit gleicher Leuchtdichte

Bei Ripperger [Rip01b] findet man noch weitere Untersuchungen darüber, daß trotz unterschiedlicher Funktion die gleiche Leuchtdichte vorliegen kann. Er untersuchte ferner die Leuchtdichte von 70 Autoleuchten und stellte fest, daß trotz unterschiedlicher Signalfunktion (Schlußleuchte oder Bremsleuchte) etliche Leuchtdichten die gleiche Größenordnung haben.

Als weiteres Beispiel werden die zwei Leuchten in Bild 2.5 betrachtet, die mit den gleichen Leuchtmitteln bestückt sind, aber andere Gehäuse besitzen. Beide Leuchten sollen eine Lichtstärke von 12 cd erreichen. Die Abschlußscheibe der ersten Leuchte besitzt die gleiche Fläche, wie die Schlußleuchte aus dem vorherigen Beispiel. Bei der zweiten Leuchte ist die Fläche jedoch nur $\frac{1}{3}$ so groß. Mit der Formel über den Zusammenhang zwischen Lichtstärke und Leuchtdichte erhält man für die Leuchtdichte der ersten Leuchte folglich wiederum 2 500 cd/m², für die der zweiten jedoch 7 500 cd/m².

2.4 Untersuchungen im Nahbereich

Befindet sich der Fahrer des nachfolgenden Kraftfahrzeuges in geringem Abstand zu der Signalleuchte, so wird sein Lichteindruck durch die lichttechnische Größe Leuchtdichte der Leuchte bestimmt. In großem Abstand zu der Leuchte ist jedoch die Lichtstärke maßgeblich. Nach den



Bild 2.5: Zwei Rückleuchten mit gleicher Lichtstärke

Untersuchungen von Armbruster [Arm01] erstreckt sich der Nahbereich der Leuchte bis zu einer Entfernung von ca. 100 m. [Rip01b] erkannte durch seine Untersuchungen einen Bereich von 0 bis 63 m als gültigen Nahbereich bei Signalen mit einer leuchtenden Fläche von 100 cm^2 an. Auch andere Autoren, unter anderem Olson [Ols96], gehen davon aus, daß sich der Nahbereich bis mindestens 50 m erstreckt. Gemessen wurde bei Olson in Entfernungen von 15,2 m und 42,6 m, um Ergebnisse über das Verhalten im Nahbereich zu erhalten.

Die von mir durchgeführten Untersuchungen liegen mit einer Entfernung von 25 m auch im Nahbereich, daher orientiere ich mich bei der Planung der Experimente an der Leuchtdichte, anstatt an der im Gesetz festgelegten Lichtstärke. Trotzdem werden die verwendeten Leuchten auch den gesetzlichen Anforderungen in Bezug auf die Lichtstärke genügen.

Die heute vorherrschende Verkehrsdichte legt nahe, statt der Lichtstärke die Leuchtdichte als lichttechnische Größe der Gesetzesgrundlage zu benutzen. Von [Arm01] liegen zu diesem Thema ausführliche Untersuchungen vor, die belegen, daß im Nahbereich die Leuchtdichte die maßgebende Größe darstellt. Auch [Rip01a] konnte durch Versuche nachweisen, daß sich die Leuchtdichte als Kerngröße bei der Definition der lichttechnischen Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten eignet.

2.5 Kodierung von Signalfunktionen

Zur Unterscheidbarkeit der Lichtsignale werden diese kodiert. Im europäischen Verkehrsraum ist für Richtungsänderungen die Farbe gelb und für Geschwindigkeitsänderungen die Farbe rot vorgeschrieben. In der Vergangenheit wurde auch öfters die Farbe grün für Schlußleuchten vorgeschlagen [BgHJD71] und in Untersuchungen, unter anderem von Mortimer [Mor70], als günstig erkannt. Dies fand aber keinen Eingang in die Gesetzgebung.

Die Farbe ist nur eines von vielen Unterscheidungsmerkmalen, die für das hintere Signalbild zur Verfügung stehen. Mögliche Kodierungen sind laut [BgHJD71] und [Fin70]:

- Intensität
- Farbe
- Blinkfrequenz
- Anzahl
- Größe
- Form
- Platzierung

Eine redundante Kodierung ist erstrebenswert, damit das Signal einfacher von anderen unterschieden werden kann. Für den Fahrtrichtungsanzeiger ist sie in [ECE97, R 6] gesetzlich festge-

schrieben. Er besitzt als einziges Signal die Farbe gelb und blinkt auch als einziges Signal. An den beiden Beispielen in Abschnitt 2.3 kann man sehen, daß die Kodierung über die Intensität oder die Größe nicht zu einer redundanten Kodierung führt. Man kann sogar sehen, daß die Leuchtdichte einer Schlußleuchte höher, als die einer Bremsleuchte sein kann.

In der Literatur wird aufgeführt, daß die geometrische Form der leuchtenden Flächen (im Beispiel die rote Abschlußscheibe) keinen Einfluß auf die Erkennbarkeit des Signalbildes hat. Dies wird bei [BgHJD71] und [Ols96] behauptet, wobei bei Olson die Aussage durch Experimente erhärtet wird.

Die Platzierung der Leuchten trägt jedoch wesentlich zur schnelleren Erfassung des Signalbildes bei. Dies geht aus den Untersuchungen zur mittleren Bremsleuchte von [CLL01] hervor. Gerade in diesem speziellen Fall kann anschaulich erklärt werden, worauf die schnellere Erkennung beruht. Hat der nachfolgende Fahrer den Autoumriß vor sich erkannt, erkennt somit auch die Mitte des Fahrzeuges, dann kann er daraus schließen, daß das Fahrzeug vor ihm bremst, wenn in der Mitte ein Licht aufleuchtet. Denn in der Mitte des Fahrzeuges darf nur eine Bremsleuchte angebracht sein. Form, Größe, Farbe und eventuell Blinkfrequenz sind zweitrangig, wenn das Signal aus der Fahrzeugmitte entspringt.

Bei der Platzierung der verschiedenen Leuchten ist darauf zu achten, daß sie sich nicht gegenseitig in ihrer Wirksamkeit behindern [BgHJD71]. Wenn die Schlußleuchte zu nahe an der Bremsleuchte platziert ist, so kann ein Fahrer, der in der Nacht plötzlich ein Auto sieht, eventuell nicht erkennen, ob dieses nur eine helle Schlußleuchte oder doch eine Bremsleuchte angeschaltet hat. Haben jedoch die beiden Leuchten einen ausreichenden Abstand voneinander, so kann der Fahrer durch Vergleich der beiden Signale sehen, daß die Bremsleuchte eingeschaltet ist. Erst recht im Fall vollständiger Überlappung kann schwer zwischen Bremsleuchte und Schlußleuchte unterschieden werden. Auch bei teilweiser Überlappung sind Einbußen bei der Erkennbarkeit des Signalbildes zu erwarten. Bereits bei [Mor70] wird als Abstand von Bremsleuchten zu anderen Leuchten mindestens 5 inch ($\approx 12,7$ cm) gefordert. Auf diesen von Mortimer vorgeschlagenen Wert nimmt auch Owen [Owe70] Bezug. Bei [BgHJD71] gilt idealerweise als Mindestabstand zwischen zwei Leuchten 15 cm.

Weiterhin ist bei der Platzierung auf einen ausreichenden Abstand zwischen der rechten und der linken Schlußleuchte zu achten, damit der Sehwinkel zum Erkennen der zwei Leuchten groß genug ist. Laut [BgHJD71] sind 1 m Abstand ein akzeptabler Wert für das Erkennen bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h. Weitaus besser für die Erkennbarkeit wäre eine Verdoppelung der Anzahl der Schlußleuchten. Bei [Mor70] wird vorgeschlagen, im oberen Bereich des Fahrzeughecks zusätzliche Schlußleuchten anzubringen. Die insgesamt vier Leuchten spannen ein Trapez auf, durch welches das Fahrzeug besser erkannt wird, da die diagonalen entfernten Leuchten einen noch größeren Abstand haben, als dies mit nur zwei Leuchten möglich wäre.

In [BgHJD71], einer Zusammenfassung und Auswertung verschiedenster Untersuchungen, wird erwähnt, daß Einigkeit darüber herrscht, daß Fahrtrichtungsanzeiger und Bremsleuchte voneinander getrennt sein müssen. Dagegen besteht keine Übereinstimmung darüber, ob dies auch für die Kombination von Fahrtrichtungsanzeiger zu Schlußleuchte nötig ist. Als Quellen für diese Aussage werden [Fin70], [Owe70] und [Mor70] angegeben. Sowohl Finch [Fin70] als auch Owen [Owe70] stellen wiederum eine Zusammenfassung von Forschungsergebnissen dar. Alle drei Zusammenfassungen verweisen auf die Ergebnisse der Untersuchungen von Mortimer, die dieser unter anderem in [Mor70] veröffentlichte.

2.6 Historische Untersuchungen

Da in den Experimenten von Mortimer unter anderem der Einfluß der Überlappung der Bremsleuchte mit dem Fahrtrichtungsanzeiger auf die Reaktionszeit untersucht wurde, werden seine Ergebnisse kurz vorgestellt und diskutiert. Die Meßwerte, auf die dafür Bezug genommen wird, sind in Anhang A.9.1 wiedergegeben.

2.6.1 Untersuchte Signalbilder

Die Versuche fanden in den siebziger Jahren in Amerika statt. Daher waren es die teilnehmenden Versuchspersonen gewohnt, daß der Fahrtrichtungsanzeiger ein rotes Blinklicht sein kann und manchmal mit der Bremsleuchte ineinander gebaut wurde. Dies muß bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. In den den Versuchen wurden acht verschiedene Kombinationen von Rückleuchten untersucht. Diese Kombinationen sind in Bild 2.6 dargestellt.

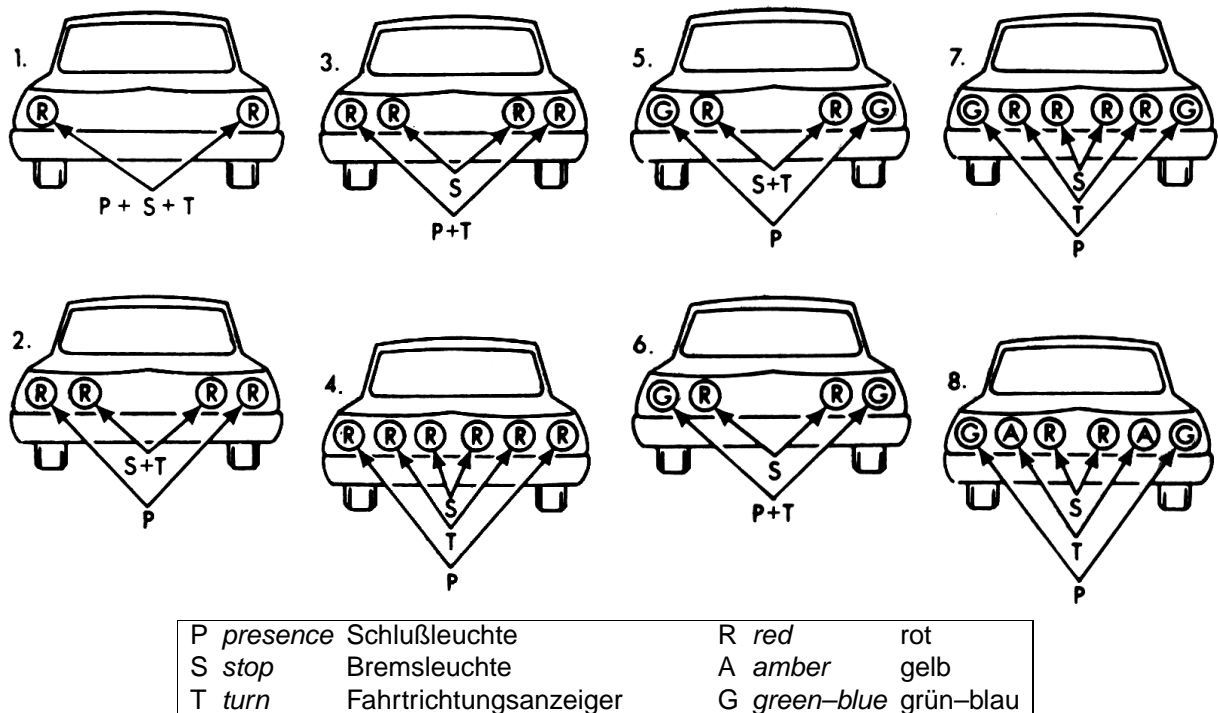


Bild 2.6: Kombinationen von Rückleuchten

Bei den Kombinationen 2 und 5 überlappen Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger vollständig, wohingegen sie bei den Kombinationen 3 und 6 nicht miteinander überlappen. (Dafür überlappt der Fahrtrichtungsanzeiger jedoch mit der Schlußleuchte.) Die Kombinationen mit drei getrennten Leuchten werden nicht diskutiert, da die Kodierung mit drei Farben vorgenommen wird. Diese Farbzahl steht für meine Untersuchungen nicht zur Verfügung.

Bei den in [Mor70] veröffentlichten Ergebnissen werden vier Fälle der zeitlichen Abfolge unterschieden:

T *Turn* Das Schlußlicht leuchtet, der Fahrtrichtungsanzeiger kommt hinzu.

S *Stop* Das Schlußlicht leuchtet, die Bremsleuchte kommt hinzu.

T-S *Turn–Stop* Schlußlicht und Fahrtrichtungsanzeiger leuchten, die Bremsleuchte kommt hinzu.

S-T *Stop–Turn* Schluß- und Bremslicht leuchten, der Fahrtrichtungsanzeiger kommt hinzu.

2.6.2 Diskussion der Ergebnisse von Mortimer

Es werden die Reaktionen der Versuchspersonen in allen vier Fällen diskutiert. Als Signalbilder werden die Kombinationen mit zwei Leuchten pro Fahrzeugseite betrachtet, das heißt die Kombinationen 2, 3, 5 und 6.

2 — 5 Diese beiden Signalbilder benutzen für das Bremslicht und den Fahrtrichtungsanzeiger eine ineinandergebaute Leuchte mit roter Abschußscheibe. Es liegt vollständige Überlappung vor. Der Unterschied zwischen den beiden Kombinationen stellt die Farbe der Schlußleuchte dar. Für das Aufleuchten der Schlußleuchte wurde in diesem Versuch keine Reaktionszeit ermittelt. Daher kann auch kein signifikanter Unterschied zwischen diesen beiden Kombinationen festgestellt werden.

3 — 6 Diese Signalbilder besitzen die gleiche Bremsleuchte, aber Fahrtrichtungsanzeiger mit unterschiedlicher Farbe. Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger überlappen nicht.

T Kombination 3 ist besser als 6. Dies liegt sicherlich daran, daß die amerikanischen Probanden auf einen roten Fahrtrichtungsanzeiger schneller reagieren, als auf einen grün-blauen, da sie es so gewohnt sind.

T-S Kombination 6 ist besser, da ein Licht schon leuchtet und nun eine neue Farbe hinzukommt.

S-T Auch hier ist Kombination 6 besser, da ein rotes Licht schon leuchtet und nun eine neue Farbe hinzukommt.

Daraus kann geschlossen werden, daß unterschiedliche Farbgebung für Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger zu einer Verkürzung der Reaktionszeit beiträgt.

2,5 — 3 Bei den Kombinationen 2 und 5 liegt Überlappung vor. Bei 3 sind Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger räumlich getrennt, besitzen aber die gleiche Farbe.

T Die Kombinationen 2 und 5 sind besser, da bei 3 der Fahrtrichtungsanzeiger mit der Schlußleuchte überlappt.

T-S Kombination 3 ist besser, da keine Überlappung vorliegt.

S-T Auch hier ist 3 besser, da keine Überlappung vorliegt.

Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, daß sich die Reaktionszeiten bei Überlappung verschlechtern, wenn keine unterschiedliche Farbkodierung der überlappenden Signale vorliegt.

2,5 — 6 Wiederum liegt bei den Kombinationen 2 und 5 Überlappung des Fahrtrichtungsanzeigers mit dem Bremslicht vor. Bei Kombination 6 sind beide Signale voneinander getrennt und besitzen eine unterschiedliche Farbkodierung.

T Die Kombinationen 2 und 5 sind besser, da bei 6 der Fahrtrichtungsanzeiger mit der Schlußleuchte überlappt und der Fahrtrichtungsanzeiger nicht rot kodiert ist, wie es die Testpersonen gewohnt waren.

T-S Kombination 6 ist besser, da keine Überlappung vorliegt.

S-T Auch hier ist 6 besser, da keine Überlappung vorliegt.

Daraus kann geschlossen werden, daß sich die Reaktionszeiten bei Überlappung verschlechtern, wenn im überlappenden Fall keine unterschiedliche Farbkodierung der Signale vorliegt.

2.6.3 Folgerung bezüglich Überlappung

Aus den Untersuchungen von Mortimer wird geschlossen, daß die vollständige Überlappung von Signalen, die mit gleicher Farbe kodiert sind, eine signifikante Verlängerung der Reaktionszeit zur Folge hat. Diese Verlängerung beträgt ca. eine halbe Sekunde (Tabelle A.1 und A.2).

Die Ergebnisse zeigen aber auch, daß eine unterschiedliche Farbgebung zwischen Bremslicht und Fahrtrichtungsanzeiger die Reaktionszeit signifikant verkürzt. Die Verkürzung beträgt ca. eine halbe Sekunde (Tabelle A.2 und A.3).

Diese beiden Beeinflussungen der Reaktionszeit könnten sich bei Überlappung von Signalen unterschiedlicher Farbkodierung aufheben. Dann würde sich die Überlappung zweier Lichtsignale unterschiedlicher Farbe nicht signifikant auf die Reaktionszeit auswirken. Dieser Zusammenhang wird in der vorliegenden Arbeit untersucht.

2.7 Gesetzeslage

2.7.1 Lichtstärke ist festgelegt

Als die heute gültigen Gesetze [StV88] über Leuchten an Kraftfahrzeugen festgelegt wurden, war die Verkehrsdichte auf den Straßen wesentlich geringer, als dies heute der Fall ist. Auch die zur Verfügung stehenden Meßgeräte gaben dem Lichttechniker längst nicht die Vielfalt an Meßmöglichkeiten, wie wir sie heute kennen. Unter anderem aus diesen Gründen wurde als Festlegung des Lichtaustrittes aus Kraftfahrzeugrückleuchten als Meßgröße die Lichtstärke festgelegt.

2.7.2 Keine Regelung für Überlappung

In den ECE-Regelungen [ECE97] wird nur zu einem einzigen Fall der Überlappung von Signallichtern eine Festlegung getroffen. Dies hat zwei Gründe:

- Zum einen sah man in der Vergangenheit wenig Beeinträchtigung durch die Überlappung von Schluß- und Bremsleuchte, so daß man dies getrost zuließ.

- Zum anderen war mit einer Überlappung von Signalleuchten, die mit verschiedenen Farben kodiert sind, nicht zu rechnen, da dies zu Zeiten der Gesetzesfindung technisch nicht mit vertretbarem Aufwand herstellbar war.

Die einzige Festlegung für Überlappung betrifft das Verhältnis der Lichtstärke von Schlußleuchte zu Bremsleuchte. Bei ineinandergebauten Leuchten (Schluß- und Bremsleuchte haben gemeinsame Lichtaustrittsfläche, somit vollständige Überlappung) wird vom Gesetz ein Verhältnis von mindestens 1:5 in der Lichtstärke vorgeschrieben, da bei kleinerem Verhältnis die Unterscheidung des Bremslichts von der Schlußleuchte beeinträchtigt ist. In [BgHJD71] werden einige Untersuchungen angeführt, denen zufolge ein wesentlich höheres Verhältnis von bis zu 1:20 angemessen wäre. Weiterhin wird in [BgHJD71, Kapitel 5] vorgeschlagen, das Verhältnis der Lichtstärken auch für benachbarte Signale festzulegen. Mit den erlaubten Lichtstärken (Schlußleuchte $I_{\max} = 17$ cd, Bremsleuchte S1 $I_{\min} = 60$ cd, siehe Seite 16) ist heute im ungünstigsten Fall ein Verhältnis von 1:3,5 erreichbar. Dadurch wird die Funktion der Bremsleuchte beeinträchtigt.

Nach heutigem Stand der Technik ist es möglich, verschiedenfarbige Signale aus derselben Fläche abgeben zu können. Als einleuchtendes Beispiel sei hier die Duo-LED in SMD-Bauform erwähnt. Dieser Leuchtdiodentyp vereinigt auf einer Fläche von zwei auf drei Millimetern die Lichterzeugung von rotem und gelbem Licht inklusive gemeinsamem Reflektor und Linse. Etwas gröber kann ein vergleichbarer Lichteindruck auch durch die Anordnung von zwei verschiedenfarbigen LED's, zum Beispiel der SuperFlux-Serie von LumiLeds [Lum00], erzeugt werden, indem diese lückenlos nebeneinander gesetzt werden. Dabei tritt dann zweifarbiges Licht innerhalb einer Fläche von 7,5 auf 15 Millimeter aus. Für den normalsichtigen Beobachter (praktischer Wert der Sehschärfe $s_0 = 1$, Maximalwert $s_{\max} = 2,75$ laut Kokoschka in [Kok97b]) bedeutet dies, daß ab einer Entfernung von 25 m die beiden Lichtfarben aus derselben Fläche stammen.

Laut [Dub01] sind LED's und Neon-Röhren die bevorzugten Lichtquellen der Fahrzeug-Stylisten. Da auch Neon-Röhren so nah beieinander montiert werden können, daß noch im Nahbereich der Leuchte die Lichtaustrittsflächen der beiden verschiedenfarbigen Lichtquellen als eine Fläche wahrgenommen werden, ist damit zu rechnen, daß in naher Zukunft immer mehr Fahrzeuge auf den Straßen anzutreffen sein werden, bei denen eine teilweise oder sogar vollständige Überlappung verschiedenfarbiger Lichtsignale vorliegt.

Daß dies nicht nur technisch möglich, sondern auch wirtschaftlich interessant ist, kann man daran sehen, daß der seit Mai 2002 auf dem Markt befindliche VW Phaeton hintere Leuchteneinheiten besitzt, bei denen sich der Fahrtrichtungsanzeiger und die Schlußleuchte teilweise überlappen. (Siehe dazu auch die technischen Daten auf Seite 75.)

In der Vergangenheit waren überlappende Flächen verschiedener Farbigkeit nur bei Rippenleuchten, eine für Fahrzeuge der Marke Mercedes typische Leuchtenform, möglich, wenn der Fahrtrichtungsanzeiger durch Rückstrahler-elemente unterbrochen wurde.

Kapitel 3

Versuchsaufbau und Voruntersuchungen

3.1 Untersuchungen bei photopischem Sehen

Die vorliegende Arbeit soll aufzeigen, ob der Überlappungsgrad der Flächenanteile zweier Lichtsignale unterschiedlicher Farbe einen Einfluß auf die Reaktionszeit hat. Die Untersuchungen werden den Tagfall behandeln, da Signalleuchten in der Nacht wesentlich besser erkannt werden. Es ist davon auszugehen, daß im Tagesfall ermittelte Reaktionszeiten im Nachtfall nicht länger werden, umgekehrt jedoch schon. So waren unter anderem bei [CLL01] die Reaktionszeiten bei Nacht kürzer, als bei Tag. Die Tragweite einer Schlußleuchte ist laut [hME93] bei Nacht zehnmal weiter, als bei Tag.

3.2 Psychophysikalische Untersuchungen

Die Reaktionszeit ist eine psychophysikalische Größe. Um die Abhängigkeit der Reaktionszeit vom Überlappungsgrad zu bestimmen, müssen daher psychophysikalische Experimente durchgeführt werden. Bei diesen Experimenten wird das Verhalten einer einzelnen Person auf externe Reize getestet. Die Meßwerte, die dabei ermittelt werden, sind subjektiv. Um allgemeine Aussagen aus diesen Werten ableiten zu können, werden die Versuche mit einer repräsentativen Personengruppe durchgeführt. Die Zusammensetzung dieser Gruppe ist in Anhang A.8 angegeben. In Bild 3.1 ist das Schema des psychophysikalischen Experimentes dargestellt.

Die Eingangsgrößen des Experimentes sind der Überlappungsgrad der Flächenanteile und das Leuchtdichteverhältnis der überlappenden Signalleuchten. Diese beiden Eingangsgrößen werden variiert. Die Flächen überlappen vollständig oder nur zu 50 Prozent. Das Leuchtdichteverhältnis beträgt 1:5, 1:1 oder 5:1 in den verschiedenen Experimenten.

Als Ausgangsgrößen liegen die Reaktionszeit und die Fehlerrate vor. Der Versuchsaufbau ist auf das Erhalten möglichst vieler aussagekräftiger Meßwerte der Reaktionszeit optimiert. Die Fehler rate wird nicht ausgewertet, da sie durch den gewählten Aufbau gering ist.

Die meisten Störgrößen (Umfeldleuchtdichte, Umgebungstemperatur, Publikumsverkehr, . . .) werden minimiert, da die Experimente im Labor durchgeführt werden. Die Konzentration und Motivation der jeweiligen Versuchsperson geht jedoch in das Experiment als Störgröße ein.

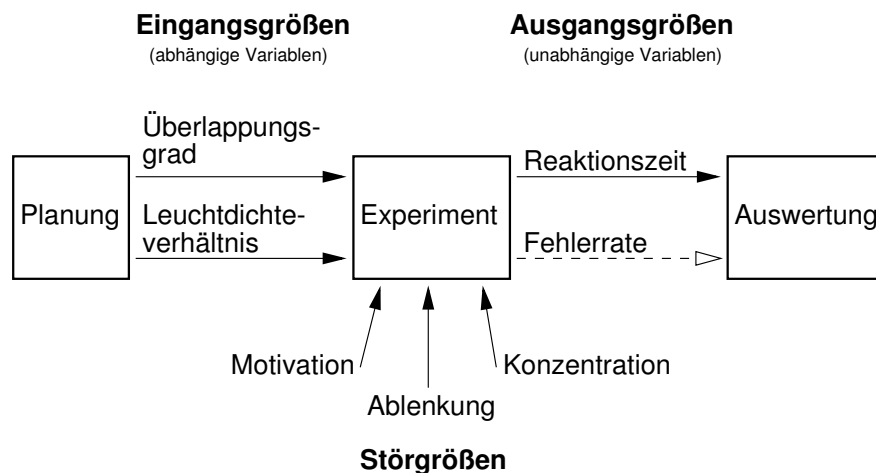


Bild 3.1: Psychophysikalisches Experiment

3.3 Ausgangssituation im Straßenverkehr

Bei der Planung eines psychophysikalischen Experimentes ist darauf zu achten, alle Störgrößen zu minimieren und dennoch das Umfeld der Versuchsperson weitgehend realistisch zu gestalten. In Bild 3.2 ist der grundsätzliche Aufbau zu sehen. Er stellt eine mögliche Situation im Straßenverkehr dar, minimiert auf die erforderlichen Objekte. (Ein vorausfahrendes und ein folgendes Fahrzeug, keine Passanten, ...)

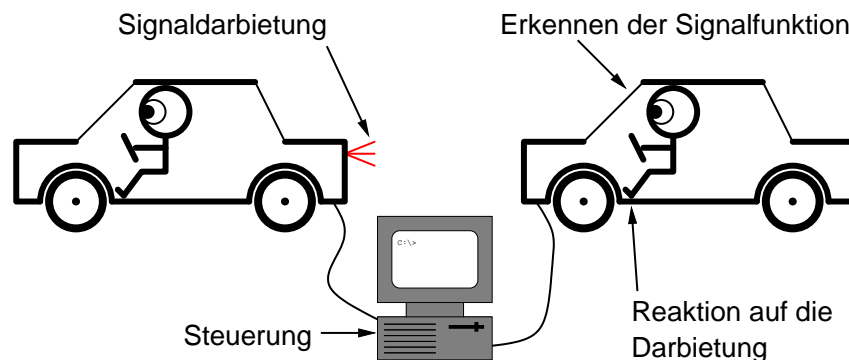


Bild 3.2: Grundsätzlicher Versuchsaufbau

Am Heck des vorausfahrenden Fahrzeuges leuchtet ein Signallight auf. Der Fahrer des nachfolgenden Kraftfahrzeuges erkennt eine Signalfunktion und reagiert darauf. Ein Computer protokolliert die Reaktion und die verstrichene Zeit zwischen dem Einschalten der Signalleuchte und der Betätigung eines Schalters durch die Versuchsperson. Dieser Computer dient zur gesamten Steuerung des Versuchsablaufes.

Dieser prinzipielle Aufbau wird auf die notwendigen Komponenten reduziert. Statt des vorausfahrenden Fahrzeuges wird nur dessen Heck mit den Rückleuchten benutzt. Das nachfolgende Fahrzeug wird auf die Bedienelemente am Lenkrad, das Lenkrad selbst und die Pedale reduziert.

3.4 Untersuchungen im Labor

Die Experimente werden im Labor durchgeführt, um bei jeder Testperson gleichbleibende Bedingungen zu gewährleisten. Die Ergebnisse des Laborexperimentes geben einen guten Anhaltspunkt dafür, welcher Art der Einfluß im realen Verkehrsgeschehen ist. Wenn sich die Reaktionszeit im Labor durch die Überlappung signifikant verlängert, wird sie sich im realen Verkehr noch weiter vergrößern. Im Anschluß an den Laborversuch sollte ein Freiversuch im realen Verkehrsfluß folgen, um die Ergebnisse zu erhärten. Es ist davon auszugehen, daß dabei die meisten Effekte weniger deutlich hervortreten, da die Streuung der Meßwerte größer sein wird und deshalb die Aussagekraft einer Meßwertgruppe geringer. Die Spanne der Meßwerte pro untersuchtem Fall wird wesentlich breiter sein, weil sich der Versuchsperson wesentlich mehr Sinneseindrücke bieten. Bei den Versuchen von Armbruster [Arm01] differieren die unter Labor- und Realbedingungen ermittelten Leuchtdichten mitunter erheblich. Aufgrund der Versuche im realen Verkehrsgeschehen werden bei ihm wesentlich höhere Leuchtdichten gefordert, als seine Laborergebnisse erwarten ließen.

3.5 Verwendete Leuchteneinheiten

3.5.1 Versuchsleuchte — LED–Matrix Leuchte

Für die Durchführung wird eine hintere Leuchteneinheit benötigt, bei der sich die Signalbilder der Bremsleuchte und des Fahrtrichtungsanzeigers überlappen. Vorteilhaft sind verschiedene Überlappungsmodi, sowie eine Helligkeitsregelung, getrennt für beide Signalbilder. Die Firma Hella stellte mit dem Prototyp *LED–Matrix Leuchte* eine Leuchte zur Verfügung, die diese Anforderungen erfüllt und darüber hinaus auch in der Form der leuchtenden Flächen in weiten Bereichen veränderbar ist. Eine genaue Beschreibung dieser Leuchte findet sich in der Veröffentlichung [GP01] ihrer Entwickler.

3.5.2 Vergleichsleuchte — konventionelle Leuchte

Als Vergleichsleuchte wird eine Leuchte benötigt, bei der eine ähnliche Technologie sowohl für Lichterzeugung, als auch Lichtverteilung eingesetzt wird. Es soll keine Überlappung verschiedenfarbiger Signale vorhanden sein. Mit dieser Leuchte ermittelte Reaktionszeiten sollten ähnliche Werte besitzen, wie die mit der LED–Matrix Leuchte im nicht überlappenden Betrieb ermittelten. Für die Untersuchung wird eine Leuchte aus der laufenden Fertigung der Firma Reitter & Scheffacker gewählt, die alle drei Funktionen, Schlußleuchte, Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger, durch LED–Leuchtmittel realisiert. Die Lichtverteilung wird, wie bei der LED–Matrix Leuchte, durch eine Fresnelscheibe vor jeder LED und einer mit Toruslinsen versehenen Abschlußscheibe erreicht. Die technischen Daten dieser Leuchte finden sich in dem entsprechenden Prüfbericht [Gut99] und sind im Anhang auf Seite 75 angegeben.

Somit eignet sich die Kombination dieser beiden Rückleuchten für die Durchführung des Versuches, da keine Beeinträchtigung durch unterschiedliches Verhalten der Leuchten zu befürchten ist.

3.5.3 Bezeichnungen der Leuchten und Signalmuster

Die Versuchsleuchte wird im folgenden mit *LED-Matrix Leuchte* bezeichnet, die Vergleichsleuchte mit *konventionelle Leuchte*. Für die einzelnen Signalfunktionen der konventionellen Leuchte und die einzelnen Signalmuster der LED-Matrix Leuchte werden die in Tabelle 3.1 angegebenen Bezeichnungen benutzt.

Da der Entwurf der Muster für die LED-Matrix Leuchte und die lichttechnischen Messungen derselben weitgehend parallel stattfanden, sind die Namen der Muster vorgehend schon hier angegeben worden, um bei den Messungen die korrekten Bezeichnungen nutzen zu können. Die Motivation für den Entwurf gerade dieser Muster wird in Abschnitt 3.17 erläutert.

Bezeichnung	Signalbild
<i>blink</i>	konventionelle Leuchte: Schlußleuchte
<i>brems</i>	konventionelle Leuchte: Bremsleuchte
<i>licht</i>	konventionelle Leuchte: Fahrtrichtungsanzeiger
<i>led_licht</i>	LED-Matrix Leuchte: Schlußleuchte nicht überlappend
<i>led_licht_2</i>	LED-Matrix Leuchte: Schlußleuchte überlappend
<i>led_brems</i>	LED-Matrix Leuchte: Bremsleuchte nicht überlappend
<i>led_brems_2</i>	LED-Matrix Leuchte: Bremsleuchte überlappend
<i>led_brems_3</i>	LED-Matrix Leuchte: Bremsleuchte nicht überlappend
<i>led_brems_4</i>	LED-Matrix Leuchte: Bremsleuchte überlappend
<i>led_brems_5</i>	LED-Matrix Leuchte: Bremsleuchte teilüberlappend
<i>led_brems_6</i>	LED-Matrix Leuchte: Bremsleuchte teilüberlappend
<i>led_blink</i>	LED-Matrix Leuchte: Fahrtrichtungsanzeiger
<i>led_blink_2</i>	LED-Matrix Leuchte: Fahrtrichtungsanzeiger

Tabelle 3.1: Bezeichnungen der Leuchten

3.6 Versuchsumgebung im Labor

Die Versuchsumgebung muß für die Versuchsperson weitgehend realitätsnah sein. Trotzdem muß darauf geachtet werden, möglichst alle Störgrößen zu vermeiden. Einzige unabhängige Variable ist die Reaktionszeit. Die abhängigen Variablen Umfeldleuchtdichte, Abstand der Versuchsperson zu den Leuchten, Blendlichtquellen, Temperatur und Lärm werden durch die Wahl des Versuchsortes weitgehend konstant gehalten. Die Halle, in der die Experimente stattfinden, ist klimatisiert und abgedunkelt. Für die Versuchsperson wird ein Fahrstand errichtet, in dem die konstant gehaltene Umfeldleuchtdichte die Augen auf den Tagfall adaptiert.

3.7 Lichtstärkeverteilung bei Fahrzeugleuchten

3.7.1 Lichtstärke

Leuchten an Kraftfahrzeugen müssen bestimmte Mindest- und Maximallichtstärken einhalten. Diese sind in den ECE-Regelungen [ECE97, Abschnitt R 6 und R 7] festgeschrieben. Bei Leuchten, die aus Leuchtdioden aufgebaut sind, also mehr als ein Leuchtmittel pro Leuchtenfunktion besitzen, gelten die Werte in Tabelle 3.2.

Leuchtenfunktion	ECE-Regelung	I_{\min} [cd]	I_{\max} [cd]
Schlußleuchte	R 7	4	17
Bremsleuchte S1	R 7	60	260
Bremsleuchte S2 (Tag)	R 7	130	728
Bremsleuchte S2 (Nacht)	R 7	30	112
Bremsleuchte S3	R 7	25	110
Fahrtrichtungsanzeiger 2a	R 6	50	350
Fahrtrichtungsanzeiger 2b (Tag)	R 6	175	980
Fahrtrichtungsanzeiger 2b (Nacht)	R 6	40	168

Tabelle 3.2: Geforderte Lichtstärken

3.7.2 Verteilung

Auch für die räumliche Verteilung des Lichts sind bestimmte Mindestgrenzen in den ECE-Regelungen festgelegt. Damit wird sichergestellt, daß das Signal nicht nur von einem Betrachter direkt hinter dem Fahrzeug, sondern auch von einem sich seitlich vom Fahrzeug befindlichen erkannt wird.

	20°	15°	10°	5°	0°	5°	10°	15°	20°
10°				20		20			
5°	10		20		70		20		10
0°			35	90	100	90	35		
5°	10		20		70		20		10
10°				20		20			

Bild 3.3: Geforderte Lichtverteilung (Angaben in Prozent der axialen Lichtstärke)

Die Zahlen in Bild 3.3 geben die geforderte Lichtstärke in Prozent von der axial vorhandenen Lichtstärke an. Die Zahlen am Rand der Tabelle geben die horizontalen und vertikalen Abweichungen von der Achse in Grad an.

3.7.3 Temperaturabhängigkeit

Bei Leuchtdioden nimmt der Lichtstrom, und damit auch die Lichtstärke, bei steigender Temperatur ab. Laut Heering [Hee98] bedingt eine Erwärmung des p-n – Übergangs in Leuchtdioden im Bereich von 0 bis 100°C um 1 K eine Abnahme des Lichtstroms um 0,5 bis 1% . Da der zulässige Temperaturbereich in der Fahrzeugelektronik sich von -40 bis +85°C erstreckt, ist auf jeden Fall mit einer großen Variation der Lichtstärke zu rechnen. Wenn daher die Lichtabgabe von Leuchtdioden gemessen wird, ist es notwendig, zu warten, bis sich das Meßsignal im Gleichgewicht befindet und sich die Intensität stabilisiert hat [Jen01]. Dies entspricht der heutigen Prüfpraxis in der Meßtechnik, die daraus besteht, die Leuchte so lange zu betreiben, bis sich der Lichtstrom nur noch unwesentlich ändert. Der dann abgegebene Lichtstrom ist je nach Thermomanagement der Leuchte wesentlich geringer, als einige Zehntel Sekunden nach dem Einschalten der Leuchte.

Dieses Verhalten steht in großem Gegensatz zu dem Einschaltvorgang von einer mit Glühlampen bestückten Leuchte. Diese benötigen ca. 150 msek, bis sie mindestens 90 % ihrer Intensität erreicht haben. Jedoch sinkt der Lichtstrom auch nach längerer Zeit nicht.

3.8 Messung der Lichtstärkeverteilung der verwendeten Leuchten

Die im Versuch verwendeten Leuchten (konventionelle Leuchte und LED-Matrix Leuchte) werden mit dem Goniometer der Prüfstelle ausgemessen. Mit diesem Gerät werden auch Scheinwerfer und hintere Leuchteneinheiten im täglichen Betrieb der Prüfstelle vermessen, die dann das Prüfzeichen dieses Instituts erhalten. Die Temperatur des Meßraumes wird durch eine Klimaanlage auf konstanter Temperatur gehalten, um die Temperaturdrift der Leuchtdioden zu minimieren. Da aufgrund der großen Lichtstärken der LED-Leuchten auf dem Scheinwerfermeßplatz gemessen wird, kann keine Messung der räumlichen Lichtverteilung (Grundhelligkeit außerhalb des 20° Feldes) durchgeführt werden. Aus Erfahrung des Meßpersonals ergibt sich jedoch, daß die geprüften Leuchten diesen Punkt der Messung auch bestanden hätten.

Obwohl es bei dem Versuch nur auf die axiale Lichtstärke ankommt, da die Versuchspersonen die Leuchte von einem festen Platz aus sehen, wird die vollständige Lichtstärkeverteilung aufgenommen. Somit können die im Laborversuch verwendeten Leuchten für einen in einer nachfolgenden Arbeit durchzuführenden Freiversuch verwendet werden, ohne daß die Grundlagenmessungen wiederholt werden müssen. Die umfangreichen Meßprotokolle sind in einem gesonderten Band dieser Arbeit [Kli02b] dokumentiert.

Bei der konventionellen Leuchte werden die Schlußleuchte, Bremsleuchte und der Fahrtrichtungsanzeiger vermessen und die Ergebnisse mit den Daten aus dem Prüfbericht für diesen Lampentyp verglichen. Dabei zeigt sich ein Unterschied in der Lichtstärke der Bremsleuchten von fast 30 %. Eine erneute Vermessung des aus dem Archiv der Prüfstelle entnommenen Referenzexemplars der Leuchte hat je nach Messung einen Unterschied von 0,3 bis 8 % zu den protokollierten Werten ergeben. Da die beiden Exemplare der Leuchte einen nicht zu vernachlässigenden Unterschied aufweisen, werden im Weiteren nur die gemessenen Werte der tatsächlich benutzten Leuchte verwendet. Die im Anhang unter Geräte A.2 angegebenen Werte beziehen sich auf den Prüfbericht. Die von mir gemessenen Werte sind in Anhang A.9.8 angegeben.

Die Temperaturabhängigkeit des Lichtstromes ist bei dieser Leuchte gut zu sehen. Zum Zeitpunkt des Einschaltens hat die Leuchte eine Temperatur von $21^{\circ}\text{C} \pm 10\%$. Nachdem die Lichtstärke um weniger als 2 % schwankt, wird mit der Messung begonnen.

Der Fahrtrichtungsanzeiger ist nur für kurzzeitigen, oder intermittierenden Betrieb ausgelegt, seiner Funktion angemessen. Jedoch muß bedacht werden, daß eine Erwärmung des p-n – Überganges auch durch Sonneneinstrahlung hervorgerufen werden kann. In Tabelle 3.3 sind die Lichtstärken im zeitlichen Verlauf notiert.

Zeit	Lichtstärke
0 sec	282 cd
10 sec	260 cd
20 sec	252 cd
30 sec	248 cd
nach Stabilisierung, vor Messung	161,4 cd
nach dreiminütiger Messung	160,6 cd

Tabelle 3.3: Temperaturabhängigkeit der konventionellen Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger

Die Lichtstärke des Fahrtrichtungsanzeigers sinkt im Dauerbetrieb auf 57 % der Einschaltlichtstärke ab!

Die Schlußleuchte hingegen ist für Dauerbetrieb ausgelegt. Es müssen nicht so hohe Lichtstärken, wie für den Fahrtrichtungsanzeiger, erzeugt werden. Daher ist es nicht erforderlich, die LED's mit einem derart hohen Strom zu betreiben, wodurch sie sich weniger stark erwärmen. Folglich ändert sich die Lichtstärke nicht so stark im Laufe der Zeit. Die Meßwerte des zeitlichen Verlaufs sind in Tabelle 3.4 angegeben.

Zeit	Lichtstärke
0 sec	12,8 cd
30 sec	12,7 cd
nach Stabilisierung, vor Messung	11,8 cd
nach dreiminütiger Messung	12,0 cd

Tabelle 3.4: Temperaturabhängigkeit der konventionellen Leuchte, Schlußleuchte

Die Lichtstärke der Schlußleuchte sinkt im Dauerbetrieb nur auf 92 % der Einschaltlichtstärke ab.

Die typische Betriebsart der Bremsleuchte ist zwar nicht intermittierend, wie beim Fahrtrichtungsanzeiger, aber auch nicht der Dauerbetrieb. So liegt die Temperaturänderung hierbei höher, als bei der Schlußleuchte. Dies liegt daran, daß die LED's mit einem höheren Strom betrieben werden und die Anzahl der LED's höher ist. Die Lichtstärken sind in Tabelle 3.5 zu sehen.

Zeit	Lichtstärke
0 sec	113 cd
10 sec	109 cd
20 sec	107 cd
30 sec	106 cd
nach Stabilisierung, vor Messung	82,3 cd
nach dreiminütiger Messung	82,0 cd

Tabelle 3.5: Temperaturabhängigkeit der konventionellen Leuchte, Bremsleuchte

Die Lichtstärke der Bremsleuchte sinkt im Dauerbetrieb auf 73 % der Einschaltlichtstärke ab.

Bei der LED-Matrix Leuchte werden alle im Versuch benutzten Signalmuster vermessen. Obwohl die LED-Matrix Leuchte plan aufgebaut ist und keine Lichtquellen speziell für die Ausleuchtung des peripheren Bereiches vorhanden sind, gelingt dessen Ausleuchtung in den meisten Fällen. Sogar bei einem Muster, das nur aus einer einzigen LED besteht, für den Versuch aber nicht benutzt wird, werden alle Anforderungen erfüllt.

Auch andere, in diesem Versuch nicht benutzte Muster, werden vermessen. Diese Messungen können als Grundlage für weitere Versuche dienen, in denen der Einfluß der Größe und der Form der leuchtenden Fläche auf die Reaktionszeit bestimmt wird.

Bei einigen exemplarischen Messungen einzelner LED's wird die Abhängigkeit der Lichtstärke der LED-Matrix Leuchte von der Betriebsdauer ermittelt. Da sich im Laufe des Betriebs der p-n – Übergang erwärmt, ist dies auch ein Maß für den Einfluß der Temperatur auf die Lichtstärke. Es ist festzustellen, daß bei den roten LED's die Lichtstärke im stabilisierten Zustand 95 % der anfänglichen Stärke hat. Bei den gelben LED's sind es noch 83 %. Auch Jenkins [Jen01] hält fest, daß die Temperaturabhängigkeit der gelben Leuchtdioden größer ist, als die der roten. Zu beachten ist jedoch, daß die angegebenen Prozentzahlen für den Fall gelten, daß nur eine einzige LED in der Matrix leuchtet. Ab einer gewissen Anzahl gleichzeitig betriebener Licht- und damit auch

Wärmequellen, ändert sich der Lichtverlust. So strahlen alle 128 gelben LED's im stabilisierten Zustand nur noch 66 % des Einschaltlichtstromes ab, wenn sie auf maximale Helligkeit eingestellt sind.

Die Änderung der Lichtstärke verursacht in den Experimenten jedoch keine signifikante Änderung der Reaktionszeit. Dies zeigt Olson [Ols96] in seinen Versuchen, in denen sich die Lichtstärke der mit LED's bestückten Leuchten im eingeschwungenen Zustand auf 80 % der Einschaltlichtstärke verringert. Bei einigen dieser Experimente ist vor der Leuchte ein Graufilter mit einer Lichtdurchlässigkeit von 80 % plazierte worden. Zwischen den Reaktionszeiten mit und ohne Filter hat sich kein signifikanter Unterschied ergeben. Somit wird davon ausgegangen, daß Schwankungen der Lichtstärke um 20 % tolerierbar sind.

Weiterhin wird jede einzelne LED der LED-Matrix Leuchte vermessen. Die gemessene LED hat eine Temperatur von 20°C und wird direkt nach dem Einschalten vermessen. Die Helligkeit ist auf maximalen Wert eingestellt. Die gesamten 256 Meßergebnisse finden sich in Anhang A.9.7. Eine rote LED erreicht somit ca. 11 cd, eine gelbe 5 cd. Die relativ großen Abweichungen direkt nebeneinander platzierter Lichtquellen ist dadurch bedingt, daß die Bauteile von Hand eingelötet sind, und daher nicht alle exakt in die gleiche Richtung abstrahlen. Die um 30 % geringere Lichtleistung der obersten Reihe, sowie die geringere Leistung bei den äußersten Spalten ist eventuell mit dem Winkel zum Meßgerät zu erklären. So trifft nicht mehr der Hauptlichtstrahl die Empfängerfläche, sondern die etwas periphereren Lichtstrahlen gelangen zum Meßgerät. Jedoch vor allem der Rand der Abschlußscheibe absorbiert etwas Licht, da er anscheinend nicht exakt genug in die Leuchte eingepasst ist.

3.9 Farbwerte für Kraftfahrzeugleuchten

Leuchten an Kraftfahrzeugen müssen nicht nur bestimmte Mindest- und Maximallichtstärken einhalten, sondern mit ihren dargebotenen Farben nach [StV88] entsprechende Grenzen einhalten.

3.9.1 Farbortgrenzen

Die für diesen Versuch relevanten Farben sind rot und gelb. Alle anderen im Straßenverkehr zugelassenen Farben werden daher nicht berücksichtigt. Die auch im Versuch dargebotene Farbe grün der Ampel dient nur als Zusatzsignal. Mit Hilfe dieses Signales werden keine Reaktionszeiten ermittelt.

Als Farbraum im Straßenverkehr wird der CIE-Farbraum (das Normvalenzsystem CIE 1931, unter anderem beschrieben bei Kokoschka [Kok97a]) benutzt. Die zu benutzenden Farben entstammen jeweils einem Farbbereich, der mit Hilfe der Farbtafelkoordinaten (x, y) der Normfarbtafel festgelegt ist. Die hier angegebenen Werte für die Grenzen entstammen [StV88]. Die Werte der Farbgrößen sind jedoch gerade in Diskussion, daher sollte für neuere Projekte in den aktualisierten ECE-Regelungen nachgeschlagen werden.

Farbname Grenzen

rot	$y < 0,335$ $x + y > 0,992$
gelb	$0,398 < y < 0,429$ $x + y > 0,992$

3.9.2 Temperaturabhängigkeit bei Leuchtdioden

Bei herkömmlichen Leuchten, aufgebaut aus einer farbigen Abschlussscheibe und bestückt mit einer Glühlampe, ändert sich die dargebotene Farbe langsam im Laufe der Betriebsdauer des Fahrzeuges durch Umwelteinflüsse auf die Abschlussscheibe, zum Beispiel Vergilbung. Bei modernen, mit LED's bestückten Leuchten kann sich die Lichtfarbe jedoch in kürzester Zeit ändern, da die von Leuchtdioden abgestrahlte Wellenlänge des Lichtes stark von der Temperatur des p-n-Übergangs abhängig ist. Die Wellenlänge ändert sich ungefähr um 0,1 nm pro Kelvin.

3.10 Messung der Farbwerte der verwendeten Leuchten

Da die konventionelle Leuchte eine zugelassene Leuchte ist, ist zu erwarten, daß ihre Farbwerte in den zugelassenen Bereichen liegen. Diese Vermutung erweist sich für das Signallicht *licht* allerdings als Trugschluß. Laut den in Abschnitt A.9.5 dokumentierten Meßergebnissen genügt dieses Signalbild nicht den oben genannten Forderungen. Da bei dieser Leuchte die einzelnen Farbflächen nicht überlappen, kommt es zu keinen Farbmischungen.

Bei der LED-Matrix Leuchte werden für die Farbbereiche des Straßenverkehrs vorsortierte Leuchtdioden eingebaut. Daher ist damit zu rechnen, daß bei dieser Leuchte die Farbwerte in erlaubten Bereichen liegen. Da hier jedoch die Farbflächen überlappen, werden nicht nur für alle Einzelmuster die Farbwerte gemessen, sondern auch für die in den Experimenten gezeigten überlappenden Fälle die resultierenden Farbwerte. Die Meßwerte sind in Anhang A.9.5 angegeben.

Durch Vergleich mit den geforderten Farbgrößen sieht man, daß alle einzelnen Muster, wie zu erwarten, den Anforderungen entsprechen. Bei überlappendem Betrieb ist dies jedoch nicht mehr der Fall. Bei Kombination von *led_blink* mit *led_licht_2* liegt die resultierende Farbe in keinem erlaubten Bereich, genauso, wie bei den Kombinationen *led_blink_2* mit *led_brems_4*, *led_brems_5* oder *led_brems_6*. Diese Farben sind also unzulässig. Die Kombination *led_blink* mit *led_brems_2* liegt im roten Farbbereich. Man kann also sagen, daß dieser Fall einen roten Fahrtrichtungsanzeiger darstellt.

Der Temperaturanstieg verursacht nur minimale Farbänderungen, die sich nicht störend auswirken. An dem bei der ersten Messung mit protokolliertem Helligkeitswert sieht man jedoch eine Abnahme der Lichtstärke durch die Temperaturerhöhung. Dieser Effekt ist in Abschnitt 3.7.3 genauer beschrieben und bei den Messungen (Abschnitt 3.8) ermittelt worden.

3.11 Leuchtdichten bei Fahrzeugleuchten

Die Leuchtdichte von Leuchten für Kraftfahrzeuge wird nicht durch das Gesetz festgelegt. In [ECE97] werden für das hintere Signalbild auch keine Vorgaben für die leuchtenden Flächen angegeben, durch die indirekt eine bestimmte Leuchtdichte gefordert würde.

Im Nahbereich spielt die Leuchtdichte, wie in Abschnitt 2.4 erläutert, eine große Rolle. Daher wird sie in den Experimenten berücksichtigt. Die Signalbilder *led_blink_2*, *led_brems_3* und *led_brems_4* sind so gestaltet, daß ihre Größe und ihre Lichtstärke, somit ihre Leuchtdichte, den durchschnittlichen Werten moderner Automobile entspricht.

Dazu wird auf die in [Rip01a, Bild 76] veröffentlichten Meßwerte zurückgegriffen. Diese geben die Lichtstärken und leuchtenden Flächen von 71 Leuchten von in den letzten zehn Jahren erstmals in

	Schlußleuchte	Bremsleuchte	Fahrtrichtungsanzeiger
Lichtstärke	8 cd	80 cd	150 cd
Fläche	7 000 mm ²	5 000 mm ²	5 000 mm ²
Leuchtdichte	1 143 cd/m ²	16 000 cd/m ²	30 000 cd/m ²

Tabelle 3.6: Werte mittlerer Rückleuchten laut [Rip01a]

Europa in den Verkehr gekommenen Personenkraftwagen an. Die durchschnittlichen Werte sind in Tabelle 3.6 zu sehen.

Wenn der Fahrtrichtungsanzeiger und die Bremsleuchte sowohl bei der Fläche als auch der Lichtstärke gleiche Werte aufweisen sollen, so ist für die Fläche 5 000 mm² zu wählen und für die Lichtstärke 115 cd. Zur Programmierung der LED-Matrix Leuchte für die Muster gleicher Leuchtdichte wird die nächstmögliche Lichtstärke mit ca. 100 cd gewählt. Da die Flächen für Schlußleuchte, Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger gleich groß sein sollen, wird als Fläche ca. 7 000 mm² gewählt. Damit ergibt sich die Leuchtdichte zu ca. 14 000 cd/m². Lichtstärken, leuchtende Flächen und Leuchtdichten aller Leuchten, die in den Experimenten benutzt werden, sind in Anhang A.9 angegeben.

[Arm01] hat 254 Leuchten im Straßenverkehr untersucht und die in Tabelle 3.7 angegebenen Werte erhalten. Diese Lichtstärken sind geringer, da sie im Straßenverkehr gemessen worden sind. Die Leuchten sind mehr oder weniger stark verdreckt und teilweise wesentlich ältere Modelle, als die bei [Rip01a] vermessenen.

	Schlußleuchte	Bremsleuchte
Lichtstärke	4,8 cd	43 cd
Fläche	9 200 mm ²	5 600 mm ²
Leuchtdichte	480 cd/m ²	6 700 cd/m ²

Tabelle 3.7: Werte mittlerer Rückleuchten laut [Arm01]

3.12 Ansprechzeiten der Leuchten

Beide für den Versuch ausgewählte Leuchten sind mit Leuchtdioden bestückt. Da so die Technologie der Lichterzeugung gleich ist, ist zu erwarten daß die Ansprechzeiten der einzelnen Signaltbilder gleich sind. Allerdings zeigen die ersten Tests des Fahrstandes, daß dies ein Trugschluß ist. Die Signaltbilder der LED-Matrix Leuchte werden durch einen Microcontroller generiert. Dieser fragt in kleinen Zeitintervallen die Eingangsports der LED-Matrix Leuchte ab, um zu erfahren, welche Muster angezeigt werden sollen. Die Anzeige der Muster erfolgt nicht Interrupt gesteuert, wie technisch sinnvoll gewesen wäre. Dadurch ist die Ansprechzeit der LED-Matrix Leuchte größer, als die der konventionellen Leuchte.

Dies muß bei dem Vergleich mit anderen Experimenten berücksichtigt werden, da dort die Ansprechzeiten der Leuchten eher den Werten der konventionellen Leuchte entsprechen, sofern es sich um mit Leuchtdioden bestückte Leuchten handelt.

3.12.1 Vergleichsversuch

Um den Wert dieser Zeitverzögerung zu erfahren, wird mit fünf Versuchspersonen ein Vergleichstest durchgeführt. Bei diesem Test wird als erstes Signaltbild *licht* und als zweites Signaltbild eine

Kombination aus *led_licht* und *led_licht_2* dem Probanden angeboten. Die beiden Signalbilder sind in Bild 3.4 dargestellt.

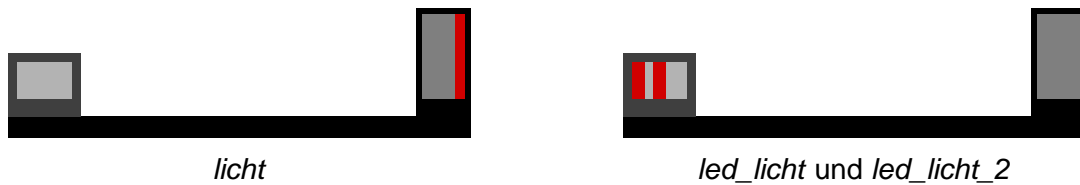


Bild 3.4: Signalbilder des Vergleichversuches

Jedes Signalbild wird mehrmals hintereinander gezeigt. Sobald ein Signal aufleuchtet, muß die Versuchsperson einen Schalter betätigen. Dies ist immer der gleiche, unabhängig davon, welches der beiden Signalbild dargeboten wird. Vor und nach dem gesamten Test wird die in Abschnitt 4.7 erläuterte Referenzaufgabe durchgeführt.

Die Meßwerte sind in Anhang A.9.3 einzusehen. Diagramm 3.1 zeigt ein Beispiel.

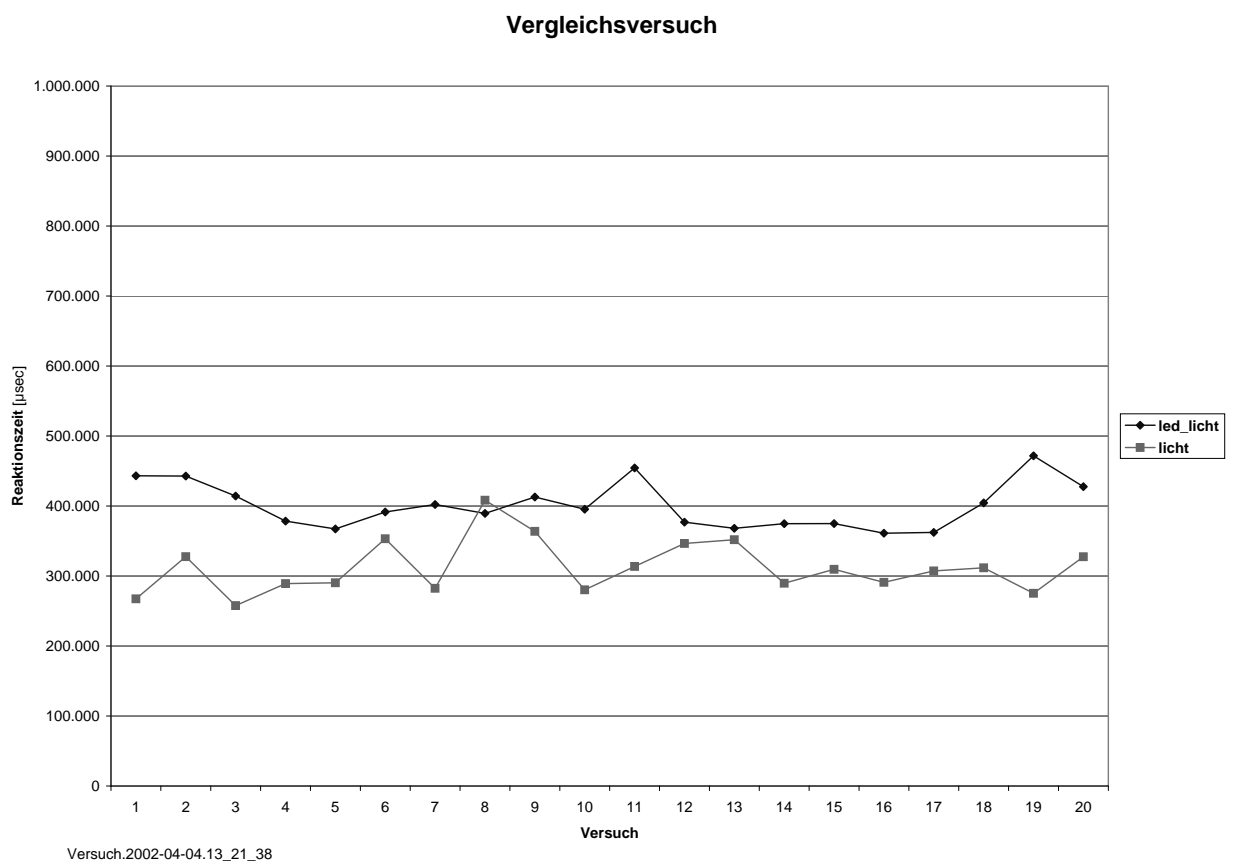


Diagramm 3.1: Beispiel für Meßwerte des Vergleichversuches

In diesem Beispiel sind zwei Meßkurven zu sehen. Die graue, beziehungsweise mit Quadraten gekennzeichnete Kurve zeigt die einzelnen Reaktionszeiten, die sich bei Anbietung eines Signales (*licht*) der konventionellen Leuchte ergeben. Die schwarze, mit Rauten markierte Kurve verbindet die Meßwerte für die mit der LED-Matrix Leuchte angebotenen Signale *led_licht* und *led_licht_2*, im Diagramm einfach *led_licht* genannt. Auf der Ordinate ist die Reaktionszeit der Versuchsperson in Microsekunden aufgetragen. (Diese Genauigkeit wird für alle Meßkurven gewählt, um zu

verdeutlichen, daß die ermittelten Zeiten *harte* Zeiten sind, gemessen durch das Steuergerät, und nicht durch Software ermittelte *weiche* Zeiten mit eventuellen Abweichungen.) Die meisten Meßwerte von *licht* liegen deutlich unterhalb der mit der LED-Matrix Leuchte ermittelten. (Obwohl die Meßkurven zum besseren Vergleich übereinander liegen, werden die Meßwerte hintereinander ermittelt.) Die Testpersonen reagieren also auf das Signal dieser Leuchte langsamer. Bei beiden Leuchten wird zeitgleich das entsprechende Signalmuster eingeschaltet. Die Leuchtdichten sind annähernd die gleichen. Man kann davon ausgehen, daß die Testpersonen auf beide aufleuchtenden Lichter gleichschnell reagieren. Daher ist der Unterschied der Reaktionszeiten auf die Verarbeitungszeit des Microcontrollers zurückzuführen.

Insgesamt ergeben sich 420 Meßwerte, wovon fünf Werte als ungültig erkannt und daher entfernt werden, da sie eindeutig aufgrund zwischenzeitlich fehlender Konzentration der Versuchsperson viel zu groß sind. Die ungültigen Werte sind in den Meßwert-Diagrammen in Anhang A.9.3 als sehr kleine Punkte gekennzeichnet.

3.12.2 Ermittelter Korrekturwert

Mit den 415 gültigen Meßwerten ergibt sich eine durchschnittliche Verzögerungszeit von 78,6 msek mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 0,001 %. Dies ist ca. 1000 mal so lang, wie die Ansprechzeit einer einzelnen Leuchtdiode. Diese beträgt laut Olson [Ols96] nur 60 nsec.

Die Ansprechzeit (Zeitdauer von 0 % bis 90 % Intensität) von Glühlampen beträgt einige zehntel Sekunden. (Bei [Ols96] wird von 140 msek ausgegangen, bei [KKN02] von mindestens 200 msek.) Die Ansprechzeit der LED-Matrix Leuchte ist somit zwar immer noch kürzer, als die einer Glühlampe, jedoch entschieden länger als die der konventionellen Leuchte.

Jedoch ist die Zeitverzögerung konstant. Somit sind die an der LED-Matrix Leuchte ermittelten Reaktionszeiten untereinander vergleichbar. Jedoch muß bei Vergleichen zu den absoluten Reaktionszeiten bei der konventionellen Leuchte oder zu anderen Experimenten diese Zeitverzögerung mit berücksichtigt werden. Von den gemessenen Werten muß daher der Korrekturwert von ca. 80 msek abgezogen werden.

3.13 Fahrzeugumriß als Fahrzeuersatz

Den Versuchspersonen werden Signalbilder von zwei Rückleuchteneinheiten angeboten. Je nach dargebotenem Signalbild müssen sie unterschiedlich reagieren. Damit die Darbietung etwas weniger abstrakt für die Teilnehmer des Versuchs ist, werden die beiden Leuchten an einem Fahrzeugumriß angebracht.

3.13.1 Typische Abmessungen von Kraftfahrzeugen

Dazu wird bei ca. 20 Fahrzeugen die Heckbreite, die Höhe der Leuchtenmitten und der Abstand der Leuchtenmitten von rechter zu linker Leuchte vermessen. Die Mittelwerte werden überschlägig berechnet. Der Mittelwert der Heckbreite stimmt mit dem entsprechenden Wert in [Arm01] überein, die anderen beiden Werte finden sich dort nicht. Diese Abmessungen werden ergänzt durch die Maße für Reifenbreite, Unterbodenfreiheit und Fahrzeughöhe aus [Arm01]. Dort sind 100 Fahrzeuge vermessen und die Mittelwerte berechnet worden.

Bezeichnung	Maß [cm]
Heckbreite	160
Abstand der Leuchtenmitten	120
Höhe der Leuchtenmitten	75
Reifenbreite	20
Unterbodenfreiheit	20
Fahrzeughöhe	140

Tabelle 3.8: Fahrzeugabmessungen

Anhand der Werte aus Tabelle 3.8 wird der Fahrzeugumriß entworfen. Ein schwarzer Umriß befindet sich vor einem weißen Fahrzeughintergrund. Dadurch entsteht ein Kontrast von 1: 15. (Die entsprechenden Leuchtdichten sind in Abschnitt 3.13.2 angegeben.) So wird der Fahrzeugumriß gut erkannt und die Fahrzeugleuchten heben sich gut von ihrer dunklen Umgebung ab. Der Kontrast zwischen den einzelnen Signalbildern beträgt bis zu 1: 40. Hinter der Silhouette wiederum befindet sich die schwarze Hallenwand. Der Hallenfußboden ist dunkelgrau gefärbt.

In Bild 3.5 sind die einzelnen Maße des Aufbaus einzusehen. Alle Werte sind in Millimetern angegeben und maßstabsgetreu eingezeichnet. Außerhalb des weißen Fahrzeughintergrundes befindet sich die Hallenwand, die im Bild nicht mehr eingezeichnet ist. Das weiße Kreuz gibt den Auftreffpunkt des axialen Sehstrahls der Versuchsperson an und ist im realen Umriß nicht vorhanden.

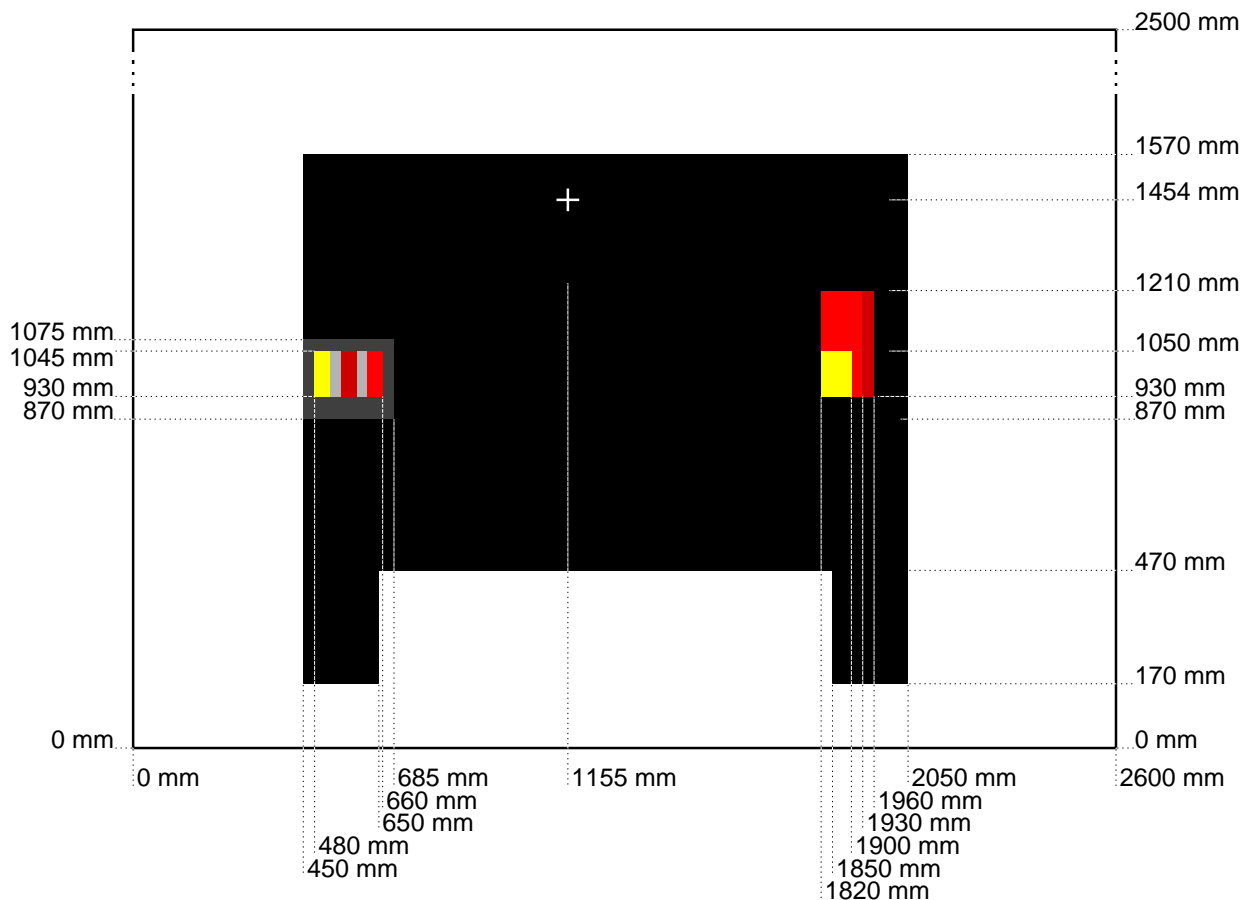


Bild 3.5: Fahrzeugumriß

Ein Vergleich der Ergebnisse der Versuche bei [Arm01] und der hier vorgestellten wird dadurch erleichtert, daß für den dortigen Versuchsaufbau ähnliche Abmessungen, wie hier, benutzt worden sind:

Die Unterkante der Leuchten befindet sich in 80 cm Höhe, der Abstand zwischen den Leuchten beträgt 115 cm. Die leuchtenden Flächen messen dort 10 auf 10 cm ($\approx 10\,000\text{ mm}^2$).

Bei den schon erwähnten Untersuchungen von [Rip01a] wird die mittlere leuchtende Fläche mit $5\,000\text{ mm}^2$ angegeben.

Für diese Experimente wird für die meisten Muster der LED-Matrix Leuchte ungefähr die Mitte dieser beiden Werte gewählt. Damit beträgt die Fläche eines Musters ca. $7\,000\text{ mm}^2$. Die genauen Größen finden sich auf Seite 98.

3.13.2 Leuchtdichten der Umrißteile

Als weitere Leuchte wird im Versuch eine grüne Ampel eingesetzt. Diese befindet sich rechts neben dem Fahrzeugumriß, sozusagen am Straßenrand. Der Punkt mit der größten Leuchtdichte auf der grünen Abschlußscheibe besitzt $7\,000\text{ cd/m}^2$.

Die gesamte Fahrzeugfläche einschließlich Hintergrund wird von zwei Quecksilberhochdrucklampen in einem Lampengehäuse beleuchtet (*Vorfelddbeleuchtung* genannt), die eine Leuchtdichte von 450 cd/m^2 auf dem Fahrzeughintergrund erzeugen. Auf dem Fahrzeugumriß werden 30 cd/m^2 erreicht. Alle gemessenen Leuchtdichten sind in Abschnitt A.9.6 dokumentiert.

Eine Draufsicht auf den gesamten Versuchsaufbau stellt die Skizze in Bild 3.6 dar. Sie dient jedoch nur zur Orientierung und ist nicht maßstäblich. Das Lampengehäuse zur Vorfelddbeleuchtung ist niedrig genug, so daß sich der Versuchsperson von ihrem Sitzplatz im Fahrstand ein freier Blick auf die Fahrzeugsilhouette bietet.

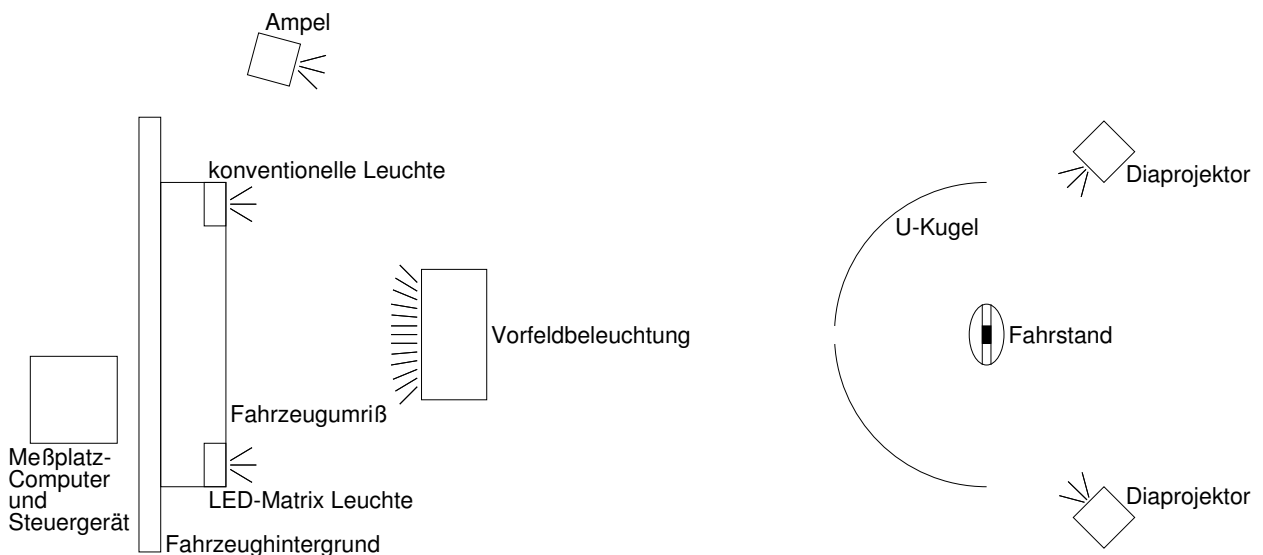


Bild 3.6: Draufsicht

3.14 Fahrstand

3.14.1 Bedienelemente für die Versuchsperson

Während der Versuchsdurchführung befinden sich die Augen der Versuchsperson in einer Entfernung von 25 m zu den am Fahrzeugumriß angebrachten Rückleuchten. Hier ist der Fahrstand aufgebaut, der aus einem höhenverstellbaren Stuhl, einem höhenverstellbaren Lenkrad mit Schalthebeln für Fahrtrichtungsanzeiger, Scheinwerfer und Beleuchtung und Gas- und Bremspedal besteht. Die Bedienelemente sind einem realen Fahrzeug (Audi 100) entnommen, jedoch leicht modifiziert, so daß die Höhe für jede Versuchsperson angepaßt werden kann.

Der Fahrstand ist in eine Hälfte einer Ulbrichtkugel eingebaut, die mit zwei Diaprojektoren ausgeleuchtet wird. (Die Anordnung kann in Bild 3.6 eingesehen werden.) An vorderster Stelle befindet sich eine rechteckige Öffnung in der Halbkugel, die den Blick auf die Leuchten freigibt. (Siehe Bild 3.7) Die Versuchsperson sitzt auf dem Stuhl, ihre Füße bedienen die Pedale, sie kann Lenken und die am Lenkradhals angebrachten Schalter betätigen, ihre Augen befinden sich in Höhe der rechteckigen Öffnung. Das schwarze Kreuz im Sichtfenster gibt die Augenmitte an. Die Versuchsperson blickt auf den Fahrzeugumriß. Dort ist der Auftreffpunkt des axialen Sehstrahls mit einem weißen Kreuz markiert (Bild 3.5).

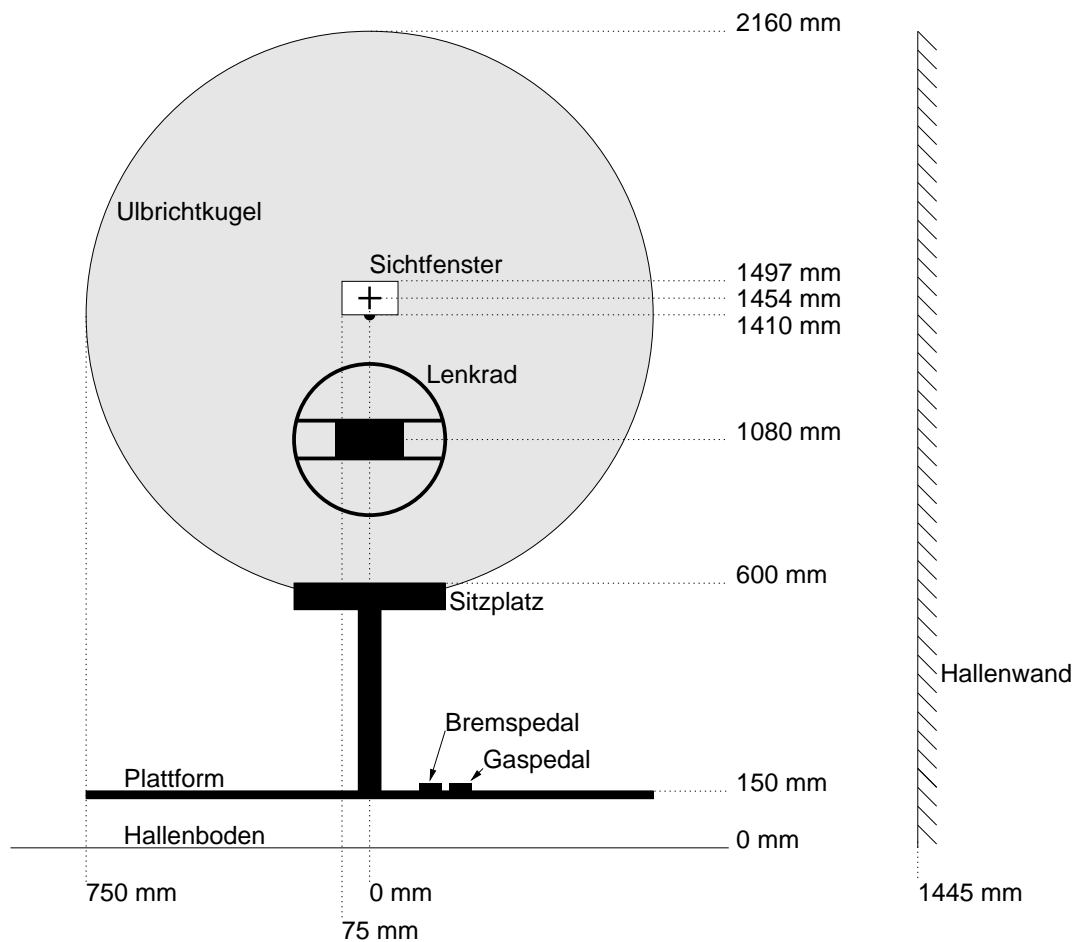


Bild 3.7: Fahrstand

3.14.2 Adaption der Versuchsperson durch die Umfeldleuchtdichte

Bei der Beleuchtung wird darauf geachtet, mit möglichst einfarbigem, weißen Licht gleichmäßig die Halbkugel auszuleuchten. Dazu werden die Objektive aus den Diaprojektoren entfernt, da durch deren Linsen an den Rändern der ausgeleuchteten Flächen Farbflecken auftreten. Die Augen der Versuchspersonen adaptieren auf die in der U-Kugel herrschende Umfeldleuchtdichte von $L_U > 2000 \text{ cd/m}^2$ (siehe Anhang A.9.6). Die Augen adaptieren somit auf photopisches Sehen, Tagessehen, da dies laut Hentschel [Hen94] schon ab 3 cd/m^2 vorliegt. Dies wird so auf Seite 12 gefordert.

Häufig werden bei Experimenten, die für den Tag- und Nachtfall durchgeführt werden, Leuchtdichten größer 100 cd/m^2 für den Tagfall gewählt. Bei einem gleichmäßig bedeckten Himmel beträgt die Leuchtdichte 5000 cd/m^2 . Da Fahrzeugleuchten jedoch nicht den Himmel als Hintergrund haben, sollte die gewählte Umfeldleuchtdichte geringer sein. Bei [Arm01] wird für das Umfeld 200 cd/m^2 gewählt und für die Straße 20 cd/m^2 . Die Umfeldleuchtdichte von 2000 cd/m^2 ist so groß gewählt, damit kein Verhältnis von über 1:100 zwischen Umfeld und Bremsleuchten auftritt. Dies wäre bei einer Leuchtdichte von nur 100 cd/m^2 der Fall. Durch diese Beschränkung des Kontrastes wird erreicht, daß sich die Versuchsperson nicht durch die Signallichter geblendet fühlt.

Als weitere Lichtquellen werden die Deckenleuchten über der gesamten Versuchsstrecke eingeschaltet, die den dunkelgrauen Hallenboden etwas beleuchten. Alle möglichen Blendlichtquellen werden ausgeschaltet. Reflektierende Gegenstände, an denen sich eventuell Teile der Rückleuchten spiegeln können, werden entfernt oder abgedeckt.

3.15 Steuergerät und Meßcomputer

Der Ablauf des Versuches wird mit einem Computer kontrolliert. Dieser ist an ein Steuergerät angeschlossen, das die Schalterstellungen im Fahrstand abfragt und die Signalbilder ein- und ausschaltet. Dieses Gerät ist von mir während meiner Zeit als wissenschaftliche Hilfskraft am lichttechnischen Institut entwickelt und aufgebaut worden. Bild 3.8 zeigt die verschiedenen Funktionseinheiten, die mit dem Steuergerät verbunden sind.

3.15.1 Kabelverbindungen

Das Steuergerät verfügt über eine serielle Verbindung zum Computer. Diese ist mit *RS232 (PC)* auf der Frontplatte des Steuergerätes beschriftet. Die seriellen Signale werden im *LINK (Leuchte)* – Kabel an die LED-Matrix Leuchte ohne Änderung weitergereicht.

Weiterhin besteht eine 64 bittige (32 Bit in, 32 Bit out) parallele Verbindung vom Steuergerät zur IO-Karte von Wasco im Computer. Diese ist mit *LINK (PC)* auf der Frontplatte des Steuergerätes bezeichnet.

Vom Steuergerät über die mit *LINK (Fahrstand)* gekennzeichnete Buchse wird eine Verbindung zum Fahrstand erstellt. Hierüber werden die Lichtschranken am Lenkrad mit Strom versorgt und die Zustände der Schalter und Pedale abgefragt.

Die mit *Autoleuchte* bezeichnete Buchse versorgt die konventionelle Leuchte mit den Versorgungsspannungen für Schlußleuchte, Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger. Zudem ist die gemeinsame Masseleitung dieser Leuchten integriert. Die Versorgungsspannungen werden durch die *PLUS FET's* geschaltet, wobei ein Spannungsabfall von maximal 20 mV entsteht.

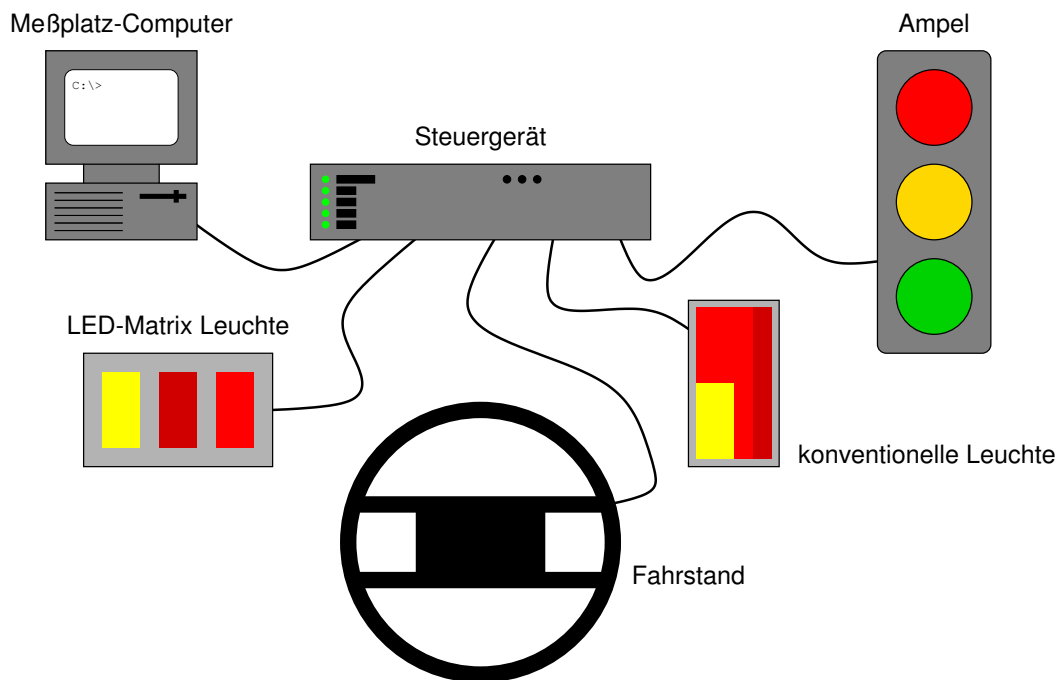


Bild 3.8: Mit dem Steuergerät verbundene Funktionseinheiten

Die Ampel wird derzeit über ein loses Kabel, das aus dem Gehäuse des Steuergerätes herausragt, angesteuert. Als Leuchtmittel wird eine 12 V Glühlampe vom Typ P21W benutzt.

Die Spannungsversorgung für das Steuergerät erfolgt über die rote (+13,5 V) und schwarze (Masse) Bananensteckerbuchse. An der weißen Buchse liegt eine stabilisierte 12 V Spannung zur Versorgung der LED-Matrix Leuchte an.

3.15.2 Innerer Aufbau des Steuergerätes

Im Inneren des Steuergerätes befinden sich zur Zeit vier Platinen. Für weitere vier ist noch Platz vorhanden.

Auf der Platine *Power-Board* (abgekürzt PB) befindet sich die Spannungsversorgung der Logik (5 V), die Optokoppler (Typ PC900V) für die Fahrstand- und Kontrollsignale, die Optokoppler (Typ CNX35) für die Musterschalter der LED-Matrix Leuchte und die *MASSE FET's*. Weiterhin sind noch acht DEBUG-LED's vorhanden.

Auf der Platine *Counter-Board* (abgekürzt CB) befinden sich die beiden Zähler mit unterstützender Logik und der Quarz-Zeitgeber.

Auf der Platine *FET-Board* (abgekürzt FB) befinden sich die PLUS FET's, das zugehörige Ansteuer-IC MAX 621 und die Optokoppler vom Typ PC900V, die diesen ansteuern. Auch die Spannungsversorgung für den Ansteuerbaustein ist hier platziert. Weiterhin befindet sich noch ein Teil der Logik für den zweiten Zähler auf dieser Platine. Schließlich sind auch die Relais zur Freischaltung der Ausgangsspannungen durch die Software hier platziert.

Auf der Platine *Update-Board* (abgekürzt UB) befindet sich die Spannungsversorgung (12 V) für die LED-Matrix Leuchte.

3.15.3 Software des Meßcomputers

Zur Bedienung des Steuergerätes wird die Software [reaktionszeit] benötigt. Mit ihr können die verschiedenen Muster der LED-Matrix Leuchte ausgelesen, verändert und geschaltet werden. Die verschiedenen Signale der konventionellen Leuchte und die Ampel können ein- und ausgeschaltet werden. Für die Durchführung der Experimente ist die Software um verschiedene Funktionen zur Behandlung der besonderen Probleme bei Überlappung erweitert worden. So ist ein zweiter Zähler hinzugefügt worden und etliche Funktionen, die der genauen Protokollierung des Versuchsablaufes dienen. Zu dieser Software existiert eine eigene Beschreibung [Kli02c]. Die zur Durchführung von Experimenten nötigen Schritte werden in Abschnitt 4.2 erklärt.

3.15.4 Messung der Reaktionszeit

Per Software wird mit einem einzigen Port-Befehl das gewünschte Signalbild eingeschaltet und gleichzeitig der zugehörige Zähler gestartet. Somit werden Zeitunterschiede vermieden, die eventuell durch das nicht echtzeitfähige Betriebssystem entstehen können. Die im Steuergerät vorhandene Logik sorgt auch für das zeitgerechte Anhalten des Zählers. Betätigt die Versuchsperson nach Aufleuchten des Signalbildes einen Schalter, so wird dadurch sofort der Zähler gestoppt, da die Eingänge vom Fahrstand direkt mit den Steuerregistern der Zähler verbunden sind. Durch diesen Aufbau wird eine Genauigkeit von einer viertel Mikrosekunde bei der Zeitmessung erreicht. Die Software des Computers fragt in kleinen Zeitintervallen die Zustände der Zähler ab und übernimmt sie erst, wenn sie gestoppt worden sind. Durch dieses Vorgehen wird die ermittelte Zeit nicht verfälscht.

3.16 Protokoll der Versuchsdurchführung

Für jede Versuchsdurchführung wird eine Protokolldatei angelegt. Der Dateiname wird aus Datum und Uhrzeit des Versuchsbeginns gebildet.

Die Protokolldatei wird nach Versuchsende ausgewertet, indem die einzelnen Meßwerte sortiert und klassifiziert werden. So entstehen Meßwertgruppen für jeden Fall der Überlappung. (In Abschnitt 3.17 stehen weitere Einzelheiten über jeden dieser Fälle.) In jeder Gruppe werden die Mittelwerte für den überlappenden und den nicht überlappenden Teil ermittelt. Die Differenz der Mittelwerte wird gebildet. Daraufhin wird mit Hilfe des *t-Testes* die Irrtumswahrscheinlichkeit errechnet, die angibt, ob der Unterschied signifikant ist.

3.16.1 Referenzwerte jeder Durchführung

Um Änderungen in der Reaktionszeit während des Versuchsverlaufes feststellen zu können, wird vor und nach der Durchführung ein Referenztest mit der Versuchsperson durchgeführt. Der Unterschied der Reaktionszeiten dieser beiden Referenztests wird errechnet. Die Signifikanz des Unterschiedes, die Irrtumswahrscheinlichkeit dafür, daß es keinen Unterschied ist, wird mit Hilfe des *t-Testes* ermittelt. Wenn eine signifikante Verlängerung der Reaktionszeit zwischen den beiden Referenzaufgaben vorliegt, bedeutet dies, daß die Versuchsperson während des Experimentes ermüdet ist.

Der Mittelwert der Reaktionszeiten aller gültigen Meßwerte während dem Versuchsverlauf wird errechnet. Dieser Wert läßt Rückschlüsse auf die Kondition der Versuchsperson zu.

3.16.2 Bereinigte Werte in den Diagrammen

Bei einigen Tabellen sind in der Spalte "*bereinigt*" Werte angegeben. Diese werden folgendermaßen ermittelt:

Wenn ein einzelner Meßwert eindeutig eine zu große Abweichung von den anderen Werten der Gruppe hat, wird dieser Meßwert nicht zu der Mittelwertbildung, und somit auch nicht zu der Berechnung der Differenz und der Irrtumswahrscheinlichkeit benutzt. Ein Meßwert wird dann als eindeutig fehlerhaft bewertet, wenn die Reaktionszeit 500 msek länger, als die durchschnittliche Reaktionszeit der Meßwert-Gruppe und die Streuung der Gruppe kleiner als 500 msek ist. Er wird als *falsche Reaktion* betrachtet. Um dies Vorgehen transparent zu gestalten, wird jeder so ignorierte Meßwert in dem jeweiligen Diagramm mit einem dünnen anstelle eines dicken Punktes gekennzeichnet.

Die Auswertung (Abschnitt 5.4) der Versuche wird mit diesen "*bereinigten*" Werten durchgeführt.

3.16.3 Falsche Reaktionen der Versuchspersonen

Da die Versuchspersonen nicht auf jede Signaldarbietung korrekt reagieren, ergeben sich auch falsche Reaktionen. Diese sind in einer eigenen Tabelle zusammengefaßt.

Darin finden sich unter anderem Signale, die nicht schnell genug erkannt werden, gekennzeichnet durch eine "0" für die Reaktionszeit und den Zusatz "Zu lange gewartet". Nach 5 Sekunden sollte die Versuchsperson reagiert haben. Wird diese Zeit überschritten, so gilt das Zeichen als nicht erkannt. Bei [Ols96] beträgt diese Wartezeit nur 3 Sekunden. Da der hier vorliegende Versuch jedoch komplexer ist, wird den Probanden mehr Zeit eingeräumt. Die derzeitige Version der Software unterstützt die Anzeige des Unterschiedes dieser Fehlreaktion und der im folgenden beschriebenen noch nicht, da dies nicht vordringlich ist. Auch in anderen Untersuchungen werden oft irrtümliche und übersehene Fehler nicht getrennt behandelt. Dieses Vorgehen ist zum Beispiel bei Kokoschka [Kok99] erwähnt.

Eine weitere Form der Fehlreaktion ist das falsche Erkennen eines Signals. Dieser Fall liegt vor, wenn zum Beispiel eine Bremsleuchte als Schlußleuchte erkannt wird oder umgekehrt. Diese Fehlreaktion geschieht häufig aus Unkonzentriertheit der Versuchsperson. Wenn jedoch die verschiedenen Signalbilder nicht genug aussagekräftig sind, so deutet diese Fehlreaktion auf einen systematischen Fehler hin. Daher wird bei der Versuchsplanung darauf geachtet, zu keinen Mißdeutungen Anlaß zu geben. (Die zweite Serie von Experimenten wird daher so ausgelegt, daß in der Reaktion nicht zwischen den Signalfunktionen Bremsleuchte und Schlußleuchte zu unterscheiden ist, da ein dargebotenes Signalbild der Bremsleuchte eventuell als Schlußleuchte gedeutet werden könnte.)

Ein häufig auftretender Fehler ist auch das Verwechseln von links und rechts. Wenn zum Beispiel der rechte Fahrtrichtungsanzeiger dargeboten wird und die Versuchsperson fälschlicherweise nach links blinkt. Diese Fehlreaktion ist mit dem Zusatz "rechts und links vertauscht" versehen. Erklärbar ist dieses Verhalten damit, daß bei der konventionellen Leuchte der Fahrtrichtungsanzeiger links vom Brems- und Schlußlicht angeordnet ist, obwohl es eine rechte Leuchteneinheit ist. Diese Plazierung verleitet zu Fehlreaktionen.

Wenn die Versuchsperson zu langsam vom Gaspedal auf das Bremspedal wechselt, wird dies auch als Fehlreaktion gewertet. Dies ist damit zu begründen, daß die ursprüngliche Reaktionszeit (die Zeitdauer von der Signaldarbietung bis zu dem Entfernen des Fußes von dem Gaspedal)

durch eine *Bedenkzeit* verlängert wird. Bei den anderen Reaktionsarten (Betätigen eines Schalters) gibt es keine Bedenkzeit. Die Fehlreaktion wird mit dem Zusatz "zu langsam von Gas zu Bremse gewechselt" versehen.

3.16.4 Aussagen der Meßwerte

Für jede Versuchsdurchführung wird eine Tabelle mit allen berechneten Werten erstellt.

Eine weitere Tabelle enthält alle *falschen Reaktionen* der jeweiligen Versuchsperson.

Zu jeder Gruppe von Meßwerten wird ein Diagramm erstellt. Um den Vergleich zwischen den verschiedenen Fällen zu erleichtern, sind alle Diagramme gleich skaliert.

Um Verwechslungen auszuschließen, ist weiterhin an jeder Tabelle und jedem Diagramm der Name der ursprünglichen Protokolldatei vermerkt.

In einem gesonderten Band [Kli02a] sind die Tabellen und Diagramme sämtlicher Versuchsdurchführungen dokumentiert. Als Beispiel wird im folgenden Diagramm 3.2 dargestellt.

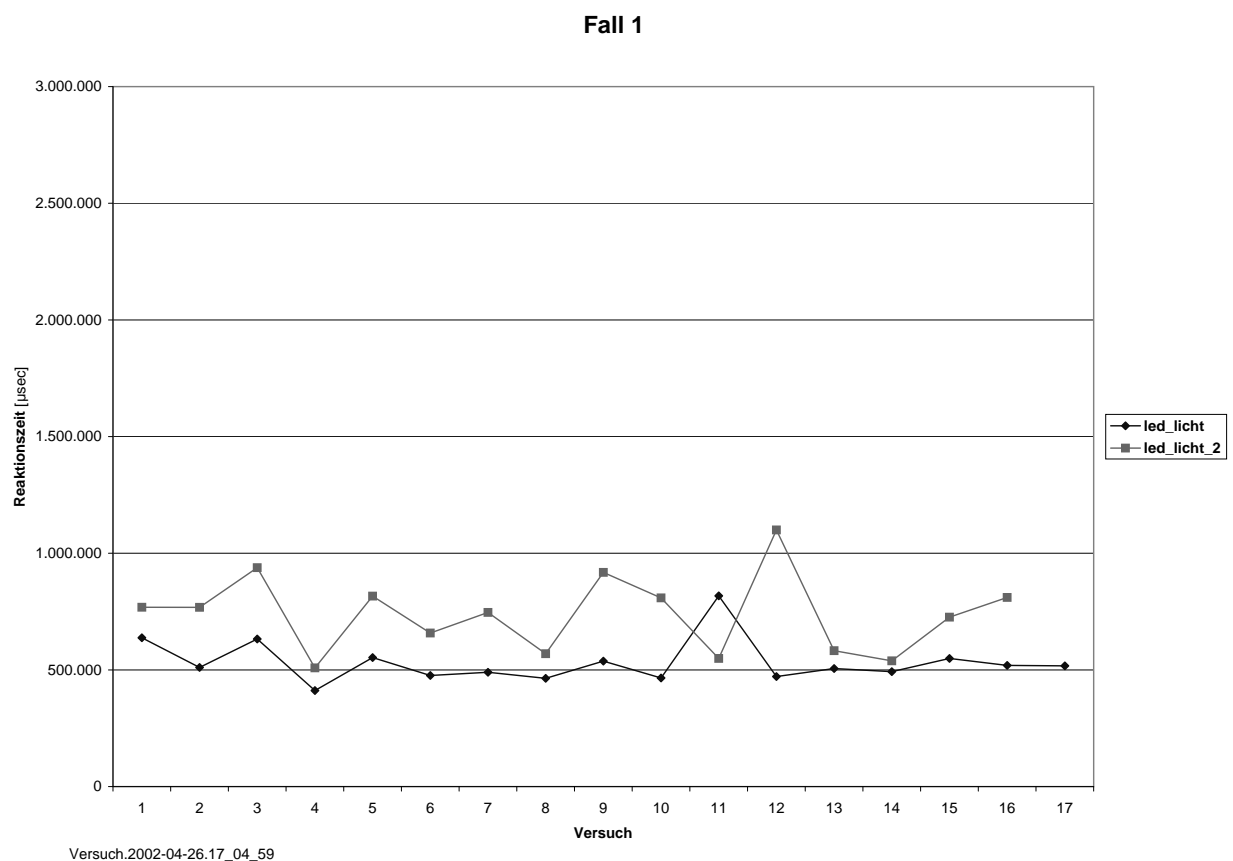


Diagramm 3.2: Beispiel für Fall 1 (Überlappung bei Schlußleuchten)

In den Diagrammen ist die Reaktionszeit der Testperson über der Nummer der Einzelversuche aufgetragen. Es sind zwei Meßkurven zu sehen. Die mit Rauten markierten Punkte auf der schwarzen Linie geben die Reaktionszeiten im nicht überlappenden Betrieb (*led_licht*) an, die graue, mit Quadraten gekennzeichnete Linie verbindet die Reaktionszeiten im überlappenden Betrieb

(*led_licht_2*). Mit der Anzahl der Punkte pro Meßkurve wird im Diagramm angegeben, wieviel Meßwerte pro Leuchte ermittelt worden sind. Die Mindestanzahl hierfür beträgt fünf.

In diesem Beispiel befindet sich die graue Kurve fast immer oberhalb (längere Reaktionszeit) der schwarzen. Daran ist abzulesen, daß im überlappenden Fall die Reaktionszeit bei dieser Versuchsdurchführung langsamer war. Die durchschnittliche Reaktionszeit der beiden Meßkurven ist in Tabelle 3.9 in den Zeilen *Fall 1a* und *Fall 1b* angegeben. In der darauf folgenden Zeile (*Unterschied*) ist die mittlere Differenz der beiden Meßkurven angegeben. Sie stellt den Unterschied zwischen den beiden Mittelwerten dar und ist vorzeichenlos angegeben. In diesem Beispiel beträgt die durch die Überlappung verursachte Änderung der Reaktionszeit 205 msec. Ob der Zeitunterschied zwischen dem nicht überlappenden und dem überlappenden Fall signifikant ist, ist der Spalte *Irrtumswahrscheinlichkeit* zu entnehmen.

Versuchsperson 1

Mittelwerte:		Irrtumswahrscheinlichkeit:	bereinigt:
Referenz a	320.356	42,08%	
Referenz e	370.772		
Unterschied	50.416		
alle Werte	597.751		
Fall 1a	532.460	0,02%	
Fall 1b	737.899		
Unterschied	205.438		
Fall 2a	443.134	90,38%	
Fall 2b	447.423		
Unterschied	4.289		
Fall 3a	591.604	20,87%	
Fall 3b	743.797		
Unterschied	152.193		
Fall 4a	557.065	1,16%	
Fall 4b	1.162.868		
Unterschied	605.803		

Versuch.2002-04-26.17_04_59

Tabelle 3.9: Beispiel einer Tabelle mit berechneten Werten

In Tabelle 3.9 ist als Irrtumswahrscheinlichkeit für Fall 1 0,02 % angegeben. Der errechnete Unterschied von 205 Millisekunden ist demnach signifikant, da der Fehler kleiner 5 % ist.

Die Auswertung des Referenztestes läßt keine Aussage über die Ermüdung der Versuchsperson zu, da die Irrtumswahrscheinlichkeit zu groß ist. Sie liegt nahe 50 % und läßt daher weder den Schluß zu, daß ein Unterschied vorliegt, noch, daß kein Unterschied vorliegt. Es kann einfach nichts ausgesagt werden.

Wäre die Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 5 %, die Reaktionszeit hätte sich folglich definitiv von *Referenz a* zu *Referenz e* verlängert, so würde dies bedeuten, daß die Testperson ermüdet ist. Die Ermüdung wäre nur gering, da der Unterschied gerade mal 50 msec beträgt.

Wäre die Irrtumswahrscheinlichkeit, daß ein Unterschied vorliegt, in der Tabelle größer 95 % und damit die Irrtumswahrscheinlichkeit, daß kein Unterschied vorliegt, kleiner 5 %, so würde die Aussage lauten: Es liegt kein Unterschied vor. (Der angegebene Wert bei Unterschied wäre durch die Streuung der Ergebnisse trotzdem von null verschieden.)

Versuchsperson 3

Mittelwerte:		Irrtumswahrscheinlichkeit:		bereinigt:	
Referenz a	350.740	37,53%			
Referenz e	413.441				
Unterschied	62.701				
alle Werte	575.051				
Fall 1a	565.290	48,72%		468.670	0,43%
Fall 1b	645.925			645.925	
Unterschied	80.634			177.255	
Fall 2a	513.627	99,99%			
Fall 2b	513.617				
Unterschied	10				
Fall 3a	661.087	33,13%			
Fall 3b	581.296				
Unterschied	79.791				
Fall 4a	653.469	33,26%		653.469	76,21%
Fall 4b	992.133			686.109	
Unterschied	338.664			32.640	

Versuch.2002-05-10.14_34_55

Tabelle 3.10: Beispiel einer Tabelle mit bereinigten Werten

In Tabelle 3.10 ist ein Beispiel mit bereinigten Werten dargestellt. In Fall 1 wird der erste Wert im nicht überlappenden Fall bereinigt. (Das ist daran zu erkennen, daß dieser Meßpunkt kleiner, als die anderen, eingezeichnet ist [Diagramm 3.3].) Dadurch wird die Streuung der Meßwerte von *led_licht* so verringert, daß die Irrtumswahrscheinlichkeit von ca. 50 % auf unter 1 % sinkt.

Die Bereinigung der Meßwerte wird nur durchgeführt, wenn der jeweilige Meßwert eindeutig stark von den anderen abweicht. In diesem speziellen Fall ist der Anfangswert mehr als doppelt so groß, wie der Mittelwert der restlichen Meßwerte. Der Wert wird angepaßt, da glaubhaft begründet werden kann, daß dieser Wert eine Ausnahme darstellt. Die Versuchsperson ist sich beim ersten Auftreten des Signalbildes noch nicht ganz sicher, als welche Funktion es einzuordnen ist. Nachdem sie diese Entscheidung getroffen hat, reagiert sie. In den weiteren Fällen ist die Entscheidung schon getroffen, und die Versuchsperson reagiert sofort auf das Signalbild, mit fast gleicher Reaktionszeit. Der bereinigte Meßwert ist in Diagramm 3.3 zu sehen.

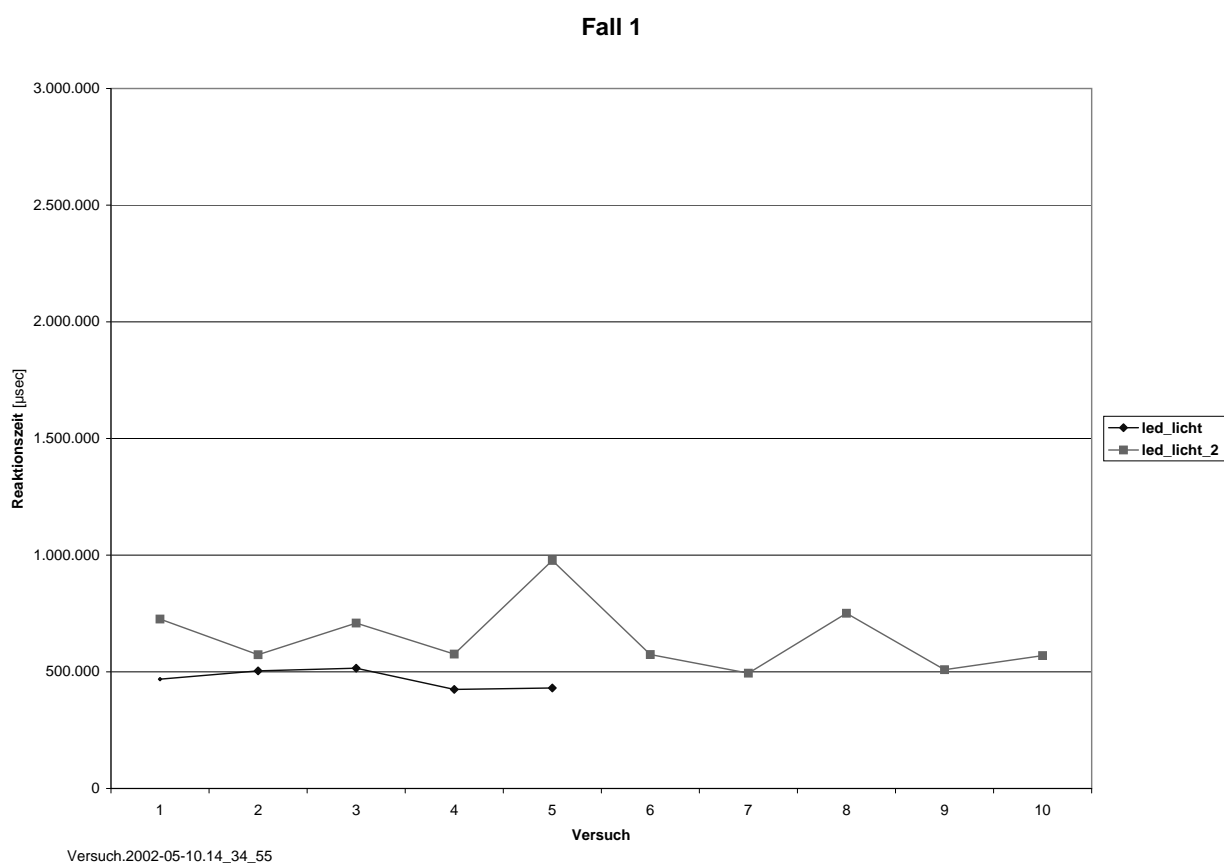


Diagramm 3.3: Beispiel für Fall 1 mit einem bereinigten Wert

3.17 Überlappung zweier Lichtsignale

3.17.1 Beispiel der zeitlichen Abfolge

Anhand der verschiedenen Kombinationen der Muster der LED-Matrix Leuchte können Aussagen getroffen werden, inwieweit die Überlappung die Reaktionszeit auf das als zweites erscheinende Signal beeinflusst.

Als Beispiel für die Möglichkeiten der zeitlichen Darbietung werden hier die Kombination der Schlußleuchten mit dem ersten Fahrtrichtungsanzeiger dargestellt:

- Zuerst *led_licht*, dann *led_blink*.
- Zuerst *led_licht_2*, dann *led_blink*.
- Zuerst *led_blink*, dann *led_licht*.
- Zuerst *led_blink*, dann *led_licht_2*.

Der erste Punkt beschreibt zwei normale Signalbilder im alltäglichen Gebrauch. Das Schlußlicht leuchtet. Der Fahrer möchte abbiegen und zeigt seine Absicht durch das Einschalten des Fahrtrichtungsanzeigers an. Dieser leuchtet neben der Schlußleuchte auf.

Der zweite Punkt beschreibt die gleiche Situation, jedoch überlappen die Flächen der beiden Leuchten vollständig. (Dieser Fall kann im heutigen Straßenverkehr meines Wissens nicht beobachtet werden. Die schon erwähnte Leuchteneinheit des VW Phaeton jedoch kommt diesem Fall sehr nahe, es liegt aber nur Teilüberlappung vor.)

Die bei Punkt drei und vier angegebene Situation bedeutet, daß der Fahrtrichtungsanzeiger eingeschaltet wird. Während dieser blinkt, wird das Schlußlicht dazu geschaltet. Dieser Fall ist im normalen Straßenverkehr höchst selten anzutreffen.

Wenn man diesen Fall abstrahiert, bedeutet er: Während der gelbe Fahrtrichtungsanzeiger intermittierend in Betrieb ist, wird ein rotes Signallicht eingeschaltet, dessen Lichtstärke und Leuchtdichte nur ein fünftel so groß ist, wie die des gelben Signallichtes. Wenn nur das Verhältnis der beiden Lichtstärken (oder der beiden Leuchtdichten) betrachtet wird, wird das rote Signal als Bremsleuchte mit fast minimaler Lichtstärke aufgefaßt und das gelbe Signal als Fahrtrichtungsanzeiger mit fast maximaler Lichtstärke.

Mit dieser Abstraktion bedeutet Punkt drei: Der Fahrer möchte abbiegen und zeigt seine Absicht durch das Einschalten des Fahrtrichtungsanzeigers an. Während der Fahrtrichtungsanzeiger blinkt wird nach einiger Zeit begonnen zu bremsen, so daß die Bremsleuchte aufleuchtet. Der Fahrtrichtungsanzeiger und das Bremslicht sind nebeneinander angeordnet.

In Punkt vier sind die beiden Leuchten vollständig überlappend angeordnet. Ansonsten entspricht diese Situation derjenigen in Punkt drei.

3.17.2 Planung der Experimente

Untersucht werden soll der Unterschied der Reaktionszeit zweier Lichtsignale unterschiedlicher Farbe. Daher ist in jedem zu untersuchenden Fall eines der beiden Muster ein Fahrtrichtungsanzeiger, das andere ein rotes Signallicht.

Es werden zwei unterschiedliche Experimente geplant. Denkbar und interessant sind weitaus mehr. Diese sollten Inhalt weiterer Arbeiten zu diesem Thema sein.

Im ersten Experiment haben alle Signalbilder gleich große Flächen. Da somit die Lichtstärke und die Leuchtdichte über einen festen Faktor miteinander verknüpft sind, verhalten sich die Verhältnisse der einzelnen Leuchtdichten zueinander genauso, wie die der einzelnen Lichtstärken.

Das Verhältnis der Leuchtdichten des Fahrtrichtungsanzeigers und der roten Lichtsignale soll sowohl 1:5, als auch 5:1 betragen. Es wird daher ein dunkelrotes und ein hellrotes Lichtsignal benötigt. Beide Lichtsignale müssen nicht überlappend und überlappend vorhanden sein. Das dunkle Signal wird durch *led_licht* und *led_licht_2* realisiert. Deren Leuchtdichte ist ca. ein fünftel so groß, wie die des Fahrtrichtungsanzeigers *led_blink*. Das helle Signal wird durch *led_brems* für den nicht überlappenden und *led_brems_2* für den überlappenden Fall realisiert. Diese Signallichter sind fünfmal so hell, wie der Fahrtrichtungsanzeiger.

Der Faktor fünf zwischen den Leuchtdichten, bzw. Lichtstärken, wird gewählt, da er in der [ECE97] als Mindestwert bei ineinanderggebauten Schlußleuchten mit Bremsleuchten, also überlappenden Flächen, festgelegt ist. Ein größerer Wert wird nicht gewählt, da mit dem gewählten alle Lichtstärken der ausgewählten Leuchten gerade noch innerhalb der gesetzlichen Grenzen liegen.

Im zweiten Experiment haben (fast) alle Signalbilder gleiche Leuchtdichten. Im ersten Teil des Experimentes hat das gelbe Signallicht die gleiche Größe und ca. gleiche Lichtstärke und Leuchtdichte, wie die roten Signallichter. Die Flächen aus dem ersten Experiment stimmen mit diesen Flächen überein. Der Faktor aus Experiment eins beträgt im zweiten Experiment also eins. Daher stellt der erste Teil eine Erweiterung von Experiment eins dar. Er dient aber auch als Vergleichsgrundlage für den zweiten Teil.

In Experiment zwei wird Teilüberlappung untersucht. Dafür werden zwei rote Signalbilder gestaltet, die die doppelte Fläche des Fahrtrichtungsanzeigers haben. Das eine Signallicht hat darüber hinaus auch die gleiche Leuchtdichte, und damit die doppelte Lichtstärke. Das andere rote Signallicht hat die gleiche Lichtstärke und somit nur die halbe Leuchtdichte, wie das gelbe Signallicht. Als Vergleichsgrundlage liegt ferner das rote Signallicht aus Teil eins mit gleicher Leuchtdichte, Lichtstärke und Fläche, wie der Fahrtrichtungsanzeiger vor.

3.17.3 Entwurf der Signalbilder

Aufgrund der oben genannten Überlegungen werden zehn verschiedene Muster für die LED-Matrix Leuchte entworfen. Diese Signalbilder sind in Bild 3.9 dargestellt. Weiterhin sind dort auch die drei Signalbilder der konventionellen Leuchte abgebildet. Die Bezeichnungen aller Signalbilder sind in Tabelle 3.1 beschrieben.

Die an der rechten Seite des Autoumrisses montierte Leuchte ist in Abschnitt 3.5.3 als *konventionelle Leuchte* bezeichnet worden. Diese hintere Leuchteneinheit ist im Cadillac GMX 270 (Cadillac DeVille) von GM eingebaut [Gut99]. Für die Versuche wird der Fahrtrichtungsanzeiger der Leuchte mit *blink* bezeichnet, die Schlußleuchte mit *licht* und die Bremsleuchte mit *brems*.

Die linke Leuchte, bezeichnet mit *LED-Matrix Leuchte*, ist der von der Firma Hella hergestellte Prototyp. Bei dieser Leuchte kann für jedes Signalbild ein individuelles Muster programmiert werden. Für jedes Experiment werden fünf Muster programmiert. Jedes Muster kann als eine Leuchte aufgefaßt werden.

Um die Beeinflussung der Reaktionszeit durch den überlappenden Betrieb festzustellen, wird der Fahrtrichtungsanzeiger, dargestellt durch die Leuchte *led_blink*, gleichzeitig mit einer anderen Funktion dargeboten. Für die Schlußleuchte ist dies im überlappenden Fall die Leuchte *led_licht_2* und im nicht überlappenden, die Leuchte *led_licht*. Der nicht überlappende Fall wird auch *nebeneinander* genannt, da hier die gezeigte Leuchte neben dem Fahrtrichtungsanzeiger angeordnet

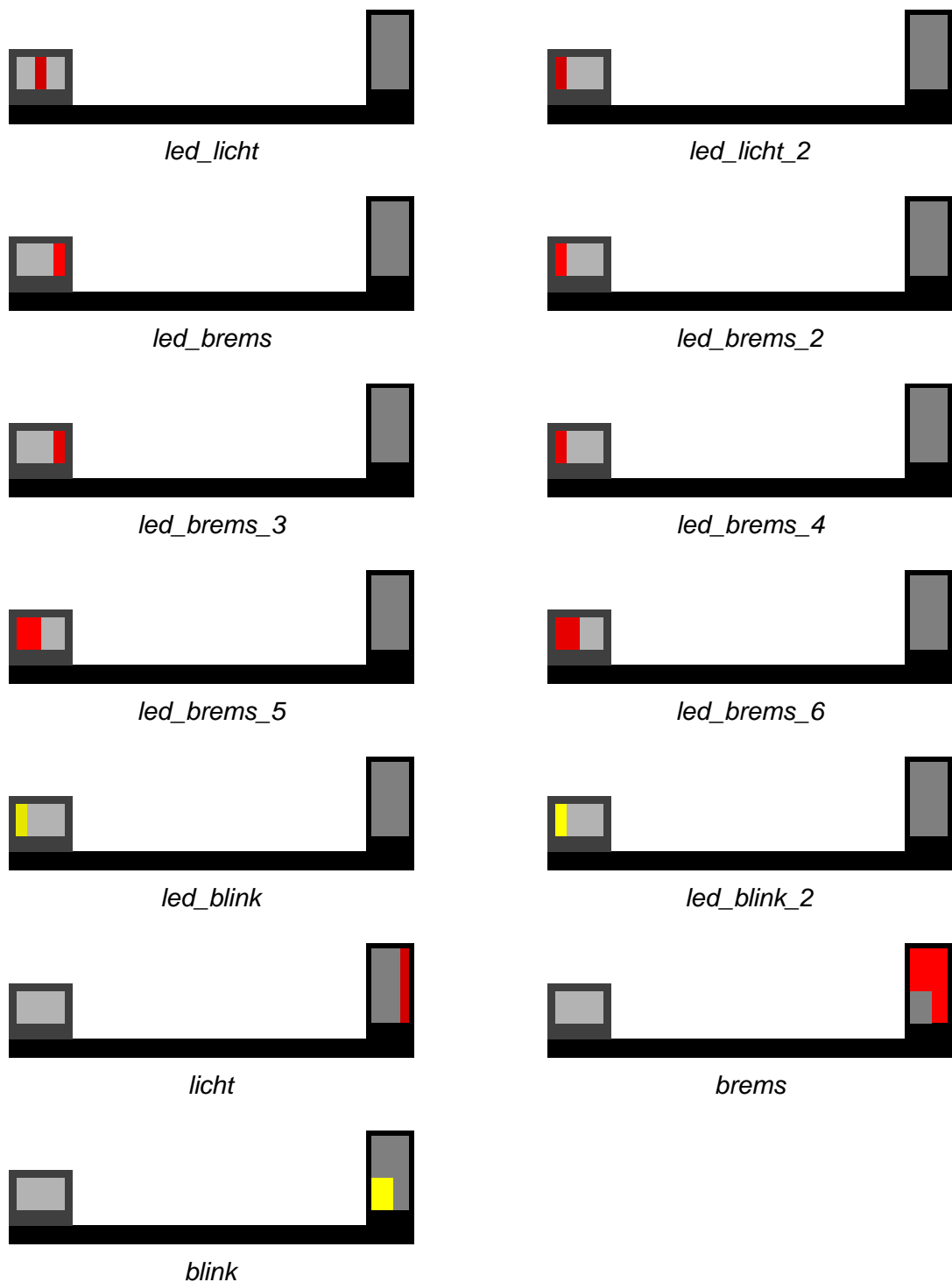


Bild 3.9: Signalbilder

ist. Für die Bremsleuchte gilt die gleiche Bezeichnungsweise. Die überlappende Leuchte ist hier *led_brems_2* und die nebeneinander angeordnete, die Leuchte *led_brems*. Diese beiden Bremsleuchten sind ca. fünfmal so hell, wie der Fahrtrichtungsanzeiger, dieser ist auch ca. fünfmal so hell, wie die Schlußleuchten.

Die beiden Bremsleuchten *led_brems_3* (nebeneinander) und *led_brems_4* (überlappend) werden mit dem Fahrtrichtungsanzeiger *led_blink_2* zusammen angeboten. Diese drei Leuchten be-

sitzen (fast) die gleiche Leuchtdichte. Die beiden Bremslichter *led_brem_5* und *led_brems_6* werden auch mit diesem Fahrtrichtungsanzeiger angeboten, wobei dies *teilüberlappend* geschieht, da die Fläche jeder Bremsleuchte doppelt so groß, wie die Fläche des Fahrtrichtungsanzeigers, ist. *led_brems_5* hat die gleiche Leuchtdichte, wie *led_blink_2*, *led_brems_6* hat die gleiche Lichtstärke, und somit die halbe Leuchtdichte, wie der Fahrtrichtungsanzeiger.

3.17.4 Zeitliche Abfolge der Darbietungen

Die Software zur Versuchsdurchführung wird dahingehend optimiert, in geringer Zeit möglichst viele, aussagekräftige Meßwerte zu erhalten. Der Hauptblock der Software wird im Folgenden beschrieben. Er wird so oft durchlaufen, bis genügend Meßwerte für die Auswertung zur Verfügung stehen.

Für jeden Überlappungsfall wird pro Durchlauf per Zufallsgenerator ausgewählt, ob der überlappende, oder nicht überlappende Teilfall angeboten wird. Weiterhin wird jedesmal per Zufall festgelegt, ob in einem Durchlauf die Fälle mit Schlußleuchten oder mit Bremsleuchten dargeboten werden. Auch die Anzahl der Einzeltests wird in einem Bereich von vier bis sieben zufällig ausgewählt.

Ein Durchlauf in Experiment eins besteht aus einer Serie Versuche des Falles eins oder zwei, gefolgt von einer Serie Versuche des Falles drei oder vier. In Experiment zwei enthält ein Durchlauf eine Serie Versuche von Fall fünf, sechs oder sieben, darauf eine Serie aus Fall acht, neun oder zehn.

Eine Serie der ersten beiden Fälle oder der Fälle fünf, sechs oder sieben beginnt mit dem Einschalten des Fahrtrichtungsanzeigers. Darauf reagiert die Testperson, indem sie den entsprechenden Blinkerhebel betätigt. Der Fahrtrichtungsanzeiger wird weiterhin blinkend dargeboten. Nun werden in unterschiedlichen Abständen die verschiedenen Signalbilder gezeigt. Die Abstände zwischen diesen Einzeltests werden per Zufall von zwei bis zehn Sekunden variiert. Die Signalbilder für Fall eins sind *led_licht*, *led_licht_2* oder *licht*. Für Fall zwei *led_brems*, *led_brems_2* oder *brems*. Die Einzeltests sind zeitlich mit dem Blinken des Fahrtrichtungsanzeigers gekoppelt, so daß ein Schluß- oder Bremslicht immer zu dem Zeitpunkt eingeschaltet wird, wenn auch gerade das gelbe Licht wieder aufleuchtet. Welches Signal gleichzeitig mit dem Fahrtrichtungsanzeiger aufleuchtet, variiert von Einzeltest zu Einzeltest.

Bei einer Serie der Fälle drei, vier, acht, neun oder zehn wird als erstes ein Schluß- oder Bremslicht eingeschaltet. Nachdem die Testperson darauf reagiert hat, folgen einige Einzeltests mit dem rechten oder linken Fahrtrichtungsanzeiger. Zwischen diesen Einzeltests liegt ein um vier Sekunden längerer Zeitraum, als in der Serie für Fall eins und zwei, damit die Versuchsperson eindeutig sehen kann, daß das Blinken aufgehört hat. Das Schluß- oder Bremslicht leuchtet dabei die ganze Zeit.

3.17.5 Kombinationen der Signalbilder

Aufgrund von den Überlegungen in Abschnitt 3.17.2 werden folgende Unterschiede in der Reaktionszeit als interessant erachtet:

1. Zuerst *led_blink*, dann *led_licht* und zuerst *led_blink*, dann *led_licht_2*.
2. Zuerst *led_blink*, dann *led_brems* und zuerst *led_blink*, dann *led_brems_2*.

3. Zuerst *led_licht*, dann *led_blink* und zuerst *led_licht_2*, dann *led_blink*.
4. Zuerst *led_brems*, dann *led_blink* und zuerst *led_brems_2*, dann *led_blink*.
5. Zuerst *led_blink_2*, dann *led_brems_3* und zuerst *led_blink_2*, dann *led_brems_4*.
6. Zuerst *led_blink_2*, dann *led_brems_3* und zuerst *led_blink_2*, dann *led_brems_5*.
7. Zuerst *led_blink_2*, dann *led_brems_3* und zuerst *led_blink_2*, dann *led_brems_6*.
8. Zuerst *led_brems_3*, dann *led_blink_2* und zuerst *led_brems_4*, dann *led_blink_2*.
9. Zuerst *led_brems_3*, dann *led_blink_2* und zuerst *led_brems_5*, dann *led_blink_2*.
10. Zuerst *led_brems_3*, dann *led_blink_2* und zuerst *led_brems_6*, dann *led_blink_2*.

3.17.6 Erwartungen über Veränderung der Reaktionszeit

Die verschiedenen, ausgewählten Fälle der Überlappung werden, jeweils getrennt, im Folgenden genauer betrachten.

1. Im ersten Fall wird erwartet, daß der Unterschied mindestens 500 msek beträgt, da der Fahrtrichtungsanzeiger so viel heller ist, daß er fast vollständig die Leuchte *led_licht_2* überstrahlt. Diese Leuchte kann daher erst wahrgenommen werden, wenn der Fahrtrichtungsanzeiger wieder ausgegangen ist. Wenn jedoch die Reaktionszeit der Versuchsperson auch im Referenzfall größer als 500 msek ist, kann nicht mehr eine so eindeutige Aussage über die Verlängerung der Reaktionszeit postuliert werden.
2. Bei Fall zwei sollte sich keine wesentliche Verlängerung der Reaktionszeit ergeben, da die Bremsleuchte fünfmal so hell, wie der Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet. Es könnte jedoch sein, daß die Farbe nicht als rot erkannt wird. Daher könnte sich doch eine Verlängerung der Reaktionszeit ergeben.
3. Bei dem dritten Fall handelt sich es um einen ähnlichen Fall, wie der zweite. Das als zweites erscheinende Signal ist fünfmal so hell, wie das vorhandene. Jedoch ist hier zuerst ein rotes Licht zu sehen, dem ein gelbes überlagert wird.
4. In Fall vier wird erwartet, daß sich die Reaktionszeit wesentlich verlängert. Wie in Fall eins ist das dazukommende Signal nur ein Fünftel so hell, wie das schon anliegende. Jedoch erlischt das anliegende Signal nicht nach 500 msek, so daß es denkbar ist, daß die Versuchsperson das hinzukommende Signal nicht wahrnimmt, da sie den Farbunterschied nicht erkennt.
5. Für Fall acht und diesen hier besitzen alle drei Leuchten die gleiche Größe und Lichtstärke, somit auch die gleiche Leuchtdichte. Ob die Reaktionszeiten einen signifikanten Unterschied haben, steht offen. Durch die Überlappung wird kein Signal in Bezug auf die Lichtintensität unterdrückt, jedoch ändert sich die Farbe zu orange. Ob darauf die richtige Reaktion erfolgt, wird das Experiment zeigen.
6. Bei dem sechsten Fall liegt Teilüberlappung vor. Das teilüberlappende Bremslicht ist doppelt so groß, wie der Fahrtrichtungsanzeiger. Durch diese Überlappung sollte sich die Reaktionszeit nicht verschlechtern. Es könnte jedoch möglich sein, daß auf das teilüberlappende Bremslicht schneller reagiert wird, als auf das nicht überlappende, da dieses nur die halbe Größe besitzt. Die Leuchtdichte ist bei allen drei Leuchten (fast) die gleiche.

7. Auch bei diesem Fall liegt Teilüberlappung vor. Entgegen dem vorherigen Fall ist die Lichtstärke der drei Leuchten gleich, und somit die Leuchtdichte von *led_brems_6* nur halb so groß. Dadurch könnte auf die Leuchte etwas langsamer reagiert werden. Eventuell wird sie sogar als Schlußleuchte aufgefaßt.
8. Für diesen Fall wird das gleiche Ergebnis, wie für Fall fünf erwartet, da Form, Farbe, Lichtstärke, Leuchtdichte und Verhältnisse der Leuchtdichten die gleichen sind.
9. Wenn in dem vorigen Fall keine Beeinträchtigung der Reaktionszeit durch die Überlappung stattfindet, dann dürfte das hier auch nicht der Fall sein, denn dieser und der vorige unterscheiden sich nur durch die Größe der überlappenden Bremsleuchte. Da diese jedoch vor dem Fahrtrichtungsanzeiger eingeschaltet wird, müßte die Reaktion auf diesen die gleiche sein.
10. Fall zehn ist ähnlich dem Fall neun. Der Fahrtrichtungsanzeiger sollte jedoch besser gesehen werden, da die Leuchtdichte des teilüberlappenden Bremslichtes nur halb so groß ist, wie die des Fahrtrichtungsanzeigers. Der Unterschied der Reaktionszeit, wenn er denn in Fall neun existiert, sollte geringer ausfallen, als dort.

3.18 Statistische Berechnungen

3.18.1 Mittelwerte und deren Differenz

Für die Auswertung jeder Versuchsdurchführung werden für jeden Fall der Überlappung zwei Meßwertgruppen gebildet. Die erste Gruppe umfaßt alle Meßwerte der überlappenden Darbietung, die zweite Gruppe die der nicht überlappenden. Von jeder Meßwertgruppe wird der arithmetische Mittelwert gebildet. Dieser Wert gibt an, wie schnell die Versuchsperson durchschnittlich auf das Aufleuchten des jeweiligen Signallichtes reagiert.

Für jeden Fall der Überlappung wird die Differenz der beiden Mittelwerte berechnet. Diese Differenz gibt an, wie groß der Einfluß der Überlappung in diesem Fall durchschnittlich bei der jeweiligen Versuchsperson ist.

3.18.2 Signifikanz der Differenz

Für die Auswertung der Versuche reicht es nicht aus, Mittelwerte der Meßwerte zu vergleichen und die Differenz zu bilden. Es muß auch untersucht werden, ob dieser Unterschied signifikant ist.

In den vorliegenden Versuchen sind die einzelnen Meßwerte statistisch verteilt. Da jedoch der Stichprobenumfang nicht groß genug ist, darf nicht von der Normalverteilung ausgegangen werden [sSG⁺88]. Somit kann auch nicht mit ihrer Hilfe die Signifikanz überprüft werden. Deshalb muß auf die Student-Verteilung zurückgegriffen werden, mit deren Hilfe mit dem t-Test die Signifikanz auch bei geringem Stichprobenumfang ermittelt werden kann.

In Abschnitt 3.16 wird erwähnt, daß die Signifikanz der Mittelwerte-Differenz mit Hilfe des t-Testes ermittelt wird. Dieser Test wird ausgewählt, da er zum Vergleich zweier Mittelwerte aus normalverteilten Grundgesamtheiten dient, wenn die Häufigkeitsverteilungen der beiden Stichproben nicht mehrgipflig und nicht allzu schief sind [BS91]. Davon wird bei den vorliegenden Werten ausgegangen. Der t-Test berücksichtigt die Anzahl der Stichproben, so daß er auch bei geringem Stichprobenumfang gültige Ergebnisse liefert. Strebt die Anzahl der Stichproben gegen unendlich, so geht die t-Verteilung in die Normalverteilung über.

Üblicherweise wird ein Signifikanzniveau α vorgegeben und der Freiheitsgrad k mit folgender Formel berechnet:

$$k = n_1 + n_2 - 2 \quad \text{Freiheitsgrad}$$

Der Freiheitsgrad besteht aus der Summe der Anzahl n der beiden Stichproben weniger zwei. Mit Hilfe des Signifikanzniveaus und des Freiheitsgrades wird in einer Tabelle der Student-Verteilung nachgeschlagen. (Ein Spezialfall der Student-Verteilung mit einem Freiheitsgrad stellt die Cauchy-Verteilung dar [BHPT95].) Die Realisierung t wird aus den Mittelwerten \bar{m} und Varianzen s^2 der beiden Meßwertgruppen berechnet:

$$t = \frac{\bar{m}_1 - \bar{m}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 k}{n_1 + n_2}} \quad \text{Realisierung}$$

Die Realisierung t der Stichproben wird berechnet und mit dem Tabelleneintrag verglichen. Dieser Vergleich gibt an, ob der Unterschied der Mittelwerte signifikant ist. Ist er dies, könnte es möglich sein, daß er auch bei einer geringeren Irrtumswahrscheinlichkeit noch signifikant ist. Um dies zu verifizieren, muß wiederum in der Tabelle nachgeschaut werden, diesmal bei dem anderen Signifikanzniveau.

Für die Auswertung der Meßwerte wird nicht in einer Tabelle nachgeschlagen, sondern durch einen Aufruf der Funktion "=ttest()" in der Software [Excel] das Signifikanzniveau ermittelt. Diese Funktion ist nicht auf fest vorgegebene Signifikanzniveaus angewiesen, sondern interpoliert zwischen den verschiedenen Werten der Student-Verteilung. Sie schaut sozusagen so oft in einer sehr fein aufgelösten Tabelle nach, bis für den errechneten T-Wert ein fast gleicher Wert gefunden ist.

Vor Benutzung dieser Funktion für die Auswertung der Meßwerte wird das Ergebnis dieser Funktion anhand einiger Stichproben überprüft. Dazu wird der T-Wert von Hand ausgerechnet und die Werte der Student-Verteilung in der Tabelle von Bronstein [BS91] nachgeschlagen. Weiterhin wird die Berechnung im C-Code der Meßsoftware implementiert und während einigen Vortests mit den Excel-Ergebnissen verglichen. Da durch die Interpolation bei Excel eine feiner aufgelöste Tabelle zur Verfügung steht, wird die Auswertung der Meßwerte nicht durch die Meßsoftware vorgenommen, sondern mit Hilfe der Excel Funktion.

3.18.3 Fehlerrate

Ein anderes Maß für die zu untersuchende Beeinflussung der Reaktion des Fahrers durch den Überlappungsgrad stellt die Fehlerrate dar. In der Auswertung der Versuche kann die Anzahl der Fehler im überlappenden Fall mit den Fehlern im nicht überlappenden Fall verglichen werden. Damit die Signifikanz der unterschiedlichen Fehlerrate mit genügender Genauigkeit ermittelt werden kann, muß eine genügend große Fehleranzahl vorliegen. Um diese zu erreichen, ist es notwendig, die Versuchsperson mit einer weiteren Aufgabe während des Versuches abzulenken, wie zum Beispiel einer einfachen Fahrsimulation, bei der die Versuchsperson den Bewegungen eines Modellautos mit eigenen Lenkbewegungen folgen muß. Zu diesem Zweck ist der Fahrstand mit einem Lenkrad ausgestattet, dessen Winkelstellung per Software abgefragt werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wird die Fehlerrate nicht zur Auswertung benutzt, da bereits mit Hilfe der Reaktionszeiten eindeutige Aussagen getroffen werden können.

Kapitel 4

Durchführung der Hauptexperimente

In diesem Kapitel wird die Durchführung der Versuche beschrieben. Der folgende Text erläutert die notwendigen Schritte zur Durchführung der Experimente. Mit dieser Anleitung bietet sich die Möglichkeit, in folgenden Arbeiten weitere Experimente durchzuführen. Die Bedienung der Geräte und Software ist fehlerunanfällig und nach kurzer Einarbeitung beherrschbar.

4.1 Vorbereitung

Einige Zeit vor dem Versuchsbeginn werden Vorfeldbeleuchtung und Diaprojektoren für die Umfeldbeleuchtung eingeschaltet. Dies ist notwendig, damit die Lampen zu Beginn des Versuches ihren vollen Lichtstrom liefern. Gerade die Hochdrucklampen der Vorfeldbeleuchtung benötigen einige Zeit, bis sie den nötigen Lichtstrom liefern und die Lichtfarbe annähernd weiß ist. Auch der Meßplatzcomputer wird eingeschaltet, da somit im Beisein der Versuchsperson nicht die Zeitdauer des Bootvorganges abgewartet werden muß.

4.2 Personendaten

Einige persönliche Daten der Versuchsperson sind für die Auswertung der Ergebnisse hilfreich. Diese werden mit in der Protokolldatei gespeichert, die vom Meßprogramm erstellt wird.

Bevor die Meß-Software aufgerufen wird, muß die Spannungsversorgung (13,5 V) für das Steuergerät und für die beiden Zusatz-Spannungsversorgungen der LED-Matrix Leuchte eingeschaltet werden.

Nun startet der Versuchsleiter das Meßprogramm auf dem Computer. Dies geschieht durch den Aufruf "reaktionszeit -v -f" an der *MS-DOS Eingabeaufforderung* des Meßplatz-Computers. Der Parameter "-v" schaltet die Ausgabe der Statusmeldungen ein und der Parameter "-f" startet das gewünschte Unterprogramm. Der Versuchsleiter gibt nun den Namen der Versuchsperson ein. Dieser Name wird nicht in der Auswertung angezeigt, da die Daten anonymisiert werden. Er dient lediglich der Zuordnung, falls eine Person mehrere Versuche absolviert. Anschließend wird das Alter und Geschlecht des Probanden eingegeben. Er wird gefragt, seit wieviel Jahren er in Führerscheinbesitz ist und ob er von einer Farbschwäche seiner Augen weiß. Diese wird nur eingetragen, wenn er definitiv sicher ist. Ansonsten bleibt dieser Eintrag im Protokoll leer. Aufgrund der Ausbildung und Berufstätigkeit der Versuchsperson wird entschieden, ob sie über lichttechnische Erfahrung verfügt.

4.3 Sehtest

Die Versuchsperson wird nun einem Sehtest unterzogen. Dazu wird auf Höhe der Rückleuchten eine Sehtafel mit Landoltringen verschiedener Größe aufgestellt. Der Versuchsperson wird in sechs Meter Entfernung davon ein Platz zugewiesen. Auf diesem stehend gibt sie dem Versuchsleiter an, in welche Richtung die Öffnung der Landoltringe weist. Falls die Person zum Führen eines Kraftfahrzeuges eine Sehhilfe benötigt, so benutzt sie diese auch während diesem Sehtest. Das Ergebnis des Sehtestes, die Sehschärfe der Testperson, wird in den Computer eingegeben und somit im Meßprotokoll vermerkt.

4.4 Signalbilder

Damit der Proband sich mit den Signalbildern vertraut machen kann, nimmt er in zwölf Meter Entfernung von den Rückleuchten Platz. In dieser Entfernung kann er den an den Leuchten befindlichen Versuchsleiter noch gut verstehen, ist aber schon weit genug von den Leuchten entfernt, um einen ähnlichen Eindruck von den verschiedenen Mustern zu erhalten, wie im Fahrstand in 25 m Entfernung.

Der Versuchsleiter zeigt der Versuchsperson nun nacheinander die verschiedenen Muster der LED-Matrix Leuchte. Welche Tasten auf dem Computer dazu betätigt werden müssen, kann er mit Druck auf die Taste "?" erfahren. Bei jedem Muster wird der Proband gefragt, welches Signalbild seiner Meinung nach zu sehen ist. Nach seiner Antwort teilt der Versuchsleiter ihm das tatsächliche Bild mit. Als erstes werden die beiden Schlußleuchten gezeigt, darauf die beiden Bremsleuchten. Als letztes wird der Fahrtrichtungsanzeiger vorgeführt.

Auch die drei verschiedenen Lichtsignale der konventionellen Schlußleuchte werden der Versuchsperson in der gleichen Reihenfolge dargeboten.

4.5 Fahrstand

Nachdem der Versuchsperson die Signalbilder vorgeführt worden sind, wird ihr gezeigt, welche Reaktionen von ihr erwartet werden. Dazu nimmt sie auf dem Sitz des Fahrstandes Platz. Dieser befindet sich in 25 m Entfernung von den Rückleuchten. Die Sitz- und Lenkradhöhe werden auf die Größe der Versuchsperson angepaßt. Der Versuchsperson bietet sich ein freier Blick auf beide Rückleuchten und die Ampel.

4.6 Reaktionen

Wenn die grüne Ampel aufleuchtet soll der rechte Fuß das Gaspedal drücken und solange halten, bis die Ampel erlischt oder eine Bremsleuchte aufleuchtet.

Leuchtet eine Bremsleuchte auf, so ist mit dem rechten Fuß vom Gas zu gehen und die Bremse zu betätigen. Diese muß jedoch nur kurz berührt werden. Wenn die Ampel weiterhin grün leuchtet, ist sofort wieder auf das Gaspedal zu wechseln. Entgegen dem realen Verhalten im Verkehr wird folglich auch dann Gas gegeben, wenn die Bremsleuchte weiterhin leuchtet. Dies ist erforderlich, damit der Versuchsperson deutlich ist, daß sie selbst bei leuchtendem Bremslicht fährt und daher auf aufleuchtende Fahrtrichtungsanzeiger reagieren muß.

Leuchten eine oder mehrere Schlußleuchten auf, ist einmalig die Lichthupe zu betätigen, unabhängig davon, ob das Schlußlicht daraufhin erlischt oder nicht.

Wenn der rechte Fahrtrichtungsanzeiger dargeboten wird, soll die Versuchsperson nach rechts blinken. Wird der linke Fahrtrichtungsanzeiger angezeigt, ist nach links zu blinken. In beiden Fällen muß der Blinkerschalter nur kurz betätigt werden, dann ist er wieder loszulassen, auch wenn der Fahrtrichtungsanzeiger weiter blinkt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß jedes Signal mit dem entsprechenden Schalter kurz zu bestätigen ist.

Als Ende der Reaktionszeit bei Anbietung einer Bremsleuchte wird der Zeitpunkt des Loslassens des Gaspedales gewertet, nicht der Zeitpunkt des Niederdrückens des Bremspedales. Jedoch nur, wenn darauf innerhalb kurzer Zeit das Bremspedal betätigt wird. Durch diese Vorgehensweise findet die Zeit des Wechsels von Gas zu Bremse keinen Eingang in die Reaktionszeit. Da für die anderen Reaktionen auch die Hand nicht von einem Schalter zum nächsten wechseln muß, sind somit in keinen Reaktionszeiten *Wechselzeiten* beinhaltet. Diese *Wechselzeiten* würden weitere Streuungen zu der Reaktionszeit hinzufügen. Über die Gas- zu Bremse- *Wechselzeiten* liegen unterschiedliche Angaben vor: Hersteller von Advanced Brake Light Devices geben eine Wechselzeit von ca. 0,3 sec an. Bei den Messungen von [DFF⁺94] ergab sich als Mittelwert jedoch nur 166 msek. Dieser Wert muß zu der Reaktionszeit addiert werden, um die wirkliche Reaktionszeit des Bremsens zu erhalten.

4.7 Versuchsablauf

Die Software steuert den gesamten Versuchsablauf selbstständig. Nachdem mit der Taste "U" der Versuch gestartet worden ist, wird nach 20 Sekunden die grüne Ampel eingeschaltet. Dieser Zeitraum dient dazu, daß der Versuchsleiter vom Meßplatz-Computer zu der Versuchsperson im Fahrstand gehen kann. Während der Versuchsdurchführung wird der Versuchsleiter den Probanden beobachten, um systematische Fehler zu erkennen. Am Anfang des Versuches wird der Versuchsleiter der Versuchsperson bei auftretenden Signalbildern die gewünschte Reaktion nochmal erläutern, falls sie dies wieder vergessen hat. Es wird jedoch so wenig, wie möglich, geredet, um die Versuchsperson nicht unnötig von ihrer Aufgabe abzulenken.

Nachdem die Ampel eingeschaltet worden ist und die Versuchsperson darauf reagiert hat, indem sie mit dem Fuß das Gaspedal niedergedrückt hat, wird die Referenzaufgabe gestartet. (*Referenz Anfang* oder *Referenz a* genannt.) Es werden zehnmal hintereinander alle drei Schlußlichter gleichzeitig eingeschaltet. (Das Signalbild ist in Bild 4.1 zu sehen.) Die Versuchsperson bestätigt dies jedesmal mit der Reaktion *Lichthupe*. Falls auf Darbietungen falsch oder zu langsam reagiert wird, wiederholt sich die Darbietung so oft, bis zehn richtige Reaktionen vorliegen.



Bild 4.1: Signalbild Referenz

Nachdem die Referenzaufgabe vollendet ist, beginnt der eigentliche Versuch, mit dem Ziel, für jede der möglichen Überlappungen (beschrieben in Abschnitt 3.17) fünf Meßwerte von richtigen Reaktionen für nicht überlappenden Betrieb und fünf für überlappenden zu erhalten. Zusammen

sind dies insgesamt 40 Reaktionszeiten pro Experiment. Es können jedoch wesentlich mehr werden, da der Ablauf zufallsgesteuert ist. Damit der Versuch unter allen Umständen terminiert, wird laufend die Anzahl schon erhaltener Meßwerte überprüft. Ab einer gewissen Anzahl wird die Zufallssteuerung zeitweise abgeschaltet und explizit noch fehlende Meßwerte ermittelt. Durch diesen Eingriff wird die Versuchsdauer unter 30 Minuten gehalten. Die Software führt so viele Durchläufe aus, bis genügend Meßwerte vorliegen. Eine genauere Beschreibung des eigentlichen Versuches findet sich in Abschnitt 3.17.4.

Der Versuchsablauf endet mit einem erneuten Anbieten der Referenzaufgabe, nun mit *Referenz Ende* oder *Referenz e* in den Meßprotokollen bezeichnet. Nach Ablauf dieser Aufgabe erlischt die grüne Ampel. Der Versuchsleiter teilt dem Probanden mit, daß nun der Versuch zu Ende ist. Darauf erkundigt sich der Versuchsleiter über die Eindrücke der Versuchsperson während des Ablaufes.

Kapitel 5

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

5.1 Einfluß der Fehlerquellen

5.1.1 Meßgestelle für Leuchtenmessungen

Zur Messung von Leuchten werden diese üblicherweise auf einem vom Leuchtenhersteller mitgelieferten Gestell montiert, das wiederum auf dem Goniometer befestigt wird. Durch diese Vorgehensweise werden reproduzierbare Meßwerte sichergestellt, da die gemessene Lichtstärkeverteilung der Leuchte gleich der vom Hersteller auf seinem Meßstand gemessenen ist.

Steht ein solches Gestell nicht zur Verfügung, muß die Leuchte auf der Plattform des Goniometers justiert werden. Dazu ist in diesem Meßgerät ein Laser integriert, mit dessen Hilfe der Mittelpunkt der Lichterzeugung der Leuchte mit dem Drehpunkt des Goniometers in Übereinstimmung gebracht wird. Die genaue Justierung wird dadurch erschwert, daß der Laserstrahl einen Durchmesser von ca. zwei Millimetern hat und zusätzlich durch die Optik der Leuchte abgelenkt wird. Schwieriger gestaltet sich die lotrechte Aufstellung der Leuchte, da für diese Justage ein geeignetes Hilfsmittel fehlt. Weil heutige Leuchtengehäuse selten gerade Außenkanten haben, hilft eine Wasserwaage nicht weiter, da sie nicht genau genug angelegt werden kann. Weil der Meßempfänger in einer relativ großen Entfernung von 25 m von der Leuchte angebracht ist, wirken sich minimale Winkeländerungen beim Montieren der Leuchte stark auf das Meßergebnis aus.

Daher ist festzuhalten, daß ohne ein geeignetes Meßgestell das Erhalten reproduzierbarer Meßergebnisse nur eingeschränkt möglich ist.

5.1.2 Mechanische Stabilität der verwendeten Leuchten

Das Gehäuse der LED-Matrix Leuchte hat sich als zu weich für exakte Messungen herausgestellt. So kommt es bei dem Montieren auf dem Meßtisch zu unvermeidbaren Verformungen, auch der optischen Abschlußscheibe.

Für das Gehäuse der konventionellen Leuchte ist ein Meßgestell gefertigt worden, auf dem sie vermessen wird und während der Versuchsdurchführung auch montiert bleibt. Trotz der Verwendung von Stahlprofilen stellt sich die Halterung der Leuchte als zu beweglich für exakte Messungen

heraus. Ein Grund dafür sind die in Gummi gelagerten Befestigungsschrauben der Leuchte. Diese sind für die Montage am Fahrzeug erforderlich, aber zur Erreichung exakter Meßergebnisse hinderlich.

Auf Seite 96 sind die Meßwerte der axialen Lichtstärke dargestellt. Betrachtet man die Messungen der gleichen Leuchtenfunktion bei unterschiedlicher Montage, ergeben sich verschiedene Werte. So schwanken die Meßwerte bei der konventionellen Leuchte um bis zu 8 %, bei der LED-Matrix Leuchte um bis zu 5 %.

5.1.3 Temperaturschwankungen im Meßlabor

Die Umgebungstemperatur beträgt bei allen Messungen ca. $21^{\circ}\text{C} \pm 10\%$ und sollte keinen signifikanten Einfluß auf die Ergebnisse haben. Mit der in Abschnitt 3.7.3 angegebenen Abhängigkeit von Temperatur und Lichtstrom erhält man eine Änderung der Lichtstärke um $\pm 2\%$. (Temperaturänderung um $\pm 10\% \hat{=} \pm 2\text{ K} \hat{=} \text{Lichtstromänderung von } \pm 2\%$)

5.1.4 Spannungsversorgung der LED-Matrix Leuchte

Die von dem [Spannungsregler] gelieferte Spannung ist hinreichend konstant (0,002 % Abweichung). Die Auswirkungen dieser Spannungsschwankungen auf den Lichtstrom sind minimal und werden daher nicht berücksichtigt.

5.1.5 Stabilisierungsphase des Lichtstroms

Vor jeder Messung wird gewartet, bis sich der Lichtstrom auf einen stabilen Wert eingestellt hat. Als stabil wird erachtet, wenn sich die Lichtstärke im Zeitraum einer halben Minute weniger als 2 % ändert. Bei Leuchten mit einer Lichtstärke größer 50 cd verändert sich die Lichtstärke weniger als 0,3 % in diesem Zeitraum.

5.1.6 Programmierung der LED-Matrix Leuchte

Die Programmierung der Muster der LED-Matrix Leuchte und die tatsächlich angezeigten Muster differieren hinsichtlich der lichttechnischen Werte erheblich. Betrachtet man die Lichtstärken (Abschnitt A.9.8) der beiden Muster *led_brems* und *led_brems_2*, ergibt sich ein Unterschied von 10 %. Zu erwarten wären gleiche Werte, da beide Muster gleich aufgebaut sind, das eine rechts der Mitte der Leuchte, das andere mit gleichem Abstand links der Mitte.

Der Unterschied der beiden Muster ergibt sich durch die manuelle Montage der Leuchtdioden in der Leuchte und durch Versatz in den Optikelementen. Die Fresnelscheibe vor den Leuchtdioden ist aus 256 Fresnellinsen-Elementen zusammengeklebt. Durch diesen Klebevorgang ergibt sich bei den linken Leuchtdioden ein kleiner Versatz zur zugehörigen Linse, da die Scheibe am rechten Rand anliegt. Diese Fehlerquelle tritt natürlich auch in der Vertikalen auf. Die Streuscheibe ist ebenfalls aus einigen Elementen zusammengefügt, so daß hierdurch weitere Ungenauigkeiten entstehen.

Die Werte der axialen Lichtstärke jeder einzelnen Leuchtdiode der LED-Matrix Leuchte differieren untereinander, wie schon in Abschnitt 3.8 auf Seite 19 angemerkt. Der Unterschied von der minimalen zur maximalen Lichtstärke innerhalb einer Farbe beträgt ca. 70 %, der durchschnittliche Unterschied benachbarter Leuchtdioden bis zu 10 %.

5.1.7 Gemessene und berechnete Leuchtdichten

Die Leuchtdichten der einzelnen Leuchten werden mit dem [Leuchtdichtemeßgerät] gemessen, wie auf Seite 94 erläutert. Auch die Lichtstärken werden gemessen (Abschnitt A.9.8). Die leuchtenden Flächen der konventionellen Leuchte sind auf Seite 75 angegeben, die leuchtenden Flächen von den Signalbildern der LED-Matrix Leuchte auf Seite 98. Mit den Flächen und den gemessenen Lichtstärken können die Leuchtdichten anhand der Formel von Seite 5 berechnet werden. Die Ergebnisse sind auf Seite 99 aufgelistet.

Bei dem Vergleich der berechneten Leuchtdichten mit den direkt gemessenen fällt ein Unterschied von bis zu 30 % bei dem Signalbild *brems* auf. Die Ursache dieses großen Unterschiedes liegt in der Meßweise der leuchtenden Fläche. Weil die Fläche der Bremsleuchte stark zerklüftet ist, wird sie als zu groß gemessen. Daher wird der berechnete Wert der Leuchtdichte zu klein.

Bei dem Signalbild *licht* beträgt der Unterschied 25 %. Hier ist der gemessene Wert wesentlich kleiner, da trotz des gewählten 20' Meßfeldes des [Leuchtdichtemeßgerätes] der Rand der leuchtenden Fläche sich nahe bei dem des Meßfeldes befindet, da die Fläche sehr schmal ist. Das Meßfeld wird daher nicht ganz mit der vollen Leuchtdichte ausgefüllt, die etwas schwächere am Rand verkleinert den Meßwert.

Die anderen Unterschiede der Leuchtdichten betragen weniger als 13 %. Meist ist der gemessene Wert größer, als der berechnete. Die Abweichungen bei der Messung der Leuchtdichte betragen bis zu 8 %.

Die Leuchtdichten und die leuchtenden Flächen von Leuchten könnten durch die Benutzung einer Leuchtdichte-Kamera genauer vermessen werden.

5.2 Resultierende Abweichungen

Die Umgebungstemperatur beeinflusst die Lichtstärke um insgesamt 4 %. Durch die Temperaturdrift im stabilisierten Zustand ändert sich die Lichtstärke um 2 %.

Durch die Montage der LED-Matrix Leuchte auf dem Meßplatz ergibt sich ein Fehler von 5 %, durch die Plazierung der Leuchtdioden auf der Platine ein Fehler von 10 %. Dieser Fehler kann sich jedoch bei genügend vielen Dioden pro Muster herausmitteln.

Wenn alle genannten Fehlerquellen vollen Einfluß nehmen, können die Lichtstärken bei zwei Messungen der gleichen Leuchte um 21 % voneinander abweichen. An dem Beispiel der Bremsleuchten in Abschnitt 5.1.6 sieht man, daß der Unterschied in der Lichtstärke 10 % beträgt für Leuchten, von denen man annehmen würde, daß sie gleiche lichttechnische Werte besitzen. Der Gesamtfehler von Umgebungstemperatur, Temperaturdrift und Montage beträgt 11 %. Da dieser Maximalwert größer, als der erzielte Fehler ist, kann der Fehler durch Plazierung herausgemittelt sein. Da der erzielte Fehler nicht größer, als der Fehler durch Plazierung ist, kann es sein, daß nur dieser den Unterschied zwischen den beiden gleichwertigen Leuchten verursacht und die ersten drei Fehlerquellen keinen Einfluß haben. Es kann keine Aussage getroffen werden, ob der durch die Plazierung verursachte Fehler bei genügend vielen Dioden pro Muster herausgemittelt wird.

Nach dem Einschaltvorgang von Leuchtdioden verringert sich ihr Lichtstrom innerhalb einer halben Minute um ca. 10 %. Die jeweiligen Muster der LED-Matrix Leuchte sind maximal zwei Minuten ununterbrochen eingeschaltet. Anhand der Untersuchungen in Abschnitt 3.8 kann davon ausgegangen werden, daß die Lichtstärken im Laufe des Betriebes um nicht mehr als 20 % abnehmen.

Somit schwankt auch die Leuchtdichte jeder einzelnen Leuchte um maximal 20 %, resultierend aus der Verringerung der Lichtstärke während des Betriebes. Durch die Summe der Abweichungen, hervorgerufen durch Montage, Plazierung, Umgebungstemperatur und Temperaturdrift, schwankt die Leuchtdichte um weitere 21 %. Diese beiden Schwankungen der Leuchtdichte wirken sich auf das Verhältnis der Leuchtdichten zweier Leuchten aus. Dadurch variiert das Verhältnis in Experiment 1 für Schlußleuchte zu Fahrtrichtungsanzeiger von 1:3,6 bis 1:8,6. Das Verhältnis von Fahrtrichtungsanzeiger zu Bremsleuchte schwankt zwischen 1:3,2 bis 1:6,9. In Experiment 2 befindet sich das Verhältnis der Leuchten im Bereich von 1:0,7 bis 1:1,5. Diese großen Schwankungsbereiche für das Leuchtdichteverhältnis sind theoretische Maximalwerte (*worst case*).

Sie werden verglichen mit den durch Messungen ermittelten Werten. Die Messung der Leuchtdichte von LED-Leuchten ohne Leuchtdichte-Kamera ist, wie weiter oben angemerkt, ungenau. Daher werden die aus gemessener Lichtstärke und Fläche berechneten Werte benutzt, um die tatsächlich vorliegenden Verhältnisse zu berechnen.

In Experiment 1 haben Schlußleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger ein Verhältnis von 1:4,5 bis 1:5,5. Das Verhältnis von Fahrtrichtungsanzeiger zu Bremsleuchte beträgt 1:3,5 bis 1:4,5, anstelle der erstrebten 1 : 5.

In Experiment 2 haben alle Leuchten, bis auf *led_brems_6*, fast die gleichen Leuchtdichten und somit ein Verhältnis von 1:0,8 bis 1:1,2.

5.3 Dargebotene Signalbilder

5.3.1 Verwechslungen der Signalfunktionen

Vor der Versuchsdurchführung werden der Versuchsperson die verschiedenen Signalbilder dargeboten, wie auf Seite 43 erläutert. Die Schlußleuchten werden zuerst gezeigt und von einigen Personen als Bremsleuchten aufgefasst. Dies ist sowohl bei den Schlußleuchten der LED-Matrix Leuchte, als auch bei denen der konventionellen Leuchte zu beobachten. Nachdem darauf die Bremsleuchten dargeboten werden, wird die falsche Zuordnung revidiert. Gründe für diese Verwechslung können zum einen daran liegen, daß die Vorführung in einem Raum stattfindet, nicht unter freiem Himmel. Die Versuchsperson befindet sich während der Demonstration noch nicht im Fahrstand, in dem die Augen auf ein Tageslicht ähnliches Umfeld adaptiert sind. Ein anderer Grund könnte auch das brillantere Erscheinungsbild von mit Leuchtdioden bestückten Leuchten gegenüber den meistens anzutreffenden Leuchten herkömmlicher Bauweise sein. Dieses Erscheinungsbild kann die Probanden täuschen.

5.3.2 Sichtbarkeit des Fahrtrichtungsanzeigers in Fall 4

Während des Versuchsablaufes gibt der Versuchsleiter, wie auf Seite 44 beschrieben, der Versuchsperson Hinweise auf die angezeigten Signalbilder. Dies ist fast nur in Fall vier notwendig. Wenn das helle Bremslicht leuchtet, kann der zusätzlich aufleuchtende Fahrtrichtungsanzeiger fast nicht wahrgenommen werden. Manch ein Proband erhöht nach einiger Zeit des Wartens stark seine Aufmerksamkeit, da es ihm verdächtig erscheint, daß längere Zeit keine Signalbilder angeboten werden. Mit dieser erhöhten Aufmerksamkeit wird das Blinken dann wahrgenommen. Bei Personen, bei denen nach mehrmaligem Anbieten des Fahrtrichtungsanzeigers keine Reaktion erfolgt, greift der Versuchsleiter ein und gibt einen Hinweis. Manchmal kommt es vor, daß sich der

Proband bei Fall vier nun besonders anstrengt und daher in diesem Fall schneller reagiert, als bei den anderen Fällen.

Einhellige Meinung der Versuchspersonen nach dem Experiment ist, daß der Fahrtrichtungsanzeiger im vierten Fall im realen Verkehrsgeschehen wahrscheinlich übersehen wird.

5.3.3 Additive Leuchtdichten

Einige Versuchspersonen erwarten, daß die gewohnten Signalbilder jederzeit zu sehen sind. Das bedeutet: Wenn eine Signalleuchte mit einer anderen vollständig überlappt, dann ist dafür Sorge zu tragen, daß beide Leuchten zu sehen sind. Dies wird am Beispiel des Fahrtrichtungsanzeigers und der Schlußleuchte erklärt:

Wenn das rote Schlußlicht leuchtet und das gelbe Blinklicht dazugeschaltet wird, so ist die Leuchtdichte der Schlußleuchte entsprechend zu erhöhen, so daß sie gegenüber dem Fahrtrichtungsanzeiger um ihre normale Leuchtdichte größer ist.

Mit Zahlenwerten verdeutlicht, bedeutet dies: Die Leuchtdichte der Schlußleuchte beträgt normalerweise $1\,500\text{ cd/m}^2$, die des Fahrtrichtungsanzeiger $8\,000\text{ cd/m}^2$. Die Schlußleuchte leuchtet. Nun wird der Fahrtrichtungsanzeiger intermittierend dazugeschaltet. Während den Zeiten, in denen er leuchtet, also auch intermittierend, beträgt die Leuchtdichte der Schlußleuchte dann $9\,500\text{ cd/m}^2$. Das ist die Leuchtdichte des gelben Lichtes addiert mit der normalen Leuchtdichte des roten Lichtes. Beide gleichzeitig eingeschalteten Leuchten ergeben somit zusammen eine Leuchtdichte von $17\,500\text{ cd/m}^2$. Die Lichtfarbe des gemeinsamen Lichtsignals ist orange.

Der Sinn dieser starken Anhebung der Leuchtdichte der Schlußleuchte ergibt sich dadurch, daß der Farbeindruck *rot* ohne Addition durch das helle gelbe Blinklicht verloren geht. Durch die Addition bleiben die Farbeindrücke erhalten, nicht die Helligkeitsempfindungen.

5.4 Meßdatenaufbereitung

5.4.1 Mittelwerte der verschiedenen Meßwertgruppen

Aus den gemessenen Reaktionszeiten werden für jedes Experiment und jeden Fall die Mittelwerte berechnet. Ein Fall gliedert sich in die beiden Teile *überlappend* und *nicht überlappend*. Pro Fall liegen somit zwei Mittelwerte vor, deren Differenz bestimmt wird.

Bei dem Vergleich der Referenzversuche am Anfang und Ende eines Versuches stellt sich heraus, daß sich die Reaktionszeit der meisten Personen verkürzt. Daher wird die Differenz der Reaktionszeiten bei Verkürzung mit einem positiven Vorzeichen versehen, bei Verlängerung mit einem negativen.

Die Differenz der Reaktionszeiten zwischen überlappendem und nicht überlappendem Fall hingegen hat ein positives Vorzeichen, wenn die Reaktionszeiten bei der Überlappung länger sind, was zumeist der Fall ist. Wenn die Reaktionszeit trotz Überlappung kürzer ist, ist das Vorzeichen negativ.

Eine Differenz mit positivem Vorzeichen gibt somit immer einen Wert im erwarteten Bereich an. In Bild 5.1 ist schematisch die Zuordnung der Differenzen in den Diagrammen gezeigt, die den Unterschied der Reaktionszeit bei Überlappung zeigen. Für das Diagramm der Referenzversuche gilt dieses Schema nicht!

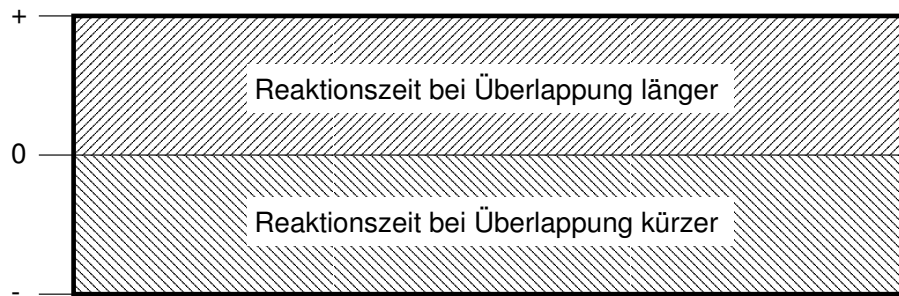


Bild 5.1: Schema der Diagramme, Reaktionszeit bei Überlappung

5.4.2 Irrtumswahrscheinlichkeiten der Hypothesen

Durch Berechnung und Vergleich der Mittelwerte ist nicht sichergestellt, ob ein Unterschied zwischen ihnen signifikant ist. Dies wird mit dem *t-Test* nachgeprüft, der in Abschnitt 3.18 näher beschrieben ist. In den Auswertungen der Meßergebnisse ist das Ergebnis des *t-Tests* für jede Differenz der Mittelwerte als Irrtumswahrscheinlichkeit angegeben. Dieser Wert gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Differenz doch nicht signifikant ist, obwohl es behauptet wird.

Die noch zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit wird zu 5 % festgelegt. Dieser Wert ist allgemein üblich und findet sich auch in der Literatur, so zum Beispiel bei [Mor70].

5.4.3 Signifikante Unterschiede der Mittelwerte

In den nachfolgenden Schaubildern sind die Differenzen der jeweiligen Mittelwerte über der Irrtumswahrscheinlichkeit aufgetragen. Die Werte links der 5 % Linie sind signifikante Unterschiede. Die Werte rechts der 95 % Linie sind, mit 5 % Fehlerwahrscheinlichkeit, keine Unterschiede. Bild 5.2 verdeutlicht die Unterschiede schematisch.

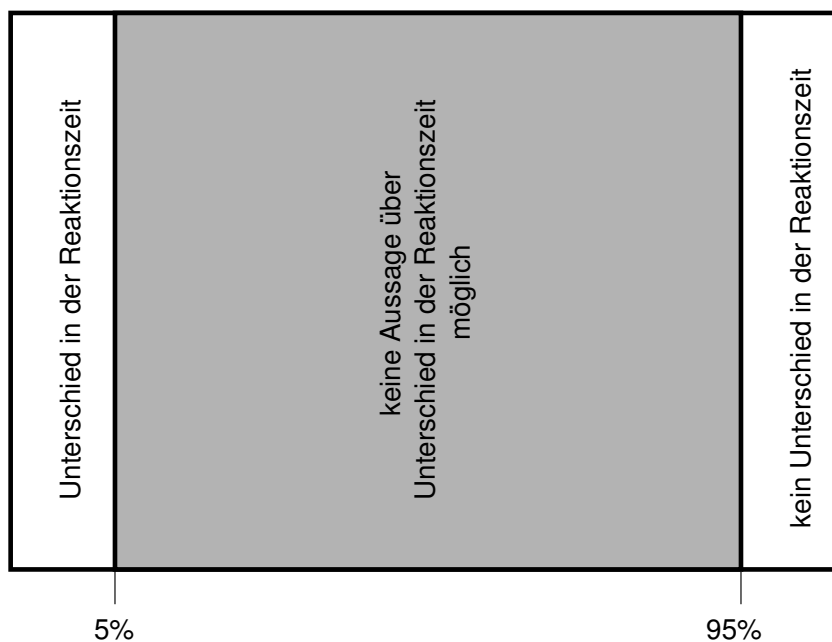


Bild 5.2: Schema der Diagramme, signifikante Unterschiede

Wenn zum Beispiel in Fall 2 ein Unterschied in der Reaktionszeit von 4 msec mit 98,11 % im Schaubild dargestellt ist, bedeutet dies, daß in Fall 2 bei diesem Versuch ziemlich sicher, nämlich mit weniger als 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit, kein Unterschied in der Reaktionszeit zwischen der überlappenden und der nicht überlappenden Darbietung vorliegt.

Wenn andererseits in Fall 2 ein Unterschied von 218 msec mit 0,65 % im Schaubild zu sehen ist, liegt bei dem Versuch, zu dem dieser Punkt gehört, mit großer Wahrscheinlichkeit ein Unterschied vor.

5.5 Ergebnisse der Referenzaufgaben

Vor (*Referenz a*) und nach (*Referenz e*) dem eigentlichen Versuch wird der Versuchsperson eine Referenzaufgabe gestellt. Bei dieser reagiert sie zehnmal auf das gleiche Signalbild, in Bild 4.1 dargestellt.

Die Ergebnisse der Referenzaufgaben sind in Tabelle 5.1 angegeben. Experiment 1 umfaßt die Versuche vom 26.04.2002, 17:04:59 Uhr, bis zum 17.05.2002, 18:08:12 Uhr. Die später durchgeführten Versuche gehören zu Experiment 2.

In der mit Δ bezeichneten Spalte sind die Differenzen der Mittelwerte angegeben. Negative Werte bedeuten, daß sich die Reaktionszeit verlängert und somit die Konzentration oder Motivation der Versuchsperson im Laufe des Experimentes abgenommen hat. Positive Werte bedeuten eine Steigerung der Konzentration.

Die Aussagen gelten jedoch nur, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit (Spalte Δ [%]) für den speziellen Wert kleiner 5 % ist. In Diagramm 5.1 kann man sehen, daß dies für negative Werte nur für vier zutrifft. (Die Werte befinden sich links der 5 % Linie und unterhalb der 0 msec Linie.) Bei sechs anderen Versuchen ist die Reaktionszeit während der Durchführung kürzer geworden. Über die Änderungen der Reaktionszeiten bei den restlichen Experimenten kann keine gesicherte Aussage gemacht werden, da sie sich rechts der 5 % Linie befinden. Es steht jedoch fest, daß die Unterschiede kleiner als 150 msec sind.

Die Veränderung der Reaktionszeit während der gesamten Versuchsdurchführung beträgt bei den Experimenten in der Regel weniger als 150 msec, wobei die Veränderung meist nicht signifikant ist. Die wenigen signifikanten Unterschiede verursachen keine Fehlinterpretationen des jeweiligen Experimentes. Dies ist durch Begutachtung der entsprechenden Meßprotokolle überprüft worden.

5.6 Ergebnisse von Experiment 1

Die Ergebnisse von Experiment 1 sind in Tabelle 5.2 angegeben. Bei diesem Experiment werden die Fälle eins bis vier der Überlappung untersucht. Die Daten der teilnehmenden Versuchspersonen sind in Anhang A.8 aufgeführt. Für jeden Fall wird jeweils der Mittelwert für den überlappenden und den nicht überlappenden Betrieb berechnet, wie in Abschnitt 3.18 erläutert. Die Differenz der beiden Mittelwerte ist in Tabelle 5.2 in den mit [msec] gekennzeichneten Spalten für jede Versuchsdurchführung und jeden Fall angegeben. In der nächsten Spalte ist die Irrtumswahrscheinlichkeit w der jeweiligen Differenz angegeben.

Im unteren Teil der Tabelle sind in der Zeile „alle Versuche“ für jeden Fall die durchschnittliche Differenz und die zugehörige Irrtumswahrscheinlichkeit, gemittelt über alle Versuchsdurchführungen, angegeben. In den beiden folgenden Zeilen werden zur Berechnung der angegebenen mittleren

Person	Versuch	Referenz a	Referenz e	Δ [msec]	Δ [%]	alle Werte
1	2002-04-26.17_04_59	320	371	-50	42,08%	598
1	2002-06-12.18_25_09.b	382	351	30	60,48%	512
2	2002-06-15.17_50_03	554	520	34	69,02%	764
3	2002-05-10.11_24_29.b	401	364	36	42,28%	780
3	2002-05-10.14_34_55	351	413	-63	37,53%	575
4	2002-05-03.13_56_34	574	437	138	38,97%	743
4	2002-05-13.10_49_31.b	444	503	-59	32,41%	721
4	2002-06-27.14_59_25	361	490	-129	4,41%	630
5	2002-05-06.15_09_14	620	657	-37	64,79%	1.096
5	2002-05-13.11_24_01	672	1.112	-440	0,07%	1.141
7	2002-04-30.17_58_53	532	448	84	2,68%	1.094
7	2002-05-17.15_20_08	519	477	41	36,30%	1.020
7	2002-06-27.17_59_45	542	446	97	15,00%	913
8	2002-05-03.12_57_39.b	1.595	862	732	0,49%	1.371
8	2002-05-10.12_17_04.b	951	686	265	2,28%	1.058
8	2002-06-28.10_11_24	622	572	50	39,93%	815
9	2002-05-04.21_11_27	562	516	46	47,71%	944
9	2002-05-14.12_14_06	489	578	-88	36,46%	845
10	2002-05-04.21_47_06	636	665	-30	77,25%	924
10	2002-05-14.12_36_55	590	695	-105	1,05%	958
11	2002-05-10.16_06_34	1.408	935	473	2,16%	1.049
12	2002-05-10.16_42_37	747	705	42	58,66%	939
13	2002-05-10.18_07_26	924	707	217	0,34%	1.065
13	2002-05-17.18_08_12	885	774	112	35,61%	812
14	2002-06-15.16_09_38.b	324	394	-71	15,46%	528
15	2002-06-15.16_52_28	421	441	-20	74,67%	709
16	2002-06-15.17_26_32	464	454	11	84,09%	665
17	2002-06-20.18_10_23	534	425	110	12,28%	830
18	2002-06-22.20_34_25	318	527	-208	0,78%	653
19	2002-06-26.22_06_24	522	379	143	0,60%	655
20	2002-06-27.14_01_53	529	419	110	10,85%	864
21	2002-06-27.15_27_14	397	400	-3	96,22%	683
Mittelwerte		600	554	46	32,59%	842

Tabelle 5.1: Referenzversuche

Differenzen nur die Differenzen derjenigen Versuchsdurchführungen benutzt, deren Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 5 % (bzw. größer 95 %) ist.

Bei der Vorstellung der verschiedenen Kombinationen der einzelnen Signalleuchten in Abschnitt 3.17 werden Erwartungen über den Einfluß der Überlappung geäußert. Anhand der gewonnenen Meßergebnisse können einige Erwartungen bestätigt werden, andere sind zu revidieren.

1. Für Fall 1 der Überlappung wird erwartet, daß der Unterschied der Reaktionszeit zwischen überlappendem und nicht überlappendem Betrieb mindestens 500 msec beträgt. Diese Erwartung bestätigt sich. Mit einem Blick auf Diagramm 5.2 erkennt man, daß fast alle Meßwerte über 500 msec liegen.

Der Großteil der Unterschiede ist signifikant und befindet sich im Bereich von 500 msec bis zu einer Sekunde.

2. In diesem Fall wird keine wesentliche Verlängerung der Reaktionszeit erwartet. Der Mittelwert aller Meßwerte in Diagramm 5.3 beträgt nur 75 msec, jedoch kann über die Signifikanz

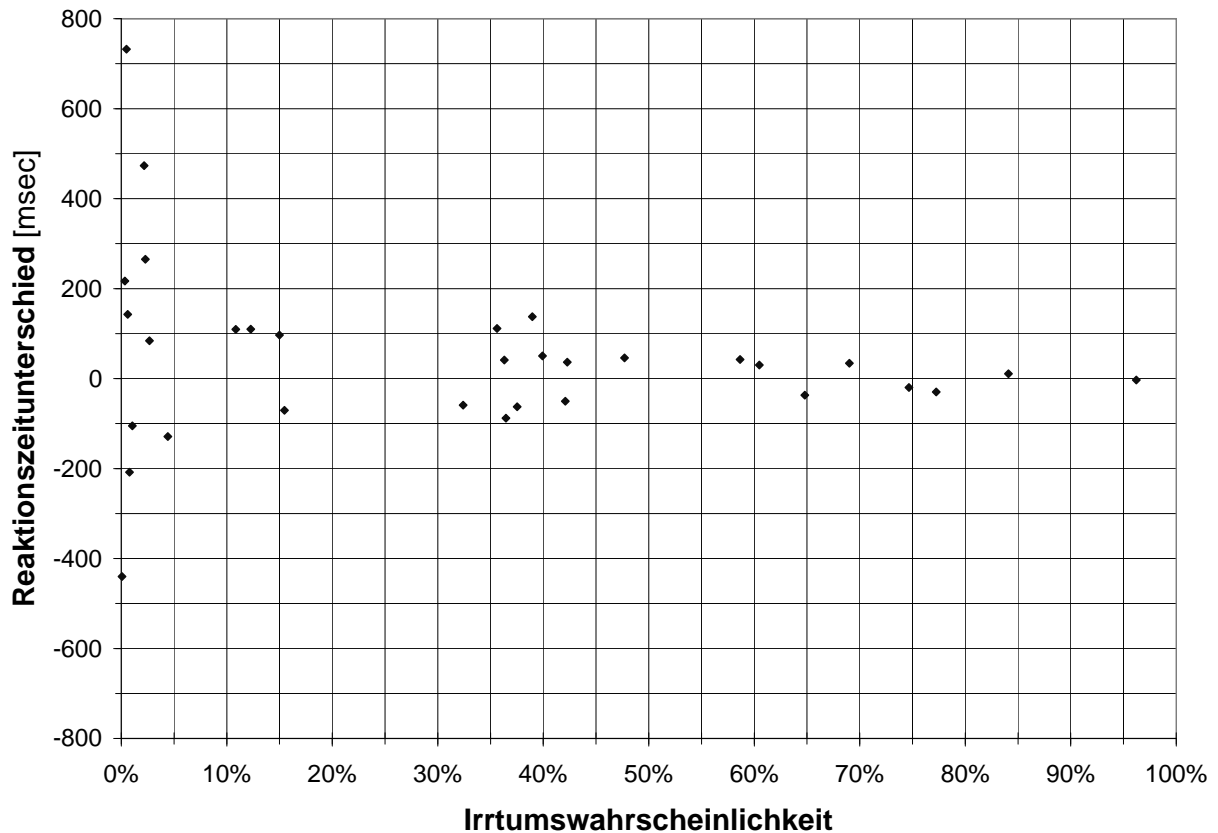


Diagramm 5.1: Referenzversuche, Unterschiede der Reaktionszeiten

der meisten Meßwerte keine Aussage getroffen werden. Wenige Meßwerte weisen eine signifikante Verlängerung der Reaktionszeit auf. Diese beträgt ca. 200 msec. Etwa genauso viele Meßwerte weisen eindeutig keinen Unterschied in der Reaktionszeit auf.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß kein nennenswerter Unterschied besteht.

3. Bei dem dritten Fall ist bei einem Viertel der Meßwerte ein signifikanter Anstieg der Reaktionszeit um fast 400 msec feststellbar. Über mehr als die Hälfte der Meßwerte in Diagramm 5.4 kann keine signifikante Aussage getroffen werden. Die Unterschiede dieser Meßwerte sind geringer als 250 msec.

In Fall drei tritt bei einer nicht zu vernachlässigenden Anzahl von Testpersonen eine signifikante Verlängerung der Reaktionszeit um 400 msec bei überlappendem Betrieb auf.

4. Die erwartete, wesentlich verlängerte Reaktionszeit im überlappenden Fall wird durch die Meßwerte in Diagramm 5.5 bestätigt. Wie in Fall eins liegen auch hier die meisten Meßwerte im Bereich bis zu einer Sekunde. Jedoch reicht der Bereich aller signifikanten Werte bis zu 2,5 Sekunden hinauf.

Dieser Fall der Überlappung verschiedenfarbiger Signale stellt eine ernste Gefahrenquelle dar. Die signifikante Verlängerung der Reaktionszeit beträgt durchschnittlich eine Sekunde.

Person	Versuch	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
		[msec]	w [%]	[msec]	w [%]	[msec]	w [%]	[msec]	w [%]
1	2002-04-26.17_04_59	205	0,02%	4	90,38%	152	20,87%	606	1,16%
3	2002-05-10.11_24_29.b	877	1,12%	46	30,47%	243	0,85%	1.432	2,62%
3	2002-05-10.14_34_55	177	0,43%	0	99,99%	-80	33,13%	33	76,21%
4	2002-05-03.13_56_34	515	0,01%	141	12,77%	34	60,96%	421	2,89%
4	2002-05-13.10_49_31.b	557	0,98%	6	88,66%	140	13,01%	239	15,07%
5	2002-05-06.15_09_14	445	0,36%	188	23,05%	101	23,04%	619	0,27%
5	2002-05-13.11_24_01	497	0,00%	55	58,43%	-17	76,11%	883	4,49%
7	2002-04-30.17_58_53	1.166	0,07%	-4	98,11%	78	55,34%	2.296	0,70%
7	2002-05-17.15_20_08	625	0,02%	3	95,87%	329	0,67%	2.499	1,10%
8	2002-05-03.12_57_39.b	1.073	0,01%	218	0,65%	-13	92,74%	870	1,08%
8	2002-05-10.12_17_04.b	752	1,96%	199	3,25%	228	33,70%	314	4,03%
9	2002-05-04.21_11_27	615	0,24%	243	8,61%	192	20,50%	1.317	18,78%
9	2002-05-14.12_14_06	208	25,43%	54	61,44%	-53	63,57%	546	23,57%
10	2002-05-04.21_47_06	627	0,00%	94	20,76%	-106	7,24%	363	15,85%
10	2002-05-14.12_36_55	704	1,17%	-89	29,84%	134	23,99%	787	0,28%
11	2002-05-10.16_06_34	993	0,09%	182	5,46%	597	1,11%	529	1,77%
12	2002-05-10.16_42_37	758	0,01%	-43	49,10%	503	0,10%	462	0,72%
13	2002-05-10.18_07_26	871	0,00%	15	77,19%	234	20,00%	1.583	2,10%
13	2002-05-17.18_08_12	541	6,35%	121	5,14%	196	1,59%	99	19,41%
Mittelwerte		Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
alle Versuche		643	2,01%	75	45,22%	152	28,87%	837	10,11%
nur Versuche mit w<5%		674	<5%	209	<5%	374	<5%	1.023	<5%
nur Versuche mit w>95%				2	>95%				

Tabelle 5.2: Experiment 1, Unterschied der Reaktionszeiten

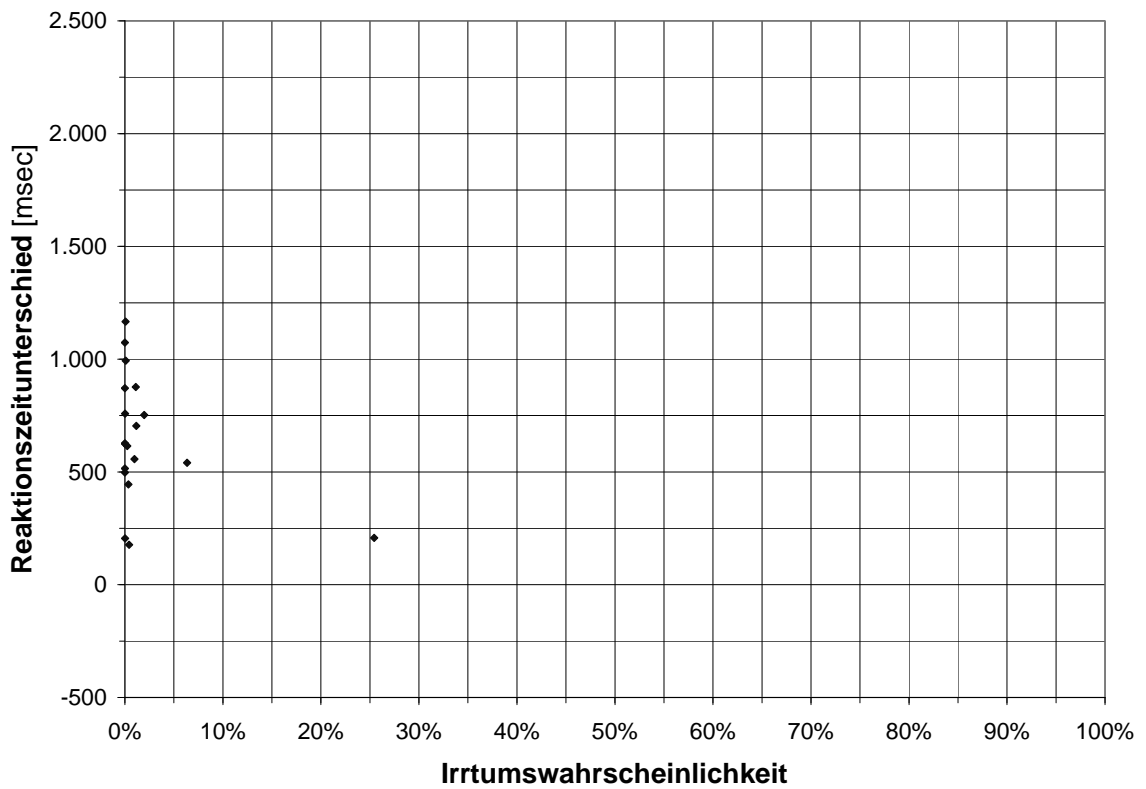


Diagramm 5.2: Fall 1, *led_licht* während *led_blink*

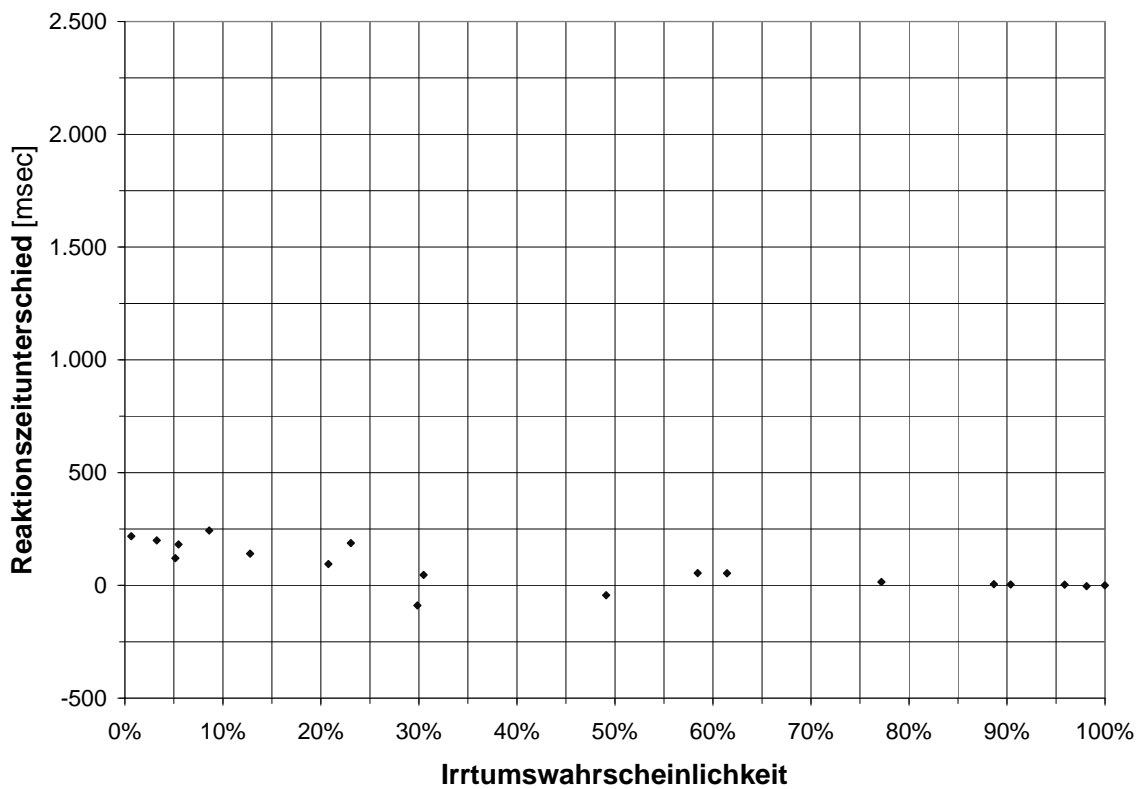


Diagramm 5.3: Fall 2, *led_brems* während *led_blink*

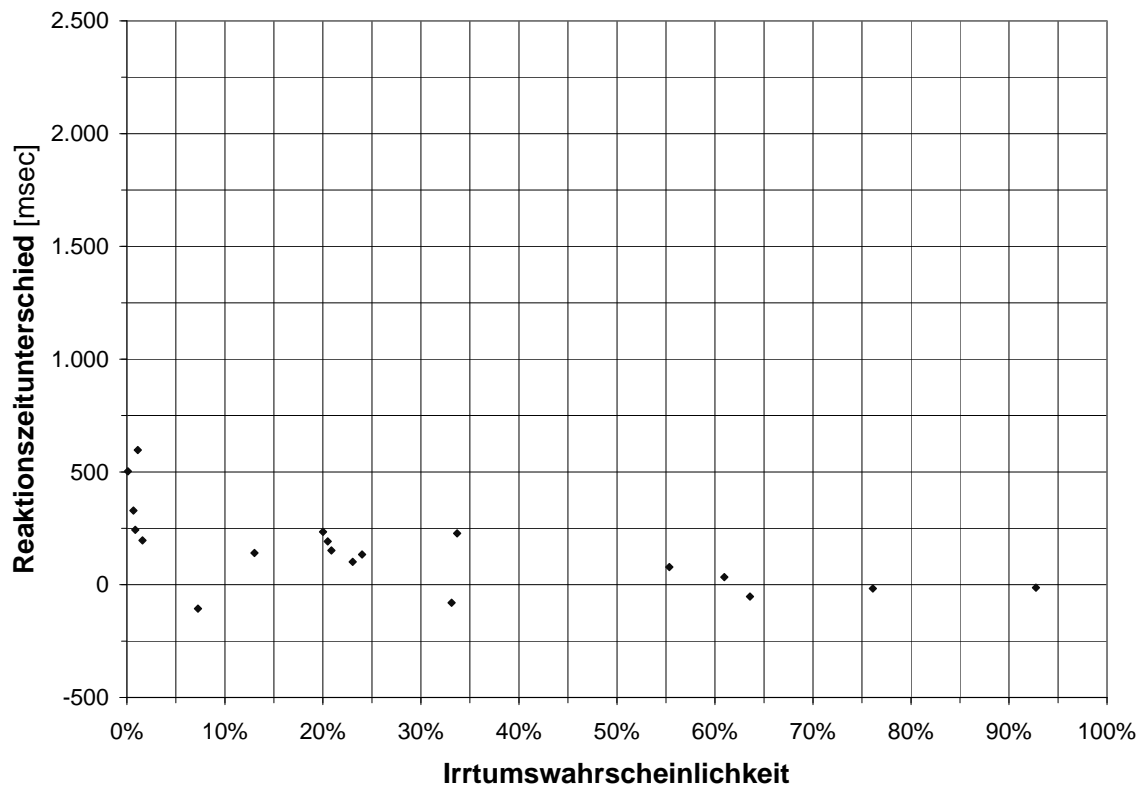


Diagramm 5.4: Fall 3, *led_blink* während *led_licht*

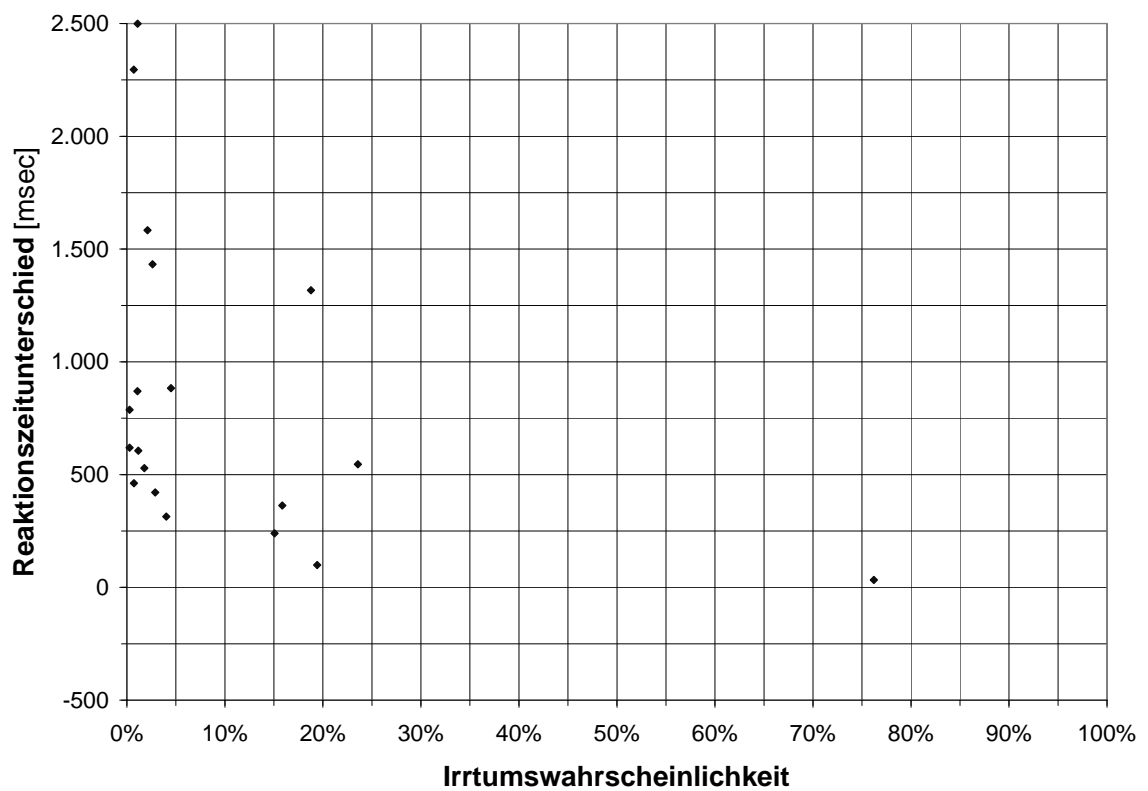


Diagramm 5.5: Fall 4, *led_blink* während *led_brems*

5.7 Ergebnisse von Experiment 2

In Experiment 1 werden Überlappungen verschieden heller Signallichter untersucht. Das Ergebnis der Versuche konnte tendenziell vorausgesagt werden. Für Experiment 2 können in Abschnitt 3.17 keine konkreten Erwartungen geäußert werden. Durch die Mischung der Signalfarben entsteht eine dritte Farbe, orange, für die keine Erfahrungswerte vorliegen, ob sie als Bremsleuchte oder Fahrtrichtungsanzeiger erkannt wird. Auch der Einfluß der Teilüberlappung kann aufgrund fehlender Erfahrung nicht eingeschätzt werden.

Anhand der durchgeführten Versuche können die Auswirkungen dieser Effekte aufgezeigt werden. Die Ergebnisse von Experiment 2 sind in Tabelle 5.3 angegeben. Diese Tabelle ist ähnlich wie Tabelle 5.2 aufgebaut. Die Erläuterungen am Anfang von Abschnitt 5.6 der einzelnen Spalten der Tabelle können daher sinngemäß auch auf diese Tabelle angewandt werden. Begonnen wird mit der Auswertung des fünften Falles der Überlappung.

5. In Fall 5 der Überlappung besitzen beide Signalbilder die gleiche Leuchtdichte und Fläche. In Diagramm 5.6 ist eine signifikante Verlängerung der Reaktionszeit von durchschnittlich 300 msek festzustellen. Die Abweichungen der signifikanten Zeitunterschiede von diesem Mittelwert sind wesentlich geringer, als in den Fällen eins, vier und acht.

In diesem Fall der Überlappung verlängert sich die Reaktionszeit um 300 msek.

6. Der Unterschied in der Reaktionszeit ist bei allen Versuchspersonen kleiner als 150 msek, im Mittel nur 40 msek. Die Signifikanz in Diagramm 5.7 ist bei keinem Versuch ausreichend, um entscheiden zu können, ob der statistische Zeitunterschied einen signifikanten Unterschied darstellt. Um die Aussagefähigkeit der Meßwerte zu erhöhen, muß die Versuchsdurchführung mit dem Ziel verändert werden, eine größere Anzahl von Meßwerten pro Durchführung für diesen Fall der Überlappung zu erhalten. Dadurch wird die Streuung verringert und die Aussagekraft erhöht.

Es ist davon auszugehen, daß kein nennenswerter Unterschied in der Reaktionszeit besteht.

7. Bei diesem Fall liegt fast die gleiche Art der Überlappung vor, wie im vorherigen. Lediglich die Leuchtdichte der Bremsleuchte ist halbiert. Die in Abschnitt 3.17 geäußerte Befürchtung, daß auf diese dunklere Bremsleuchte langsamer, als auf die hellere, reagiert wird, kann durch die Versuchsdurchführung nicht bestätigt werden.

Der Mittelwert der Ergebnisse ist mit 60 msek minimal größer, als im vorhergehenden Fall. (Der einzelne Wert größer 750 msek in Diagramm 5.8 wird als Ausnahme gewertet und nicht berücksichtigt. Dies ist legitim, da die Irrtumswahrscheinlichkeit des Wertes 34 % beträgt, was besagt, daß zu einem Drittel kein Unterschied besteht.)

Auch in diesem Fall ist davon auszugehen, daß kein nennenswerter Unterschied besteht.

Die Ergebnisse in Fall 6 und 7 sind fast gleich. Bei der untersuchten Art der Teilüberlappung hat eine Verringerung der Leuchtdichte der größeren Signalfäche keinen Einfluß auf die Reaktionszeit.

8. In diesem Fall weist zwar ein Drittel der Versuche auf eine signifikante Verlängerung der Reaktionszeit hin, jedoch verkürzte sich in einem Versuch die Reaktionszeit signifikant um 200 msek. Dieser Wert kann aufgrund seiner geringen Irrtumswahrscheinlichkeit nicht vernachlässigt werden. Der überwiegende Teil der Reaktionszeitunterschiede in Diagramm 5.9 ist geringer als 250 msek.

Tendenziell weisen die Ergebnisse auf eine Verlängerung der Reaktionszeit um 250 msek hin.

Eine größere als die vorhandene Anzahl von Meßwerten ist notwendig, um diese Aussage zu bekräftigen.

9. In diesem Fall scheint der Einfluß der Überlappung auf die Reaktionszeit personenabhängig zu sein. Bei mehr als einem Drittel der Personen ist der Unterschied kleiner als 40 msek oder nicht vorhanden. Wenn die Signifikanzgrenze auf 10 % erhöht wird, zeigt sich bei einer genauso großen Gruppe von Personen eine durchschnittliche Verlängerung der Reaktionszeit um 200 msek. Die Meßwerte der beiden Personengruppen sind in Diagramm 5.10 zu sehen. Die Werte der ersten Gruppen befinden sich rechts der 50 % Linie, die der zweiten Gruppe links der 10 % Linie.

In diesem Fall der Überlappung kommt es bei einer Personengruppe zu einer Verlängerung der Reaktionszeit um 200 msek. Bei einer anderen Gruppe nimmt die Überlappung keinen Einfluß auf die Reaktionszeit. Demzufolge kann keine einheitliche Aussage getroffen werden.

10. Auch in diesem Fall ist der Einfluß auf die Reaktionszeit personenabhängig. Es kristallisieren sich zwei Personengruppen heraus. Die Zusammensetzung der beiden Gruppen entspricht der im vorherigen Fall. Die Verlängerung der Reaktionszeit ist etwas geringer als zuvor, nämlich 170 msek. Diese Verkürzung des Unterschiedes wird erwartet, da sich der Fahrtrichtungsanzeiger auf Grund seiner höheren Leuchtdichte von der Bremsleuchte abhebt. Bei der anderen Gruppe gibt es keinen nennenswerten Einfluß auf die Reaktionszeit. Die Meßwerte dieser Gruppe befinden sich rechts der 15 % Linie in Diagramm 5.11.

Bis auf eine kleine Verkürzung des Reaktionszeitunterschiedes sind die Ergebnisse die gleichen, wie in Fall 9. Die Verringerung der Leuchtdichte der größeren Signalfäche hat nur einen geringen Einfluß auf die Reaktionszeit.

Durch Betrachtung der Personendaten in Anhang A.8 stellt sich heraus, daß die Zusammensetzung der beiden Personengruppen in Fall 9 und 10 von der Sehschärfe abhängt. Die Personen mit einer größeren Sehschärfe sehen in beiden Fällen den Fahrtrichtungsanzeiger mit gelber Farbe, den anderen Personen scheint er orange zu sein. Würde ein größerer Beobachtungsabstand gewählt, so würde sich bei allen Personen eine Verlängerung der Reaktionszeit um 200 msek in Fall 9 und 10 ergeben.

Person	Versuch	Fall 5		Fall 6		Fall 7	
		[msec]	w [%]	[msec]	w [%]	[msec]	w [%]
1	2002-06-12.18_25_09.b	81	24,74%	-8	84,43%	-4	92,17%
2	2002-06-15.17_50_03	42	54,91%	113	14,52%	-39	49,54%
4	2002-06-27.14_59_25	38	58,58%	60	35,83%	93	29,53%
7	2002-06-27.17_59_45	362	7,60%	-84	58,96%	-43	78,26%
8	2002-06-28.10_11_24	273	0,61%	93	10,16%	35	45,16%
14	2002-06-15.16_09_38.b	197	7,26%	53	7,26%	33	42,18%
15	2002-06-15.16_52_28	12	79,39%	-16	68,68%	765	33,98%
16	2002-06-15.17_26_32	314	1,61%	39	49,50%	3	94,46%
17	2002-06-20.18_10_23	359	1,09%	151	8,12%	332	0,84%
18	2002-06-22.20_34_25	139	10,86%	32	51,02%	162	7,63%
19	2002-06-26.22_06_24	207	2,43%	58	35,65%	45	45,84%
20	2002-06-27.14_01_53	124	25,85%	-24	72,02%	-9	86,99%
21	2002-06-27.15_27_14	376	0,25%	52	33,91%	112	5,88%

Mittelwerte	Fall 5	Fall 6	Fall 7
alle Versuche	194 21,17%	40 40,77%	114 47,11%
nur Versuche mit w<5%	306 <5%		332 <5%
nur Versuche mit w<10%	298 <10%	102 <10%	202 <10%
nur Versuche mit w>95%			

Person	Versuch	Fall 8		Fall 9		Fall 10	
		[msec]	w [%]	[msec]	w [%]	[msec]	w [%]
1	2002-06-12.18_25_09.b	82	21,27%	174	9,73%	114	6,14%
2	2002-06-15.17_50_03	-198	1,51%	-21	80,69%	66	55,53%
4	2002-06-27.14_59_25	27	70,60%	110	16,68%	-63	18,92%
7	2002-06-27.17_59_45	991	0,32%	232	3,55%	127	8,07%
8	2002-06-28.10_11_24	-11	89,10%	-40	52,04%	-65	23,40%
14	2002-06-15.16_09_38.b	-10	91,27%	-114	20,44%	-22	83,09%
15	2002-06-15.16_52_28	37	73,85%	183	14,78%	21	73,19%
16	2002-06-15.17_26_32	191	31,68%	19	88,25%	-79	40,66%
17	2002-06-20.18_10_23	69	57,57%	35	56,89%	36	61,22%
18	2002-06-22.20_34_25	461	12,33%	1	99,10%	5	95,40%
19	2002-06-26.22_06_24	236	2,14%	171	8,24%	167	6,28%
20	2002-06-27.14_01_53	166	0,52%	286	1,79%	244	12,91%
21	2002-06-27.15_27_14	231	1,05%	105	8,06%	186	1,45%

Mittelwerte	Fall 8	Fall 9	Fall 10
alle Versuche	175 34,86%	88 35,40%	57 37,41%
nur Versuche mit w<5%	285 <5%	259 <5%	186 <5%
nur Versuche mit w<10%	285 <10%	194 <10%	148 <10%
nur Versuche mit w>95%		1 >95%	5 >95%

Tabelle 5.3: Experiment 2, Unterschied der Reaktionszeiten

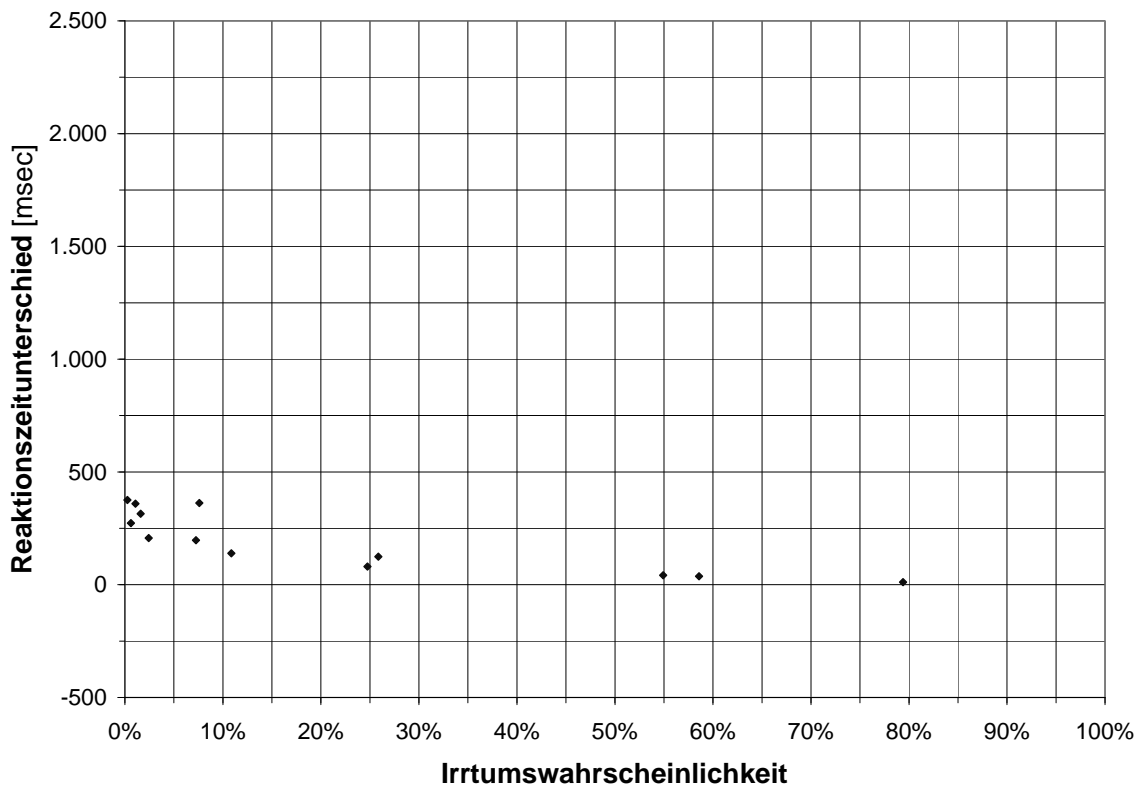


Diagramm 5.6: Fall 5, *led_brems_3* zu *led_brems_4* während *led_blink_2*

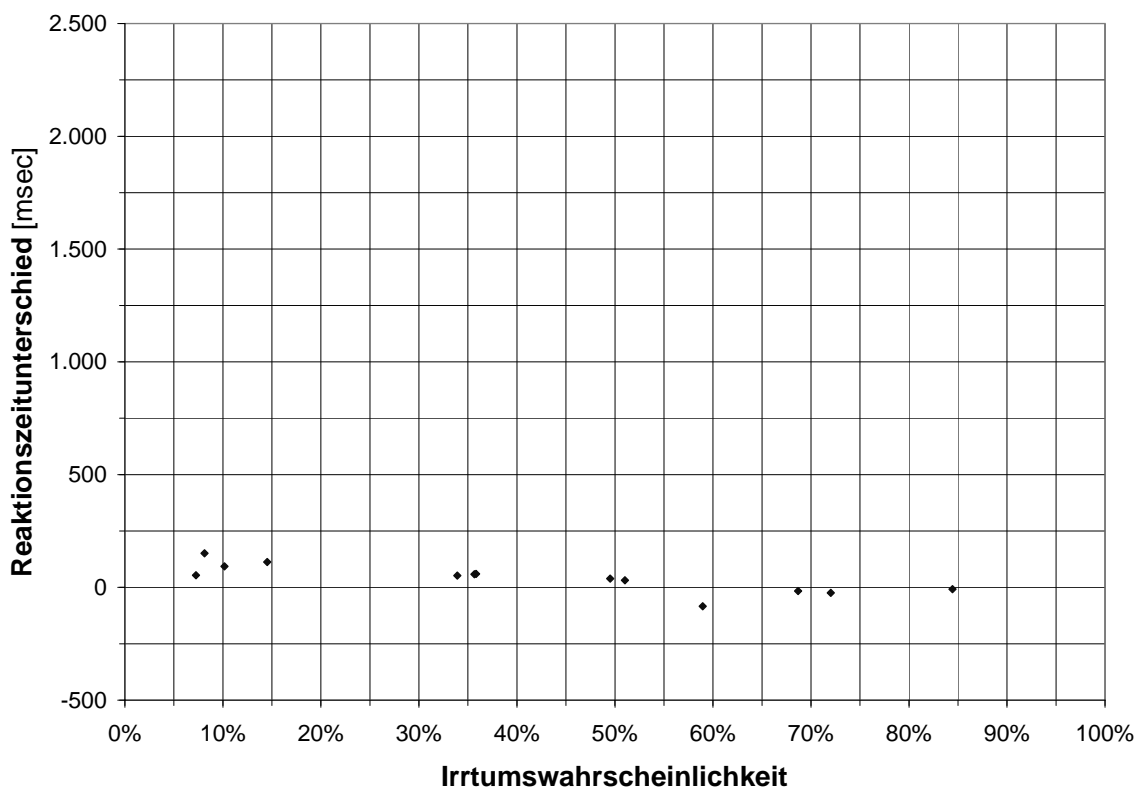


Diagramm 5.7: Fall 6, *led_brems_3* zu *led_brems_5* während *led_blink_2*

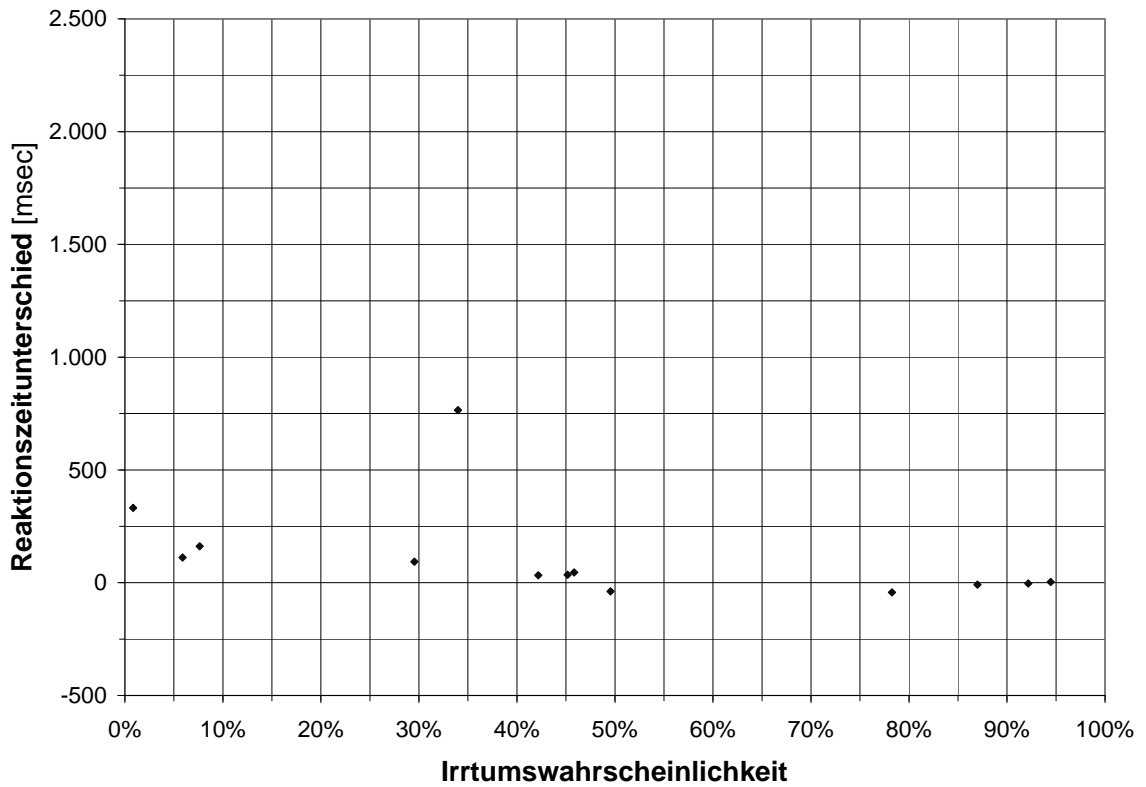


Diagramm 5.8: Fall 7, *led_brems_3* zu *led_brems_6* während *led_blink_2*

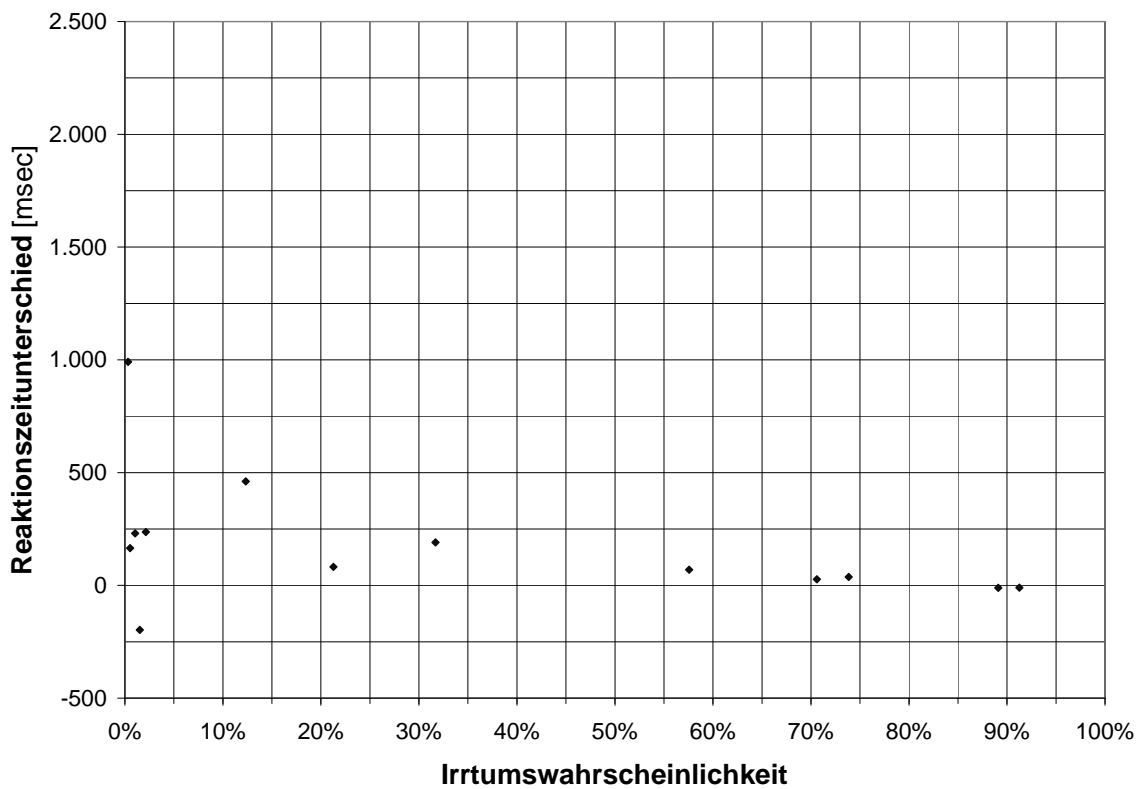


Diagramm 5.9: Fall 8, *led_blink_2* während *led_brems_3* zu *led_brems_4*

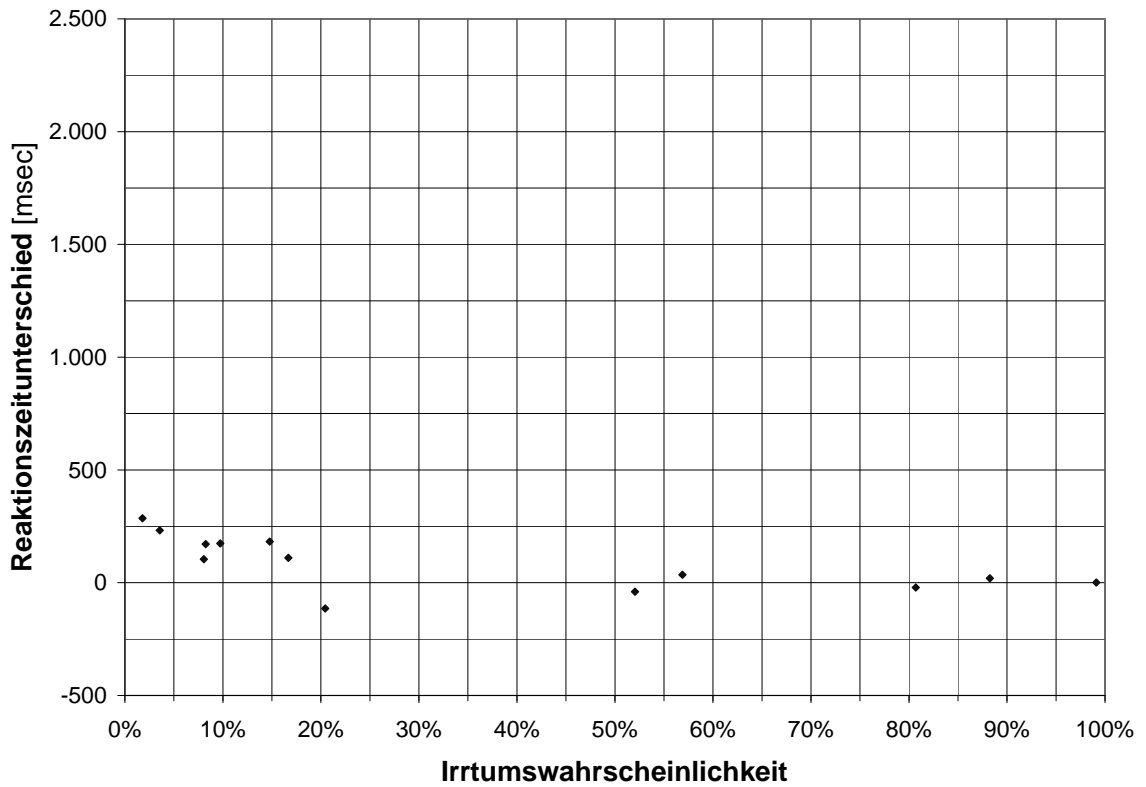


Diagramm 5.10: Fall 9, *led_blink_2* während *led_brems_3* zu *led_brems_5*

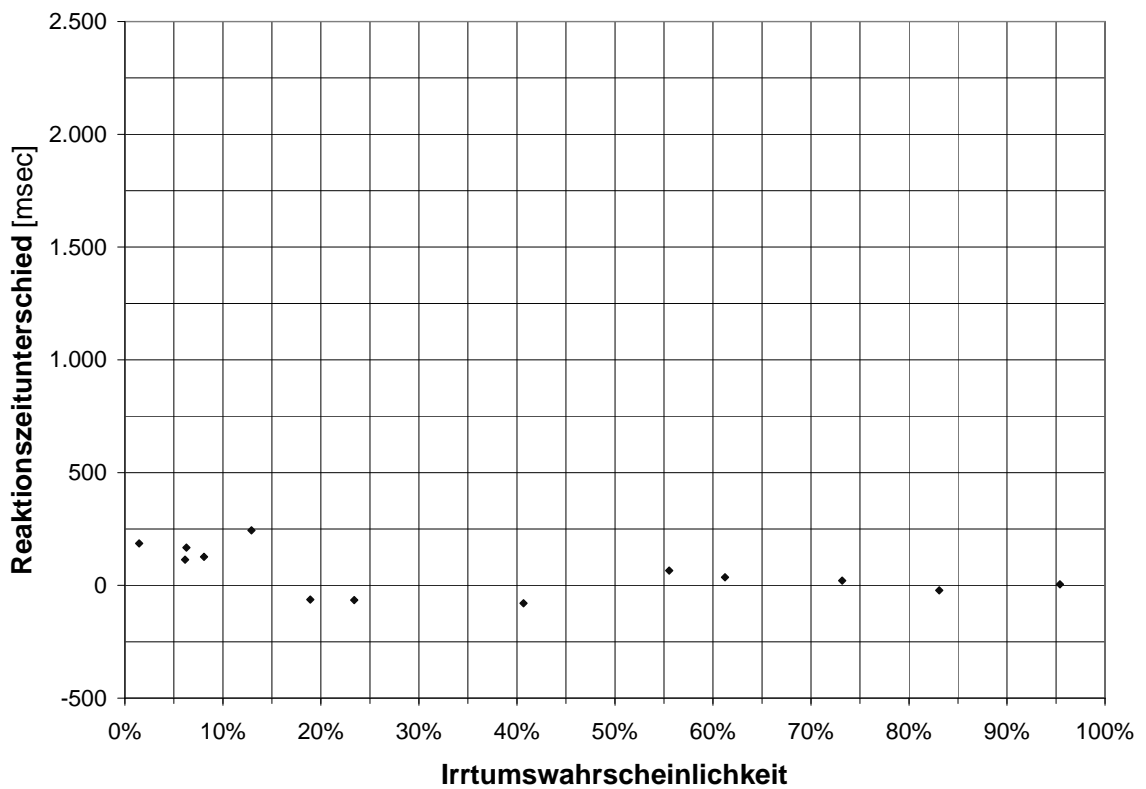


Diagramm 5.11: Fall 10, *led_blink_2* während *led_brems_3* zu *led_brems_6*

5.8 Ergebnisübersicht

In den letzten beiden Abschnitten sind die Ergebnisse anhand der erstellten Diagramme beschrieben worden. Tabelle 5.4 gibt einen Überblick über alle diese Ergebnisse.

Fall 1	Zuerst Blinker, dann dunkle rote Leuchte hinzu. Signifikante Verlängerung um 500 bis 1000 ms	Verhältnis 5:1
Fall 2	Zuerst Blinker, dann helle rote Leuchte hinzu. Keine nennenswerte Verlängerung	Verhältnis 1:5
Fall 3	Zuerst dunkle rote Leuchte, dann Blinker hinzu. Bei 25 % der Versuche Verlängerung um 400 ms	Verhältnis 1:5
Fall 4	Zuerst helle rote Leuchte, dann Blinker hinzu. Signifikante Verlängerung um durchschnittlich 1000 ms	Verhältnis 5:1
Fall 5	Zuerst Blinker, dann rote Leuchte hinzu. Signifikante Verlängerung um 300 ms	Verhältnis 1:1
Fall 6	Zuerst Blinker, dann große rote Leuchte hinzu. Keine nennenswerte Verlängerung	Verhältnis 1:1
Fall 7	Zuerst Blinker, dann dunkle große rote Leuchte hinzu. Keine nennenswerte Verlängerung	Verhältnis 2:1
Fall 8	Zuerst rote Leuchte, dann Blinker hinzu. Signifikante Verlängerung um 250 ms	Verhältnis 1:1
Fall 9	Zuerst große rote Leuchte, dann Blinker hinzu. Verlängerung um 200 ms	Verhältnis 1:1
Fall 10	Zuerst dunkle große rote Leuchte, dann Blinker hinzu. Verlängerung um 200 ms	Verhältnis 1:2

Tabelle 5.4: Verlängerung der Reaktionszeit durch Überlappung, Überblick aller Ergebnisse

5.9 Diskussion der Ergebnisse

5.9.1 Amerikanische und europäische Signalbilder im Vergleich

In Abschnitt 2.6.3, der Betrachtung der Untersuchungen von Mortimer [Mor70], wird festgestellt, daß bei Signallichtern gleicher Farbe und gleicher Leuchtdichte durch die Überlappung eine Verlängerung der Reaktionszeit um 500 msek stattfindet. Mit Experiment 2 der nun durchgeführten Untersuchungen wird gezeigt, daß bei unterschiedlicher Farbe die Verlängerung der Reaktionszeit nur 300 msek beträgt.

Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger mit gleicher Leuchtdichte und mit derselben Austrittsfläche des Lichtes, die eine unterschiedliche Farbkodierung haben, sind demnach sicherer, als solche mit gleicher Farbe für beide Signalfunktionen. Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger mit europäischer Farbkodierung (rotes Bremslicht und gelber Fahrtrichtungsanzeiger mit Farbwerten, die den ECE-Regelungen entsprechen) und vollständiger Überlappung sind sicherer, als die traditionelle amerikanische Kodierung (rote Farbe bei Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger), jedoch unsicherer für den Verkehr, als traditionelle europäische ohne Überlappung. Am unsichersten sind die traditionellen amerikanischen Rückleuchten, bei denen beide Signalfunktionen dieselbe Fläche benutzen, was schon Mortimer [Mor70] festgestellt hat.

Die Verlängerung der Reaktionszeit dieser vier Leuchtensysteme, bei denen jede Signalleuchte die gleiche Flächengröße und die gleiche Leuchtdichte hat, ist in Tabelle 5.5 zusammengefaßt.

Flächennutzung	Farbkodierung	Verlängerung der Reaktionszeit
vollständige Überlappung	gleiche Farbe	1 000 msec
getrennte Flächen	gleiche Farbe	500 msec
vollständige Überlappung	unterschiedliche Farbe	300 msec
getrennte Flächen	unterschiedliche Farbe	0 msec

Tabelle 5.5: Reaktionszeitunterschiede verschiedener Leuchtensysteme gleicher Leuchtdichte

5.9.2 Bezug der Ergebnisse zu existierenden Leuchten

Bei der schon mehrmals erwähnten Leuchteneinheit des VW Phaeton liegt Teilüberlappung von zwei Lichtsignalen unterschiedlicher Farbe vor.

Die Leuchtdichte des Fahrtrichtungsanzeigers ist 50 mal so groß, wie die der Schlußleuchte. Der Fahrtrichtungsanzeiger wird vollständig von der Schlußleuchte überlappt, diese jedoch nur zu ca. einem Viertel von dem Fahrtrichtungsanzeiger. Zur Erzeugung des gelben Lichtes des Fahrtrichtungsanzeigers werden Duo-LED's benutzt, die auch das rote Licht der Schlußleuchte in dem gemeinsamen Flächenbereich erzeugen.

Die Reaktionszeit, die ein nachfolgender Fahrzeugführer benötigt, um auf das Aufleuchten des Schlußlichtes zu reagieren, ist irrelevant, da das Einschalten von diesem Signallicht keine akute Gefahr anzeigt. Die Reaktionszeit des nachfolgenden Fahrers auf das Einsetzen des Fahrtrichtungsanzeigers, während die Schlußleuchte in Betrieb ist, darf nicht wesentlich verlängert werden.

Von den untersuchten Fällen kommt Fall 10 der hier vorliegenden Situation am nächsten. In Fall 10 beträgt das Leuchtdichteverhältnis 1:2, hier 1:50. Es kann daher davon ausgegangen werden, daß die Verlängerung der Reaktionszeit bei der Phaeton-Leuchteneinheit wesentlich geringer, als in Fall 10, ist.

Die Reaktionszeit auf das Aufleuchten des Fahrtrichtungsanzeigers verlängert sich durch die Überlappung weniger als 200 msec. Dies entspricht ungefähr der Verkürzung der Reaktionszeit, die durch den Einsatz von Leuchtdioden anstelle von Glühlampen erreicht wird.

5.9.3 Einfluß des Leuchtdichteverhältnisses auf die Reaktionszeit

Das Verhältnis der Leuchtdichten der überlappenden Signalleuchten beeinflusst stark die Reaktionszeit. Bei einem Verhältnis von 1:1 beträgt die Verlängerung der Reaktionszeit durch die Überlappung weniger als 300 msec.

Wenn das als zweites erscheinende Signal eine fünfmal höhere Leuchtdichte besitzt, als das schon anliegende Signal, so beträgt die Verlängerung der Reaktionszeit bei einem Großteil der Versuchspersonen weniger als 250 msec.

Wenn die Leuchtdichte des als zweites erscheinenden Signales jedoch nur ein Fünftel der schon zu sehenden Leuchtdichte beträgt, dann verlängert sich die Reaktionszeit meist um mehr als 500 msec. Das als zweites erscheinende Signal wird teilweise ganz übersehen.

In Tabelle 5.6 wird dieser Sachverhalt dargestellt. Das Leuchtdichteverhältnis gibt das Verhältnis von anliegender Leuchtdichte zu hinzukommender Leuchtdichte an.

Leuchtdichteverhältnis	Verlängerung der Reaktionszeit
5:1	größer 500 msek
1:1	300 msek
1:5	250 msek

Tabelle 5.6: Reaktionszeitunterschiede bei unterschiedlicher Leuchtdichte

5.9.4 Einfluß des Überlappungsverhältnisses auf die Reaktionszeit

Bei teilweiser Überlappung der Flächenanteile zweier Lichtsignale unterschiedlicher Farbe wird ein Anteil des Lichtsignales nicht überlappt. Ist dieser nicht überlappende Anteil so groß, daß er für eine sichere Signalisierung ausreicht, wird die Reaktionszeit nicht oder weniger als 200 msek durch die Überlappung verlängert. Die Verlängerung entsteht, weil der Kontrast der Signalleuchte zu ihrem direkten Umfeld geringer ist, wie er es bei einer abgesetzten Leuchte wäre. Eine *sichere Signalisierung* liegt dann vor, wenn der nicht überlappende Anteil auch als eigenständige Leuchte den gesetzlichen Regelungen über die Lichtstärke genügt. Der überlappende Teil ist dann nur als Zusatz zu einer normalen Leuchte anzusehen.

Die Problematik der Teilüberlappung von Signalleuchten ist vergleichbar mit der aneinandergelagerten Signalleuchten.

5.10 Schlußfolgerung

Die heute zur Verfügung stehenden Leuchtmittel eröffnen neue Möglichkeiten im Fahrzeugdesign. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von Überlappung bei Kraftfahrzeugrückleuchten, realisierbar durch Leuchtdioden als Leuchtmittel.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen ist festzustellen, daß sich bei gleicher Leuchtdichte von Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger die Reaktionszeit nicht, oder nur minimal verlängert, wenn Teilüberlappung vorliegt. Es ist davon auszugehen, daß sich die Reaktionszeit nicht verlängert, wenn beide Signalfächen mindestens zu 50 % nicht überlappen. Eine solche Leuchtenkombination ist ein Beispiel für gutes Design von Fahrzeugrückleuchten.

Gefährlich für den Straßenverkehr und ein Beispiel für schlechtes Design ist eine Leuchtenkombination, bei der die Signalfächen vollständig überlappen und das Leuchtdichteverhältnis größer 1:5 ist. Das dunklere Signallicht kann bei gleichzeitigem Betrieb der Leuchten übersehen werden.

Die grundlegende Frage nach der Abhängigkeit der Reaktionszeit von dem Überlappungsgrad der Flächenanteile zweier Lichtsignale unterschiedlicher Farbe kann anhand der vorgestellten Ergebnisse beantwortet werden:

Bei gutem Design von Fahrzeugrückleuchten verlängert sich die Reaktionszeit nicht, oder nur minimal.

Bei schlechtem Design wird die Verlängerung der Reaktionszeit unakzeptabel groß. Signale können übersehen werden.

Kapitel 6

Ausblick

6.1 Weitere Untersuchungen

Die gesamte Problematik der Überlappung verschiedenfarbiger Signale ist durch die vorliegende Arbeit noch nicht vollständig untersucht. Es sind weitere Experimente durchzuführen, um alle Intensitätsverhältnisse zu ermitteln, bei denen keine signifikante Verlängerung der Reaktionszeit auftritt.

Im Bereich der Teilüberlappung existieren bedeutend mehr mögliche Kombinationen, wie bisher untersucht. In folgenden Arbeiten werden daher weitere Fälle der Teilüberlappung zu untersuchen sein.

6.2 Freier Zugriff auf die Meßdaten

Während den Versuchsdurchführungen sind erheblich mehr Daten erhoben worden, als für die Auswertung benötigt. Die gesamten Meßprotokolle mit diesen Daten sind auf dem Internet-Server des lichttechnischen Institutes der Universität Karlsruhe [<http://www.lti.uni-karlsruhe.de>] frei zugänglich. Dadurch wird die Möglichkeit gegeben, auch ohne Experimente weitere Untersuchungen im Bereich der Fahrzeugtechnik und über die Beeinflussung der Reaktionszeit durchzuführen.

6.3 Der Einfluß der Überlappung bei Blendung

In der vorliegenden Arbeit wird nur der Einfluß der Überlappung auf die Reaktionszeit für das hell adaptierte Auge untersucht. In Abschnitt 3.1 wird begründet angenommen, daß die gewonnenen Ergebnisse auch für mesopisches und skotopisches Sehen gelten. Die Problematik der Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge bleibt hier unberücksichtigt. Diese Problematik ist in weiteren Arbeiten zu untersuchen, die den Einfluß der Überlappung auf die Reaktionszeit bei gleichzeitiger Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge ermitteln. Das Licht des Gegenverkehrs sollte auch in der Farbe variiert werden. Es ist vorstellbar, daß dann gerade in Fall 4 der Fahrtrichtungsanzeiger vollständig übersehen wird.

6.4 Techniken für weitere Experimente

In Experiment 2 ist die Anzahl der Ergebnisse im signifikanten Bereich knapp. Um eine größere Anzahl aussagekräftiger Meßwerte zu erhalten, kann in einer folgenden Arbeit der Versuchsaufbau erweitert werden, um dem Probanden eine Zusatzaufgabe anzubieten. Der Aufbau und das Meßgerät ist für eine solche Erweiterung schon vorbereitet. Wenn die Anzahl der zu untersuchenden Fälle pro Experiment gesenkt wird, können mehr Meßwerte pro Fall erhalten werden. Durch die Zusatzaufgabe bleibt der Versuchsablauf trotz der häufigen Anbietung gleicher Signalbilder abwechslungsreich.

Eine mögliche Fortsetzung der Experimente sollte in einem Fahrsimulator durchgeführt werden. In diesem bietet sich dem Probanden eine realistischere Situation, als in den durchgeführten Laborversuchen. Der zu betreibende Aufwand für die Messungen ist dabei geringer, als dies für Fahrversuche der Fall wäre. Zuvor sollte überprüft werden, inwieweit darin ermittelte Erkenntnisse mit den aus Fahrversuchen ermittelten übereinstimmen.

6.5 Untersuchungen in angrenzenden Themengebieten

Der Zusammenhang von Leuchtdichte und Fläche bei gleicher Lichtstärke wird in dieser Arbeit bereits aufgezeigt (Abschnitt 2.3). In diesem Themengebiet liegt ein großer Bedarf an Grundlagenforschung aufgrund neuer Technologien vor, da mit ihnen extreme Leuchtdichten erreicht werden können. [Arm01] und [Rip01a] behandeln in ihren Arbeiten den Einfluß der Leuchtdichte und Gleichmäßigkeit. Untersuchungen über den Einfluß der Flächenänderung bei gleichbleibender Leuchtdichte auf die Erkennbarkeit und die Reaktionszeit fehlen derzeit.

6.6 Additive Leuchtdichten

Für die in Abschnitt 5.3.3 beschriebenen additiven Leuchtdichten ist es wünschenswert, eine Versuchsreihe zu starten, bei der einer Anzahl von Personen Leuchten vorgeführt werden, die Signale mit additiver Leuchtdichte darstellen. Durch die Versuchspersonen zu bewerten ist, welcher Signalfunktion das zu sehende Signallicht zugeordnet werden kann. Um bei dem Beispiel aus Abschnitt 5.3.3 zu bleiben: Wird ein Schluß- und ein Blinklicht gesehen, oder ein Brems- und ein Blinklicht?

6.7 Neue Technologien für innovative Leuchten

Mit den heute zur Verfügung stehenden Leuchtmitteln sind Signalleuchten möglich, die noch vor einem Jahrzehnt undenkbar waren.

So könnte eine Schlußleuchte, realisiert durch eine einzige Leuchtdiode mit minimalem Optikzusatz, in eine einzigen 5 mm großen Öffnung der Fahrzeugkarosserie eingebaut werden. Die Anforderungen hinsichtlich der Lichtstärke würden durch eine solche Leuchte erfüllt, die hohe Leuchtdichte jedoch wäre abzulehnen. Hier ist der Gesetzgeber gefordert, durch eine Änderung der Regelungen die Verkehrsteilnehmer vor zu hohen Leuchtdichten zu schützen.

Durch Leuchtfolien können heute klassische Leuchtenarten ersetzt werden. So sind für die Kennzeichenbeleuchtung herkömmlich benutzte Leuchten verzichtbar, da das Kennzeichen selbst aus

einer leuchtenden Folie hergestellt wird. Diese Technik wird schon für einige Fahrzeugmodelle des VW-Konzerns angeboten.

Auch durch die Lichtleitertechnologie in Verbindung mit extrem kleinen Leuchtmitteln sind neue Formen im Leuchtenbereich ermöglicht worden. Als Beispiel dafür stehen die kreisförmigen vorderen Begrenzungsleuchten der neueren Limousinen von BMW.

6.8 Das zukünftige Signalbild

Im heutigen Straßenverkehr befindet sich der Kraftfahrzeugführer in einem ständig lebendiger werdenden Umfeld. Dies wird unter anderem hervorgerufen durch die große Vielfalt von Rückleuchten. So existieren mattleuchtende, klassische Arten und neuere, mit brilliantem Erscheinungsbild. Auch das einfache Rundumblinklicht früherer Sonderfahrzeuge wird oft durch auffallend blitzende Warnleuchten ersetzt.

Aufgrund dieser vorherrschenden Lebendigkeit der Signaldarbietungen im Straßenverkehr, an die der heutige Kraftfahrzeugführer gewöhnt ist, sollte ein dynamisches rückwärtiges Signalbild den Fahrer nicht überbelasten. Vielmehr könnte es den Fahrer mit wichtigen Zusatzinformationen versorgen. Ein Schritt in diese Richtung wird die Einführung von informativen Bremsleuchten sein, die den Grad der Verzögerung dem nachfolgenden Fahrer anzeigen.

Je mehr Informationen mit dem hinteren Signalbild durch zusätzliche Leuchten übermittelt werden sollen, desto öfter werden einzelne Signalbilder überlappen, da das Raumangebot für die Platzierung von Leuchten am Fahrzeugheck eingeschränkt ist.

Die Überlappung der Flächenanteile von Lichtsignalen unterschiedlicher Farbe wird im zukünftigen Fahrzeugdesign immer häufiger anzutreffen sein.

Anhang

A.1 Lichttechnische Größen

Gerade bei Rückleuchten von Kraftfahrzeugen besteht ein fester Zusammenhang zwischen Lichtstärke und Leuchtdichte, wie in Abschnitt 2.3 erläutert wird. Die Messung beider Größen erfolgt mit der selben Meßvorrichtung, denn es kann immer nur die Beleuchtungsstärke auf dem Photoelement gemessen werden. Im Folgenden werden die grundlegenden lichttechnischen Größen anhand der Entwicklung einer Fahrzeugrückleuchte beschrieben. Es wird deutlich, wie eng die einzelnen Größen miteinander verknüpft sind.

Rückleuchten von Kraftfahrzeugen sind lichttechnische Geräte. Zur Erzeugung des Lichtes werden Leuchtmittel benutzt. Die Ausbreitung des Lichtes wird durch Optiken, Reflektoren und Linsen, gesteuert. Diese physikalischen Vorgänge werden durch lichttechnische Größen beschrieben.

A.1.1 Lichtstrom

Es wird eine Glühlampe benutzt, um Licht zu erzeugen. Die photometrische Größe für das gesamte, von einer Lichtquelle abgegebene Licht, ist der Lichtstrom [Hen94]. Die Einheit für den Lichtstrom Φ ist Lumen [lm].

$$\Phi = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad \text{Lichtstrom [lm]}$$

Normierungskonstante: $K_m = 683 \text{ lm/W}$

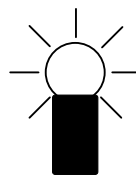


Bild A.1: Lichtstrom

Die Glühlampe gibt ihr Licht in alle Richtungen ab, wie in Bild A.1 zu sehen.

Die photopische Größe Lichtstrom ist auf das relative spektrale Hellempfinden des menschlichen Auges angepaßt. Zu beachten ist, daß die $V(\lambda)$ -Anpassung für den Tagfall vorgenommen worden ist, also für photopisches Sehen. In der Nacht, bei skotopischem Sehen, muß die energetische Größe $\Phi_{e\lambda}$ mit Hilfe der $V'(\lambda)$ -Funktion in die äquivalente lichttechnische Größe Φ' überführt werden.

A.1.2 Lichtstärke

Da eine Glühlampe zur Erzeugung des rückwärtigen Signalbildes benutzt wird, die ihren Lichtstrom in den gesamten Raum abstrahlt, muß dafür gesorgt werden, daß kein Licht nach vorne, oder in den Fahrgastraum abgestrahlt wird, sondern nach hinten. Um dies zu erreichen, wird die Glühlampe in ein Gehäuse eingebaut (Bild A.2). Der Lichtstrom wird nun in das Raumwinkelement ω abgestrahlt. So liegt eine bezogene Größe vor, die Lichtstärke genannt wird.

Candela [cd] ist die Einheit der Lichtstärke I . Die Candela ist eine der Basisgrößen des SI-Systems. Sie ist die Strahlung von $1/683$ W/sr bei einer Wellenlänge von $\lambda = 550$ nm [Stö94].

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad \text{Lichtstärke [cd]}$$

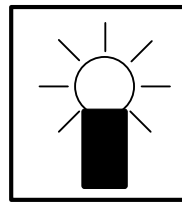


Bild A.2: Lichtstärke

A.1.3 Beleuchtungsstärke

Von dieser Lichtquelle soll das ausgestrahlte Licht gemessen werden. In Lichtmeßgeräten wird eine lichtempfindliche Fläche, die meist mit einem Siliziumempfänger realisiert ist, zum Messen verwendet. Vor dieser Fläche befindet sich ein Filter, welcher die $V(\lambda)$ -Anpassung des Empfängers bewirkt. Die Fläche A des Meßgerätes wird von der Lichtquelle beleuchtet. Ist der Lichtstrom bekannt, der auf diese Fläche fällt, so kann die Beleuchtungsstärke ausgerechnet werden. Die Einheit der Beleuchtungsstärke E ist Lux [lx].

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad \text{Beleuchtungsstärke [lx]}$$

Diese Größe wird mit Lichtmeßgeräten gemessen. Wenn die Entfernung des Beleuchtungsmessers wesentlich größer (10:1), als die Ausdehnung der Lichtquelle ist, so gilt das photometrische Entfernungsgesetz. Es kann damit die Beleuchtungsstärke auf der lichtempfindlichen Fläche ausgerechnet werden, ohne die genaue Ausdehnung der Fläche zu wissen. Die Variable ε gibt hierbei den Winkel zwischen der Flächennormalen des Empfängers und der Abstandsgeraden zur Lichtquelle an. Der Abstand wird mit r angegeben.

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varepsilon \quad \text{Photometrisches Entfernungsgesetz}$$

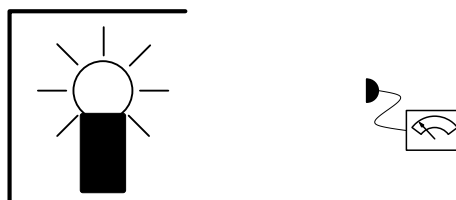


Bild A.3: Beleuchtungsstärke

A.1.4 Lichtstärkeverteilung

Welchen Eindruck hat jedoch ein nachfolgender Kraftfahrer, wenn er nicht genau hinter (horizontal 0° , vertikal 0°) dem vorausfahrenden Fahrzeug, sondern etwas schräg von der Seite das Fahrzeugheck sieht? Um dies zu erfahren, wird das abgestrahlte Licht im hinteren Halbraum (rechter Bildteil in Bild A.4) der Leuchte gemessen und man erhält so die Lichtstärkeverteilung.

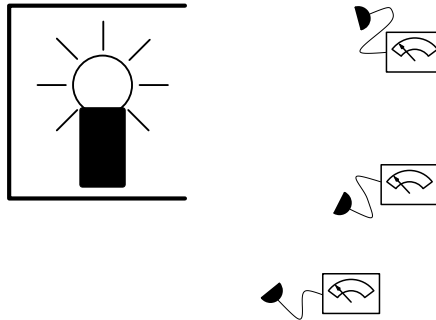


Bild A.4: Lichtstärkeverteilung

A.1.5 Leuchtdichte

Da verschiedene Signale (sowohl Geschwindigkeits-, als auch Richtungsänderungen) übertragen werden sollen, müssen sie kodiert werden.

Zur Kodierung wird die Farbe benutzt. Dazu wird das Lampengehäuse zum Beispiel mit einer farbigen Scheibe abgeschlossen. Dies ist in Bild A.5 mit einer roten Abschlussscheibe realisiert, um die Funktion einer Bremsleuchte bereitzustellen. Um einen Fahrtrichtungsanzeiger zu realisieren, wird eine gelbe Scheibe genutzt. Das Licht der Glühlampe tritt nun durch diese Abschlussscheibe hindurch und verursacht auf ihr eine Leuchtdichte [Kok99]. Die Einheit der Leuchtdichte L ist Candela pro Quadratmeter [cd/m^2].

$$L = \frac{\Phi}{A_p \cdot \omega}$$

Leuchtdichte [cd/m^2]

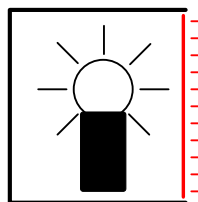


Bild A.5: Leuchtdichte

A.1.6 Sehwinkel

Der Sehwinkel ist die Größe, unter der ein Gegenstand dem Betrachter erscheint [GV93]. Sie hängt vom Abstand des Auges zum Gegenstand ab. In Bild A.6 sind die beiden Grenzstrahlen von dem Auge des Betrachters zum Fahrzeug eingezeichnet, die den Winkel ε bilden. Der Abstand zwischen Auge und Fahrzeughecke wird mit a bezeichnet, die Breite des Fahrzeughecks mit b . Die Sehschärfe s gibt an, unter welchem Sehwinkel der Betrachter zwei Punkte gerade noch voneinander unterscheiden kann.

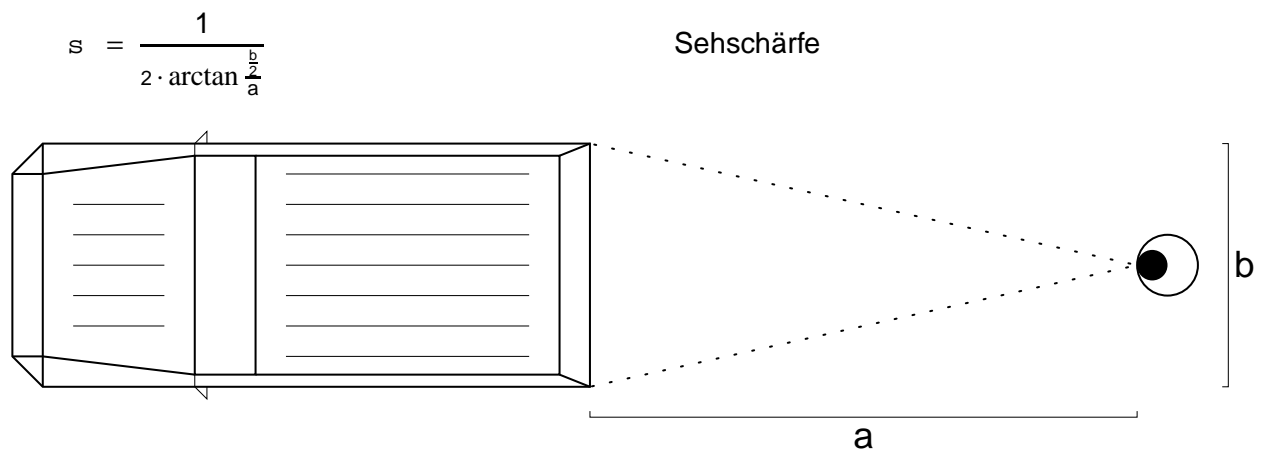


Bild A.6: Sehwinkel

Die Sehschärfe wird oft mit Hilfe von Landoltringen (Bild A.7) bestimmt. Eine Tafel mit verschiedenen großen Landoltringen wird der zu untersuchenden Person gezeigt. Sie teilt dem Versuchsleiter mit, an welcher Stelle die unterschiedlichen Ringe geöffnet sind. Anhand der Größe des Ringes, dessen Öffnungsrichtung gerade noch richtig erkannt wird, wird die Sehschärfe bestimmt. *Gerade noch* bedeutet, daß das kritische Detail mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % erkannt wird [Kok99].



Bild A.7: Landoltring

A.2 Verwendete Geräte

Meßplatz-Computer

Grundgerät	Prozessor	AMD 586 mit 116 MHz
	Arbeitsspeicher	32 MB
	Festplatte	316 MB SCSI
	Betriebssystem	Microsoft Windows NT 4.0 Service-Pack 3
IO-Karte	WITIO-PCI32 Standard	
Steuergerät	Entwickler	Karsten Klinger
	Meßprogramm	Reaktionszeit, Version 1.05
	Beschreibung	[Kli02c]

Spannungsregler

Hersteller	Gossen
Typ	24K16R8 System-Konstanter
Leistung	128 W
Reglerprinzip	Serienregler ohne Vorregler
Versorgungsspannung	220 V \pm 10 % 45 ... 65 Hz
Arbeitstemperatur	-10 °C ... 40 °C
Ausgangsspannung	0 ... 16 V \pm 0,002 %
Ausgangsstrom	0 ... 8 A \pm 0,01 %
Restwelligkeit	0,3 mV _{eff}
Sense-Leitung	Ausgleich regelbar für bis zu 0,5 V je Leitung

Multimeter

Hersteller	ITT Instruments
Typ	ITT MXBP
Temperatursensor	LM 35

Temperatursensor

Hersteller	National Semiconductor
Typ	LM 35 CZ
Temperaturbereich	-40 ... +110°C \pm 0,9°C
Versorgungsspannung	4 ... 30 V
Ausgangsspannung	10 mV pro Kelvin

Tisch-Ventilator

Hersteller	Termozeta
Typ	731
Modell	Frizer

LED-Matrix Leuchte

Hersteller	Hella Lippstadt
Typ	frei programmierbare hintere Leuchteneinheit
Bestückung	128 rote und 128 gelbe Leuchtdioden
Helligkeitsstufen	20
Versorgungsspannung	12 V
Beschreibung	[GP01]

Konventionelle Leuchte

Hersteller	Reitter & Schefenacker GmbH & Co. KG	
Typ	hintere Leuchteinheit	
Typbezeichnung	278	
Gutachten	LE 146 [Gut99]	
Bestückung	44 rote und 28 gelbe Leuchtdioden	
leuchtende Flächen	Fahrtrichtungsanzeiger	6 090 mm ²
	Bremsleuchte	16 905 mm ²
	Schlußleuchte	6 888 mm ²
Lichtstärken	Fahrtrichtungsanzeiger	174 cd
	Bremsleuchte	114 cd
	Schlußleuchte	12,6 cd

Nebelschlußleuchte

Hersteller	NIOX
Vertrieb	ULO-Werk Moritz Ullmann GmbH & Co. KG
Bestückung	Glühlampe P21W
Zulassung	A 70903
Versorgungsspannung	12 V
Versorgungsstrom	1,7 A
leuchtende Fläche	4 320 mm ²
Lichtstärke	159 cd
Leuchtdichte	36 800 cd

Phaeton-Leuchte

Hersteller	Reitter & Schefenacker GmbH & Co. KG	
Typ	hintere Leuchteinheit	
Typbezeichnung	333	
Gutachten	LE 188	
Bestückung	33 Duo-Leuchtdioden (rot/gelb) und 90 rote Leuchtdioden	
leuchtende Flächen	Fahrtrichtungsanzeiger	5 952 mm ²
	Bremsleuchte	7 935 mm ²
	Schlußleuchte	39 536 mm ²
Lichtstärken	Fahrtrichtungsanzeiger	118 cd
	Bremsleuchte	199 cd
	Schlußleuchte	15,3 cd
Leuchtdichten	Fahrtrichtungsanzeiger	19 825 cd/m ²
	Bremsleuchte	25 078 cd/m ²
	Schlußleuchte	387 cd/m ²

Vorfeldbeleuchtung

Hersteller	Institutseigenes Gerät
Beschreibung	Metallgehäuse mit innenliegendem Reflektor, in welchem zwei Hochdrucklampen betrieben werden können. Die nötigen Vorschaltgeräte sind im Gehäuse integriert.
Anschluß	230 V
Bestückung	zwei HQI-T 400 W Hochdrucklampen

Ulbrichtkugel

Hersteller	Institutseigenes Gerät
Beschreibung	Die Hälfte einer Ulbrichtkugel, die auch schon bei diversen anderen Arbeiten des Institutes benutzt worden ist, so auch bei der Dissertation von [Gre].
Durchmesser	1,5 m

Fahrstand

Entwickler	Karsten Klinger
Einbauort	Ulbrichtkugel

Diaprojektor

Hersteller	Simda
Typ	SIMDA 2200-400
Lampe	Halogenlampe mit 400 W bei 36 V

Goniometer

Hersteller	LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin
Typ	LMT GO-H 1300S
Seriennummer	119741
Meßprogramm	LMTGOH Version 06/98

Sehschärfe-Meßgerät

Hersteller	Institutseigenes Gerät
Beschreibung	Auf weißem Hintergrund befinden sich schwarze Landoltringe. In dem getesteten Sehschärfebereich befinden sich für jede Sehschärfe sechs gleich große Landoltringe in einer Zeile. Wenn nicht alle Öffnungen der Ringe einer Zeile von der Testperson erkannt werden, wird die Sehschärfe zwischen der vorherigen vollständig erkannten Zeile und der nur teilweise erkannten Zeile gemittelt.
Sehschärfezeilen	0,6 0,67 0,75 0,86 1,0 1,2 1,5 2,0
Positionierung	In sechs Meter Entfernung von der Testperson in gleicher Höhe der Schlußleuchten.

Leuchtdichtemeßgerät

Hersteller	LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin
Typ	LMT L1009
Seriennummer	11A060
Anzeigebereich	0,0001 ... $2 \cdot 10^7$ cd/m ²
Benutzte Meßfelder	1° und 20'

Oszilloskop

Hersteller	Hameg
Typ	HM 512
Kanäle	2
Bandweite	10 MHz

Funktionsgenerator

Hersteller	Philips
Typ	PM 5134
Frequenzbereich	1 MHz ... 20 MHz

Farbmeßgerät

Hersteller	LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin	
Typ	LMT C2000	
Art	Dreibereichsfarbmeßgerät	
Seriennummer	Steuergerät	0779051
	Farbmeßkopf	0779052

Farbmeßgerät

Hersteller	LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin	
Typ	LMT C1210	
Art	Dreibereichsfarbmeßgerät	
Seriennummer	Steuergerät	129534
	Farbmeßkopf	0779052

A.3 Verwendete Software**Excel**

Hersteller	Microsoft
Programmtyp	Tabellenkalkulation
Version	Excel 97 SR 2
Betriebssystem	Windows 98
Beschreibung	[Bal99]

Visual C++

Hersteller	Microsoft
Programmtyp	Compiler und Programmierumgebung
Version	Visual C++ 6.0 Professional Edition
Betriebssystem	Windows 98
Beschreibung	[msd]

LMTGOH

Hersteller	LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin
Programmtyp	Meßprogramm für Lichtstärkeverteilungen
Version	06/98
Betriebssystem	Windows 95 (Version 4.00.1111)

Reaktionszeit

Autor	Karsten Klinger
Programmtyp	Meßprogramm
Version	Reaktionszeit 1.05
Betriebssystem	Windows NT und Windows 98
Beschreibung	[Kli02c]

TeX

Autor	D. E. Knuth
Programmtyp	Textsatzsystem
Version	T _E X 3.14159
Betriebssystem	Linux
Beschreibung	[P ⁺ 95]

xfig

Autor	Supoj Sutanthavibul
Programmtyp	Zeichenprogramm
Version	Xfig 3.2 patchlevel 2 (Protocol 3.2)
Betriebssystem	Linux

A.4 Literaturangaben

- [Arm01] Daniel Armbruster. *Optimierung der visuellen Informationsübermittlung durch adaptive Kraftfahrzeugsignalleuchten*. Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2001, ISBN 3-8316-0016-3. Dissertation.
- [Bal99] Said Baloui. *Excel 2000, Tabellen und Diagramme gestalten*. Markt&Technik Buch- und Software-Verlag GmbH, 1. Auflage, 1999, ISBN 3-8272-5375-6.

- [BgHJD71] Dipl.-Phys. Johannes Bol und Ing. (grad.) Hans-Joachim Decker. *Verbesserung der Heckbeleuchtung von Kraftfahrzeugen*. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1971, ISBN 3-18-12-0216-9. Battelle-Bericht für den Bundesminister für Verkehr.
- [BHPT95] Beyer, Hackel, Pieper, und Tiedge. *Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik*. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 7. Auflage, 1995, ISBN 3-8154-2075-X.
- [BS91] I. N. Bronstein und K. A. Semendjajew. *Taschenbuch der Mathematik*. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig und Verlag Nauka Moskau, 25. Auflage, 1991, ISBN 3-8154-2000-8.
- [CLL01] Tso-Wei Chang, Chin-Chiuan Lin, und Sung-Nan Lin. *Driving Performance Analysis on Interactions among Factors of Center High Mounted Stop Lamp and Road Environment*. Herbert Utz Verlag, 2001, ISBN 3-89675-971-X.
- [DFF⁺94] J. Damasky, K. Foese, G. Fougere, D. Lescaill, L. Lesage, und M. Pedé. *Efficiency of Advanced Brake Light Devices*. Technische Universität Darmstadt, 1994.
- [Dub01] Christophe Dubosc. *Lighting Systems and Show Cars*. Herbert Utz Verlag, 2001, ISBN 3-89675-971-X.
- [ECE97] *Regelungen der Economic Commission for Europe für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger (ECE-Regelungen)*. Kirschbaum Verlag, Bonn, 1997. Loseblattsammlung.
- [Fin70] D. M. Finch. *Automotive Signaling and Lighting*. Society of Automotive Engineers, Inc, 1970. SAE 700385.
- [GP01] Rainer Groenewold und Christoph Plagge. *Aufbau einer adaptiven LED-Matrix-Rückleuchte für Kraftfahrzeuge zur Anzeige situativ angepasster Signalbilder*. Fachhochschule Wilhelmshaven, 2001. Diplomarbeit.
- [Gre] Roland Greule. *Kontrastwahrnehmung bei transienter Adaption*. Universität Karlsruhe. Dissertation.
- [Gut99] *Gutachten LE 146*, 1999. Interner Prüfbericht der Prüfstelle Karlsruhe.
- [GV93] Christian Gerthsen und Helmut Vogel. *Physik*. Springer-Verlag, 17. Auflage, 1993, ISBN 3-540-56638-4.
- [Hee98] Prof. Dr.-Ing. W. Heering. *Festkörper- und Halbleiterstrahlungsquellen*. Universität Karlsruhe, 1998. Skript zur Vorlesung.
- [Hen94] Hans-Jürgen Hentschel. *Licht und Beleuchtung*. Hüthig Buch Verlag GmbH, 4. Auflage, 1994.
- [hME93] Dr.-Ing. habil. Martin Eckert. *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Verlag Technik GmbH, 1. Auflage, 1993, ISBN 3-341-01072-6.
- [Jen01] S.E. Jenkins. *Use and Measurement of LED Clusters for Signals*. Herbert Utz Verlag, 2001, ISBN 3-89675-971-X.
- [KKN02] Vladimir Kubena, Daniel Kletensky, und Rainer Neumann. *Rear Lamp Reaction Time Study – Comparison of Incandescent Bulbs and LEDs*. Society of Automotive Engineers, Inc, 2002, ISBN 0-7680-0936-7. SAE paper : SAE/SP-02/1668.

- [Kli02a] Karsten Klinger. *Meßdiagramme zur Diplomarbeit*. Universität Karlsruhe, 2002. Diplomarbeit.
- [Kli02b] Karsten Klinger. *Meßprotokolle zur Diplomarbeit*. Universität Karlsruhe, 2002. Diplomarbeit.
- [Kli02c] Karsten Klinger. *Reaktionszeit Dokumentation*. 2002. interne Dokumentation der Prüfstelle.
- [Kok97a] Prof. Dr.-Ing. S. Kokoschka. *Photometrie und Farbmeterik*. Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe, 1997. Vorlesungsmanuskript.
- [Kok97b] Prof. Dr.-Ing. S. Kokoschka. *Physiologie des Sehens*. Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe, 1997. Vorlesungsmanuskript.
- [Kok99] Prof. Dr.-Ing. S. Kokoschka. *Grundlagen der Lichttechnik*. Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe, 1999. Vorlesungsmanuskript.
- [Lum00] LumiLeds Lighting. *Technical Data Super Flux LEDs*, 2000. Internet www.lumileds.com.
- [Mor70] Rudolf G. Mortimer. *Psychological Research in Automobile Rear Lighting*. Society of Automotive Engineers, Inc, 1970. SAE 700388.
- [msd] *Microsoft Development Network Visual Studio*. Microsoft Press, 6. Auflage.
- [Ols96] Paul L. Olson. *Evaluation of a New LED High-Mounted Stop Lamp*. Society of Automotive Engineers, Inc, 1996, ISBN 1-56091-753-9. SAE 87 00 65.
- [Owe70] Lewis C. Owen. *The Controversy Over Rear Lighting and Signaling on Motor Vehicles*. Society of Automotive Engineers, Inc, 1970. SAE 700387.
- [P⁺95] Hubert Partl et al. *L^AT_EX₂_ε-Kurzbeschreibung*. EDV-Zentrum der TU Wien, 4. Auflage, 1995.
- [Rip01a] Joachim Ripperger. *Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge*. Herbert Utz Verlag, 2001, ISBN 3-89675-818-7. Dissertation.
- [Rip01b] Joachim Ripperger. *Luminance: the Future Photometric for Rear- and Brake-lights*. Herbert Utz Verlag, 2001, ISBN 3-89675-971-X.
- [sSG⁺88] Dr. sc. S. Gottwald et al. *Mathematik Ratgeber*. Verlag Harri Deutsch, 2. Auflage, 1988, ISBN 3-8171-1004-9.
- [Stö94] Professor Dr. Horst Stöcker. *Taschenbuch der Physik*. Verlag Harri Deutsch, 2. Auflage, 1994, ISBN 3-8171-1358-7.
- [StV88] *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung*. Verlag C.H.Beck, 1988. Loseblattsammlung.

A.5 Bildernachweis

[Bild 2.6] R. G. Mortimer. *Fig. 2 – The lighting systems*. Aus: [Mor70]

[Bild A.8] Rainer Groenewold und Christoph Plagge. *Optik der LED-Matrix Leuchte*. Aus: [GP01]

A.6 Tabellenverzeichnis

3.1	Bezeichnungen der Leuchten	15
3.2	Geforderte Lichtstärken	16
3.3	Temperaturabhängigkeit der konventionellen Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger	17
3.4	Temperaturabhängigkeit der konventionellen Leuchte, Schlußleuchte	18
3.5	Temperaturabhängigkeit der konventionellen Leuchte, Bremsleuchte	18
3.6	Werte mittlerer Rückleuchten laut [Rip01a]	21
3.7	Werte mittlerer Rückleuchten laut [Arm01]	21
3.8	Fahrzeugabmessungen	24
3.9	Beispiel einer Tabelle mit berechneten Werten	32
3.10	Beispiel einer Tabelle mit bereinigten Werten	33
5.1	Referenzversuche	53
5.2	Experiment 1, Unterschied der Reaktionszeiten	55
5.3	Experiment 2, Unterschied der Reaktionszeiten	60
5.4	Verlängerung der Reaktionszeit durch Überlappung, Überblick aller Ergebnisse	64
5.5	Reaktionszeitunterschiede verschiedener Leuchtensysteme gleicher Leuchtdichte	65
5.6	Reaktionszeitunterschiede bei unterschiedlicher Leuchtdichte	66
A.1	Fahrversuche im Stadtverkehr	84
A.2	Fahrversuche auf der Schnellstraße	84
A.3	Weitere Fahrversuche im Stadtverkehr	85

A.7 Abbildungsverzeichnis

2.1	Typische Rückleuchten	4
2.2	Rückleuchten mit Leuchtdioden	4
2.3	Rückleuchte mit vollständiger Überlappung	4
2.4	Zwei Rückleuchten mit gleicher Leuchtdichte	5
2.5	Zwei Rückleuchten mit gleicher Lichtstärke	6
2.6	Kombinationen von Rückleuchten	8
3.1	Psychophysikalisches Experiment	13
3.2	Grundsätzlicher Versuchsaufbau	13
3.3	Geforderte Lichtverteilung	16
3.4	Signalbilder des Vergleichversuches	22

3.1	Beispiel für Meßwerte des Vergleichsversuches	22
3.5	Fahrzeugumriß	24
3.6	Draufsicht	25
3.7	Fahrstand	26
3.8	Mit dem Steuergerät verbundene Funktionseinheiten	28
3.2	Beispiel für Fall 1 (Überlappung bei Schlußleuchten)	31
3.3	Beispiel für Fall 1 mit einem bereinigten Wert	34
3.9	Signalbilder	37
4.1	Signalbild Referenz	44
5.1	Schema der Diagramme, Reaktionszeit bei Überlappung	51
5.2	Schema der Diagramme, signifikante Unterschiede	51
5.1	Referenzversuche, Unterschiede der Reaktionszeiten	54
5.2	Fall 1, <i>led_licht</i> während <i>led_blink</i>	56
5.3	Fall 2, <i>led_brems</i> während <i>led_blink</i>	56
5.4	Fall 3, <i>led_blink</i> während <i>led_licht</i>	57
5.5	Fall 4, <i>led_blink</i> während <i>led_brems</i>	57
5.6	Fall 5, <i>led_brems_3</i> zu <i>led_brems_4</i> während <i>led_blink_2</i>	61
5.7	Fall 6, <i>led_brems_3</i> zu <i>led_brems_5</i> während <i>led_blink_2</i>	61
5.8	Fall 7, <i>led_brems_3</i> zu <i>led_brems_6</i> während <i>led_blink_2</i>	62
5.9	Fall 8, <i>led_blink_2</i> während <i>led_brems_3</i> zu <i>led_brems_4</i>	62
5.10	Fall 9, <i>led_blink_2</i> während <i>led_brems_3</i> zu <i>led_brems_5</i>	63
5.11	Fall 10, <i>led_blink_2</i> während <i>led_brems_3</i> zu <i>led_brems_6</i>	63
A.1	Lichtstrom	70
A.2	Lichtstärke	71
A.3	Beleuchtungsstärke	71
A.4	Lichtstärkeverteilung	72
A.5	Leuchtdichte	72
A.6	Sehwinkel	73
A.7	Landoltring	73
A.8	Optik der LED–Matrix Leuchte	97
A.9	Matrix der LED–Matrix Leuchte	98

A.8 Versuchspersonen

Nummer	Alter [Jahre]	Geschlecht	Fahrpraxis [Jahre]	Lichttechnische Erfahrung	Sehschärfe	Farbschwäche
1	28	männlich	10	ja	1,2	
2	31	weiblich	13	nein	1,8	
3	25	männlich	7	ja	1,3	nein
4	44	männlich	26	ja	2,0	
5	30	männlich	3	ja	1,5	
6	23	weiblich	5	nein		
7	27	weiblich	7	nein	1,0	nein
8	53	männlich	34	ja	1,0	
9	62	männlich	42	nein	1,0	nein
10	60	weiblich	41	nein	1,3	nein
11	62	männlich	40	nein	1,2	
12	52	weiblich	29	nein	0,85	
13	36	männlich	18	nein	1,0	nein
14	35	männlich	12	nein	1,1	nein
15	20	männlich	2	nein	1,9	
16	32	männlich	14	ja	1,4	
17	28	männlich	10	ja	1,4	nein
18	25	männlich	7	nein	1,6	
19	23	männlich	5	nein	1,2	nein
20	27	weiblich	9	ja	0,95	nein
21	24	männlich	6	nein	1,2	nein

A.9 Meßwerte

A.9.1 Historische Meßwerte

In den Siebzigern hat R. G. Mortimer mehrere Versuche zur psychologischen Untersuchung von Rückleuchten an Fahrzeugen durchgeführt. Seine Ergebnisse sind unter anderem in [Mor70] veröffentlicht worden. Aus dieser Veröffentlichung entnommen sind die folgenden drei Tabellen mit den Ergebnissen der von ihm durchgeführten Fahrversuche.

Auf diesen Daten basieren die Überlegungen in Abschnitt 2.6.

In den beiden ersten Versuchen (Tabelle A.1 und A.2) beträgt das Verhältnis der Lichtstärken von Schlußleuchte zu Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger 1:5. Dieses Verhältnis wird auch bei der vorliegenden Arbeit im ersten Experiment zwischen Schlußleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger benutzt. Für den in Tabelle A.3 abgedruckten Versuch wird in [Mor70] ein Verhältnis von 1:13 angegeben.

Geometric Mean Reaction Time (Seconds) for Each System
and Signal Mode in City Driving, for 34 Subjects

Mode	System								Mean
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Turn	1.170	.988	1.206	.988	.930	1.334	1.007	.949	1.072
Stop	.903	.894	.841	.858	.841	.867	.858	.825	.861
Turn-Stop	1.007	.894	.825	.800	.850	.809	.809	.761	.844
Stop-Turn	2.155	1.816	1.661	.939	1.873	1.473	.927	.894	1.467
Mean	1.309	1.148	1.133	.896	1.123	1.121	.900	.857	1.061

Individual Comparisons by Newman-Keuls Tests:

1. Turn: Systems 8, 7, 5, 4, 2 significantly* better than 6, 3, 1
Systems 3, 1 significantly better than 6
2. Stop: No differences were significant
3. Turn-Stop: Systems 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 significantly better than 1
System 8 significantly better than 2
4. Stop-Turn: Systems 8, 7, 4 significantly better than 6, 5, 3, 2, 1
System 6 significantly better than 5, 3, 2, 1
System 3 significantly better than 5, 2, 1
Systems 5, 2 significantly better than 1

*Significant at $P \leq .05$

Tabelle A.1: Fahrversuche im Stadtverkehr

Geometric Mean Reaction Time (Seconds) for Each System
and Signal Mode in Expressway Driving, for 32 Subjects

Mode	System								Mean
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Turn	.958	.885	.978	.978	.894	.997	.850	.912	.932
Stop	.761	.800	.835	.800	.785	.777	.754	.777	.786
Turn-Stop	.876	.903	.800	.792	.858	.800	.761	.717	.813
Stop-Turn	1.782	1.677	1.401	.921	1.695	1.049	.825	.867	1.277
Mean	1.094	1.066	1.004	.873	1.058	.906	.798	.818	.952

Individual Comparisons by Newman-Keuls Tests:

1. Turn: 7 significantly* better than 6, 4, 3, 1
5, 2 significantly better than 6
2. Stop: No differences were significant
3. Turn-Stop: 8 significantly better than 6, 5, 4, 3, 2, 1
7 significantly better than 5, 2, 1
6, 4, 3 significantly better than 2
4. Stop-Turn: 7 significantly better than 6, 5, 4, 3, 2, 1
8, 4 significantly better than 6, 5, 3, 2, 1
6 significantly better than 5, 3, 2, 1
3 significantly better than 5, 2, 1

*Significant at $P \leq .05$

Tabelle A.2: Fahrversuche auf der Schnellstraße

Geometric Mean Reaction Time (Seconds) for Each
System and Signal Mode in the Hi and Lo Intensity
City Driving Tests, for 80 Subjects

Mode	System				
	<u>1</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>8</u>
Turn	1.080	1.160	1.102	1.090	1.011
Stop	0.917	0.951	0.933	0.905	0.891
Turn-Stop	0.985	0.865	0.915	0.812	0.811
Stop-Turn	<u>1.941</u>	<u>1.305</u>	<u>1.032</u>	<u>1.086</u>	<u>0.965</u>
Mean	1.231	1.070	0.996	0.973	0.919

Individual Comparisons by Newman-Keuls Tests:

1. Turn: 8 significantly* better than 6, 4, 3, 1
2. Stop: 8 significantly better than 3
3. Turn-Stop: 8, 6, 3 significantly better than 4, 1
8, 6 significantly better than 3
4. Stop-Turn: 8, 6, 4, 3 significantly better than 1
8 significantly better than 6, 4, 3
6, 4 significantly better than 3

*Significant at $P \leq .05$

Tabelle A.3: Weitere Fahrversuche im Stadtverkehr

A.9.2 Vorversuch

Während der Entwicklung der Software "reaktionszeit" ist ein Versuch durchgeführt worden, um die prinzipielle Funktionsfähigkeit dieser zu testen. Der Versuch liefert den in Abschnitt 3.12.2 aufgezeigten prinzipiellen Unterschied zwischen Glühlampen und Leuchtdioden beim Einschaltvorgang als Ergebnis.

Die hier angegebenen Meßwerte sind mit den Versionen 0.37 ... 0.39 des Programmes [Reaktionszeit] ermittelt worden. Da sich das Programm zu diesem Zeitpunkt noch in Entwicklung befunden hat, können diese Meßwerte nur als Richtwerte gelten. Die Versuchspersonen haben einem Abstand von 1,5 m zu der jeweiligen Leuchte. Die Nebelschlußleuchte ist mit einer Glühlampe bestückt, die anderen Leuchten mit LED's. Die angegebenen Meßwerte werden durch Mittelwertbildung aus den einzelnen Meßwerten errechnet, wobei die Anzahl der zugrunde liegenden Einzelmeßwerte, wie angegeben, variiert.

Versuchsperson 1

Datum	Leuchte	Anzahl	gemittelte Reaktionszeit
26.2.2002	konventionelle Leuchte, Schlußleuchte	60	250 msek
26.2.2002	konventionelle Leuchte, Bremsleuchte	80	250 msek
27.2.2002	Nebelschlußleuchte	80	270 msek
27.2.2002	konventionelle Leuchte, Schlußleuchte	60	257 msek
28.2.2002	konventionelle Leuchte, Schlußleuchte	100	233 msek
28.2.2002	Nebelschlußleuchte	40	244 msek

Versuchsperson 7

Datum	Leuchte	Anzahl	gemittelte Reaktionszeit
27.2.2002	konventionelle Leuchte, Schlußleuchte	20	236 msek

Wenn die Meßwerte getrennt für jeden Tag betrachtet werden, ist festzustellen, daß die Reaktionszeiten bei der mit einer Glühlampe bestückten Leuchte länger sind. Weiterhin kann ein Unterschied zwischen zwei Versuchspersonen festgestellt werden. Wenn jedoch derselben Person bei der gleichen Leuchte unterschiedliche Lichtstärken angeboten werden, ist kein Unterschied in der Reaktionszeit festzustellen.

Mit diesen Ergebnissen, die den Erwartungen entsprechen, wird festgestellt, daß die Software zufriedenstellend arbeitet und keine unsinnigen Werte liefert.

A.9.3 Vergleichsversuch

Fünf Versuchspersonen nehmen an diesem Experiment teil, manche Personen mehrmals. Es ergeben sich 420 Meßwerte, wovon fünf Werte als ungültig erkannt und daher entfernt werden.

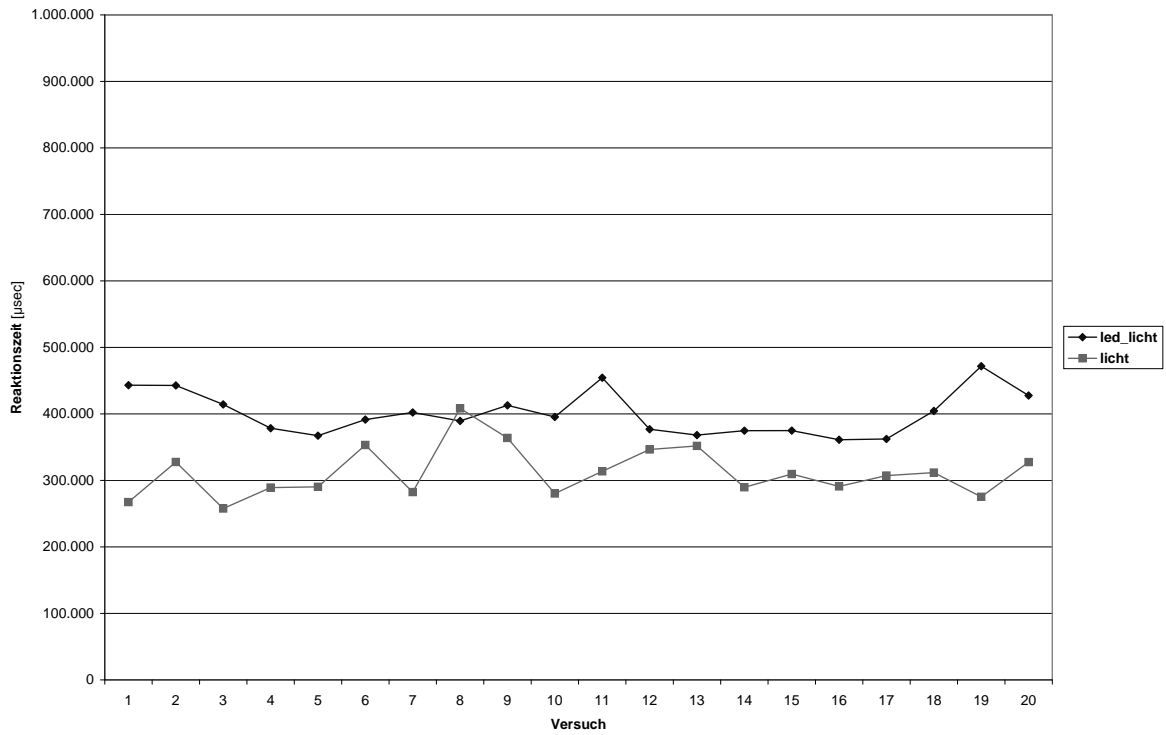
Mit den 415 gültigen Meßwerten errechnet sich eine durchschnittliche Verzögerung von 78,6 msek.

Die ungültigen Werte sind in den Meßwert-Diagrammen in Anhang A.9.3 als sehr kleine Punkte gekennzeichnet.

Bei den drei ersten Experimenten wird zwanzigmal das Signalbild *licht* gezeigt und darauf zwanzigmal *led_licht*. Bei den darauf folgenden Experimenten werden danach weitere zwanzig Bilder des Types *licht* gezeigt. Diese sind mit etwas größeren Rechtecken gekennzeichnet.

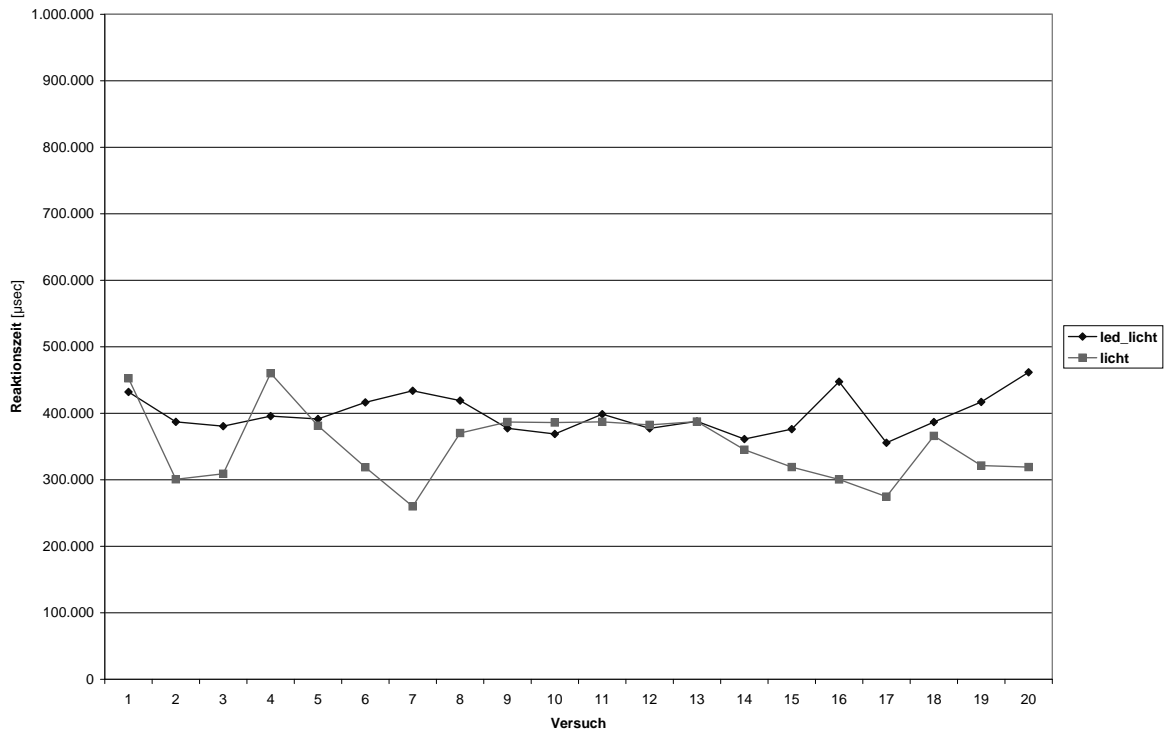
Versuchsperson 1

Vergleichsversuch



Versuchsperson 1

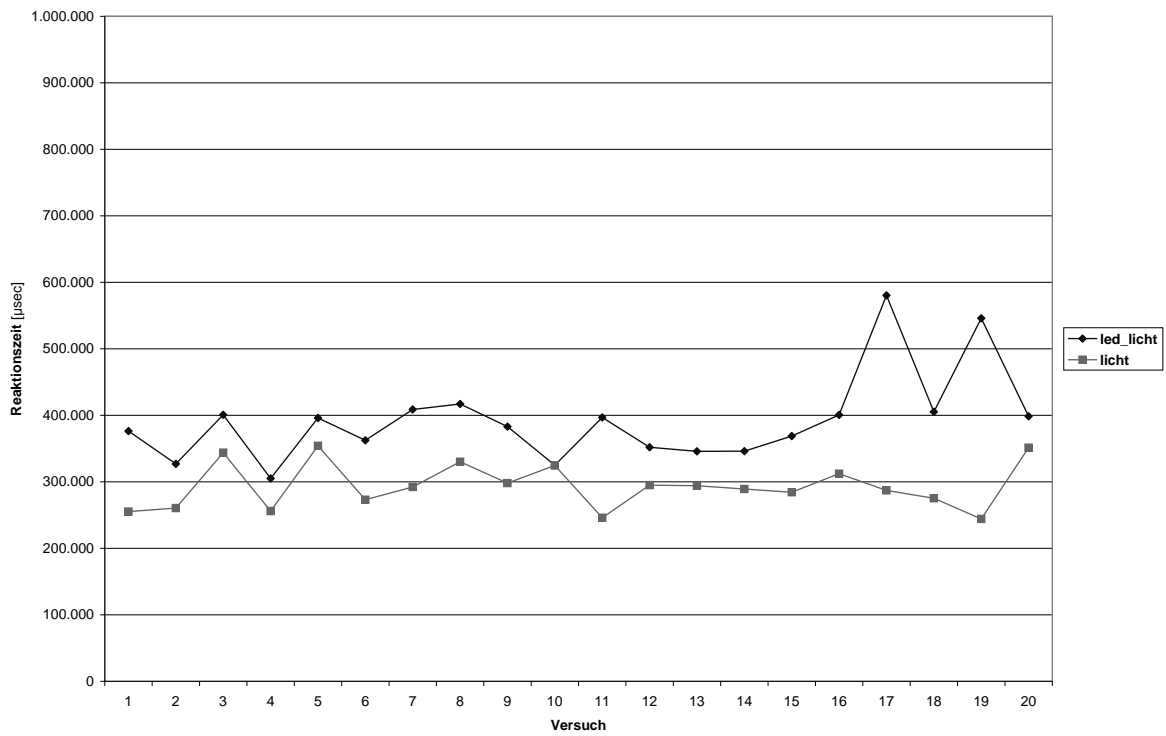
Vergleichsversuch



Versuch.2002-04-04.15_40_14

Versuchsperson 1

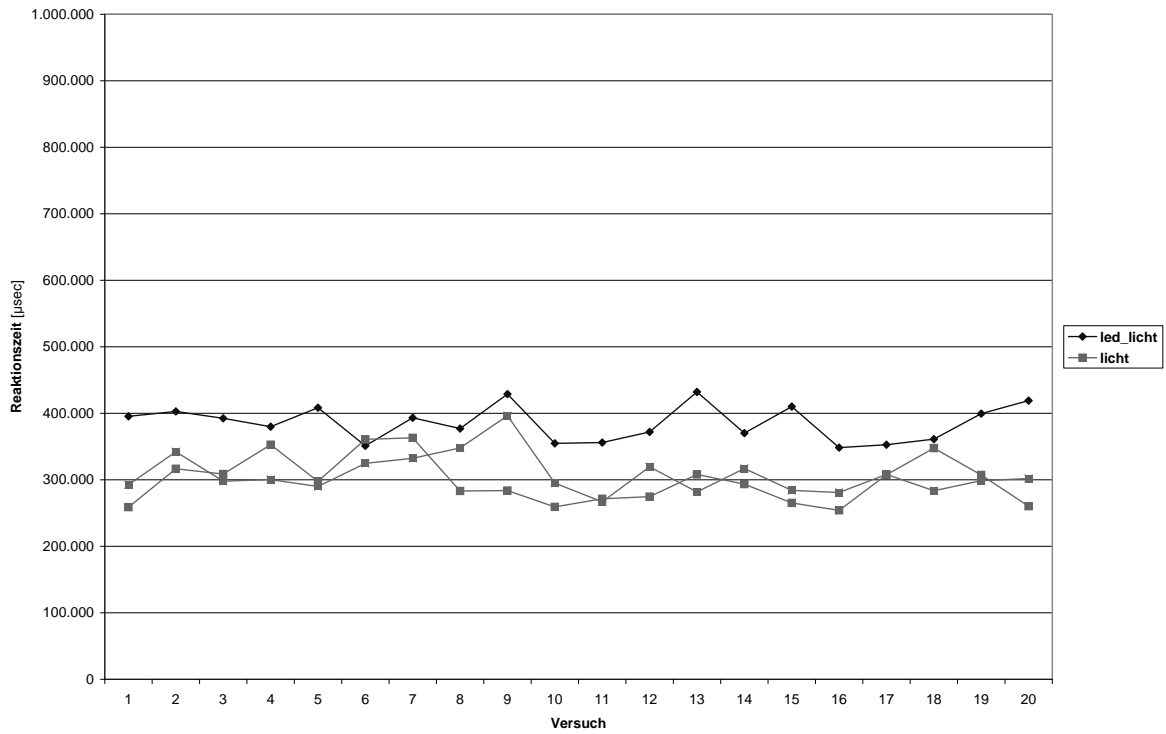
Vergleichsversuch



Versuch.2002-04-08.17_56_43

Versuchsperson 3

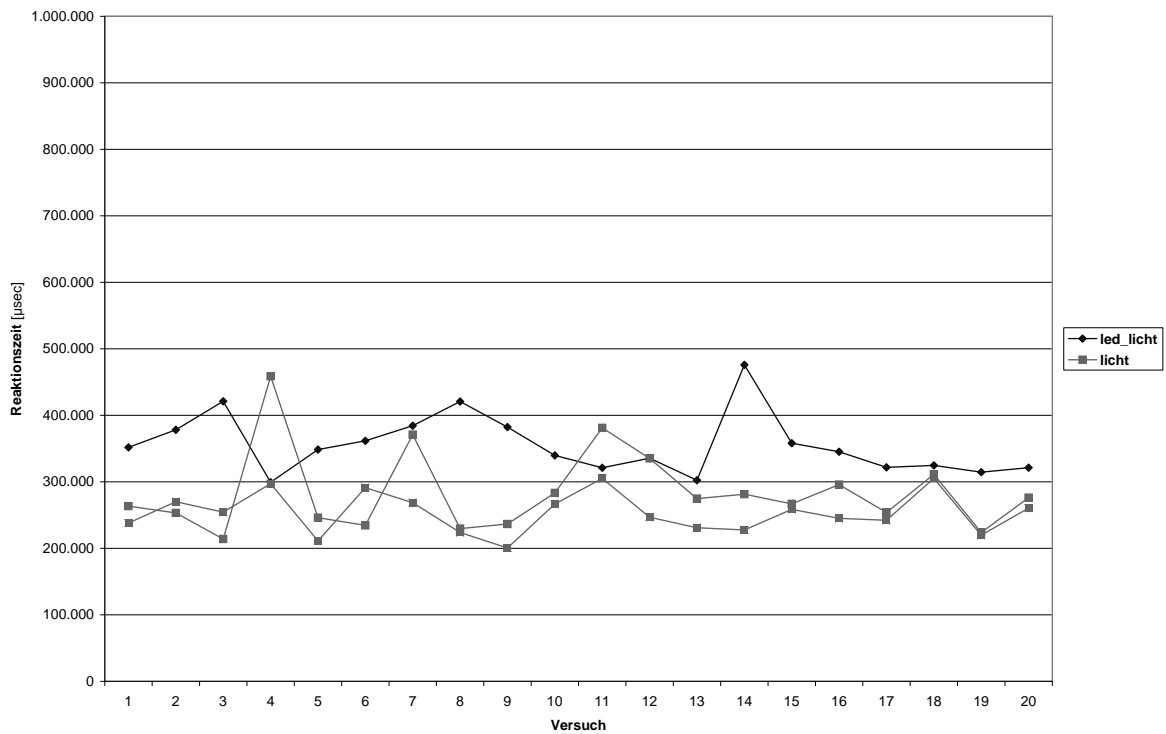
Vergleichsversuch



Versuch.2002-04-19.14_24_03

Versuchsperson 1

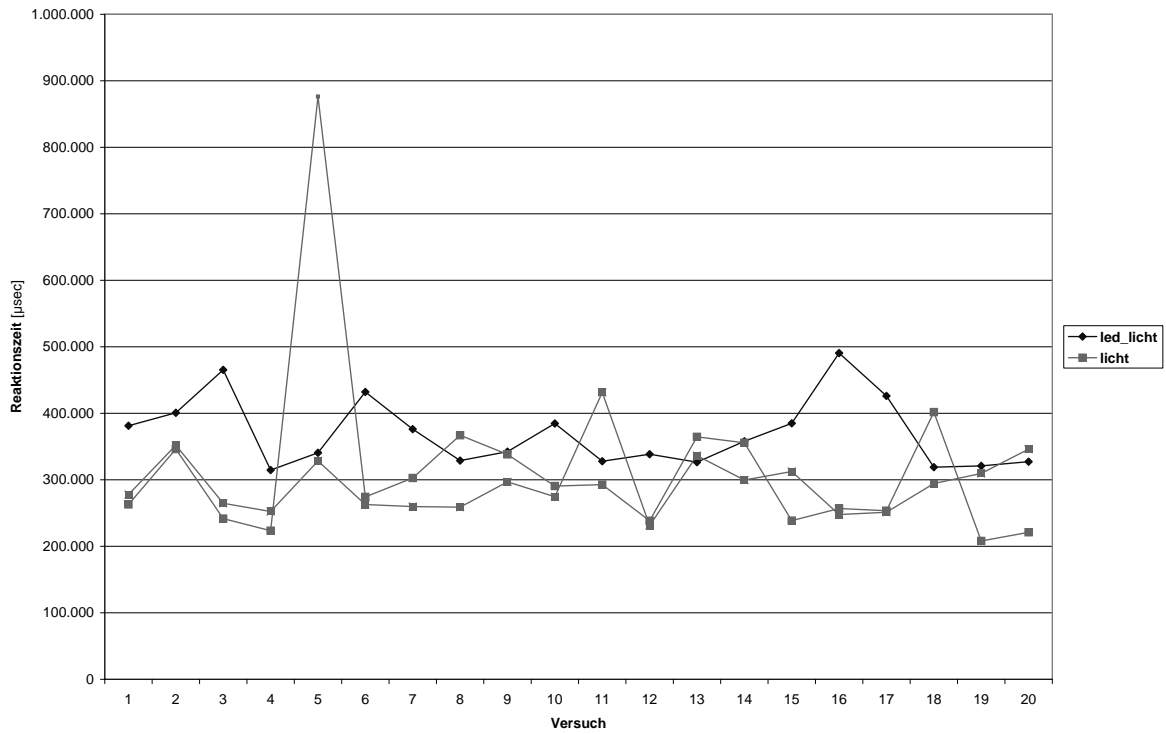
Vergleichsversuch



Versuch.2002-04-19.14_38_30

Versuchsperson 4

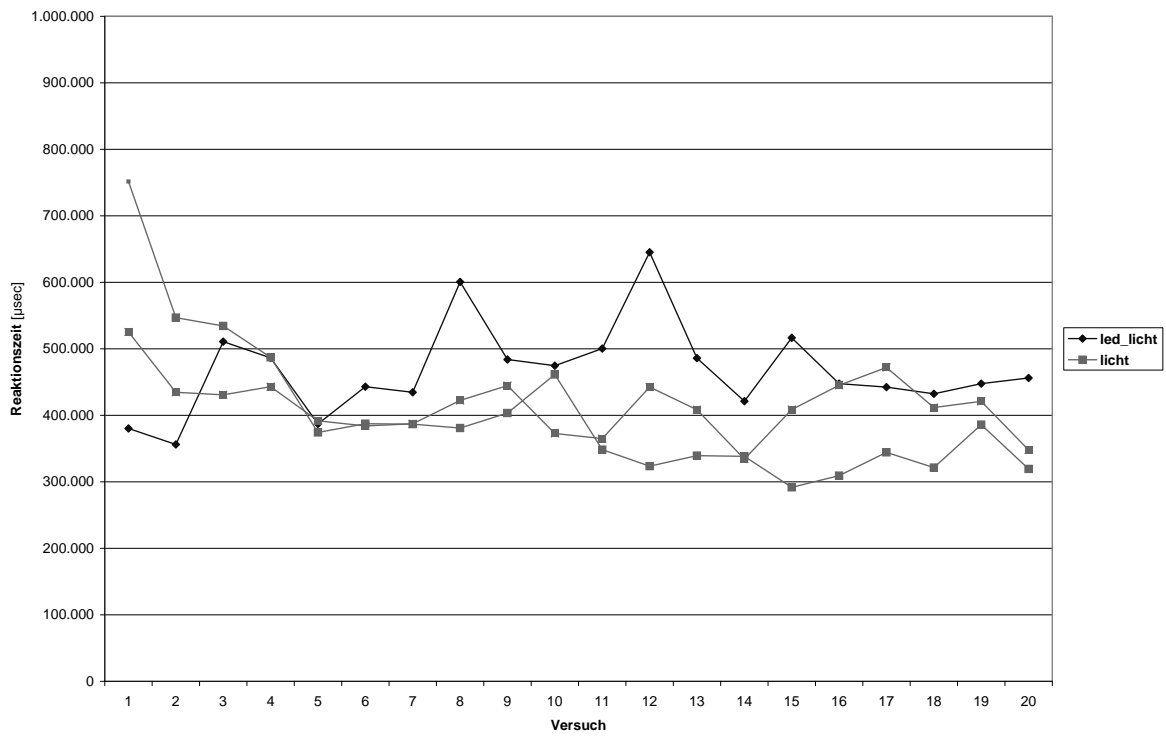
Vergleichsversuch



Versuch.2002-04-19.14_51_30

Versuchsperson 5

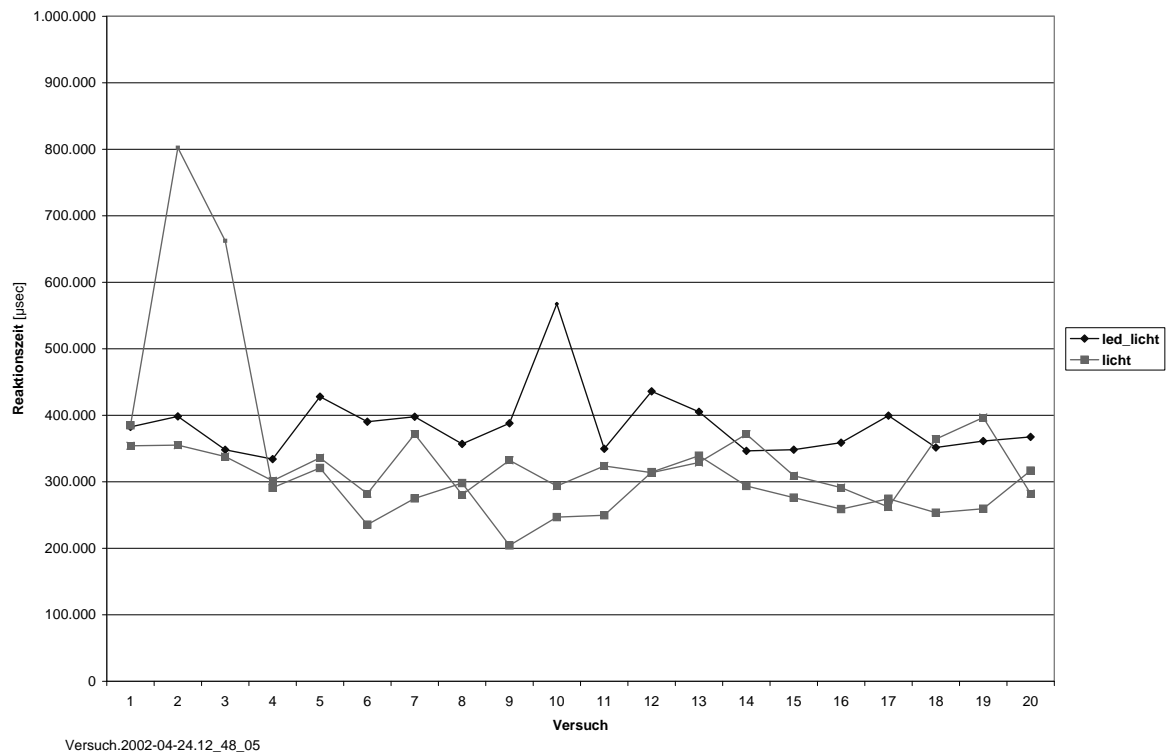
Vergleichsversuch



Versuch.2002-04-22.15_38_56

Versuchsperson 6

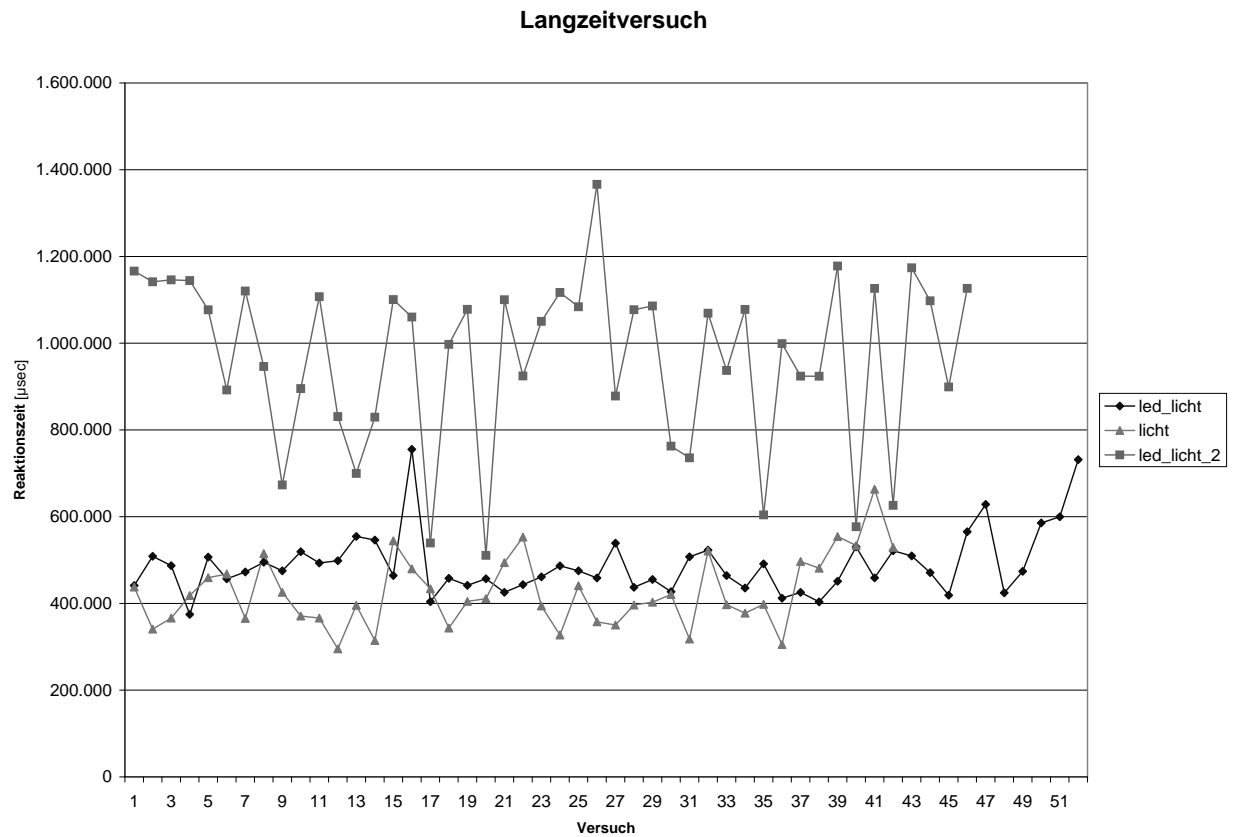
Vergleichsversuch



A.9.4 Langzeitversuch

Bei diesem Versuchsdurchlauf blinkt der Fahrtrichtungsanzeiger während der gesamten Durchführung. Die drei im Schaubild gezeigten Leuchten werden zufällig eingeschaltet.

Dieser Versuch wird nur mit der Versuchsperson 1 durchgeführt.



A.9.5 Farbwerte

Die erste Messung erfolgt mit dem Farbmeßgerät LMT C2000. Diese Messung findet vor der Versuchsdurchführung statt. Alle roten LED's der Leuchte werden mit voller Intensität eingeschaltet. Im Abstand von 30 sec werden die Meßwerte notiert. Gemessen wird x , y und \underline{y} . Der Wert von z wird mit $x + y + z = 1$ berechnet. Anhand des Wertes \underline{y} ist qualitativ zu erkennen, wie der Lichtstrom im Laufe der Zeit abnimmt. Da die Messung nur zur Ermittlung der Farbwerte dient, wird dieser Wert nicht kalibriert und daher ohne Einheit angezeigt.

LED-Matrix Leuchte rot

x	y	z	Y	x+y
0,6870	0,3130	0,0000	6450	1,0000
0,6870	0,3128	0,0002	6260	0,9998
0,6876	0,3123	0,0001	6200	0,9999
0,6883	0,3114	0,0003	6010	0,9997
0,6884	0,3115	0,0001	5820	0,9999
0,6888	0,3111	0,0001	5630	0,9999
0,6892	0,3107	0,0001	5560	0,9999
0,6890	0,3109	0,0001	5560	0,9999
0,6894	0,3105	0,0001	5540	0,9999
0,6891	0,3108	0,0001	5530	0,9999
0,6896	0,3103	0,0001	5470	0,9999
0,6897	0,3102	0,0001	5410	0,9999
0,6897	0,3102	0,0001	5390	0,9999

Die nächsten Messungen erfolgen mit dem Farbmeßgerät LMT C1210. Sie finden nach den Versuchsreihen statt. Der erste Meßwert wird ca. 10 sec nach dem Einschalten der Leuchte abgelesen, zu dem Zeitpunkt, zu dem das Meßgerät in den passenden Meßbereich schaltet und einen gültigen Wert anzeigt. Sobald sich der Wert stabilisiert hat, wird dieser notiert. Gemessen wird das jeweilige Lichtmuster, das auch bei den Versuchen dargestellt wird.

licht

x	y	z	x + y
0,6712	0,3154	0,0134	0,9866
0,6717	0,3153	0,0130	0,9870

brems

x	y	z	x + y
0,6876	0,3110	0,0014	0,9986
0,6888	0,3104	0,0008	0,9992

blink

x	y	z	x + y
0,5901	0,4081	0,0018	0,9982
0,5935	0,4055	0,0010	0,9990

led_licht

x	y	z	x + y
0,6760	0,3200	0,0040	0,9960
0,6763	0,3201	0,0039	0,9961

led_licht_2

x	y	z	x + y
0,6766	0,3196	0,0038	0,9962
0,6768	0,3196	0,0036	0,9964

led_brems

x	y	z	x + y
0,6849	0,3149	0,0002	0,9998
0,6854	0,3145	0,0001	0,9999

led_brems_2

x	y	z	x + y
0,6844	0,3155	0,0001	0,9999
0,6852	0,3147	0,0001	0,9999

led_brems_3

x	y	z	x + y
0,6831	0,3162	0,0007	0,9993
0,6827	0,3163	0,0010	0,9990

led_brems_4

x	y	z	x + y
0,6819	0,3172	0,0009	0,9991
0,6825	0,3166	0,0009	0,9991

led_brems_5

x	y	z	x + y
0,6828	0,3167	0,0005	0,9995
0,6828	0,3166	0,0006	0,9994

led_brems_6

x	y	z	x + y
0,6806	0,3176	0,0018	0,9982
0,6805	0,3176	0,0019	0,9981

led_blink

x	y	z	x + y
0,5818	0,4172	0,0010	0,9990
0,5834	0,4156	0,0010	0,9990

led_blink_2

x	y	z	x + y
0,5912	0,4066	0,0022	0,9978
0,5938	0,4038	0,0024	0,9976

led_blink mit led_licht_2

x	y	z	x + y
0,6038	0,3956	0,0006	0,9994
0,6038	0,3956	0,0006	0,9994

led_blink mit led_brems_2

x	y	z	x + y
0,6696	0,3301	0,0003	0,9997
0,6702	0,3295	0,0003	0,9997

led_blink_2 mit led_brems_4

x	y	z	x + y
0,6424	0,3570	0,0006	0,9994
0,6425	0,3566	0,0009	0,9991

led_blink_2 mit led_brems_5

x	y	z	x + y
0,6581	0,3410	0,0009	0,9991
0,6590	0,3404	0,0006	0,9994

led_blink_2 mit led_brems_6

x	y	z	x + y
0,6379	0,3610	0,0011	0,9989
0,6391	0,3602	0,0007	0,9993

A.9.6 Leuchtdichten

Alle hier angegebenen Leuchtdichten werden mit dem [Leuchtdichtemeßgerät] gemessen. Die gemessenen Flächen haben keine ganz gleichmäßigen Leuchtdichten. Die angegebenen Werte sind als Richtwerte zu verstehen. Die realen Werte können je nach Ort um bis zu 50 % davon abweichen.

Fahrstand

Diese Fläche wird mit dem 1° Meßfeld aus 2 m Entfernung gemessen.

Fläche	Leuchtdichte [cd/m^2]
Ulbrichtkugel (Umfeldleuchtdichte)	2 000

Die folgenden Leuchtdichten werden aus einer Entfernung von 6 m gemessen.

Fahrzeugflächen

Die folgenden drei großen Flächen werden mit dem 1° Meßfeld gemessen.

Fläche	Leuchtdichte [cd/m^2]
Fahrzeughintergrund (weiß)	450
Fahrzeugumriß (schwarz)	30
Abschlußscheibe der LED-Matrix Leuchte (Leuchte aus)	250

hintere Leuchteneinheiten

Die folgenden Flächen werden mit dem 20' Meßfeld gemessen. Für diese Messungen wäre eine Leuchtdichtekamera praktischer gewesen. Die realen Werte können je nach Ort um bis zu 8 % (bei Ampel: 50 %) abweichen.

Fläche	Leuchtdichte [cd/m^2]
konventionelle Leuchte, Schlußleuchte (<i>licht</i>)	1 300
konventionelle Leuchte, Bremsleuchte (<i>brems</i>)	7 000
konventionelle Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>blink</i>)	30 000
LED-Matrix Leuchte, Schlußleuchte (<i>led_licht</i>)	1 000
LED-Matrix Leuchte, Schlußleuchte (<i>led_licht_2</i>)	1 600
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems</i>)	40 000
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_2</i>)	30 000
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_3</i>)	15 000
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_4</i>)	14 000
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_5</i>)	14 000
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_6</i>)	6 000
LED-Matrix Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>led_blink</i>)	9 000
LED-Matrix Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>led_blink_2</i>)	14 000
Nebelschlußleuchte	50 000
grüne Ampel	7 000

A.9.7 Einzelne Leuchtdioden der LED-Matrix Leuchte

Jede LED der LED-Matrix Leuchte wird einzeln geprüft. Die gemessene LED hat eine Temperatur von 20°C und wird direkt nach dem Einschalten vermessen. Die Helligkeit ist auf maximalen Wert eingestellt.

Alle Angaben sind in Candela [cd].

6,5	8,4	8,8	10,2	9,4	9,2	7,9	8,9	8,2	8,2	9,5	8,8	7,6	8,9	7,5	5,7
5,0	5,3	5,1	5,4	5,0	5,0	4,9	4,3	5,0	5,1	5,2	5,9	5,5	5,4	5,9	4,3
8,3	9,6	10,3	12,2	11,6	11,2	10,1	11,3	10,1	9,9	12,5	10,3	8,4	10,7	9,0	6,1
4,6	5,3	5,4	5,6	5,5	5,1	4,7	4,7	4,5	5,0	4,8	5,1	4,6	5,3	5,3	3,1
9,3	12,5	12,2	12,0	13,5	12,4	9,7	10,2	11,2	10,7	9,7	10,5	9,5	10,7	9,0	5,2
5,1	6,3	5,9	5,6	5,6	5,6	5,3	4,7	4,7	5,3	5,1	4,5	4,2	4,5	4,1	1,5
8,6	14,0	13,0	11,5	12,0	11,0	11,3	10,7	11,0	12,1	9,3	8,0	9,2	9,4	8,3	5,4
5,2	5,9	5,2	5,6	5,1	5,6	5,1	4,8	4,7	4,4	4,1	4,7	5,2	5,2	4,7	3,7
9,5	12,1	12,0	12,0	12,1	13,0	11,0	10,2	11,1	10,8	11,0	10,9	10,4	10,1	10,1	8,0
5,1	5,9	5,9	5,7	5,2	5,3	4,9	4,9	4,7	4,5	4,5	4,5	4,7	4,6	5,1	3,7
8,1	10,4	10,7	11,7	12,0	12,6	11,7	10,7	10,7	13,7	11,0	12,6	4,6	10,5	10,6	8,6
3,7	5,1	5,4	4,9	5,5	5,2	5,0	4,9	4,9	4,6	4,4	4,7	2,1	4,4	5,1	4,1
8,9	9,2	12,5	12,3	12,7	12,7	12,4	12,9	12,1	11,1	12,0	10,1	4,4	12,0	11,7	9,9
5,1	6,1	5,5	5,7	5,1	5,7	5,1	5,1	5,1	4,2	4,7	4,0	4,4	5,1	4,6	3,6
8,0	10,7	12,2	11,1	12,0	13,0	12,2	12,1	11,5	11,2	12,5	11,7	9,4	11,5	10,6	9,1
4,1	4,6	4,5	4,5	4,5	4,6	4,8	4,3	4,4	5,0	3,2	4,3	5,1	4,9	4,5	2,9

A.9.8 Lichtstärken

Die in Abschnitt A.2 angegebenen lichttechnischen Werte entstammen den Prüfprotokollen der jeweiligen Leuchten. Nur die Werte der [Nebelschlußleuchte] sind Meßwerte, da hierzu kein Prüfprotokoll vorhanden ist. Wie in Abschnitt 3.8 beschrieben, wird das verwendete Exemplar der konventionellen Leuchte und jedes benutzte Muster der LED-Matrix Leuchte auf dem Prüfstand vermessen.

Bei jeder Leuchte (und jedem Muster) wird gewartet, bis sich der Lichtstrom auf einen stabilen Wert eingestellt hat, bevor die Messung gestartet wird. Die Umgebungstemperatur beträgt bei allen Messungen $21^{\circ}\text{C} \pm 10\%$.

Bei der konventionellen Leuchte wird das Prüfmuster aus dem Archiv der Prüfstelle und das im Versuch benutzte Versuchsmuster gemessen. Beide Leuchten werden jeweils auch an verschiedenen Tagen gemessen und für jede Messung neu auf das Goniometer aufgespannt. Auch die LED-Matrix Leuchte wird zwischen manchen Messungen neu aufgespannt.

Leuchte	axiale Lichtstärke [cd]
konventionelle Leuchte (Prüfmuster), Schlußleuchte	15,7
konventionelle Leuchte (Prüfmuster), Schlußleuchte	15,9
konventionelle Leuchte (Prüfmuster), Bremsleuchte	113,7
konventionelle Leuchte (Prüfmuster), Bremsleuchte	122,6
konventionelle Leuchte (Prüfmuster), Fahrtrichtungsanzeiger	165,4
konventionelle Leuchte, Schlußleuchte (<i>licht</i>)	11,9
konventionelle Leuchte, Bremsleuchte (<i>brems</i>)	82,2
konventionelle Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>blink</i>)	173,6
konventionelle Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>blink</i>)	161,3
LED-Matrix Leuchte, Schlußleuchte (<i>led_licht</i>)	9,5
LED-Matrix Leuchte, Schlußleuchte (<i>led_licht_2</i>)	9,8
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems</i>)	235,0
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems</i>)	231,6
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_2</i>)	211,2
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_2</i>)	206,5
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_3</i>)	99,1
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_4</i>)	92,5
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_5</i>)	197,2
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_6</i>)	79,5
LED-Matrix Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>led_blink</i>)	52,4
LED-Matrix Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>led_blink_2</i>)	92,6
LED-Matrix Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>led_blink_2</i>)	88,3

A.9.9 Leuchtende Flächen

Die Angaben für die leuchtenden Flächen der konventionellen Leuchte entstammen dem Prüfprotokoll.

Die Werte der LED-Matrix Leuchte sind nicht nach Vorschrift der [ECE97], sondern anhand der physikalischen Abmessungen der Linsenmatrix berechnet. Der Aufbau der Optik ist in Bild A.8 zu sehen.

Jedes Fresnellinsen-Element hat eine Länge von 15 mm und Breite von 7,5 mm. Die oberhalb angebrachten Toruslinsen sind auf das Raster der Fresnellinsen ausgerichtet. Daher wird die leuchtende Fläche einer einzelnen Leuchtdioden mit der Fläche einer einzelnen Fresnellinse gleichgesetzt. Mit der gegebenen Länge und Breite beträgt diese Fläche 112,5 mm².

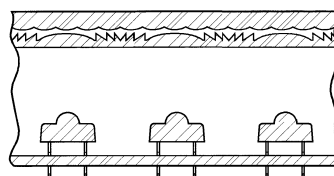


Bild A.8: Optik der LED-Matrix Leuchte

Die roten Leuchtdioden der LED-Matrix Leuchte sind in der ersten, dritten, usw. Reihe angebracht, die gelben Leuchtdioden in den Reihen mit geraden Nummern. Die Anordnung ist in Bild A.9 dargestellt. Die rechteckigen (farbigen) Flächen symbolisieren die Linsenelemente.

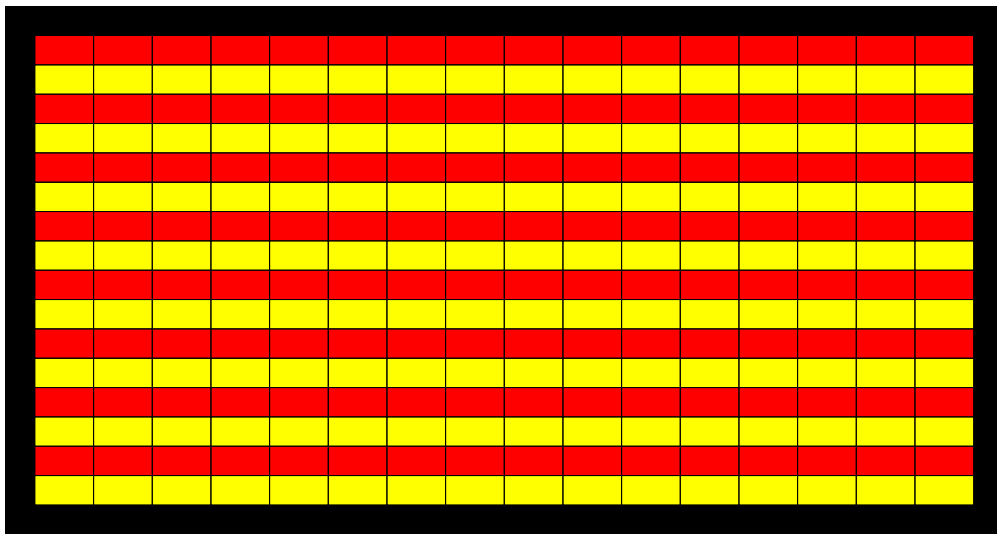


Bild A.9: Matrix der LED-Matrix Leuchte

Ein einfarbiges Muster aus mehreren untereinander angeordneten Leuchtdioden enthält daher immer nichtleuchtende Flächenteile. Die in der Tabelle in Klammern angegebenen Werte sind nur mit den leuchtenden Flächenelementen berechnet. Benannt wird diese Fläche mit *wahre Fläche*. Wenn die zwischenliegenden nichtleuchtenden Flächenelemente mit hinzugerechnet werden, ergeben sich die nicht in Klammer stehenden Werte. Würde die leuchtende Fläche nach [ECE97] gemessen werden, würden ähnliche Flächenangaben entstehen.

Ein aus zwei verschiedenfarbigen Mustern bestehendes Signalbild, besitzt als leuchtende Fläche die Summe der beiden Flächen. So beträgt die Fläche des überlappenden Signalbildes in Fall vier 7 200 mm². (Wahre Fläche *led_brems_2* plus wahre Fläche *led_blink*.)

leuchtende Flächen

Leuchte	Fläche [mm ²]
konventionelle Leuchte, Schlußleuchte (<i>licht</i>)	6 888
konventionelle Leuchte, Bremsleuchte (<i>brems</i>)	16 905
konventionelle Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>blink</i>)	6 090
LED-Matrix Leuchte, Schlußleuchte (<i>led_licht</i>)	6 750 (3 600)
LED-Matrix Leuchte, Schlußleuchte (<i>led_licht_2</i>)	6 750 (3 600)
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems</i>)	6 750 (3 600)
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_2</i>)	6 750 (3 600)
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_3</i>)	6 750 (3 600)
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_4</i>)	6 750 (3 600)
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_5</i>)	13 500 (7 200)
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_6</i>)	13 500 (7 200)
LED-Matrix Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>led_blink</i>)	6 750 (3 600)
LED-Matrix Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>led_blink_2</i>)	6 750 (3 600)

A.9.10 Berechnete Leuchtdichten

Mit den Angaben der leuchtenden Flächen (Abschnitt A.9.9) und der Lichtstärken (aus Abschnitt A.9.8, wenn mehrere Meßwerte vorhanden sind, wird der erste benutzt.) können durch die Formel von Seite 5 die Leuchtdichten berechnet und mit den gemessenen in Abschnitt A.9.6 verglichen werden.

Leuchte	Leuchtdichte [cd/m^2]
konventionelle Leuchte, Schlußleuchte (<i>licht</i>)	1 728
konventionelle Leuchte, Bremsleuchte (<i>brems</i>)	4 862
konventionelle Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>blink</i>)	28 506
LED-Matrix Leuchte, Schlußleuchte (<i>led_licht</i>)	1 407
LED-Matrix Leuchte, Schlußleuchte (<i>led_licht_2</i>)	1 452
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems</i>)	34 814
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_2</i>)	31 289
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_3</i>)	14 681
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_4</i>)	13 704
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_5</i>)	14 607
LED-Matrix Leuchte, Bremsleuchte (<i>led_brems_6</i>)	5 889
LED-Matrix Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>led_blink</i>)	7 763
LED-Matrix Leuchte, Fahrtrichtungsanzeiger (<i>led_blink_2</i>)	13 719

A.9.11 Experimente

Die Meßprotokolle und Diagramme, die während dem Versuchsaufbau erstellt werden, sind aufgrund ihres Umfangs in einem gesonderten Band enthalten. Dort sind die aufbereiteten Meßwerte für jede Versuchsperson dargestellt. Wenn eine Versuchsperson mehrmals am Experiment teilnimmt, dann existiert für jede Teilnahme ein eigenes Protokoll. In Abschnitt 3.16 ist beschrieben, welche Schritte zur Aufbereitung der Meßwerte unternommen werden.

Aufgeführte Elemente

Für jede Versuchsdurchführung wird eine Tabelle mit allen berechneten Werten erstellt.

Eine weitere Tabelle enthält alle *falschen Reaktionen* der jeweiligen Versuchsperson.

Zu jeder Gruppe von Meßwerten wird ein Diagramm erstellt. Um den Vergleich zwischen den verschiedenen Fällen zu erleichtern, sind alle Diagramme gleich skaliert.

Um Verwechslungen auszuschließen, ist weiterhin an jeder Tabelle und jedem Diagramm der Name der ursprünglichen Protokolldatei vermerkt.

Alle Meßwerte für die Reaktionszeiten sind in μsec angegeben.