

Experimentelle Studie zu Protanopie und Wahrnehmung von Bremsleuchten

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Mensch und Sicherheit Heft M 332

bast

Experimentelle Studie zu Protanopie und Wahrnehmung von Bremsleuchten

von

Melanie Helmer
Klaus Trampert

Karlsruher Institut für Technologie
Lichttechnisches Institut, Karlsruhe

unter Mitwirkung von

Ulrich Schiefer
Judith Ungewiß

Hochschule Aalen
Kompetenzzentrum „Vision Research“, Aalen

Maximilian Baumann
Jan Feßler

Karlsruher Institut für Technologie
Lichttechnisches Institut, Karlsruhe

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Mensch und Sicherheit Heft M 332

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 82.0716
Experimentelle Studie zu Protanopie (Rotblindheit) und Wahrnehmung von Bremsleuchten

Fachbetreuung
Nicole Gräcmann

Referat
Fahreignung, Fahrausbildung, Kraftfahrerrehabilitation

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9315
ISBN 978-3-95606-706-8

Bergisch Gladbach, Oktober 2022

Kurzfassung – Abstract

Experimentelle Studie zu Protanopie und Wahrnehmung von Bremsleuchten

Ziel dieses Projekts ist es, den Einfluss einer Protanopie (Rotblindheit) auf die Erkennbarkeit des Bremssignals von roten Bremsleuchten auf Basis einer explorativen Probandenstudie zu ermitteln.

In der Studie wird modellhaft die Situation einer plötzlichen Bremsung mit 15 m Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nachgebildet, was einer realitätsnahen innerstädtischen und potenziell kritischen Situation bei 50 km/h entspricht. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse werden die lichttechnischen Randparameter der Bremsleuchten im Rahmen der gesetzlichen Regelungen möglichst kritisch hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Sicherheitsrisiko gewählt.

In der Studie wird eine maßstabsgetreue Modellnachbildung eines Fahrzeughecks vor einem Fahrzeugsitz mit Pedalen und Lenkrad aufgestellt. Im Modell des Fahrzeughecks befinden sich konventionelle Heckleuchten eines aktuell zugelassenen Kraftfahrzeugs (Kfz) in einer Version mit Glühlampen- und in einer mit LED-Lichtquellen mit vergleichbarem Erscheinungsbild.

In der Studie werden vier Situationen in den möglichen Kombinationen aus einer Tag- bzw. Nachtsituation mit beiden Lichtquellentechnologien getestet. Pro Situation werden dem Probanden 20 unterschiedlich helle Bremsleuchtniveaus zwischen 12 cd und 120 cd mit je zwei Wiederholungen in zufälliger Folge dargeboten. Als Maß zur lichttechnischen Bewertung wird der Lichtstärkekontrast zwischen dem dauerhaft dargebotenen Schlusslicht und dem jeweiligen Bremsleuchtniveau herangezogen.

Die Untersuchung der Wahrnehmungsunterschiede von roten Bremsleuchten zwischen Protanopen und Normalsichtigen wird mit folgenden Nullhypothesen durchgeführt.

$H_{0,1}$: Es gibt in Bezug auf die ermittelten Kontrastschwellen des Bremssignals von Bremsleuchten keinen Unterschied zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Sehvermögen.

$H_{0,2}$: Die verwendeten Technologien von Glühlampe und LED zeigen keinen Unterschied in Bezug auf die Kontrastschwellen zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

$H_{0,3}$: Bei separater Betrachtung von Glühlampe und LED gibt es jeweils keinen Unterschied der Reaktionszeit zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

Zur Prüfung der ersten Nullhypothese $H_{0,1}$ wird die Erkennbarkeitsschwelle bei einer Wahrscheinlichkeit von 50 % und 80 % der einzelnen Kontraststufen bestimmt. Die Erkennbarkeitsschwelle ist für beide Probandengruppen unter Berücksichtigung der Streubreiten gleich, was zur Annahme der Nullhypothese $H_{0,1}$ führt. Aus der UN-Regelung Nr. 7, die die gesetzlichen Anforderungen für Schluss- und Bremsleuchten festlegt, ergibt sich ein minimaler Kontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchten von 4 bis zum Jahr 2010 und 2,5 seit 2010. Diese minimalen Kontraste wurden von beiden Gruppen sicher erkannt.

Die zweite Nullhypothese $H_{0,2}$ klärt den Einfluss der relativen spektralen Verteilung der verwendeten Lichtquellentechnologie, hier Glühlampe bzw. LED, auf die Wahrnehmbarkeitsschwelle für Protanope. Die gemessenen Kontrastschwellen zeigen keine Unterschiede zwischen den Technologien. Der Einfluss der relativen spektralen Verteilung der untersuchten Technologie auf die Wahrnehmung kann ausgeschlossen werden und die Nullhypothese $H_{0,2}$ ist ebenfalls angenommen.

Die dritte Nullhypothese $H_{0,3}$ untersucht den Einfluss der Lichtquellentechnologie auf Basis der Betrachtung der Reaktionszeiten über den Kontraststufen. Eine Differenzierung zwischen den Probandengruppen ist auch hier nicht zu erkennen, sodass die dritte Nullhypothese $H_{0,3}$ ebenfalls angenommen ist.

Anhand der in dieser Studie ermittelten Daten kann kein sicherheitsrelevanter Einfluss einer vorliegenden Protanopie auf die Wahrnehmung von Kfz-Bremsleuchten (UN-Regelung Nr. 7) im Straßenverkehr nachgewiesen werden. Es hat sich gezeigt, dass im beschriebenen Untersuchungssetting in Bezug auf die ermittelten Kontrastschwellen des Bremssignals kein Unterschied zwischen pro-

tanopen Personen und Personen mit normalem Sehvermögen belegbar ist.

Die Untersuchungsergebnisse bieten daher keine Grundlage für eine Änderung der derzeit geltenden gesetzlichen Regelungen der Fahrerlaubnis-Verordnung. Da es sich allerdings um eine Untersuchung unter Laborbedingungen handelt, ist eine direkte Übertragbarkeit in den realen Straßenverkehr aufgrund der dort vorliegenden Komplexität nicht ohne weiteres möglich. Soll die Übertragbarkeit dennoch hergestellt werden, werden die ermittelten Werte üblicherweise mit dem sogenannten Praxisfaktor multipliziert. Die Anwendung des Praxisfaktors führt in diesem Fall zu dem Schluss, dass die in der UN-Regelung Nr. 7 festgelegten Anforderungen an die Bremsleuchten für beide Probandengruppen nicht ausreichend sind, um ein rechtzeitiges Erkennen der Bremsleuchten zu gewährleisten. Aufgrund dieser Erkenntnis besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Neubewertung der Mindest- und Maximallichtstärken für Schluss- und Bremsleuchten respektive deren Kontrast zueinander.

Experimental study on protanopia and perception of brake lights

The aim of this project is to determine the influence of protanopia (red blindness) on the recognisability of red stop lamps based on an explorative study with test subjects.

In the study, a braking situation is simulated at a distance of 15 m from the vehicle in front. This corresponds to a realistic inner-city potentially critical situation at 50 km/h. In order to ensure the transferability of the findings, the legally permitted photometric parameters for stop lamps are chosen as critically as possible with regard to their effect on the recognisability.

In the study, a true to scale model of a vehicle rear is placed in front of a vehicle seat with pedals and steering wheel. In the model of the vehicle rear, there are conventional rear lights of a current vehicle with a comparable appearance between both light source technologies, incandescent lamps and LEDs.

During the study, four different situations are tested: Day- and night-time conditions in each case with both light source technologies. For each situation, the test subject is presented a set of 20 different

bright stop lamp levels with two repetitions in random order. The levels are in the range between 12 cd and 120 cd. As a measure for the photometric evaluation, the luminous intensity contrast between the permanently presented rear position lamp and the respective stop lamp level is used.

To investigate perception differences of red stop lamps between protanope and normal vision subjects, the study is performed with the following null hypotheses.

$H_{0,1}$: There is no difference between protanope subjects and subjects with normal vision with regard to the determined contrast thresholds of stop lamps.

$H_{0,2}$: The technologies of incandescent lamps and LEDs used show no difference in contrast thresholds between protanope subjects and subjects with normal colour vision.

$H_{0,3}$: When considering incandescent lamp and LED separately, there is no difference in the reaction time of the determined contrasts between protanope subjects and subjects with normal colour vision.

To verify the first null hypothesis $H_{0,1}$, the perception threshold of the individual contrast levels is determined at a probability of 50 % and 80 %. The perception threshold shows no differences between both groups of test subjects. Considering the variance ranges leads to accepting the null hypothesis $H_{0,1}$. From the legal regulation requirements UN Regulation No. 7, there is a theoretically minimum luminous intensity contrast between rear position lamps and stop lamps of 4 up to the year 2010 and 2.5 since 2010. The theoretically minimum contrast of 2.5 was recognised reliably by both groups.

The second null hypothesis $H_{0,2}$ tests the influence of the relative spectral distribution of the light source technology, incandescent lamp or LED, on the perception threshold. The technology-sensitive contrast thresholds of both groups of test subjects are compared. The measured contrast thresholds show no differences between the technologies. Thus, the influence of the relative spectral distribution of the examined technology on the perception can be excluded and we can also accept the null hypothesis $H_{0,2}$.

The third null hypothesis $H_{0,3}$ investigates the influence of the light source technology on the general reaction behaviour in more detail. The

determined mean values of the reaction times do not show any differences between both groups of test subjects, also with regard of the presented contrast levels. So, the third null hypothesis $H_{0,3}$ can also be assumed.

Based on the data determined in this study, no safety-relevant influence of an existing protanopia on the perception of stop lamps (UN Regulation No. 7) in road traffic can be demonstrated. It has been shown that there is no difference between protanope people and people with normal vision with respect to the determined contrast thresholds of stop lamps.

Therefore, the results of the investigation do not provide a basis for changing the currently applicable legal regulations for driving licenses. Because of the fact that the study was conducted under laboratory conditions, it is not possible to transfer the results in real and complex road traffic. If the results are to be transferred, the determined values are usually multiplied by the so-called practice factor. In this case, using this factor leads to the conclusion that the requirements for stop lamps according to UN regulation No. 7 are not sufficient to ensure a timely detection of the brake light as well as for protanope people and for people with normal vision.

Based on this finding, there is a need for further research with regard to the re-evaluation of the minimum and maximum light intensities for the tail lamps and stop lamps respectively their contrast to each other.

Summary

Experimental study on protanopia and perception of brake lights

1 Motivation and background

The aim of this experimental study is to show in how strongly protanopia (red-blindness) affects the recognition of stop lamps and what relevance there may be for road safety. Regarding the adaption to European law, annex 6 of the driving licence regulation (Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV)) was changed to the effect that since July 1st 2011 all driving licences classes of group 2(C1, C1E, C, CE, D1, D1E, D, DE, FzF) can be acquired (previously only C1, C1E, C and CE). In the case of red blindness or red weakness with an anomaly quotient below 0.5, it is only necessary to inform the person concerned about the possible risk.

National experts are worried that, due to their deficit, protanopes have difficulties in recognising stop lamps in time and are therefore increasingly involved in rear-end collisions. This study is intended to examine if recommendations for action are clearly necessary for the legislature.

A person with normal vision has three different receptors for colour vision. If a receptor is impaired, there is a deficit in colour perception. In the case of protanomaly (limited function) or protanopia (complete failure), the L-cone is affected. Protanomaly is the second most common congenital colour perception disorder, affecting about 1 % males and 0.02 % females in Europe.

To determine a colour vision deficiency and its severe, there are established measurement systems. The vision requirements for obtaining a driving licence are regulated in § 12 para. 2 of the driving licence regulation. They vary with the driving licence class to be acquired.

In road traffic, the colour red has the signalling function. Therefore, missing red signals increases the potential for danger. Due to the shift in colour and brightness perception, this is especially critical for people with impaired red perception. Rear-end collisions are particularly critical because of the presumably less perceptible stop lamps.

The literature shows inconsistent and sometimes contradictory study results and conclusions. For

example, some authors argue that protanopes should generally not be allowed to obtain a driving licence, regardless of the degree of red-sense deficiency. Other authors demand an exclusion only for higher categories of licences such as bus drivers licences or passenger transport licences, sometimes linked to a settled minimum anomaly quotient.

From a legal point of view, Regulation number 7 of the United Nations Economic Commission for Europe, or UNECE for short, describes the requirements for the rear position lamps and stop lamps. So, the colour red is prescribed, which can be realised with different light sources, primarily incandescent lamps or LED.

2 Research hypotheses

People with an impaired red perception are more likely not to see red stop lamps in time. The safety risk increases.

Therefore, the null hypotheses are:

$H_{0,1}$: There is no difference between protanope subjects and subjects with normal vision with regard to the determined contrast thresholds of stop lamps.

$H_{0,2}$: The technologies of incandescent lamps and LEDs used show no difference in contrast thresholds between protanope subjects and subjects with normal colour vision.

$H_{0,2}$: When considering incandescent lamp and LED separately, there is no difference in the reaction time of the determined contrasts between protanope subjects and subjects with normal colour vision.

3 Experimental design

3.1 Experimental design in general

Based on the formulated null hypotheses, a comparative study between a protanopic and a normally seeing group of test subjects is planned. To ensure the unambiguousness of the findings, all parameters will be selected as critically as possible according to a worst-case scenario with regard to their effect on the safety risk.

For the study, an inner-city drive with a distance of 15 m to the vehicle in front is simulated. This corresponds to a potentially critical and at the same time realistic braking situation at 50 km/h. The

boundary parameters are chosen considering legal and realistic conditions.

The detectability of a stop lamp depends on the perceived contrast between the luminance of the stop lamp and the luminance of the surrounding area. For this reason, the influence of brightness, i.e. the ambient luminance, is considered for a day and night situation. Typical ambient luminances are defined for each situation.

The study is planned as a laboratory study, so that potential disturbing influences can be reduced, the environmental conditions can be controlled and the reproducibility of the results can be guaranteed as best as possible. The scene should also be as realistic as possible; therefore, the rear lights are integrated into a scale model of a vehicle rear. The rear lights are selected in such a way that rear position lamp and stop lamp functions look as similar as possible in both technologies. This ensures that any difference can be attributed to the relative spectral composition of the light source. The requirements are fulfilled by the rear light of the Seat Leon III. Therefore, these will be the basis for the study.

The hypotheses result in a within-subject design with measurement repetition. This means that all test conditions are run through by each test subject. This procedure is economically and methodologically sensible, since interpersonal differences have the same effect on all conditions.

Based on the formulated null hypotheses, the contrast threshold and the reaction time are the dependent variables, i.e. the variables to be measured. The independent variable, i.e. the variable to be manipulated, is the brightness contrast between rear position lamp and stop lamp. The constant method according to FECHNER is used to determine the perception threshold.

3.2 Method

All test subjects pass a complete ophthalmological-optical examination for fitness to drive in accordance with FeV recommendations, in which the anamnestic data are collected. The classification of the test subjects is based on the examination results of the anomaloscope. In addition, semi-automated kinetic perimetry (SKP) is performed exclusively along the horizontal meridian including reaction time correction with different measurement marks.

Within the study, the influencing parameters ambient brightness (day/night), light source technology (incandescent lamp/LED) as well as the contrast levels of the stop lamp levels are randomly varied.

For this study, the contrast according to WEBER K_W is used as a measure for detecting differences in brightness. The perceptibility increases with increasing luminous intensity difference between rear position lamp and stop lamp, i.e. with increasing contrast. The most critical contrast that can be displayed, is when the rear position lamp and stop lamp are equally bright and cannot be distinguished. This results in a contrast of K_W , the so-called catch trial, in which no stimulus is presented.

From a legal point of view, according to the current UN Regulation No. 7, luminous intensities between a minimum of 4 cd and a maximum of 17 cd are permitted for rear position lamps. Until 2010, the permitted maximum was limited to a luminous intensity of 12 cd. The legally permitted range of the stop lamp in this UN regulation starts at 60 cd.

Therefore, the rear position lamp level of 12 cd for the day and night situation is used in this study. The distinction between old and new UN Regulation No. 7 can be derived from the effective contrasts of $K_W = 4$ for a stop lamp level of 12 cd and $K_W = 2,5$ for a stop lamp level of 17 cd. The 20 contrast levels are distributed as evenly as possible over the available range between 12 cd and 120 cd, covering the contrasts $K_W = 0$, $K_W = 2,5$ and $K_W = 4$.

3.3 Experimental procedure

After the ophthalmological examination, the photometric part of the study takes place. Each subject is first instructed in writing and then verbally by the test administration. The test subjects are informed that the set-up situation is an inner-city drive behind. They are also informed that the stop lamps of the vehicle in front will light up at certain intervals. Their task is to step on the brake pedal immediately after the stop lamp comes on. This procedure is repeated several times and with different brightness levels of the stop lamp, i.e. contrast levels.

The situations to be investigated are examined one after the other. At the beginning of each situation, an adaptation phase takes place for the test subject. For the day situation, the adaptation time is 3 min. For the night situation, the adaptation time is 10

min. After each situation, the subject has a recovery break of at least 5 min.

During the study, the time required by the test subjects to react to a braking situation presented to him is recorded as the reaction time. Consequently, the reaction time is calculated from the distance between the time of the presentation and the time when the test subject steps on the brake pedal.

4 Results

4.1 Test subjects

A total of six colour-normal subjects and five protanope subjects participated. The average age of the normal-vision subjects was 32.9 years and that of the protanope subjects 23.7 years. Overall, this is a relatively young group of subjects. All test persons have sufficient vision according to the FeV.

4.2 Lighting investigation

If the contrast level is high enough, so that the stop lamp is easily recognisable, the subject can react quickly to it. If the presented contrast level is lower and near by the perception threshold, it is more difficult for the subject to perceive it. In this case, longer reaction times are to expected.

Due to the missing L-cone, protanope subjects presumably have a reduced brightness perception, especially for the colour red. In relation to this study, this means that a protanope subject requires a higher contrast to perceive the stop lamp compared to subjects with normal vision. If there is an influence of a protanopia on the perception of stop lamps, it should be possible to show this aspect based of the recorded data.

The 50 % threshold is usually used to determine the absolute threshold. Using this threshold would mean that the presented stop lamps would be detected in 50 % of cases. Due to the safety relevance of the study, the perception probability should be chosen as high as possible. The most conservative approach would be to set the threshold at 100 %. But this threshold is not realistic. Due to inattention, wrong or no subject reactions can occur. In order to this aspect and also not to set the threshold too high, the 80 % threshold is used in this study.

Because the perception of signalling lamps depends on the ambient brightness, the contrast levels of both technologies were presented in a daytime and night-time situation. The results show that for this study a separation between day and night is not necessary for further evaluations.

4.2.1 Testing the null hypothesis regarding contrast thresholds

To investigate the first null hypothesis, the determined threshold contrasts are plotted in a histogram, divided into the two subject groups. The results are shown in Figure 4-1 and Figure 4-2.

The histograms show that a separation of both groups of test subjects is not possible. Furthermore, it is shown that the determined threshold contrasts are below the minimum contrast of 2.5, which is possible according to ECE Regulation No. 7. Based on the results shown here, the first null hypothesis must be accepted. This means: There is no difference between protanope subjects and subjects with normal vision with regard to the determined contrast thresholds of stop lamps.

An influence of protanopia on the perceptibility of red stop lamps cannot be proven based on the results considered here.

4.2.2 Testing the null hypothesis regarding light source technology

To investigate this hypothesis, the data is divided technology-specifically and the 80 % threshold is considered.

As shown in Figure 4-3 and Figure 4-4, it is not possible to separate the subject groups. The threshold contrasts determined for the protanope subjects and for the normal vision subjects are similarly distributed over the specified ranges. In addition, the determined threshold contrasts are 80 % below the possible minimum contrast of 2.5. Therefore, the second null hypothesis can also be accepted. This means, the technologies incandescent lamp and LED show no difference in contrast thresholds between protanopia subjects and subjects with normal colour vision.

An influence of protanopia with regard to the light source technology of stop lamps cannot be recognised based on the results considered in this study.

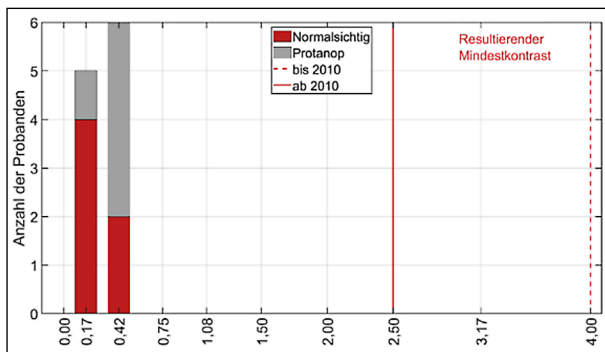


Fig. 4-1 Histogram 50 %-threshold sorted by subject group cumulated over all situations; red = colour normal, gray = protanopia

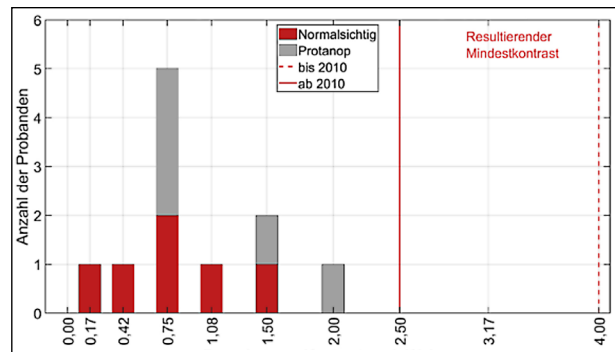


Fig. 4-3 Histogram 80 % incandescent lamp sorted by subject group; red = colour normal, gray = protanopia

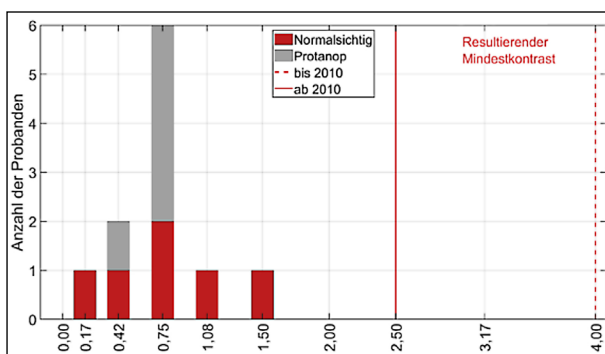


Fig. 4-2 Histogram 80 %-threshold sorted by subject group cumulated over all situations; red = colour normal, gray = protanopia

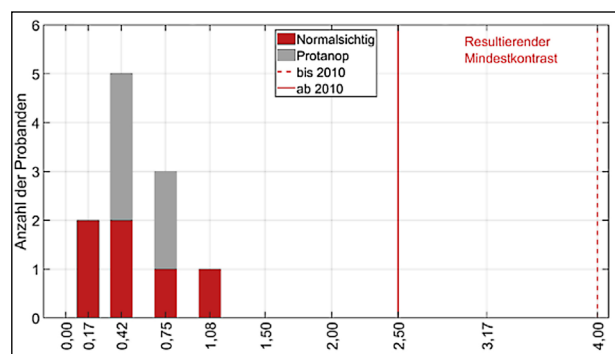


Fig. 4-4 Histogram 80 % LED sorted by subject groups; red = colour normal, gray = protanopia

4.2.3 Testing the null hypothesis regarding the reaction time

If the present protanopia has an influence on reaction time, this should be demonstrated as a function of the presented contrast. Due to the predicted perceptual deficit, it can be assumed that the contrast threshold for protanopia subjects shifts to higher contrasts.

The mean value of the reaction time calculated for the contrast level of 2.5 for the normally vision group of subjects is 1.09 s with a standard deviation of 0.07 s. For the protanope subject group, the mean value of the reaction time is 1.05 s with a standard deviation of 0.08 s. The mean reaction times of the five highest, clearly visible contrast levels are between 0.98 s and 1.05 s for the subjects with normal colour vision. Consequently, no noticeable differences can be detected. There is no influence of protanopia on the reaction time at the critical contrast in this study.

Therefore, the third null hypothesis is also to be accepted for this application case of the legally regulated stop lamps. This means, if incandescent lamp and LED are considered separately, there is

no difference between protanope test subjects and test subjects with normal colour vision regarding the reaction time.

5 Conclusion and outlook

Based on the data obtained in this study, no safety-relevant influence of protanopia on the perception of vehicle stop lamps in road traffic can be proven. The data do not provide a basis for changing the currently applicable legal regulations. However, the authors agree with the requirement that people with known and diagnosed protanopia or protanomaly should be advised to drive attentively.

With the help of the laboratory study, it can be shown that the determined threshold contrasts of both subject groups are smaller than the possible minimum contrast of 2.5 according to UN Regulation No. 7 of 2010. This means that both subject groups can reliably detect stop lamps.

It is true that the determined threshold contrast of perception is just below the theoretically possible minimum contrast of the regulation. Because of the

fact that the study was conducted under laboratory conditions, it is not possible to transfer the results in real and complex road traffic. So, the influence of secondary tasks, such as driving a vehicle, could not be depicted. Usually, such results from laboratory studies are multiplied by a practical factor.

Regarding the application, the practical factor should be 3 at least. This means, the determined threshold contrasts for both groups already exceed the possible minimum contrast of 2.5. In this case, a risk potential cannot be excluded. However, a possible risk potential for this type of stop lamp function can be derived from this. This means that, according to the current state of the art, stop lamps that comply with the regulations cannot be perceived safely. To counteract this problem, it would be conceivable to prescribe a minimum contrast between rear position lamp and stop lamp within UN Regulation No. 7. The value of this contrast has to be investigated in a further study.

Inhalt

1	Wissenschaftlicher Hintergrund/ Motivation	13	6.1	Probandenkollektiv.....	30
1.1	Farbfehlsichtigkeit.....	13	6.2	Ergebnisse der Farbfehlsichtigkeits- bestimmung	31
1.2	Farbfehlsichtigkeit und Fahrerlaubniserwerb	14	6.3	Selbsteinschätzung Farbfehlsichtiger	33
1.3	Studien zum Einfluss einer Farbfehlsichtigkeit auf die Verkehrssicherheit	14	7	Ergebnisse der lichttechnischen Untersuchung	34
1.4	Gesetzliche und technologische Rahmenbedingungen für Schluss- und Bremsleuchten	16	7.1	Datenaufbereitung	34
2	Forschungshypothesen	17	7.2	Charakteristischer Verlauf.....	34
3	Versuchskonzept	17	7.3	Normierung der Reaktionszeit	35
3.1	Allgemeines Versuchskonzept	17	7.4	Vorgehensweise bei der Auswertung der Messdaten	36
3.2	Anforderungen an das Probandenkollektiv.....	18	7.4.1	Trennbarkeit zwischen protanopen und normalsichtigen Probanden	36
3.3	Anforderungen an die Versuchsumgebung	18	7.4.2	Bestimmung der Kontrastschwelle	36
3.3.1	Nachzustellende Situation	18	7.4.3	Unterscheidung zwischen den Tag- und Nachtsituationen	38
3.3.2	Umfeldbedingungen.....	19	7.5	Überprüfung der Nullhypothesen.....	38
3.4	Anforderung an die Heckleuchten.....	19	7.5.1	Kontrastschwelle.....	38
4	Versuchsaufbau	20	7.5.2	Lichtquellentechnologie	39
4.1	Versuchsumgebung	20	7.5.3	Reaktionszeiten	40
4.2	Heckleuchten	22	8	Diskussion	42
5	Untersuchungsmethode	24	8.1	Augenärztliche Untersuchungen.....	42
5.1	Ophthalmologisch-optische Untersuchung der Probanden	24	8.2	Selbsteinschätzung Farbfehlsichtiger	43
5.2	Lichttechnische Untersuchung.....	25	8.3	Lichttechnische Studie im Vergleich zu anderen Studien aus der Literatur	43
5.2.1	Situation	26	8.4	Vergleich lichttechnischer Parameter	44
5.2.2	Kontraststufen.....	27	8.5	Wahl der Kontraststufen.....	46
5.2.3	Versuchsablauf	29	8.6	Probandenkollektiv	47
6	Ergebnisse der ophthalmologisch- optischen Untersuchung der Probanden	30	9	Zusammenfassung	47
			10	Handlungsempfehlung für Protanopie im Straßenverkehr	48
			11	Ausblick	49
			Literatur		50

Bilder 52

Tabellen..... 54

Anhang..... 55

1 Wissenschaftlicher Hintergrund/Motivation

Ziel dieser Studie ist es, in einer experimentellen Studie aufzuzeigen, wie stark sich eine Protanopie im experimentellen Design auf die Erkennbarkeit von Bremsleuchten auswirkt und welche Relevanz ggf. für die Verkehrssicherheit besteht. Im Zuge einer Anpassung an das europäische Recht wurde die Anlage 6 der Fahrerlaubnis-Verordnung dahingehend geändert, dass seit dem 01.07.2011 mit einer vorliegenden Rotblindheit oder Rotsehschwäche alle Fahrerlaubnisklassen der Gruppe 2 (C1, C1E, C, CE, D1, D1E, D, DE, FzF) erworben werden können (zuvor nur C1, C1E, C, CE). Bei Rotblindheit oder Rotschwäche mit einem Anomaliequotienten unter 0,5 ist lediglich eine Aufklärung des Betroffenen über die mögliche Gefährdung erforderlich.

Da von nationaler Expertenseite befürchtet wird, dass Protanope aufgrund ihres Defizits Schwierigkeiten beim rechtzeitigen Erkennen von Bremsleuchten haben und somit vermehrt in Auffahrunfälle involviert sind, soll diese Studie untersuchen, ob sich diese Befürchtungen experimentell belegen lassen.

1.1 Farbfehlsichtigkeit

Einem normalsichtigen Menschen stehen zum Farbsehen drei verschiedene Rezeptoren zur Verfügung, die sich in ihrem relativen Empfindlichkeitsspektrum unterscheiden. Diese Rezeptoren werden hinsichtlich ihres Maximums der relativen spektralen Empfindlichkeit unterschieden in S-Zapfen mit einem Maximum bei etwa 420 nm, M-Zapfen mit 530 nm Maximum und L-Zapfen mit einem Maxi-

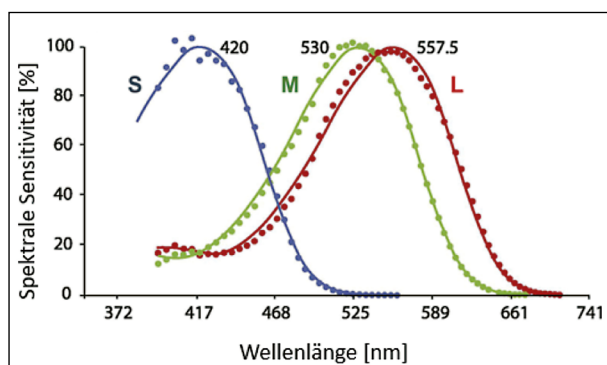


Bild 1-1: Relative Empfindlichkeit der drei Rezeptoren im Auge (NEITZ & NEITZ 2011)

um bei 557,5 nm (NEITZ & NEITZ 2011). Farbnormalsichtige Menschen zählen daher zur Gruppe der Trichromaten, da sie über drei Rezeptorarten des Farbsehens verfügen. Die relativen Empfindlichkeitskurven der drei Rezeptoren sind in Bild 1-1 dargestellt.

Eine Farbfehlsichtigkeit kann aufgrund von genetischen Defekten oder krankhaften Veränderungen im Auge entstehen und in unterschiedlichen Ausprägungen auftreten, welche nach Art des betroffenen Rezeptors und Ausmaß der Funktionseinschränkung unterschieden werden. Ein vollständiger Ausfall wird als Dichromasie oder Anopie bezeichnet, eine Einschränkung als anomale Trichromasie oder Anomalie. Der komplette Funktionsverlust der L-Zapfen wird als Protanopie, der der M-Zapfen als Deutanopie und der der S-Zapfen als Tritanopie bezeichnet. Bei der Protanomalie, d. h. der Rotschwäche, ist die Empfindlichkeit der L-Zapfen beeinträchtigt. Eine Grünschwäche, d. h. eine Einschränkung der M-Zapfen, wird als Deuteranomalie bezeichnet und die Beeinträchtigung der S-Zapfen führt zu einer Blauschwäche, genannt Tritanomalie (SACHSENWEGER & KLAUß 2003; SCHMIDT & SCHAIBLE 2006).

Etwa 8 % aller Männer und nur 0,4 % aller Frauen haben eine angeborene Farbsinnstörung. Sie ist meist genetisch bedingt und im X-Chromosom verankert, weswegen vorrangig Männer von ihr betroffen sind (SACHSENWEGER & KLAUß 2003). Bei der Protanomalie handelt es sich um die zweithäufigste angeborene Farbwahrnehmungsstörung. Die Prävalenz für eine genetisch bedingte Protanopie, d. h. eine Rotblindheit, liegt im europäischen Raum bei Männern bei etwa 1 % und bei Frauen bei 0,02 % (KARNATH & ACKERMANN 2012). Betroffene Personen haben, wie in Bild 1-2 gezeigt, ein eingeschränktes Farbempfinden.

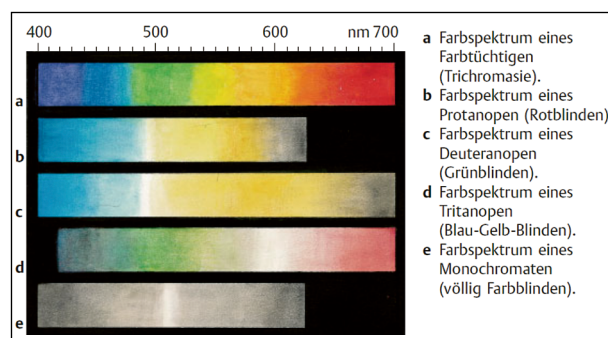


Bild 1-2 Farbempfindung bei verschiedenen Formen der Farbsinnstörung im Vergleich zur Farbwahrnehmung eines Farbtüchtigen (SACHSENWEGER & KLAUß 2003)

1.2 Farbfehlsichtigkeit und Fahrerlaubniserwerb

Zur Feststellung einer Farbfehlsichtigkeit und dessen Schwere stehen verschiedene etablierte Messsysteme, wie z. B. das Anomaloskop, Farblegetests oder Farbtafelsysteme, wie beispielsweise die Ishihara Tafeln, zur Verfügung (BIRCH 2012; KARNATH & ACKERMANN 2012). Für einen weiterführenden Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten zur Untersuchung des Farbsinns sei auf KRASTEL (KRASTEL et al. 2009) verwiesen.

Unterschiedliche Testmethoden werden zur Überprüfung der Anforderungen an das Sehvermögen im Rahmen des gesetzlich verpflichtenden Sehtests bei Erwerb einer Fahrerlaubnis genutzt. Dies ist in § 12 Abs. 2 Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV) geregelt. Die Farbsinnprüfung ist in der FeV fest verankert, jedoch variieren die zu erfüllenden Mindestanforderungen, die zu nutzende Messmethode und die abgeleiteten Konsequenzen mit der zu erwerbenden Fahrerlaubnisklasse (LACHENMAYR 2003).

So werden für die Fahrzeugklassen A, A1, A2, B, BE, AM, L und T gemäß FeV keine Anforderungen an das Farbsehen gestellt (GRUNDLER & STRASBURGER; LACHENMAYR 2003; LACHENMAYR & FREIBLER 2019). Die Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft (DOG) empfiehlt jedoch, die Betroffenen auf ihre Farbsinnstörung und die damit verbundenen potenziellen Gefahren vor allem bei diagnostizierter Protanomalie oder Protanopie hinzuweisen (LACHENMAYR & FREIBLER 2019).

Bei den Fahrzeugklassen für Berufskraftfahrer (Klassen C, C1, CE, C1E und D, D1, DE, D1E sowie die Fahrerlaubnis zur Fahrgastbeförderung FzF) ist hingegen der sogenannte Anomaliequotient mit einem Anomaloskop zu bestimmen. Eine diagnostizierte Protanopie oder ausgeprägte Protanomalie, d. h. ein Anomaliequotient kleiner als 0,5, hatte bis zum 30.06.2011 das Nichterfüllen der Anforderungen zum Fahrerlaubniserwerb für die Fahrzeugklassen D, D1, DE, D1E sowie FzF bedeutet. Bedingt durch eine Gesetzesänderung ist die Regelung seit dem 01.07.2011 dahingehend geändert, dass für alle Klassen die Aufklärung über potenzielle Gefahren der betroffenen Personen ausreicht (Anlage 6 FeV) (RL 2006/126/EG).

Im Vereinigten Königreich (UK) müssen Farbsinnstörungen nicht bei der britischen Fahrerlaubnisbe-

hörde angegeben werden. Somit existieren keine fahrerlaubnisrechtlichen Einschränkungen beziehungsweise Auflagen für farbsinngestörte Fahrer. Auch in Australien haben von 1994 bis 2003 Einschränkungen für Farbfehlsichtige bestanden. Während dieser Zeit erhielten protanope Berufskraftfahrer keine Fahrerlaubnis. 2003 ist diese Regelung aufgrund einer Klage aufgehoben worden, sodass in Australien nun keine Einschränkungen für protanope Personen mehr bestehen (COLE 2016).

In den USA ist die Prüfung der Farbwahrnehmung verpflichtend. Die Anforderungen an das Farbsehen werden von der US Federal Motor Carrier Safety Administration (FMCSA) geregelt. Hier wird jedoch nur überprüft, ob die Farben „Rot“, „Grün“ und „Bernstein“ (gelb/orange) durch Benennung von einfachen Farbtafeln unterschieden werden können. Ein Testverfahren ist nicht explizit definiert. Aus diesem Grund ist gemäß COLE (COLE 2016) diese Vorgehensweise hinsichtlich ihrer Effektivität infrage zu stellen, da nur selten eine Farbsinnstörung diagnostiziert wird.

1.3 Studien zum Einfluss einer Farbfehlsichtigkeit auf die Verkehrssicherheit

Im Straßenverkehr hat die Farbe Rot die Signalfunktion zum Hinweis auf eine Gefahr oder dem Gebot des Anhaltens. Dies wird beim roten Stoppschild, bei der roten Lichtzeichenanlage und den Schluss- und Bremsleuchten von Fahrzeugen deutlich. Das Übersehen von roten Signalen stellt folglich ein erhöhtes Gefährdungspotenzial dar.

Dieses Gefährdungspotenzial ist bei protanopen und protanomalen Personen aufgrund der Verschiebung der Farb- und Helligkeitsempfindung vor allem für Rot im Vergleich zu Normalsichtigen (NEITZ & NEITZ 2011) nach LACHENMAYR (LACHENMAYR 2003; LACHENMAYR & FREIBLER 2019) als kritisch zu erachten. Im Besonderen werden in diesem Zusammenhang potenzielle Auffahrunfälle genannt, da das rote Bremssignal aufgrund der gestörten Farbwahrnehmung mutmaßlich schlechter wahrgenommen werden kann.

Als Maß für die visuelle Sichtbarkeit roter Signale im Straßenverkehr wird in den statischen Studien von COLE (2002) und VERRIEST (VERRIEST et al. 1980) die Erkennbarkeitsentfernung verwendet. Die Erkennbarkeitsentfernung bildet in diesen Versu-

chen prinzipiell die Schwelle der Helligkeitswahrnehmung ab, ist jedoch nur eine isolierte Grenzbeobachtung roter Signale ohne direkte Übertragbarkeit innerhalb der gesamten Straßenszene.

COLE (2002) untersucht in seinen Studien unterschiedliche Rottöne, beschrieben als unterschiedliche Schwerpunktwellenlängen, sowie unterschiedliche rote Signale. Teil der Studie sind rote Reflektoren von Lkw und Fahrrädern bei Nacht und rote Rückleuchten bei Tag und Nacht. VERRIEST (VERRIEST et al. 1980) legt den Schwerpunkt unter anderem auf die Erkennung von Verkehrszeichen am Tage, Schlussleuchten von Fahrrädern, Mofas und Kraftfahrzeugen sowie verschiedene Reflektoren bei Nacht, Bremsleuchten von Motorrädern und Kraftfahrzeugen bei bedecktem Tageslichthimmel sowie Ampeln am Tage.

Sowohl bei COLE (2002) als auch bei VERRIEST (VERRIEST et al. 1980) sind keine Angaben hinsichtlich des individuellen Sehvermögens zu finden, weswegen davon ausgegangen werden kann, dass vor Versuchsbeginn kein Sehtest mit entsprechendem Ausschlussverfahren erfolgt ist. Es kann angenommen werden, dass sich die Streubreiten der Erkennbarkeitsentfernung reduzieren, wenn alle am Versuch teilnehmenden Personen innerhalb der Gruppen „normalsichtig“, „protanop“ und „protanomale“ über ein vergleichbares Sehvermögen unabhängig von der vorhandenen Farbfehlsichtigkeit verfügen.

Die Studien enthalten weder konkrete Informationen zu den Umgebungshelligkeiten (d. h. mittlere Umgebungsleuchtdichten) während des Versuchs, noch Angaben zur spektralen Verteilung und Lichtstärke der verwendeten Lichtquellen. Es werden lediglich die Schwerpunktwellenlängen der untersuchten Farben genannt. Die Versuchsbedingungen werden allgemein als Situationen am Tag bezeichnet und mit einer nicht lokalisierten Umgebungsleuchtdichte von etwa 1250 cd/m² angegeben.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass in den Studien von COLE (2002) und VERRIEST (VERRIEST et al. 1980) das Sehvermögen der Versuchsteilnehmer und vor allem die lichttechnischen Rahmenbedingungen nicht ausreichend nachvollziehbar beschrieben sind, was einen direkten Vergleich der Studien deutlich erschwert.

Die Ergebnisse dieser Studien zeigen eine Überlagerung der Streubreiten der gemessenen Erkennbarkeitsentfernungen für die beiden Personengruppen, d. h. dass sich die Erkennbarkeitsentfernungen einiger als normalsichtig eingestuften Personen mit denen protanoper und protanomaler Personen überdecken.

Trotz der Überlagerung kommt COLE in seinen Recherchen (COLE 2002) zu dem Schluss, dass die gestörte Farbwahrnehmung protanoper und protanomaler Personen zu einer signifikant schlechteren Wahrnehmung von roten Signalen im Straßenverkehr führt. Daraus leitet er ein erhöhtes Unfallrisiko insbesondere für Auffahrunfälle ab und spricht die Empfehlung aus, dass protanope und protanomale Personen keine kommerzielle Fahrerlaubnis besitzen sollten. Ein Nachweis dafür, dass protanope oder protanomale Personen überdurchschnittlich häufig in Auffahrunfälle involviert sind, kann COLE nicht erbringen. Die Studie umfasst keine Überprüfung dieser Annahme anhand von Unfallstatistiken (COLE 2002).

Dementgegen steht eine von MARRÉ (NEUBAUER 1979) durchgeführte Analyse von mehr als 2000 Unfällen. Sie kommt zu dem Schluss, dass Personen mit einer Rotsinnstörung signifikant mehr Unfälle durch Auffahren und das Übersehen roter Stopp- und Warnlichter zeigen. MARRÉ führt dies auf die verspätete Wahrnehmung roter Lichter zurück. Die Analyse zeigt außerdem, dass Personen mit einer Rotsinnstörung insgesamt betrachtet nicht mehr Unfälle als Farbtüchtige oder Personen mit einer Grünsinnsinnstörung verursachen. Allerdings zeigen protanope und protanomale Personen ein signifikant erhöhtes Unfallgeschehen in den Wintermonaten und bei Nässe und Glätte. Anhand der Analyse kommt MARRÉ zu dem Schluss, dass die Teilnahme protanoper oder protanomaler Personen im Straßenverkehr generell nicht untersagt werden sollte. Handelt es sich um rotsinngestörte Personen, die Personen befördern, sollten nach MARRÉ höhere Anforderungen gelten. MARRÉ spricht sich in diesem Fall, unabhängig vom Grad der Rotsinnstörung, für einen Ausschluss dieser Personen aus.

VERRIEST (VERRIEST et al. 1980) schließt sich der Meinung von COLE bezüglich des Verbotes der kommerziellen Fahrerlaubnis für protanope und protanomale Personen nicht an, weist jedoch explizit darauf hin, dass sich Kraftfahrer mit einer Farbsinnstörung über ihr Handicap bewusst sein sollten. Des Weiteren regt er an, rote Ampelsignale größer

zu gestalten. In Bezug auf Schluss- und Bremsleuchte von Fahrzeugen empfiehlt er, ausreichende Helligkeiten und keine ausschließlich rot transmittierenden Filter zu verwenden.

Bedenkt man, dass die ermittelten mittleren Erkennbarkeitsentfernungen in allen genannten Studien im Bereich von bis zu mehreren hundert Metern liegen und somit deutlich größer als sicherheitsrelevante Anhaltewege im Straßenverkehr sind, ist es ersichtlich, dass der getroffene Rückschluss zwischen Protanopie beziehungsweise Protanomalie und Gefahrenpotenzial infrage zu stellen ist. Vielmehr ist zu untersuchen, ob die Bremsleuchten im sicherheitsrelevanten Bereich bei Auffahrsituationen hell genug sind, damit auch protanope und protanomale Personen diese sicher erkennen können.

In der Laborstudie von ATCHISON (ATCHISON et al. 2003) werden zur Bewertung des Einflusses einer Farbsinnstörung die Reaktionszeit und Verwechslungshäufigkeit in Bezug auf Ampelfarben genutzt. Als Untersuchungsobjekt wird ein winkeltreuer Nachbau eines Ampelsignals mit einer Lichtstärke von 0,32 cd für Rot und Grün bzw. 0,96 cd für Gelb verwendet. Die Probandenaufgabe besteht darin, die gezeigte Ampelfarbe zu benennen. Anhand der Angaben von ATCHISON (ATCHISON et al. 2003) kann angenommen werden, dass Umgebungsleuchtdichten von etwa 300 cd/m² vorlagen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Protanope im Vergleich zu Normalsichtigen für rote Ampelsignale mit einer Lichtstärke von 0,32 cd eine längere Reaktionszeit und eine um etwa 8 % erhöhte Verwechslungswahrscheinlichkeit haben.

Die Einschränkungen durch die Farbsehstörung werden gemäß LACHENMAYR (LACHENMAYR 2003) vermutlich durch das angepasste Situationsbewusstsein ausgeglichen. Möglicherweise liegt hier der Grund für die Gegensätzlichkeit der in der Literatur auffindbaren Ergebnisse aus statischen wissenschaftlichen Studien und der realen Unfallstatistik nach MARRÉ (NEUBAUER 1979).

Auf Basis der genannten Studien sehen LACHENMAYR (LACHENMAYR 2003), wie auch die DOG (LACHENMAYR & FREIßLER 2019), trotz der genannten Widersprüche, Personen mit Protanopie bzw. Protanomalie mit einem Anomaliequotienten kleiner als 0,5 als Gefährdungspotenzial im Straßenverkehr und sprechen sich gegen eine Fahreignung für die Fahrzeugklassen D, D1, DE, D1E sowie FzF aus.

1.4 Gesetzliche und technologische Rahmenbedingungen für Schluss- und Bremsleuchten

Die Regelung 7 der United Nations Economic Commission for Europe, kurz UNECE, legt die gesetzlichen Anforderungen für Schluss- und Bremsleuchten fest. Gemäß der geltenden aktuellen UN-Regelung Nr. 7 sind für Schlussleuchten Lichtstärken zwischen 4 cd und 17 cd in Hauptabstrahlrichtung vorgeschrieben sowie für die Bremsleuchten Lichtstärken von mindestens 60 cd. Bis 2010 war gemäß UN-Regelung Nr. 7 für die Schlussleuchten noch ein Lichtstärkebereich zwischen 4 cd und 12 cd gesetzlich verankert. Einen gesetzlich vorgeschriebenen Mindestkontrast zwischen Bremsleuchte und Schlussleuchte, der besagt, dass eine Bremsleuchte mindestens um einen bestimmten Faktor heller sein muss als eine Schlussleuchte, gibt es derzeit nicht.

Seit 1996 ist zum Anzeigen des Bremsvorgangs die hochgesetzte Bremsleuchte verpflichtend. Durch den Einsatz der hochgesetzte Bremsleuchte wird es anderen Verkehrsteilnehmern ermöglicht, auch bei verdeckten Schlussleuchten der Vorausfahrenden einen eingeleiteten Bremsvorgang rechtzeitig erkennen zu können.

Sowohl für die hochgesetzte Bremsleuchte als auch für die Schluss- und Bremsleuchten ist gemäß UN-Regelung Nr. 7 die Farbe Rot in einem dort definierten Farbbereich im CIE 1931 Farbraum festgelegt. Dieser Farbbort wird mit unterschiedlichen Lichtquellen realisiert. Es werden vornehmlich Glühlampen

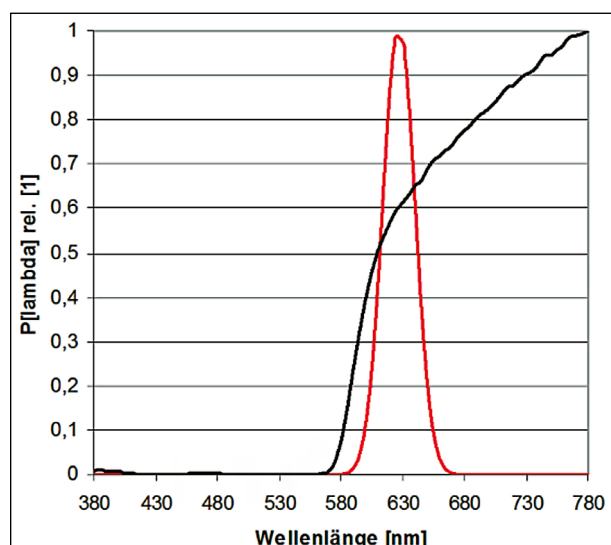


Bild 1-3 Beispielhafte Spektren für eine LED-basierte (rot) und eine glühlampenbasierte Bremsleuchte (schwarz)

oder LED-Quellen eingesetzt. Bei Glühlampen werden zur Erreichung des gesetzlich vorgeschriebenen Farbortes Farbfilter eingesetzt. Die sich typischerweise ergebenden relativen spektralen Verteilungen von LED und gefilterten Glühlampen sind in Bild 1-3 dargestellt.

2 Forschungshypothesen

Anhand der beschriebenen Literatur ist unklar, ob die Teilnahme von protanopen und protanomalen Personen im Straßenverkehr ein erhöhtes Sicherheitsrisiko darstellt. Das Sicherheitsrisiko ergibt sich für protanope und protanomale Personen aufgrund des fehlenden Rotsinnvermögens. Mutmaßlich steigt dadurch die Wahrscheinlichkeit, rote Bremsleuchten nicht rechtzeitig oder gar nicht erkennen zu können. Daher soll innerhalb dieser Studie der Einfluss einer Protanopie auf die Erkennbarkeit des Bremssignals mittels einer Probandenstudie untersucht werden.

Unabhängig davon, ob ein Defizit in der Wahrnehmung von Rot vorliegt oder nicht, muss die Bremsleuchte des Vorausfahrenden hell genug sein, damit sie erkannt werden kann. Da eine protanope und protanomale Person, wie in Bild 1-2 gezeigt, die Farbe Rot anders wahrnimmt, ist zu untersuchen, ob die Empfindlichkeit dennoch ausreicht, das Bremssignal sicher erkennen zu können.

Um das Sicherheitsrisiko, bedingt durch eine vorliegende Protanopie beziehungsweise Protanomalie, für Auffahrunfälle bewerten zu können, ist für realitätsnahe Bedingungen zu prüfen, inwiefern sich die Kontrastwahrnehmung von normalsichtigen und protanopen beziehungsweise protanomalen Personen unterscheidet. Dabei sind die Kontrastschwellen, ab der die Bremsleuchte im Vergleich zur Schlussleuchte sicher erkannt werden kann, zu bestimmen und zwischen den Personengruppen zu vergleichen.

Die Nullhypothese mit dem Hauptziel lautet:

$H_{0,1}$: Es gibt in Bezug auf die ermittelten Kontrastschwellen des Bremssignals von Bremsleuchten keinen Unterschied zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Sehvermögen.

Der Unterschied der Kontrastschwelle zwischen protanopen beziehungsweise protanomalen und normalsichtigen Personen ist maßgeblich beein-

flusst durch die relative spektrale Verteilung der Lichtquelle. Aufgrund der unterschiedlichen spektralen Gewichtung zwischen normalsichtigen und protanopen beziehungsweise protanomalen Personen ist die Proportionalität der effektiven Helligkeitsempfindung für rote Bremssignale zwischen diesen beiden Personengruppen fraglich. Es lässt sich folglich nicht ausschließen, dass die für das Bremssignal verwendete Lichtquellentechnologie einen Einfluss auf die Erkennbarkeit des Bremssignals hat. Auch dieser Aspekt wird im Rahmen der Studie untersucht.

Daher wird anhand dieses Nebenziels eine weitere Nullhypothese wie folgt definiert:

$H_{0,2}$: Die verwendeten Technologien von Glühlampe und LED zeigen keinen Unterschied in Bezug auf die Kontrastschwellen zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

Um Rückschlüsse zum Einfluss einer Protanopie auf die Reaktionszeit auf das Bremssignal ziehen zu können, wird zudem noch die Reaktionszeit innerhalb der Studie aufgenommen und bewertet. Daraus lässt sich eine dritte Nullhypothese ableiten, die wie folgt formuliert ist:

$H_{0,3}$: Bei separater Betrachtung von Glühlampe und LED gibt es jeweils keinen Unterschied der Reaktionszeit der ermittelten Kontraste zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

3 Versuchskonzept

3.1 Allgemeines Versuchskonzept

Ausgehend von den formulierten Nullhypothesen wurde eine Probandenstudie geplant. Diese Studie ist eine Vergleichsstudie zwischen einer protanopen und einer normalsichtigen Probandengruppe.

Für die Durchführung der Studie ist eine innerstädtische Hinterherfahrt mit 15 m Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nachgebildet, was einer potenziell kritischen und zugleich realitätsnahen Bremssituation bei 50 km/h entspricht. Dabei sind die freien Randparameter unter Berücksichtigung gesetzlicher und realistischer Bedingungen gewählt. Zur Sicherstellung der Eindeutigkeit der Erkenntnisse sind alle Parameter entsprechend eines

Worst-Case-Szenarios möglichst kritisch hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Sicherheitsrisiko ausgelegt.

Die Studie ist als Laborstudie geplant, sodass potenzielle Störeinflüsse reduziert, die Umgebungsbedingungen kontrolliert und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bestmöglich gewährleistet wird.

Aus den Hypothesen ergibt sich ein Within-Subject-Design mit Messwiederholung. Dies bedeutet, dass alle Versuchsbedingungen von jedem Probanden durchlaufen werden. Dieses Vorgehen ist sowohl ökonomisch als auch methodisch sinnvoll, da sich somit interpersonelle Unterschiede auf alle Bedingungen gleichermaßen auswirken.

Anhand der formulierten Nullhypothesen ergeben sich als abhängige, also zu messende Variablen die Kontrastschwelle und die Reaktionszeit. Die unabhängige, also zu manipulierende Variable ist der Helligkeitskontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchte.

Zur Schwellenbestimmung wird die Konstanzmethode nach FECHNER verwendet. Bei der Konstanzmethode werden die Reize, respektive die verschiedenen Helligkeiten, den Probanden in randomisierter Reihenfolge mehrfach dargeboten. Die Reizstärken sind dabei so zu wählen, dass sie um die vermutete Schwelle variieren und auch eindeutig sichtbare sowie nicht sichtbare Reize präsentiert werden. Wird der Reiz durch die Versuchsperson wahrgenommen, muss diese entsprechend der Probandenaufgabe reagieren. Vorteil der Konstanzmethode, im Gegensatz zu den beiden anderen Methoden nach FECHNER, ist die Tatsache, dass mit dieser beliebige Schwellen bestimmt werden können. Des Weiteren können bei dieser Methode zur Identifikation von bestimmten Reaktionsneigungen sogenannte „catch trials“ in den Versuch eingestreut werden, bei denen gar kein Reiz dargeboten wird. Die Häufigkeit, mit der bei solchen Durchgängen die Wahrnehmung eines Reizes behauptet wird, kann zur Korrektur der Reaktionsneigungen verwendet werden. Neben diesem Vorteil zeichnet sich die Konstanzmethode auch durch hohe Präzision aus. Nachteilig ist allerdings der damit verbundene hohe Aufwand. Für weitere Informationen zu dieser und den anderen Methoden sei auf zwei Literaturstellen (FECHNER 1860; BECKER-CARUS & WENDT 2017) verwiesen.

3.2 Anforderungen an das Probandenkollektiv

Unter dem oben beschriebenen Konzept des Worst-Case-Szenarios ist diese Studie auf zwei eindeutige Probandengruppen beschränkt. Es sind nur protanope und normalsichtige Probanden in die Studie eingeschlossen, um eine eindeutige Aussage hinsichtlich der Nullhypothesen ableiten zu können.

Protanomale Probanden sind in der Auswertung folglich ausgeschlossen, da deren Farbsehleistung zum Erkennen der Bremsleuchten zwischen denen von Protanopen und Normalsichtigen liegt. Außerdem kann eine Protanomalie in unterschiedlich starken Ausprägungen auftreten, die wiederum einen unbekanntem Einfluss auf die Erkennbarkeit von Bremsleuchten haben können.

Um die Validität der Ergebnisse zu verbessern und die Vergleichbarkeit innerhalb des Probandenkollektivs zu gewährleisten, sind bis auf die zu untersuchende Farbfehlsichtigkeit nur augengesunde Probanden zur Studie zugelassen. Probanden mit schwerwiegenden Augen-, Sehbahnerkrankungen, Augenverletzungen oder anderen Fehlsichtigkeiten sind ausgeschlossen.

3.3 Anforderungen an die Versuchsumgebung

3.3.1 Nachzustellende Situation

Wie bereits in Kapitel 1.3 beschrieben, werden Auffahrunfälle, die auf ein Übersehen der Bremsleuchten zurückzuführen sind, für protanope Personen als besonders sicherheitskritisch eingestuft. Daher ist im Rahmen dieser Probandenstudie eine entsprechende Szene möglichst realistisch nachgestellt.

In der Straßenverkehrsordnung (StVO) ist in § 4 der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug geregelt. Der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug muss in der Regel so groß sein, dass auch hinter diesem gehalten werden kann, wenn plötzlich gebremst wird.

Als anerkannte Faustformel der Rechtsprechung gilt, dass der Abstand zum Vordermann innerorts mindestens so groß sein muss, dass innerhalb von einer Sekunde sicher gehalten wird. Hieraus ergibt sich ein einzuhaltender Sicherheitsabstand bei

50 km/h von 15 m. Aufgrund der Häufigkeit von Auf-
fahrnfällen innerorts wird diese Szene als exemp-
larisch kritischste betrachtet. Daher ist der Abstand
zwischen Heckleuchte und Proband auf 15 m fest-
gelegt worden.

Da es sich um eine Laborstudie handelt, wird auf
eine möglichst realistische Umsetzung der Szene
geachtet. Die untersuchten Heckleuchten sind da-
her in einem maßstabsgetreuen modellhaften
Nachbau eines Fahrzeughecks integriert.

3.3.2 Umfeldbedingungen

Die Erkennbarkeit einer Bremsleuchte hängt vom
wahrgenommenen Kontrast zwischen der Leucht-
dichte der Bremsleuchte und der des Umfeldes ab.
Aus diesem Grund ist der Einfluss der Helligkeit,
das heißt der Umfeldleuchtdichte, sowohl für Tag
als auch für Nacht berücksichtigt. Für jede Situation
sind typische Umfeldleuchtdichten festgelegt.

Für die Situation bei Tag ist die Umgebungsleucht-
dichte so gewählt, dass der Proband photopisch,
das heißt hell, adaptiert ist. Das Adaptationsniveau
für die Tagsituation ist in Anlehnung an die Anfor-
derungen an einen Büroarbeitsplatz gemäß DIN EN
12464-1 ausgelegt, in der eine minimale Beleuch-
tungsstärke von 500 lx auf der Arbeitsfläche vorge-
schrieben ist. Die Beleuchtungsstärke von 500 lx ist
als mittlere vertikale Beleuchtungsstärke auf dem
Fahrzeugmodell definiert, was einer Leuchtdichte
von circa 150 cd/m² auf einer mattweißen Fläche
entspricht.

Die Umgebungsleuchtdichte bei Nacht befindet sich
im Mesopischen, das heißt im Bereich des Dämme-
rungssehens. Sie ist im Falle einer Hinterherfahrt
maßgeblich durch die Fahrbahnausleuchtung des
eigenen Abblendlichtes und der Schlussleuchte des
Vorausfahrenden bestimmt. Die resultierende Um-
feldleuchtdichte liegt für die Nachtsituation im Be-
reich von 1 cd/m².

Die Szene und deren Umgebung muss zudem mög-
lichst frei von Glanzpunkten und Reflexionen sein,
damit keine lokalen Kontrastüberhöhungen entste-
hen, die die Ergebnisse verfälschen können. Die
Oberfläche des modellhaften Fahrzeughecks ist da-
her matt gewählt, die Laborszene mit Vorhängen
und zusätzlichen Bodenbelag versehen. Somit wer-
den mögliche gerichtete Reflexionen vermieden
und der Versuchsaufbau ist gleichzeitig hinsichtlich
Positionseinflüssen unempfindlicher gestaltet.

3.4 Anforderung an die Heckleuchten

Für eine realitätsnahe Nachbildung der Bremssitua-
tionen werden reale Heckleuchten verwendet. Da
innerhalb der Studie der Vergleich der Kontrast-
schwellen zwischen protanopen und normalsichti-
gen Probanden für LED- und glühlampenbasierten
Bremsleuchten untersucht wird, muss eine visuelle
Vergleichbarkeit der jeweiligen Schluss- und Brems-
leuchten unabhängig von der verwendeten Licht-
quelle gewährleistet sein. Daher sind die Heck-
leuchten für die Untersuchung so ausgewählt, dass
diese ein möglichst ähnliches Erscheinungsbild der
Schluss-/Bremsleuchtenfunktionen in beiden Tech-
nologien aufweisen. Dies hat zum Ziel, unterschied-
liche Erwartungshaltungen des Probanden auszu-
schließen. Somit ist sichergestellt, dass ein poten-
zieller Unterschied rein auf die relative spektrale Zu-
sammensetzung der Lichtquelle zurückgeführt wer-
den kann.

Da innerhalb der Probandenstudie eine Kontrast-
schwelle bestimmt wird, müssen unterschiedliche
Kontraststufen der Bremsleuchten präsentiert sein.
Technisch gesehen muss daher die Bremsleuchte
beider Varianten dimmbar sein. Dabei dürfen keine
störenden Inhomogenitäten, also sichtbare helle
und/oder dunkle Bereiche, innerhalb der leuchten-
den Fläche auftreten. Ebenso ist sichtbares Flim-
mern zu vermeiden. Darüber hinaus ist sicherzu-
stellen, dass sich die Farbe der Bremsleuchten
beim Dimmen nicht sichtbar verändert.

In Bezug auf die wahrnehmungspsychologischen
Anforderungen ist die Art des Kontrastes beim Um-
schalten von Schlussleuchten- auf Bremsleuchten-
niveau zu beachten. Generell lassen sich in Bezug
auf die regelungskonforme Auslegung der Schluss-
und Bremsleuchten zwei Arten von Helligkeitskon-
trasten unterscheiden, die im Folgenden kurz be-
schrieben sind.

Ein Helligkeitskontrast gegenüber einer Referenz-
fläche, wie in Bild 3-1 oben gezeigt, liegt dann vor,
wenn zusätzlich zu einer leuchtenden Fläche im
Laufe der Zeit eine weitere leuchtende Fläche zu-
geschaltet bzw. ein Teil der leuchtenden Fläche ab-
geschaltet wird. Für den Beobachter ändert sich so-
mit die Größe der leuchtenden Fläche. Da die
menschliche Wahrnehmung auf der Wahrnehmung
von lokalen Kontrasten beruht, ist ein sichtbarer
Kontrast zu jedem Zeitpunkt vorhanden. Auch bei
kleinen Helligkeitsunterschieden zwischen den Flä-

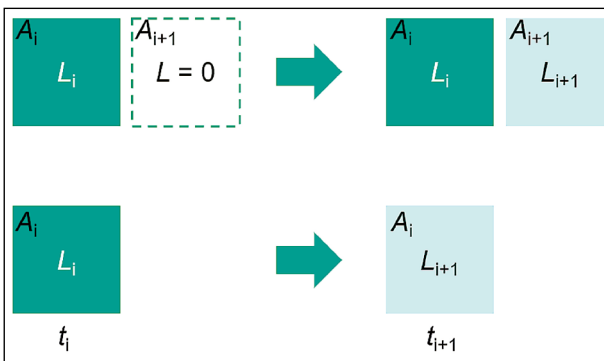


Bild 3-1 Qualitative Darstellung der beiden Helligkeitskontraste, oben: Helligkeitskontrast gegenüber einer Referenzfläche, unten: Helligkeitskontrast innerhalb der Fläche

chen ist dieser Kontrast, sofern die Fläche ausreichend groß ist, gut sichtbar.

Beim Helligkeitskontrast innerhalb der Fläche ändert sich, wie in Bild 3-1 unten zu sehen, ausschließlich die Helligkeit einer Fläche über die Zeit. Es wird keine zusätzliche Fläche geschaltet. Der wahrgenommene Kontrast basiert auf dem zeitlichen Helligkeitsunterschied innerhalb der Fläche. Im Vergleich zum Helligkeitskontrast gegenüber einer Referenzfläche ist der Helligkeitskontrast innerhalb der Fläche nur mit der zeitlichen Korrelation und nicht zu jedem Zeitpunkt erkennbar, sodass er schwerer wahrnehmbar ist.

Beide Arten von Helligkeitskontrasten werden in der Praxis zur Anzeige eines Bremsvorgangs genutzt. Welcher Kontrast verwendet wird, ist abhängig vom Design der Heckleuchte. Innerhalb einer Heckleuchte können auch Mischformen auftreten.

In Bezug auf die Probandenstudie ist das Worst-Case-Szenario hinsichtlich der Anforderung an die Heckleuchte gewählt. Somit ist ein Design mit dem schwieriger wahrnehmbaren Helligkeitskontrast innerhalb der Fläche ausgewählt.

Mit der Wahl des Helligkeitskontrastes innerhalb der Fläche ist die Verwendung der hochgesetzten Bremsleuchte im Rahmen dieser Probandenstudie ausgeschlossen, da die hochgesetzte Bremsleuchte einen Helligkeitskontrast gegenüber einer Referenzfläche erzeugt. Dies ist realitätsnah, da Stand heute auch Fahrzeuge, historisch oder fahrzeugklassenbedingt, ohne hochgesetzte Bremsleuchte am Straßenverkehr teilnehmen. Aus diesen Gründen wird der Versuch ohne hochgesetzte Bremsleuchte durchgeführt.

4 Versuchsaufbau

4.1 Versuchsumgebung

Für die Durchführung der Studie ist eine innerstädtische Hinterherfahrt mit 15 m Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nachgebildet, was einer potenziell kritischen Bremsituation bei 50 km/h entspricht. Die Probandenstudie wird in Räumlichkeiten der Hochschule Aalen durchgeführt. Der verwendete Kellerraum ist 20 m lang, 4 m breit und 3,80 m hoch und hat die geeignete Größe, um den geplanten Versuchsaufbau unterzubringen. Der Grundriss ist in Bild 4-1 dargestellt.

Zur Sicherstellung einheitlicher Umgebungsbedingungen sind die Fenster verdunkelt. Um weitere Störeinflüsse aufgrund von Reflexionen im Raum zu vermeiden, sind die Wände an kritischen Positionen mit schwarzem Bühnenmolton abgedeckt. Mithilfe von grauem Malervlies werden Spiegelungen des Bodens zwischen Probandenposition und Fahrzeugsilhouette verhindert. Neben der Verminderung der Spiegelung der Schluss- und Bremsleuchten auf dem Boden weist das Malervlies ein asphaltähnliches Reflexionsverhalten auf, was die Übertragbarkeit in die Realität begünstigt.

Der Proband sitzt in einem modellhaften Nachbau eines Auto-Cockpits mit Fahrersitz, Lenkrad und

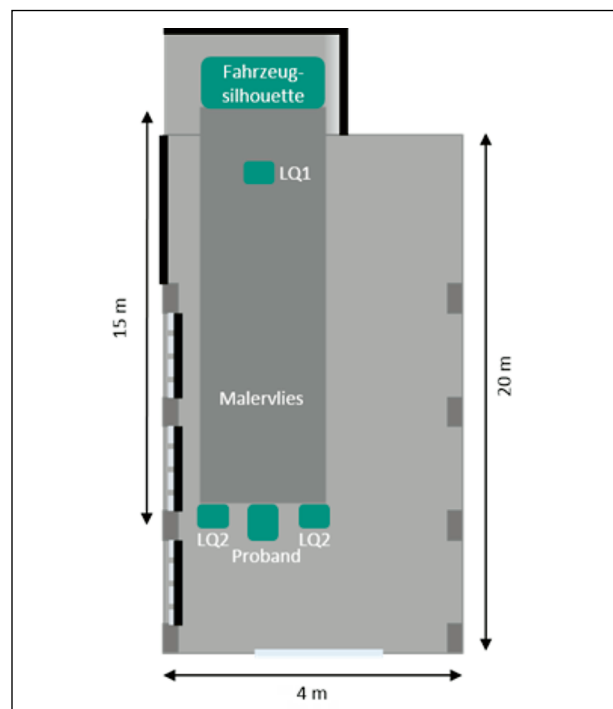


Bild 4-1 Grundriss Versuchsaufbau, LQ1- Lichtquelle zur Beleuchtung der Fahrzeugsilhouette, LQ2 - Lichtquellen zur Realisierung der Vorfeldbeleuchtung

Fußpedalen. Bei dem Cockpit handelt es sich um einen kommerziell erhältlichen Nachbau eines Fahrersitzes aus dem Gaming-Bereich. Das Abblendlicht des eigenen Fahrzeuges ist mithilfe von Bühnenscheinwerfern nachgebildet.

Zur Nachbildung des vorausfahrenden Fahrzeugs ist ein Modell eines Fahrzeughecks im Maßstab 1:1 aufgebaut. In dieses Fahrzeugmodell sind reale Heckleuchten integriert, sodass ein realitätsnaher Eindruck eines vorausfahrenden Fahrzeuges entsteht. Die Kontur des Modells ist der eines Pkws nachempfunden.

Die Heckleuchten in dem Modell sind so ausgerichtet, dass sich die Hauptabstrahlrichtung der Leuchte auf der Beobachtungsachse befindet.

Das Modell des Fahrzeughecks ist spektral und räumlich aseptiv, das heißt matt weiß, gestrichen. Durch diesen Anstrich wird der Kontrast zwischen Hintergrund und Schlussleuchte bei Tage möglichst gering gehalten, um der Worst-Case-Auslegung ge-

recht zu werden. Durch die Wahl der mattweißen Farbe Brillux ELF 954 ist der Aufbau zudem unempfindlich gegen Variation der Blickrichtung und weist keine Glanzreflexe auf.

Der Versuchsaufbau aus Probandensicht für die Tag-Situation, das heißt unter photopischen Bedingungen, ist in Bild 4-2 zu sehen. Die Fahrzeugsilhouette ist gemäß der Anforderung aus Kapitel 3.3.2 so beleuchtet, dass auf dieser eine mittlere Beleuchtungsstärke von 500 lx vorliegt.

Die Beleuchtung auf der mattweißen Oberfläche des Fahrzeugmodells ergibt eine mittlere Leuchtdichte von circa 150 cd/m², wie aus dem Leuchtdichtebild in Bild 4-3 zu entnehmen ist.

In Bild 4-4 ist der Versuchsaufbau aus Probandensicht für die Nacht-Situation, das heißt für mesopische Bedingungen, aus Probandensicht dargestellt. Die Leuchtdichte auf der Fahrzeugsilhouette beträgt, wie in Bild 4-5 zu sehen und in Kapitel 3.3.2 festgelegt, im Mittel 0,1 cd/m².



Bild 4-2 Nachgestellte Tag-Situation aus Probandensicht für die photopische Bedingung mit eingeschalteter Bremsleuchte



Bild 4-4 Nachgestellte Nacht-Situation aus Probandensicht für die mesopische Bedingung mit eingeschalteter Bremsleuchte



Bild 4-3 Leuchtdichteverteilung für die Tag-Situation mit eingeschalteter Bremsleuchte



Bild 4-5 Leuchtdichteverteilung für die Nacht-Situation mit eingeschalteter Bremsleuchte

4.2 Heckleuchten

Eine durchgeführte Recherche ergab, dass nur wenige Heckleuchten die in Kapitel 3.4 geforderten Bedingungen erfüllen. Nicht alle Heckleuchten werden gleichzeitig in reinen Glühlampen- und LED-Version angeboten. Heckleuchten, die in beiden Versionen angeboten werden, unterscheiden sich häufig aus designtechnischen Gründen gewollt in ihrem visuellen Erscheinungsbild. Zudem vereinen viele Heckleuchten aus Kostengründen häufig beide Lichtquellentechnologien. So wird die Schlussleuchte überwiegend in LED und die Bremsleuchte mithilfe einer Glühlampe realisiert. Solche Mischformen sind für diese Studie ungeeignet.

Die gestellten Anforderungen bezüglich eines visuell ähnlichen Erscheinungsbildes in beiden Lichtquellentechnologien sind von der Heckleuchte des Seat Leon III erfüllt. Daher bilden diese Heckleuchten die Basis für die Studie.

Das Signalbild der Glühlampenversion gemäß Serienbetrieb zeigt Bild 4-6 inklusive hochgesetzter Bremsleuchte. Die LED-Version ist in Bild 4-7 zu sehen.

Anhand von Bild 4-6 und Bild 4-7 ist ersichtlich, dass die Signalbilder beider Heckleuchten visuell ähnlich sind, sie bei genauer Betrachtung dennoch deutliche Unterschiede aufweisen.

Die Heckleuchten des Seat Leon III bestehen sowohl in der Glühlampen- als auch in der LED-Version aus zwei separaten Segmenten. Diese werden, entsprechend ihres Anbauortes im realen Fahrzeug, im Weiteren als Kotflügelsegment (I) und Heckklappensegment (II) bezeichnet, wie Bild 4-8 und Bild 4-9 beschrieben.

Aus gesetzlicher Sicht muss alleine das Kotflügelsegment die Anforderungen an Schluss- und Bremsleuchten erfüllen. Dies ist notwendig, da bei geöffnetem Kofferraum das Heckklappensegment nicht sichtbar ist.

Die Schlussleuchtsignatur der LED-Version ist im Vergleich zur Glühlampenversion deutlich schmaler, was auch aus einer Entfernung von 15 m deutlich sichtbar sein würde. Diese Unterschiede können zu einer eindeutigen visuellen Unterscheidbarkeit der Technologien und folglich zu einer, wie in Kapitel 3.4 beschriebenen, geänderten Erwartungshaltung der Probanden führen.



Bild 4-6 Signalbild der Seat Leon Heckleuchte mit aktivierter Bremsleuchte in der Glühlampenversion



Bild 4-7 Signalbild der Seat Leon Heckleuchte mit aktivierter Bremsleuchte in der LED-Version

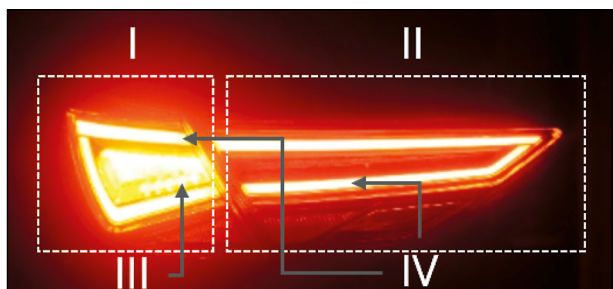


Bild 4-8 Segmente der Seat Leon III Heckleuchte in LED-Version mit eingeschalteter Bremsleuchte; (I) Kotflügelsegment, (II) Heckklappensegment, (III) Innensegment, (IV) Signatur

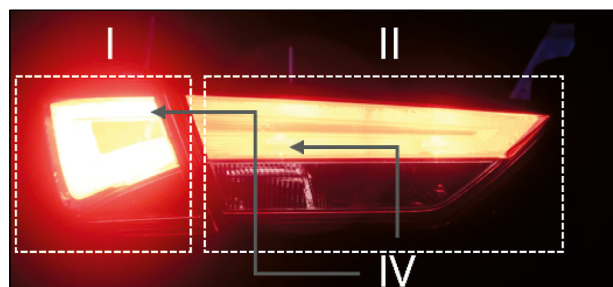


Bild 4-9 Segmente des Moduls in Glühlampenausführung mit eingeschalteter Bremsleuchte; (I) Kotflügelsegment, (II) Heckklappensegment, (IV) Signatur

In Kapitel 3.4 ist das Worst-Case-Szenario zur Umsetzung der Bremsleuchte festgelegt worden. Ausgehend von der Schlussleuchte darf zur Signalisierung eines Bremsvorgangs keine weitere Fläche hinzugeschaltet werden.

Da das Heckklappensegment nur die Schlussleuchtenfunktion beinhaltet, wird dieses in dieser Studie nicht genutzt, da es sonst in Bremsituation zu einem Flächenkontrast zwischen Kotflügel- und Heckklappensegment käme. Für die weiteren Ausführun-



Bild 4-10 Schlussleuchte der Glühlampen-Version ausschließlich im Kotflügelsegment



Bild 4-11 Schlussleuchte der LED-Version ausschließlich im Kotflügelsegment

gen wird nur das Kotflügelsegment betrachtet, wie in Bild 4-10 und Bild 4-11 zu sehen.

In der Glühlampenversion des Seat Leon III ist die Bremsleuchte serienmäßig als reiner Helligkeitskontrast innerhalb einer Fläche ausgeführt. Die Schlussleuchte ist innerhalb der kompletten Fläche des Kotflügelsegments umgesetzt und wird in der Bremssituation heller geschaltet. Die Bremsleuchte entspricht folglich einer helleren Schlussleuchte.

Im Gegensatz dazu besteht das Kotflügelsegment der LED-Version aus zwei Teilflächen, der Signatur und dem Innensegment, wie in Bild 4-8 dargestellt. Die Signatur stellt serienmäßig zusammen mit dem Heckklappensegment die Schlussleuchte dar. Zur Umsetzung der Bremsleuchte wird das Innensegment (Bild 4-8 (III)), somit eine weitere Fläche, hinzugeschaltet. Diese Kombination von Schluss- und Bremsleuchte stellt folglich einen Helligkeitskontrast gegenüber einer Referenzfläche dar und entspricht nicht dem geforderten Worst-Case-Szenario.

Aus methodischen Gründen ist die LED-Variante daher so angepasst, dass die Signatur und das In-

nensegment synchron angesteuert werden. Damit werden beiden Teilflächen effektiv zu einer Fläche verbunden. Somit kann sichergestellt werden, dass die Bremsleuchte über einen Helligkeitskontrast innerhalb einer Fläche dargestellt wird. Folglich ergibt sich das aus Bild 4-10 und Bild 4-11 angepasste Erscheinungsbild der Seat Leon III Heckleuchten.

Der Betrieb der Heckleuchten erfolgt mit einer Spannungsquelle, bei der für Pkw typischen Prüfspannung gemäß UN-Regelung Nr. 7 (United Nations Economic Commission for Europe 2012) von 13,5 V. Die für die Studie notwendige Realisierung gezielter Helligkeitsniveaus erfolgt über eine Dimmung der Spannungsquelle mithilfe einer externen Elektronik. Die Dimmung erfolgt auf Basis einer Pulsweitenmodulation, kurz PWM. Diese Art der Dimmung ist zur Sicherstellung eines konstanten Farbortes und einer linearen Helligkeitsdimmung der LED-Quellen notwendig. Vorteilhaft ist, dass diese Methode ebenso zur Dimmung von Glühlampen verwendet werden kann.

Zur Vermeidung des für PWM typischen Flimmerns ist die Modulationsfrequenz ausreichend hoch zu wählen. Im Rahmen dieser Studie wurde die Modulationsfrequenz zu 400 Hz gewählt, was einer Periodendauer von 2,5 ms entspricht.

Die optische Ansprechzeit von LED-Quellen liegt typischerweise im Bereich weniger Nanosekunden und liegt somit deutlich unter der Periodendauer der PWM-Dimmung. Die optische Ansprechzeit einer Glühlampe wird beeinflusst von der Wärmekapazität der Wendel und liegt im Bereich einiger zehn Millisekunden. Sie ist zudem abhängig vom Aussteuerungslevel der Glühlampe.

Die effektive optische Ansprechzeit der Heckleuchten wird im Rahmen der Studie mithilfe eines hinreichend schnellen Photometers bestimmt. Für den auftretenden Extremfall von Schlussleuchteniveau auf maximales Bremsleuchteniveau wird die effektiv optische Ansprechzeit der Glühlampen- und LED-Version gemessen. Die effektive optische Ansprechzeit der LED-Version liegt im Bereich von 2 μ s und die der Glühlampenversion im Bereich von maximal 50 ms.

5 Untersuchungsmethode

5.1 Ophthalmologisch-optische Untersuchung der Probanden

Alle Probanden werden einer ophthalmologisch-optischen Untersuchung unterzogen, in der die anamnestischen Daten erhoben werden. Des Weiteren sind die Probanden gebeten, Angaben zu ihrer aktuellen Fahrtätigkeit und eine Selbsteinstufung abzugeben. In der Selbsteinstufung wird unter anderem das „allgemeine Sehvermögen“, die „Farbwahrnehmung“ sowie Angaben zur „Fahrtauglichkeit“ abgefragt.

Alle Probanden werden ophthalmologisch-optisch im Sinne einer kompletten ophthalmologischen Untersuchung zur Überprüfung der Fahreignung gemäß FeV/DOG-Empfehlungen untersucht. Dies ist notwendig, um einerseits die vorliegende Protanopie nachzuweisen und um andererseits auch andere Krankheiten auszuschließen. Dies führt zu einer Verbesserung der Validität der Ergebnisse, da die Vergleichbarkeit innerhalb des Probandenkollektivs gewährleistet werden kann.

Hierzu werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- automatische Refraktionsbestimmung mit einem Autorefraktometer/Keratometer HRK-7000 der Firma HUVITZ Co., Ltd.,
- subjektiver binokularer Refraktionsabgleich,
- Fern-Sehschärfe mithilfe der Präsentation von Landolt-Ringen im Leuchtkasten der Firma VISUS GmbH,
- Stereopsis über den LANG I-Stereo-Nahtest der LANG-STEREOTEST AG,
- Ermittlung des Führungsauges mittels Visiertest der Firma ESSILOR GmbH,
- Augenstellung mittels Hornhaut-Reflexbildchen sowie einseitiger und alternierender Abdecktest in Ferne und Nähe,
- Augenbeweglichkeit mittels Führungsbewegungen und Sakkaden-Untersuchung,
- efferenter und afferenter Pupillenstatus,
- vordere Augenabschnitte mittels BQ 900-Spaltlampe der Firma HAAG-STREIT,
- Augenhintergrund einschließlich Untersuchung des Fixationsverhaltens über die direkte Oph-

thalmoskopie mit dem Beta 2000 Ophthalmoskopie und indirekte Ophthalmoskopie mit dem binokularen Kopfhthalmoskop Omega 2000 jeweils der Firma HEINE Optotechnik GmbH und der 20 dpt Lupe der Firma VOLK Optical Inc.,

- Farbsehvermögens mit dem HMC Anomaloskop der Firma OCULUS,
- binokulare Untersuchung von Dämmerungssehen und Blendungsempfindlichkeit mit dem Optovist Gerät der Firma Vistec AG,
- semi-automatisierte kinetische Perimetrie (SKP) entlang des horizontalen Meridians einschließlich Reaktionszeitkorrektur mit verschiedenen Messmarken

Die Einteilung der Probanden erfolgt auf Basis der Untersuchungsergebnisse des Farbsehvermögens mittels HMC-Anomaloskop zur Bestimmung des Anomaliequotienten.

Der Anomaliequotient ist ein Zahlenwert, der das Verhältnis der additiven Mischung der Farben Rot und Grün gemäß Rayleigh-Gleichung beschreibt. Die Aufgabe der Probanden ist es, die beiden Farben so zu mischen, dass die eingestellte Mischfarbe dem gelben Vergleichsfeld entspricht. Das gesamte kreisförmige Prüffeld hat eine Größe von 2° und ist waagrecht geteilt in das gelbe Vergleichsfeld und Mischfeld mit variabler Rot-Grün-Mischung. Die grafische Darstellung der Rayleigh-Gleichung

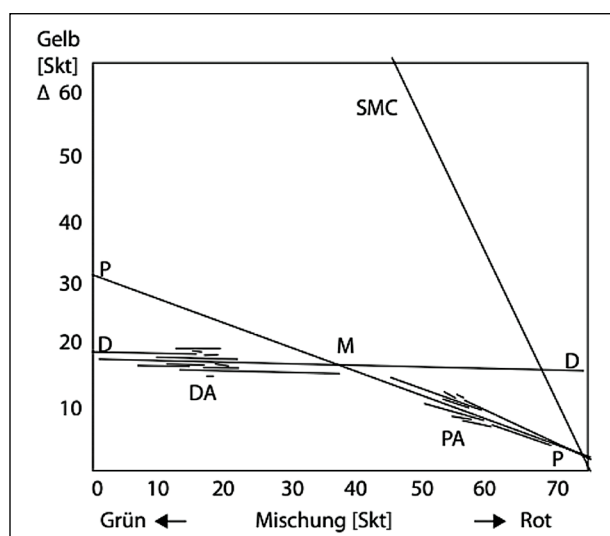


Bild 5-1 Pitt-Diagramm mit markierten Zuordnungsbereichen der möglichen angeborenen Farbsinnstörungen (P-Protanopie, PA-Protanomalie, D-Deuteranopie, DA-Daueranomalie und SMC-Stäbchenmonochromasie mit extremem Helligkeitsverlust in Richtung Rot) und dem Zuordnungsbereich ohne Farbsinnstörung (M-Mittelnormgleichung) (KRASTEL et al. 2009)

beziehungsweise der mit dem Anomaloskop ermittelten Werte erfolgt über das Pitt-Diagramm, dessen Abszisse, wie in Bild 5-1 zu sehen, von 0 (reines Grün) bis 73 (reines Rot) reicht. Auf der Ordinate wird die Helligkeit des gelben Vergleichslichtes aufgetragen.

Der Anomaliequotient AQ berechnet sich gemäß der folgenden Formel:

$$AQ = \frac{\frac{73 - V}{V}}{\frac{73 - M}{M}} \quad \text{Gl. 5-1}$$

Dabei entspricht V der individuell vom Probanden eingestellten Skalenanteile der Mischung und der Skalenanteile der Mischung gemäß Mittelnormgleichung des Anomaloskops. M und V sind für jedes Auge jedes Probanden mithilfe des Anomaloskops zu bestimmen. Für genauere Beschreibung der Vorgehensweise zur Bestimmung dieser Werte sei auf (KRASTEL 2006; KRASTEL et al. 2009) verwiesen. Mithilfe der Werte M und V errechnet sich dann der Anomaliequotient, auf Basis dessen die Zuordnung der Probanden in die Gruppe Normalsichtig oder Protanop erfolgt.

Für Normalsichtige liegt der Anomaliequotient zwischen 0,7 und 1,4. Liegt der Anomaliequotient zwischen 0 und 0,7, liegt eine Protanomalie vor. Anomaliequotienten über 1,4 bis ∞ lassen auf eine Deutanomalien schließen (KRASTEL 2006; KRASTEL et al. 2009).

Zur Gesichtsfelduntersuchung wurde eine semi-automatisierte kinetische Perimetrie (SKP) ausschließlich entlang des horizontalen Meridians einschließlich Reaktionszeitkorrektur mit verschiedenen Messmarken durchgeführt. Routinemäßig werden dabei die Messmarken (gemäß GOLDMANN-Klassifikation) III4e mit den Sollwerten (25,7', 320 cd/m²) und III1e mit den Sollwerten (25,7', 10 cd/m²) eingesetzt. Es wurde die semi-automatisierte kinetische Perimetrie (SKP) mit Berücksichtigung und Kompensation der individuellen Reaktionszeiten für jede Messmarkeneigenschaft verwendet (SCHIEFER et al. 2001, SCHIEFER et al. 2003, VONTHEIN et al. 2007). Hierbei wurden die Stimuli auf dem horizontalen Meridian mit konstanter Winkelgeschwindigkeit zur Gesichtsfeldmitte mehrfach dargeboten.

Im Rahmen der augenärztlichen Untersuchungen wird die SKP um ein neues Verfahren zur perimetrischen Ermittlung und anschließenden Gegenüber-

stellung der Wahrnehmungsschwellen für rote und weiße Stimuli bei Protanopen und farbnormalen Kontrollpersonen erweitert. Hierbei werden die Messmarken als roter und weißer Reiz angeboten. Die oben genannten Leuchtdichteangaben der Messmarken beziehen sich auf die konventionellen weißen Marken. Für die Generierung der roten Messmarken ist der firmenseitig eingebaute Rotfilter (SCHOTT RG610) angewählt, wodurch sich die Leuchtdichten der roten Messmarken in etwa auf ein Drittel im Vergleich zu den weißen Messmarken reduzierten. Der Median der Einzelmessungen spezifiziert die lokale Schwelle der jeweiligen Farbe, der zugehörige Interquartilsabstand, kurz IQR, dient als Streuungsmaß.

Auf eine vollständige Gesichtsfelduntersuchung beider Augen mittels schwelennah-überschwelliger Rasterperimetrie gemäß FeV konnte verzichtet werden, da bei allen Versuchspersonen die durchgeführte semi-automatisierte kinetische Perimetrie mit Gutachten-relevanter Messmarke entlang des horizontalen Meridians durchweg keine Auffälligkeiten zeigte. Zudem zeigte sich bei der Prüfung mittels swinging flashlight-Test (Beurteilung der direkten und konsensuellen Pupillenreaktion beider Augen im Rahmen des Pupillen-Wechselbeleuchtungstests) kein Hinweis auf einen afferenten Pupillendefekt und auch die Augenhintergrundbefunde sind unauffällig ausgefallen.

5.2 Lichttechnische Untersuchung

Innerhalb der Studie werden, wie oben beschrieben, die Einflussparameter Umfeldhelligkeit (Tag/Nacht), Lichtquellentechnologie (Glühlampe/LED) sowie die Kontraststufen der Bremsleuchtniveaus variiert. Rein methodisch müssen diese Einflussfaktoren randomisiert dargeboten werden, um Positionseffekte zu vermeiden. Aus untersuchungsökonomischen Gründen erfolgte eine vollständige Randomisierung nicht.

Die wahrgenommene Helligkeit ist abhängig von der relativen Sensitivität der Rezeptoren. Diese relative Sensitivität wird maßgeblich von der Umfeldhelligkeit bestimmt. Die Anpassung an die Umgebung benötigt eine gewisse Zeit und wird als Adaptation bezeichnet. Die Adaptationsgeschwindigkeit ist abhängig von der Richtung und der Größe der zeitlichen Änderung der Umfeldhelligkeit. Für den Übergang von Dunkel nach Hell benötigt das Auge nur wenige Sekunden. Die Adaptation von Hell auf

Dunkel benötigt deutlich mehr Zeit und liegt im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden bei vollständiger Dunkeladaptation. Aus ökonomischer Sicht war es daher empfehlenswert, die Reihenfolge der Situationen so zu planen, dass möglichst wenige Dunkeladaptationen für den Probanden notwendig sind.

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, werden zwei Arten von Heckleuchten verwendet. Diese Heckleuchten befinden sich in dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Fahrzeugmodell. Der Einfachheit halber ist dies technisch so realisiert, dass sich beide Quellen auf je einer Seite eines drehbaren Haltegestells befinden. Der Wechsel der Lichtquellentechnologie wird in der Studie durch Drehung des Gestells realisiert. Aus diesem Grund ist ein direkter Wechsel ohne Umbau nicht möglich, was eine vollständige Randomisierung dieses Einflussparameters ebenfalls verhindert.

Die Variation der unterschiedlichen Kontraststufen erfolgt allein über die Dimmung der Lichtquelle und erzeugt daher, im Gegensatz zur Adaptation beziehungsweise zum Technologietausch, keine Verzögerungszeiten. Somit ist für diesen Parameter eine vollständige Randomisierung inklusive Wiederholungen ohne Verzögerung möglich.

Die Randomisierung der Einflussparameter verfällt daher in zwei Ebenen. Auf der oberen Ebene wurden die beschriebenen Parameter Umfeldhelligkeit und Lichtquellentechnologie quasi randomisiert. Diese Ebene wird als Situation in Kapitel 5.2.1 beschrieben. Die untere Ebene wird vom Parameter Kontraststufe bestimmt und in Kapitel 5.2.2 beschrieben.

5.2.1 Situation

Aus den oben genannten Gründen setzt sich eine Situation aus den Parametern Umfeldhelligkeit (Tag/Nacht) und Lichtquellentechnologie (Glühlampe/LED) zusammen. Somit ergeben sich für jeden Probanden vier unterschiedliche Situationen durch die Kombination von Tag/Nacht und LED/Glühlampe. Aus der vollständigen Randomisierung dieser beiden Parameter ergaben sich rechnerisch 16 Kombinationsmöglichkeiten, die in Tabelle 5-1 aufgezeigt sind.

Unter Beachtung des Einflusses der Adaptationszeit ist es sinnvoll, die Anzahl der Wechsel von Hell (Tag) auf Dunkel (Nacht) für einen Probanden zu

Situation	Variante	A	B	C	D
Tag	1	Glühlampe	Glühlampe	LED	LED
Tag		LED	LED	Glühlampe	Glühlampe
Nacht		Glühlampe	LED	Glühlampe	LED
Nacht		LED	Glühlampe	LED	Glühlampe
Nacht	2	Glühlampe	Glühlampe	LED	LED
Nacht		LED	LED	Glühlampe	Glühlampe
Tag		Glühlampe	LED	Glühlampe	LED
Tag		LED	Glühlampe	LED	Glühlampe
Tag	3	Glühlampe	Glühlampe	LED	LED
Nacht		LED	LED	Glühlampe	Glühlampe
Nacht		Glühlampe	LED	Glühlampe	LED
Tag		LED	Glühlampe	LED	Glühlampe
Tag	4	Glühlampe	Glühlampe	LED	LED
Nacht		LED	LED	Glühlampe	Glühlampe
Tag		Glühlampe	LED	Glühlampe	LED
Nacht		LED	Glühlampe	LED	Glühlampe

Tab. 5-1 Übersicht über alle Reihenfolgenmöglichkeiten, in welchen die Probanden die Studie durchlaufen

minimieren. Aus diesem Grund werden in der Studie aus den möglichen Kombinationen der Situationen nur diese ausgewählt, bei der nur ein Wechsel von Tag auf Nacht erfolgt. Daher wird auf die Variante 4 verzichtet. Somit ergeben sich nur 12 Kombinationsmöglichkeiten unter Beachtung der Randomisierung der Variation der Lichtquellentechnologie.

Durchläuft der erste Proband beispielsweise Variante 1A, lautet die zu durchlaufende Reihenfolge:

1. Tag – Glühlampe
2. Tag – LED
3. Nacht – Glühlampe
4. Nacht – LED

5.2.2 Kontraststufen

Das Maß zum Erkennen von Helligkeitsunterschieden ist der Kontrast. Der Kontrast K_W berechnet sich gemäß der Definition nach WEBER (DIN-Normenausschuss Lichttechnik 1986) wie folgt:

$$K_W = \frac{L_{\text{Objekt}} - L_{\text{Umfeld}}}{L_{\text{Umfeld}}} \quad \text{Gl. 5-2}$$

Wobei L_{Objekt} die Objekt- und L_{Umfeld} die Umfeldleuchtdichte in cd/m^2 beschreibt. Hält man die Objektgröße und die Beobachtungsrichtung konstant, so ist die mittlere Leuchtdichte direkt linear zur Lichtstärke. Somit ist der Kontrast der mittleren Leuchtdichten L identisch dem Kontrast der Lichtstärken I . Der Kontrast nach WEBER ergibt sich somit direkt über das Verhältnis der Lichtstärken. Übertragen auf den im Rahmen dieser Studie zu betrachtenden Helligkeitskontrast zwischen Schlussleuchte und Bremsleuchte innerhalb einer Fläche ergibt sich für den dargestellten Kontrast K_W :

$$K_W = \frac{I_{\text{Bremsleuchte}} - I_{\text{Schlussleuchte}}}{I_{\text{Schlussleuchte}}} \quad \text{Gl. 5-3}$$

Dabei entspricht $I_{\text{Bremsleuchte}}$ der Lichtstärke der Brems- und $I_{\text{Schlussleuchte}}$ der Lichtstärke der Schlussleuchte. Die Einheit der Lichtstärke ist Candela mit dem Formelzeichen cd .

Die Wahrnehmbarkeit steigt mit zunehmenden Lichtstärkeunterschied zwischen Schluss- und Bremsleuchte, das heißt mit steigendem Kontrast. Der kritischste darstellbare Kontrast liegt dann vor, wenn Schluss- und Bremsleuchte gleich hell sind. In diesem Fall sind Schluss- und Bremsleuchte nicht zu unterscheiden. Rechnerisch ergibt sich ein Kontrast von $K_W = 0$.

Aus gesetzlicher Sicht sind, wie bereits in Kapitel 1.4 beschrieben, nach der aktuellen UN-Regelung Nr. 7 für die Schlussleuchte Lichtstärken zwischen mindestens 4 cd bis maximal 17 cd zulässig. Bis 2010 ist das erlaubte Maximum für die Schlussleuchte auf eine Lichtstärke von 12 cd begrenzt gewesen. Der gesetzlich erlaubte Bereich der Bremsleuchte in dieser UN-Regelung beginnt bei 60 cd .

Bestandsfahrzeuge verfügen über eine tendenziell dunklere Schlussleuchte. Dies erschwert die grundsätzliche Erkennbarkeit zum Umfeld und stellt hier das Worst-Case-Szenario dar. Daher wird für die Studie als Basis das Schlussleuchtniveau von 12 cd für die Tag- und Nachtsituation verwendet.

Die Unterscheidung zwischen alter und neuer UN-Regelung Nr. 7 kann jedoch aus den effektiven Kontrasten von $K_W = 4$ und $K_W = 2,5$ abgeleitet werden. Dabei ist das Ausgangsniveau vernachlässigbar, da ausschließlich der Helligkeitskontrast innerhalb der Fläche untersucht wird.

Wie oben beschrieben, wird im Rahmen der Studie die Wahrnehmbarkeit des Helligkeitskontrastes zwischen Schluss- und Bremsleuchte innerhalb einer Fläche untersucht, wobei ein Ausgangsniveau der Schlussleuchte von 12 cd festgelegt ist. Die technisch bedingte maximal realisierbare Lichtstärke der ausgewählten Heckleuchten beträgt 120 cd . Zur Ausnutzung der technisch zur Verfügung stehenden Spannweite werden die untersuchten Kontraste, das heißt, die verwendeten Bremsleuchtniveaus, gleichmäßig über diese Spannweite verteilt.

Bezugnehmend auf die psychometrische Funktion besteht ein Zusammenhang zwischen der Reizstärke, also der Stärke des Kontrastes, und der Wahrscheinlichkeit, diesen Reiz zu entdecken bzw. den Kontrast wahrzunehmen. Insbesondere im Schwellenbereich ist es möglich, dass Schwankungen bei der Kontrastwahrnehmung auftreten, sodass eine Kontraststufe manchmal sichtbar ist und manchmal nicht. Daher ist es aus methodischer Sicht empfohlen, alle dargebotenen Reize bei der Schwellenbestimmung mehrfach zu präsentieren.

Für die Auswahl und die Anzahl der abgeprüften Stufen ergibt sich ein Zielkonflikt. Für eine möglichst präzise Schwellenbestimmung muss die Anzahl der dargebotenen Kontraststufen möglichst groß gewählt werden. Da die Grundlage zur Bestimmung von Wahrnehmungsschwellen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung ist, sind zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten Messwiederholungen notwendig. Aus Konzentrationsgründen sollte die Anzahl der Entscheidungen und damit auch die Anzahl der dargebotenen Kontraststufen möglichst geringgehalten werden. Somit ist die Anzahl der abgeprüften Stufen immer ein Kompromiss zwischen den drei genannten Kriterien. Aus Erfahrungswerten ähnlicher Studien mit einfachen Ja/Nein-Entscheidungen kann abgeleitet werden, dass einem Probanden maximal 80 Entscheidungen ohne Erholungspause zugemutet werden können.

Zur Sicherstellung valider Ergebnisse werden in dieser Studie daher 20 Kontraststufen mit je drei Wiederholungen innerhalb einer Situation präsentiert. Nach jeder Situation wird eine Erholungspau-

se von mindestens 5 Minuten für die Probanden eingelegt.

Die innerhalb der Studie verwendeten Kontraststufen sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst. Die 20 Kontraststufen sind möglichst gleichmäßig über die zur Verfügung stehende Spannbreite zwischen 12 cd und 120 cd verteilt, damit der komplette Bereich gleichabständig abgetastet wird. Dabei ist zu beachten, dass die Kontraststufen $K_W = 0$ (sogeannter Catch-Trial, bei dem kein Reiz vorhanden ist), $K_W = 2,5$ (Kontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchten gemäß neuer ECE-Regelung) und $K_W = 4$ (Kontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchte gemäß alter ECE-Regelung) in jedem Fall abgefragt werden müssen, damit unter anderem die

Kontraststufe	$I_{\text{Bremsleuchte}}$ in cd	K_W
1	12	0,00
2	14	0,17
3	17	0,42
4	21	0,75
5	25	1,08
6	30	1,50
7	36	2,00
8	42	2,50
9	50	3,17
10	60	4,00
11	65	4,42
12	70	4,83
13	75	5,25
14	80	5,67
15	90	6,50
16	100	7,33
17	105	7,75
18	110	8,17
19	115	8,58
20	120	9,00

Tab. 5-2 Kontraststufe mit zugehöriger Lichtstärke der Bremsleuchte und berechneter Kontrast nach Weber für den Helligkeitskontrast innerhalb der Fläche zwischen Schluss- und Bremsleuchte

gesetzlichen Mindest- und technisch möglichen Maximalwerte abgedeckt sind. Da vor Versuchsbeginn nicht sicher war, ob die zu ermittelnde Schwelle sich oberhalb oder unterhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Mindestlichtstärke befindet, waren sowohl der obere als auch der untere Bereich gleichermaßen abzutasten. Unabhängig davon, in welchem Bereich die zu ermittelnde Schwelle liegt, kann so gleichzeitig sichergestellt werden, dass die Schwelle valide bestimmt wird.

Gesucht ist die unmittelbare Reaktion des Probanden mit einer einfachen Ja/Nein-Reaktion.

Die Präsentationszeit der Bremsleuchte ist ein Kompromiss zwischen einer möglichst intuitiven und einer sicheren Reaktion. Mit einer sehr langen Präsentationszeit der Bremsleuchte wäre eine sichere Reaktion des Probanden gewährleistet, da man hierbei immer eine Reaktion des Probanden erhält. Aufgrund der Tatsache, dass es sich hier um eine sicherheitsrelevante Situation handelt und der Praxisbezug gewährleistet werden muss, ist die Präsentationszeit möglichst kurz gewählt. Die Präsentationszeit ist daher auf eine Sekunde festgelegt. Dies ist praxisnah und deckt sich mit der in der StVO beschriebenen notwendigen Anhaltezeit.

Nach jeder dargebotenen Bremssituation in der zugehörigen Kontraststufe erfolgt eine kurze Pause bis zur nächsten Darbietung. Diese Pause zwischen zwei Stimuli wird als Interstimulusintervall, kurz ISI, bezeichnet. Zur Vermeidung von Rhythmusseffekten wird diese Pausendauer randomisiert. Die Spannbreite dieses Intervalls beträgt in der Studie 8 s bis 10 s. Die Randomisierung ist notwendig, um die Konzentration des Probanden aufrecht zu halten. Die verwendete Intervallbreite basiert auf Erfahrungswerten aus anderen ähnlichen Probandenstudien und ist ein Kompromiss zwischen Ermüdung und Aufrechterhaltung der Konzentration des Probanden. Der prinzipielle zeitliche Ablauf ist in Bild 5-2 dargestellt.

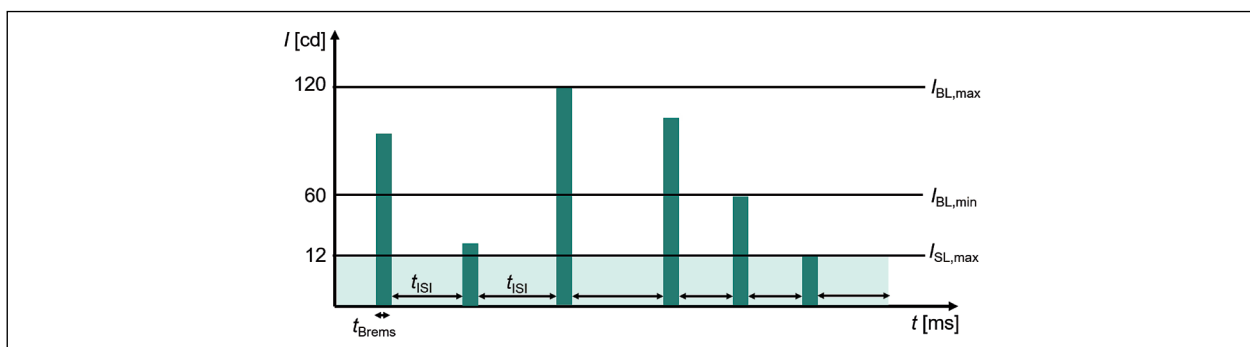


Bild 5-2 Prinzipieller zeitlicher Ablauf bei der Reizdarbietung inkl. arrhythmischer Interstimulusintervalle

5.2.3 Versuchsablauf

Nach der augenärztlichen Untersuchung werden die Probanden zum Hauptgebäude der Hochschule Aalen geführt, in dem der lichttechnische Teil der Studie stattfindet. Jeder Proband wird zunächst schriftlich und im Anschluss mündlich durch die Versuchsleitung zur Sicherstellung, dass alle Versuchsteilnehmer mit den gleichen Voraussetzungen in die Studie starten, instruiert. Der Instruktionbogen, der den Probanden ausgehändigt wird, ist im Anhang 15.1 angefügt.

Den Probanden wird mitgeteilt, dass die aufgebaute Situation eine innerstädtische Hinterherfahrt darstellt. Die Probanden werden gebeten, den Blick auf das vorausfahrende Fahrzeug bzw. explizit auf die Mitte des angebrachten Nummernschildes als Fixationspunkt zu richten. Des Weiteren werden sie darüber in Kenntnis gesetzt, dass in gewissen zeitlichen Abständen die Bremsleuchten des vorausfahrenden Fahrzeuges aufleuchten. Ihre Aufgabe ist es, unmittelbar nach dem Aufleuchten der Bremsleuchte kräftig auf das Bremspedal zu treten und dieses für mindestens eine Sekunde gedrückt zu halten. Im Anschluss ist der Fuß wieder auf die Ruheposition, beispielsweise auf das Gaspedal, zurückzusetzen. Dieser Vorgang wird mehrfach und in unterschiedlichen Helligkeiten der Bremsleuchte, das heißt Kontraststufen, wiederholt.

Die zu untersuchenden Situationen werden gemäß Kapitel 5.1 nacheinander untersucht. Zu Beginn jeder Situation erfolgt für den Probanden eine Adaptionsphase. Vor einem Durchgang der Tag-Situation beträgt die Adaptionszeit 3 Minuten. Für einen Durchgang, der die Nacht-Situation widerspiegelt, beträgt die Adaptionszeit 10 Minuten.

Zu Beginn jeder Situation wird nach der Adaptionsphase die Schlussleuchte eingeschaltet. Der Proband ist gebeten, mitzuteilen, ob er etwas erkennen kann, ohne zu wissen, wann die Schlussleuchte angeschaltet wird. Ist das der Fall, ist sichergestellt, dass das Schlussleuchterniveau erkennbar ist, sodass die Variation der Kontraststufen innerhalb der Situation beginnen kann. Danach werden den Probanden die 20 ausgewählten Kontraststufen, wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben, mit dreifacher Wiederholung in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Eine Situation beinhaltet somit 60 Entscheidungen und dauert circa 10 Minuten.

Nach jeder Situation erfolgt eine Erholungspause für den Probanden von mindestens 5 Minuten. Für

diese Pause wird der Proband in einen Nebenraum geführt. Währenddessen wird vom Versuchsleiter die nächste Situation eingestellt, das bedeutet, ein Anpassen der Umgebungshelligkeit beziehungsweise ein Wechsel der Lichtquellen. Auch für den Fall, dass gemäß der vorab festgelegten Reihenfolge kein Technologiewechsel notwendig ist, wird diese Pause eingelegt. Der Proband ist beim Technologiewechsel nicht anwesend, sodass Erwartungseffekte ausgeschlossen werden können. Insgesamt durchläuft jeder Proband vier Situationen in randomisierter Reihenfolge, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben.

Somit ergibt sich ein Ablauf des gesamten lichttechnischen Versuchsteils, wie in Bild 5-3 dargestellt. Die Dauer pro Situation beträgt in etwa 10 Minuten zuzüglich einer Erholungspause von jeweils 15 Minuten. Folglich ergibt sich einschließlich einer Umbaupause und der Zeit für die Dunkeladaptation von je 10 Minuten eine Gesamtdauer von maximal 130 Minuten.

Zur Sicherstellung der Datenqualität wird der komplette oben beschriebene Prozessablauf in einem

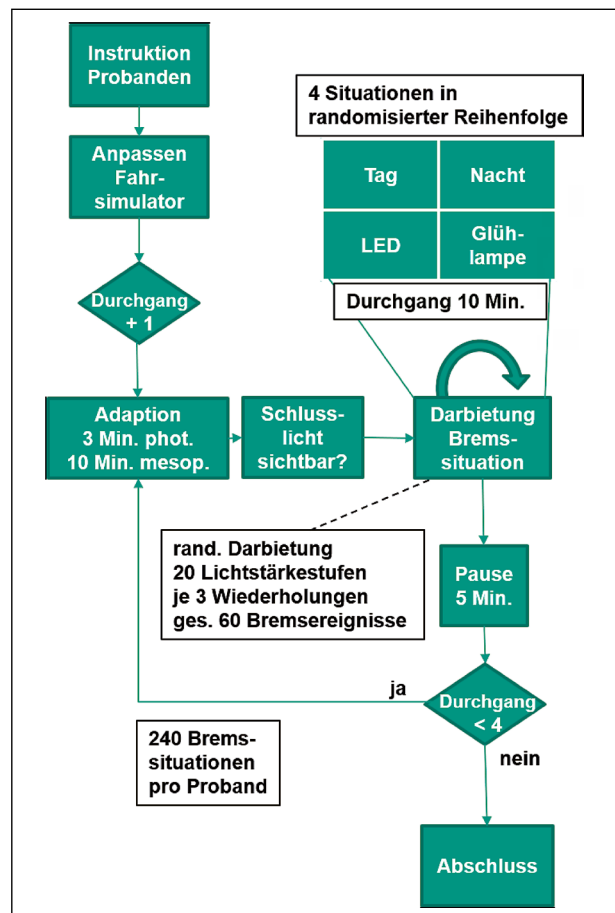


Bild 5-3 Kompletter Versuchsablauf eines Probanden

für die Studie angefertigten Programm hinterlegt. Als Softwareumgebung dient MATLAB der Firma MathWorks. Das Programm generiert eine Datenbank, in der alle Randparameter erfasst werden. Die Randomisierung, die zeitliche Ablaufsteuerung sowie die Aufnahme der Reaktionen und Reaktionszeiten erfolgen automatisch über das beschriebene Programm.

Während eines Studiendurchgangs werden für jede Bremssituation die Rahmenparameter, Durchgangsnummer, Zeitpunkt, Umgebungssituation und Kontraststufe aufgezeichnet. Diese Daten werden in einer Datenbank für die im Anschluss stattfindende Auswertung gespeichert. Die Zeit, die der Proband benötigt, um auf eine ihm dargebotene Bremssituation zu reagieren, ist die Reaktionszeit t_{Reaktion} , wie in Bild 5-4 dargestellt. Diese ergibt sich aus dem Abstand zwischen den Zeitpunkten $t_{\text{Darbietung}}$ und Betätigungszeitpunkt $t_{\text{Bremsvorgang}}$ des Pedals durch den Probanden.

Zu Beginn der Auswertung bedarf es einer kritischen Analyse hinsichtlich der Plausibilität der aufgenommenen Reaktionszeiten. Es ist zunächst zu prüfen, ob die gemessenen Reaktionszeiten realistischen Werten entsprechen. Nach KLEBELSBERG (KLEBELSBERG 1982) sind Reaktionszeiten zwischen 400 ms und 800 ms zu erwarten. Die minimale Reaktionszeit für visuelle Reize beträgt gemäß THIENES (THIENES 1998) 200 ms. Aus diesem Grund wird festgelegt, dass Reaktionszeiten kleiner als 200 ms als Messfehler zu interpretieren und zu streichen sind.

Da jedes verpasste Bremssignal ein erhebliches Unfallrisiko birgt, ist im Rahmen dieser Studie auch eine maximale zulässige Reaktionszeit festzulegen. Diese Reaktionszeit entspricht auch gleichzeitig der Zeit, ab der das Bremssignal als nicht erkannt interpretiert wird. Diese Messwerte sind bei der Auswertung der Reaktionszeiten auszuschließen. In Anleh-

nung an die in Kapitel 3.3.1 beschriebene 1-Sekunden-Faustformel wird die maximal zulässige Reaktionszeit auf 2 Sekunden festgelegt.

6 Ergebnisse der ophthalmologisch-optischen Untersuchung der Probanden

6.1 Probandenkollektiv

Aus dem Arzt-Informationssystem der Universitäts-Augenklinik Tübingen werden insgesamt 60 Personen mit Protanopie identifiziert, schriftlich kontaktiert und gebeten, sich bei Interesse an der Studienteilnahme an das Projektteam zu wenden. Darüber hinaus werden augengesunde Personen persönlich angesprochen, sodass insgesamt 22 männliche Versuchspersonen eingeladen wurden. Von den zehn Versuchspersonen mit angenommener normaler Trichromasie erfüllen vier die vorgegebenen Einschlusskriterien nicht. In der Gruppe der angenommenen Protanopen ist dies bei insgesamt sieben Probanden der Fall. Die Ausschlussgründe sind in Bild 6-1 aufgeführt. Insgesamt konnten sechs farbnormale Kontrollpersonen und fünf protanope Probanden in die Studie aufgenommen werden.

Die Probanden aus der normalsichtigen Gruppe sind zwischen 23 Jahren und 50 Jahren alt. Die Probanden mit einer diagnostizierten Protanopie sind zwischen 21 Jahren und 29 Jahren alt. Das Durchschnittsalter der normalsichtigen Probanden beträgt 32,9 Jahre und das der protanopen Probanden 23,7 Jahre. Es handelt sich insgesamt um ein relativ junges Probandenkollektiv. Alle Probanden, die final eingeschlossen werden, verfügen über ein ausreichendes Sehvermögen gemäß FeV.

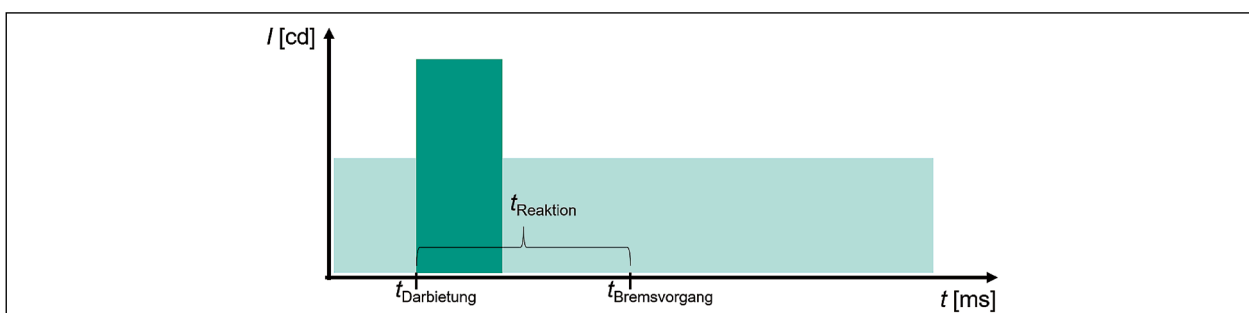


Bild 5-4 Ermittlung der Reaktionszeit

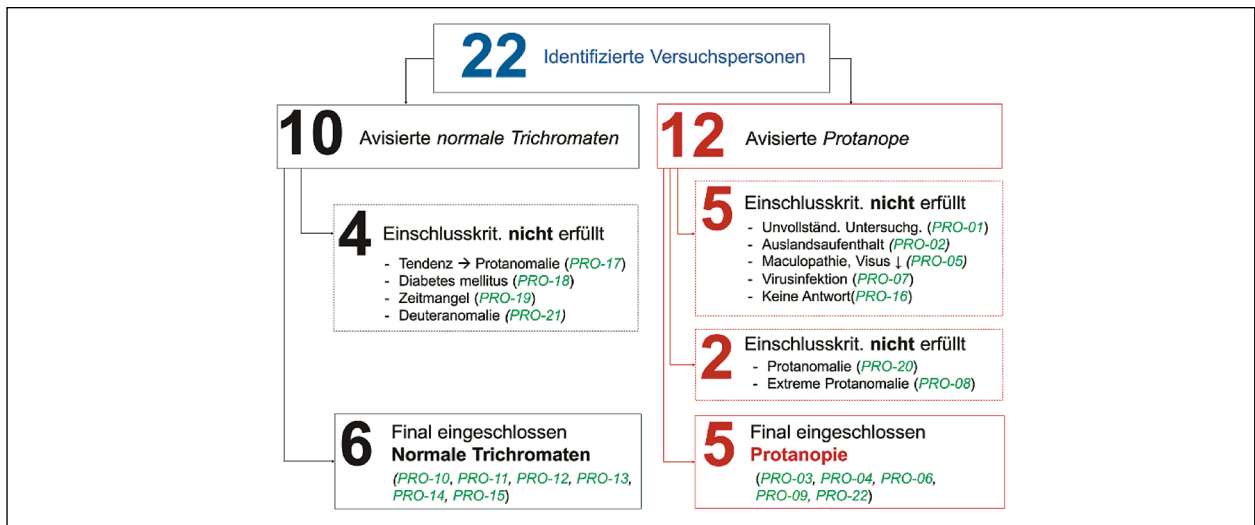


Bild 6-1 Im Rahmen der Studie identifizierte, ausgeschlossene und letztendlich eingeschlossene Versuchspersonen, nebst Häufigkeitsangaben, Ausschlussgründen sowie pseudonymisierter Kennung der jeweiligen Versuchspersonen

6.2 Ergebnisse der Farbfehlsichtigkeitsbestimmung

Die Einteilung der Probanden erfolgt auf Basis der mit dem HMC-Anomaloskop ermittelten Anomaliequotienten. Gemäß KRASTEL (KRASTEL 2006) ist es notwendig, beide Augen getrennt voneinander zu untersuchen. Aus diesem Grund wird im Folgenden zwischen rechtem Auge (RA) und linkem Auge (LA) unterschieden. Da bei der Untersuchung mit dem Anomaloskop sowohl die Farbe als auch die Helligkeit zu berücksichtigen sind, ergeben sich je Auge jeweils zwei zusammengehörige Messwerte für *M* und *V*. In Tabelle 6-1 sind diese exemplarisch für zwei Probanden (PRO-09 und PRO-11) gezeigt.

Proband	Rechtes Auge				Linkes Auge			
	<i>M</i> ₁	<i>V</i> ₁	<i>M</i> ₂	<i>V</i> ₂	<i>M</i> ₁	<i>V</i> ₁	<i>M</i> ₂	<i>V</i> ₂
PRO-09	0,0	31,4	72,7	1,9	0,0	33,4	72,7	1,9
PRO-11	39,8	15,0	40,1	13,6	40,7	16,4	41,2	15,0

Tab. 6-1 Mit Anomaloskop ermittelte Werte für *M* und *V* der Probanden PRO-09 und PRO-11 getrennt nach Auge unter Berücksichtigung der Dimensionen Farbe und Helligkeit

Die Messwerte für *M* und *V* können in das Pitt-Diagramm übertragen werden, sodass die Diagnose der möglichen vorliegenden Farbfehlsichtigkeit grafisch erfolgt. Das Ergebnis, exemplarisch für die Probanden PRO-09 und PRO-11, ist in Bild 6-2 dargestellt.

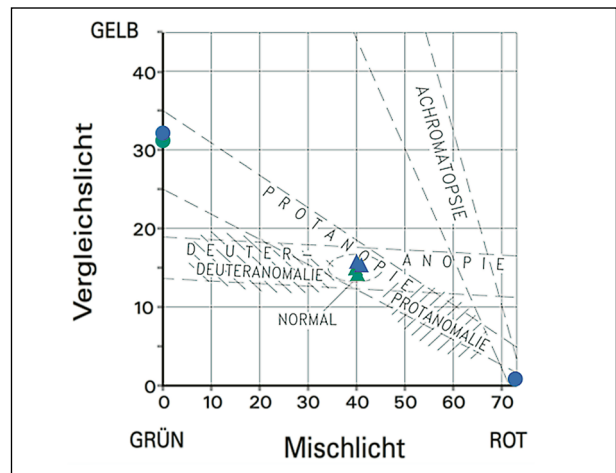


Bild 6-2 Pitt-Diagramm mit eingezeichneten ermittelten Werten *M* und *V* der Probanden PRO-09 (Kreise) und PRO-11 (Dreiecke), wobei grün jeweils das rechte Auge und blau das linke Auge repräsentiert

In Bild 6-2 ist ersichtlich, dass sich die ermittelten Werte *M* und *V* für PRO-11, die durch Dreiecke dargestellt sind, relativ nah beieinander im mittleren Bereich des Pitt-Diagramms befinden. Definitionsgemäß liegen die ermittelten Werte von PRO-11 im Bereich für Normalsichtige, sodass dieser Proband mithilfe des Pitt-Diagramms der Gruppe Normal-sichtig zugeordnet wird.

se liegen nahezu beziehungsweise direkt auf der Abszisse beziehungsweise der Ordinate. Das bedeutet, dass der Proband zum Angleichen des Testfeldes an das Vergleichsfeld den kompletten Umfang des Anomaloskops ausgenutzt hat. Damit liegen die Werte, wie Bild 6-2 zeigt, innerhalb des Bereiches, der auf eine Protanopie schließen lässt.

Anders verhält es sich, wie in Bild 6-2 zu sehen, mit den eingezeichneten ermittelten Werten *M* und *V* von PRO-09, die durch Kreise dargestellt sind. Die-

Proband	Ermittelter Anomaliequotient 1		Ermittelter Anomaliequotient 2		Gruppenzuordnung
	RA	LA	RA	LA	
PRO-03	∞	∞	0	0	Protanop
PRO-04	∞	∞	0	0	Protanop
PRO-06	>300	>300	0	0	Protanop
PRO-09	∞	∞	0	0	Protanop
PRO-10	0,93	0,92	0,82	0,71	Normalsichtig
PRO-11	1,0	0,96	1,0	0,93	Normalsichtig
PRO-12	1,0	1,0	0,83	0,9	Normalsichtig
PRO-13	0,92	0,9	0,85	0,85	Normalsichtig
PRO-14	0,9	0,9	0,88	0,88	Normalsichtig
PRO-15	0,96	1,0	0,89	0,89	Normalsichtig
PRO-22	∞	∞	0	0	Protanop

Tab. 6-2 Ermittelte Anomaliequotienten aller Probanden für das rechte Auge (RA) und das linke Auge (LA) sowie die Zuordnung in die Probandengruppe

Daher ist PRO-09 anhand des Pitt-Diagramms der Gruppe Protanop zuzuordnen.

Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, kann mithilfe der ermittelten Werte M und V über die Formel (5-1) der Anomaliequotient AQ für jeden Probanden bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der beiden Dimensionen Helligkeit und Farbe ergeben sich so für jeden Probanden zwei Anomaliequotienten. In Bezug auf die Eignungsbeurteilung der Farbsichtigkeit ist, bezogen auf den Grenzwertbegriff, der von der Norm am weitesten entfernte Anomaliequotient anzugeben. Auf Basis dieser Vorgehensweise erfolgte im Rahmen dieser Studie auch die Zuteilung der Probanden zu einer der beiden Probandengruppen. Der Vollständigkeit halber sind beide ermittelten Anomaliequotienten sowie die Gruppenzuordnung in Tabelle 6-2 zusammengefasst.

Die konventionelle, standardisierte klinische Untersuchung des Farbsehvermögens mit dem Anomaloskop ist hervorragend geeignet, um erbliche Farbsinnstörungen zu diagnostizieren und um z. B. auch zwischen einer Protanomalie und Protanopie zu differenzieren (KRASTEL 2009).

Die Auswirkung einer Rotsinnstörung auf die perimetrisch ermittelte Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit ist lange bekannt (KRASTEL et al. 1986; KRASTEL et al. 1987). Protanope zeigen bei der Untersuchung mit roten Lichtmarken eine deutliche Einschränkung der Isopteren. Die ausschließliche Verwendung roter Messmarken hat mangels intra-individueller Referenzierung auf eine subjektbezogene Bezugsgröße den potenziellen Nachteil einer

beschränkten Erfassung des intra-individuellen Schädigungsausmaßes bei gleichzeitig gegebenenfalls beeinträchtigter inter-individueller Vergleichbarkeit. Der hier vorgestellte grundsätzliche Bezug auf die Isopterenausdehnung des Standard-Weißlichtreizes umgeht dieses Problem und kreierte den einfach nachzuvollziehenden Quotienten RWR (red/white ratio), der Werte zwischen 1 (keine Beeinträchtigung) und 0 (Komplettausfall der roten Stimuluswahrnehmung) annehmen kann. Die Beschränkung auf den horizontalen Meridian reduziert den Untersuchungsaufwand beträchtlich und lehnt sich an die in vielen europäischen Ländern übliche Beurteilung der horizontalen Gesichtsfeldausdehnung an (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 2371/20 1991, Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft und Berufsverband der Augenärzte Deutschlands 2019).

Der Einsatz der semi-automatisierten kinetischen Perimetrie (SKP) gewährleistet ein gut standardisiertes, weitgehend untersucherunabhängiges Messverfahren mit einer definierten, konstanten Winkelgeschwindigkeit für festgelegte Vektoren entlang des horizontalen Meridians (VONTHEIN et al. 2007). Die individuelle, reizmarkenspezifische Ermittlung von Reaktionszeiten im Rahmen der SKP erlaubt eine Korrektur des systematischen Fehlers einer reaktionszeitbedingten Verschiebung der perimetrischen Schwelle in Richtung der Stimulusbewegung. Im Gegensatz zur konventionellen Anomaloskop-Untersuchung erzielt dieses Verfahren quantifizierbare Ergebnisse nicht nur bei Protanomalie, sondern auch bei Protanopie. Perimetrische Geräte und Untersuchungstechniken sind – im Gegensatz zum Anomaloskop – weit verbreitet und zudem auch durch ÄrztInnen anderer Fachbereiche (Neurologie, Arbeits- und Betriebsmedizin), (Verkehrs-)PsychologInnen und andere, adäquat eingewiesene medizinische Berufsgruppen (OrthoptistInnen, AugenoptikerInnen, ArzthelferInnen etc.) durchführbar. Die Dokumentation jedes einzelnen Untersuchungsschritts einschließlich der Reaktionszeitmessung trägt zur Qualitätssicherung dieses perimetrischen Verfahrens bei.

Die RWR-Ergebnisse der im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten SKP zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen der normalsichtigen und protanopen Probandengruppe für die reizstarken Messmarken (III4e). Für reizschwache Marken (III1e) zeigt die RWR für fast alle Protanopen gegenüber den Kontrollpersonen eine deutliche Reduktion.

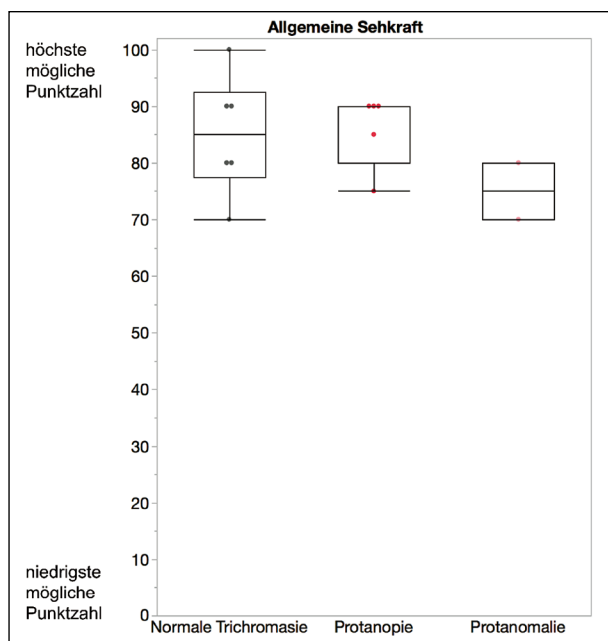


Bild 6-3 Vergleichende Gegenüberstellung des NEI-VFQ 25 General Vision-Score für die drei Farbsinnsgruppen; diese Skala „Allgemeine Sehkraft“ umfasst zwei Aspekte. Eine Frage lautet z. B.: „Wie würden Sie heute Ihre Sehkraft bewerten, die Sie mit Brille oder Kontaktlinse haben?“. Die Ergebnisse für normale Trichromasie (links), Protanopie (Mitte) und Protanomalie (rechts) sind als Box & Whisker Plots dargestellt: Die horizontale Linie symbolisiert den Median, der untere und obere Rand der Box das 25. bzw. 75. Perzentil, und die Whisker (senkrechte Striche) repräsentieren jeweils den 1.5-fachen Betrag des Interquartilsabstands. Die einzelnen Messwerte sind durch runde Symbole dargestellt.

Es zeigt sich überwiegend eine Zunahme der Reaktionszeiten für reizschwächere Marken (III1e) gegenüber reizstärkeren (III4e) und eine deutliche Steigerung der Reaktionszeit für reizschwache rote gegenüber reizschwachen weißen Stimuli in der Gruppe der Protanopen. Für reizstärkere Messmarken zeigt sich darüber hinaus ein Decken-Effekt (ceiling effect), der eine Differenzierung zwischen den Kontrollpersonen (farbnormale Trichromaten) und den Patienten mit Rotsinnstörung nicht möglich macht.

Die konkreten Messergebnisse der semi-automatisierten kinetischen Perimetrie sind im Anhang zu finden.

6.3 Selbsteinschätzung Farbfehlsichtiger

Bild 6-3 bis Bild 6-5 veranschaulichen die Ergebnisse der subjektiven Selbsteinstufung anhand der (ins Deutsche übersetzten, validierten) Fragebogen

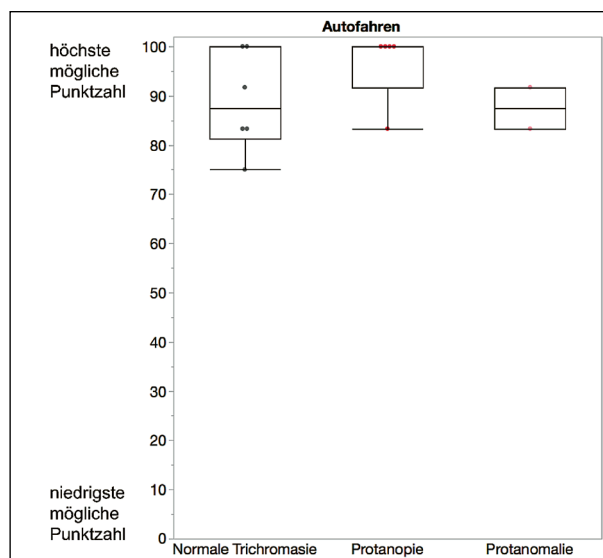


Bild 6-4 Vergleichende Gegenüberstellung des NEI-VFQ 25 Score für den Aspekt „Driving“ („Probleme mit dem Autofahren“). Dieser umfasst drei Aspekte des Autofahrens (Probleme bei Nacht/bei fremden Strecken/ bei bekannten Strecken) s. Legende Bild 6-3

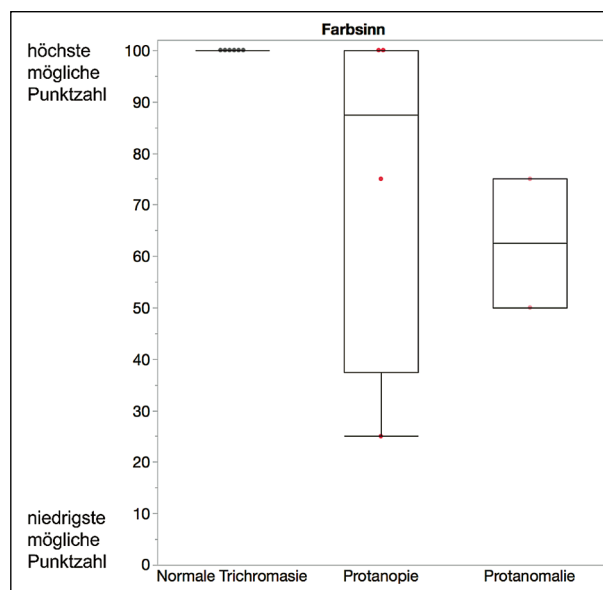


Bild 6-5 Vergleichende Gegenüberstellung des NEI-VFQ 25 Score für die (einzige) farbsinnbezogene Frage 12 des Fragebogens: „Haben Sie aufgrund Ihrer Sehkraft Schwierigkeiten, Ihre eigene Kleidung farblich zusammenzustellen?“ siehe Legende Bild 6-3

NEI-VFQ 25 (FRANKE GH et al. 1998). Hierbei zeigt die Selbsteinschätzung zur „Allgemeinen Sehkraft“, siehe Bild 6-3, keine wesentlichen Unterschiede zwischen der farbnormalen Kontrollgruppe und den protanopen Probanden.

Bild 6-4 zeigt die Ergebnisse der Selbsteinschätzung zum Thema „Probleme beim Autofahren“. Hier weist der Median von Protanopen sogar einen etwas höheren/besseren Score auf als der von Normalsichtigen oder Protanomalen.

Für die einzig farbsinnspezifische Frage Nr. 12 dieses Fragebogens ergibt sich bei vergleichsweise großer Streuung für die rotsinngestörten Patienten ein Hinweis auf eine Verschlechterung der Fähigkeit zur farblichen Zusammenstellung von Kleidungsstücken um 1 bis 1,5 Punkte (Median) gegenüber der farbnormalen Kontrollgruppe, wie in Bild 6-5 gezeigt.

7 Ergebnisse der lichttechnischen Untersuchung

7.1 Datenaufbereitung

Die Sichtung der Daten hat ergeben, dass zwei Messwerte kleiner als die festgelegte Mindestreaktionszeit sind. Diese beiden Werte können unterschiedlichen Probanden und Kontraststufen zugeordnet werden. Bei 11 auswertbaren Probanden mit jeweils 240 Messwerten beträgt der Anteil fehlerhafter Messwerte somit 0,08 %.

7.2 Charakteristischer Verlauf

Um einen ersten Eindruck von den gemessenen Daten zu gewinnen, sind in Bild 7-1 die gemessenen Reaktionszeiten für alle Situationen in Abhängigkeit der präsentierten Kontraststufe für drei verschiedene Probanden visualisiert. Die probandenspezifischen Mediankurven zeigen, dass die gemessene Reaktionszeit zum einen von der Stärke der Reizdarbietung, das heißt der dargebotenen Kontraststufe der Bremsleuchte, und zum anderen vom Probanden abhängig ist.

Ist die Kontraststufe hoch genug, sodass die Bremsleuchte gut erkennbar ist, kann der Proband schnell auf diese reagieren. Ist die dargebotene Kontraststufe kleiner und liegt sogar im Bereich der Wahrnehmbarkeitsschwelle, ist es für den Probanden schwieriger, diese wahrzunehmen. Die unsichere Entscheidungsfindung führt zu längeren Reaktionszeiten.

Liegen die dargebotenen Kontraststufen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle, kann die Bremsleuchte nicht wahrgenommen werden. Es erfolgt keine Reaktion des Probanden. Ist der präsentierte Kontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchte $K_W = 0$, wird vom Probanden keine Reaktion erwartet, sodass auch keine Reaktionszeit messbar ist. Dieser Fall stellt in der Studie eine Kontrollsituation zur Validierung der Probandenreaktion dar. Bild 7-1 zeigt, dass keiner der drei Probanden bei dieser Stufe reagierte. Diese Aussage ist auf alle Probanden übertragbar.

Der qualitative Verlauf der ermittelten Reaktionszeiten über den dargebotenen Kontrast ist in Bild 7-2 gemäß den oben beschriebenen charakteristischen Bereichen skizziert. Ist es für den Probanden nicht möglich, die Bremsleuchte aufgrund der zu geringen

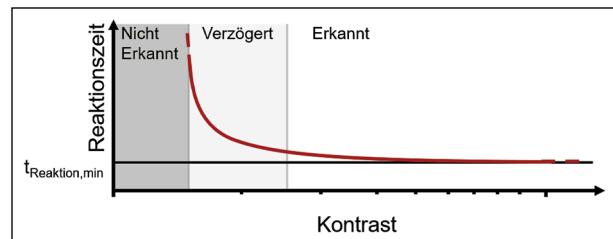


Bild 7-2 Qualitativer Verlauf der Reaktionszeiten über dem dargebotenen Kontrast

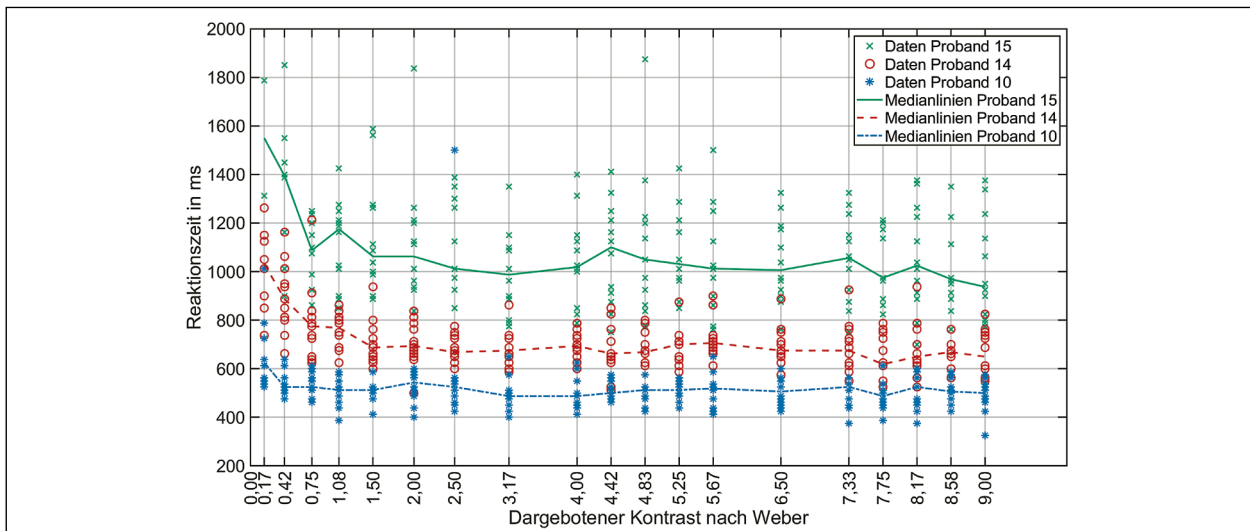


Bild 7-1 Reaktionszeiten über den Kontraststufen dreier Probanden. Jeder Datenpunkt stellt hierbei eine Reaktionszeit dar.

gen Kontraststufe wahrzunehmen, ist dies dem Bereich „Nicht erkannt“ zuzuordnen. Ist die Kontraststufe der Bremsleuchte hoch genug, sodass die Bremsleuchte sicher wahrnehmbar ist, liegen die gemessenen Werte im Bereich „Erkannt“. Alle übrigen gemessenen Reaktionszeiten sind im Zwischenbereich „Verzögert“ zu erwarten, in welcher die dargebotene Kontraststufe nahe der Wahrnehmbarkeitsschwelle liegt. Charakteristisch für den Verlauf ist auch, dass sich die Reaktionszeiten bei hohen dargebotenen Kontraststufen asymptotisch einer minimalen individuellen Reaktionszeit nähern, die im Folgenden als $t_{\text{Reaktion,min}}$ bezeichnet wird. Hierbei handelt es sich um die individuelle Reaktionszeit, die der Proband mindestens benötigt, um auf die gestellte Aufgabe zu reagieren. Für eindeutig überschwellige Reize ergibt sich eine individuelle minimale Reaktionszeit, welche unabhängig von der Sehleistung ist und nur noch von Wahrnehmungsprozessen und Reizweiterleitung bestimmt ist.

7.3 Normierung der Reaktionszeit

Anhand der Kurvenverläufe in Bild 7-1 wird veranschaulicht, dass interpersonelle Unterschiede bezüglich der Reaktionszeit für überschwellige Reizdarbietungen bestehen. So liegt die mittlere Reaktionszeit von Proband 10 für die eindeutig überschwelligen Kontraste K_W größer als 6,5 bei circa 500 ms, wohingegen die minimale Reaktionszeit von Proband 15 bei 1100 ms liegt. Um diese interpersonellen Unterschiede auszugleichen, ist auf die individuelle minimale Reaktionszeit zu normieren.

Mithilfe der Normierungen werden die interpersonellen Unterschiede der individuellen Reaktionszeiten eliminiert.

Anhand von Bild 7-1 ist zu sehen, dass sich die gemittelte Reaktionszeit jedes Probanden bei hohen Kontraststufen der in Bild 7-3 gezeigten minimalen Reaktionszeit $t_{\text{Reaktion,min}}$ nähern. Zur Bestimmung der individuellen minimalen Reaktionszeit sind die Zeiten eindeutig überschwelliger Kontraststufen zu nutzen. Daher werden zur Bestimmung der minimalen Reaktionszeit die letzten fünf dargebotenen Kontraststufen für jede Situation herangezogen. Die relativen individuellen Normierungswerte sind mittels Boxplots in Bild 7-3 situationsspezifisch dargestellt.

Da es sich um eine reine Vergleichsstudie zwischen Personengruppen handelt, gibt es keine Bezugssi-

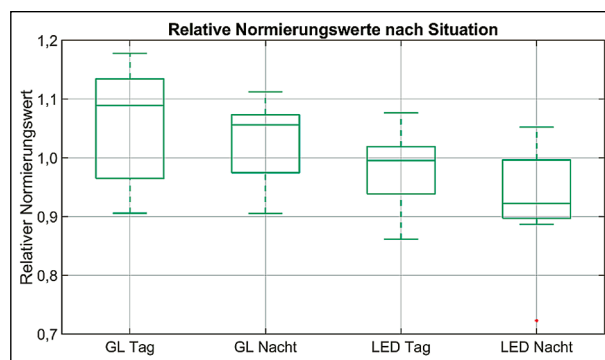


Bild 7-3 Relative Normierungswerte der fünf höchsten Kontraststufen nach Situationen getrennt. Die situationspezifischen Mittelwerte werden durch den Probandenmittelwert geteilt.

uation. Folglich werden die Ergebnisse der Situationen untereinander verglichen und dahingehend geprüft, ob es eine bevorzugte Situation gibt. Denkbar wäre eine geringe Streubreite im Vergleich zu den anderen Situationen.

Die interpersonellen Unterschiede sind dann gering, wenn auch die Streuung, also der Interquartilsabstand, und die Spannweite des 1,5-fachen Interquartilsabstandes der ermittelten minimalen Reaktionszeit möglichst gering sind. Gemäß den Ergebnissen aus Bild 7-3 ist der Interquartilsabstand für die Situation LED Tag am kleinsten und für Situation Glühlampe Tag am größten. In Bezug auf die Spannweite der 1,5-fachen Interquartilsabstände zeigt sich hingegen bei Situation Glühlampe Tag der größte und bei LED Nacht der kleinste Wert, wobei nur in der Situation LED Nacht ein extremer Ausreißer vorliegt. Daher liefert dieses Kriterium kein eindeutiges Ergebnis zur Wahl der Referenzsituation.

Möglich ist auch eine Extremsituation als Referenz auszuwählen. Damit gemeint ist eine Situation, die im Vergleich zu den anderen Situationen entweder deutlich geringere oder längere Reaktionszeiten und gleichzeitig vergleichsweise kleine Interquartilsabstände und bestenfalls keine Ausreißer aufweist. Anhand von Bild 7-3 zeigt sich, dass der Median der normierten Reaktionszeiten für die Situation LED Nacht am geringsten und der Median der normierten Reaktionszeiten für die Situation Glühlampe Tag am höchsten ist. Unter Berücksichtigung der Interquartilsabstände und Anzahl der Ausreißer ergibt sich kein eindeutiges Ergebnis bezüglich der Wahl der Referenzsituation.

Aus diesen Gründen wird im Rahmen dieser Studie auf eine Referenzsituation verzichtet und daher die individuellen Reaktionszeiten der letzten

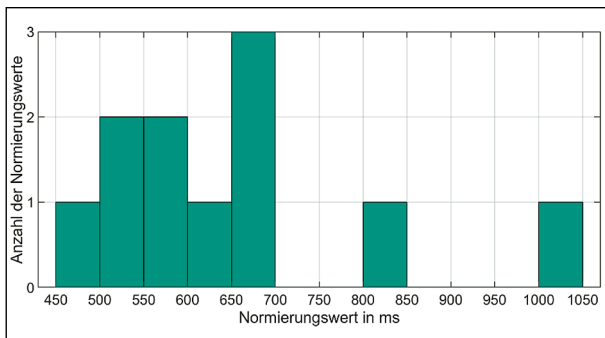


Bild 7-4 Histogramm der Anzahl der Normierungswerte in 50 ms Intervallen

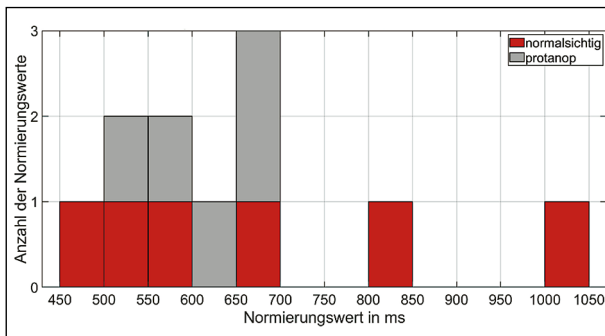


Bild 7-5 Histogramm der Anzahl eingeteilter Normierungswerte in 50 ms Intervallen

fünf Kontraststufen aller Situationen als Normierungswert genutzt. Vorteilhaft ist, dass sich die Robustheit der Normierungswerte gegen Ausreißer erhöht und relative Unterschiede zwischen den Situationen besser herausgearbeitet werden können.

Die Verteilung der Normierungswerte aller Probanden ist in Bild 7-4 dargestellt. Das Histogramm zeigt die Anzahl der Normierungswerte in 50 ms breiten Intervallen. Die Ergebnisse der ermittelten normierten Reaktionszeiten decken sich mit den Ergebnissen von KLEBELSBERG (KLEBELSBERG 1982), der zu erwartende Reaktionszeit von 400 ms und 800 ms angibt. Lediglich zwei Normierungswerte weichen von der Gruppe zwischen 450 ms und 700 ms ab.

Um ausschließen zu können, dass zwischen der protanopen und normalsichtigen Probandengruppe Unterschiede der normierten Reaktionszeiten vorliegen, wird dieser Aspekt näher untersucht. Unterschiede liegen dann vor, wenn eine Häufung der ermittelten Normierungswerte in Abhängigkeit der Probandengruppe aufgezeigt werden kann. Sollte anhand der Untersuchung keine eindeutige Trennung der gruppenspezifischen Normierungswertenmöglich sein, liegen keine Unterschiede der normierten Reaktionszeiten beider Probandengruppen vor. Wie in Bild 7-5 zu erkennen ist, zeigt

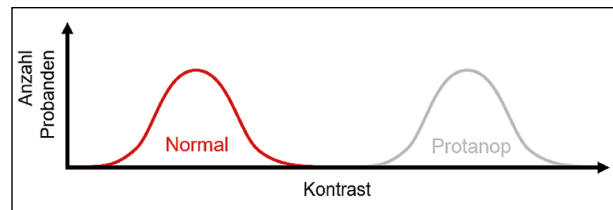


Bild 7-6 Qualitative Darstellung der vermuteten Verteilung der Probandenschwellen über dem Kontrast

sich keine direkte Unterscheidbarkeit zwischen den Gruppen. Die beiden abweichenden Werte sind normalsichtigen Probanden zuzuordnen.

7.4 Vorgehensweise bei der Auswertung der Messdaten

7.4.1 Trennbarkeit zwischen protanopen und normalsichtigen Probanden

Aufgrund des fehlenden L-Zapfens verfügen protanope Probanden mutmaßlich über eine reduzierte Helligkeitswahrnehmung insbesondere für die Farbe Rot. Bezogen auf die durchgeführte Studie bedeutet das, dass ein protanoper Proband zur Wahrnehmung der Bremsleuchte im Vergleich zu Probanden mit normalen Sehvermögen einen vermutlich höheren Kontrast benötigt. Sofern ein Einfluss einer vorliegenden Protanopie auf die Wahrnehmung der Bremsleuchte vorliegt, müsste sich dieser Aspekt anhand der aufgenommenen Daten zeigen lassen.

Der Kontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchte, den protanope Probanden im Vergleich zu normalsichtigen Probanden benötigen, um die Bremsleuchte mit der gleichen Wahrscheinlichkeit wahrnehmen zu können, müsste merklich höher sein. Eine Unterscheidung zwischen protanopen und normalsichtigen Probanden ist dann möglich, wenn die entsprechenden Probandengruppen eine Häufung um unterschiedliche Kontraststufen aufweisen. Dieser Zusammenhang ist qualitativ in Bild 7-6 dargestellt. Je weiter die beiden dargestellten Verteilungen auseinanderliegen, desto größer der Effekt. Überlagern sich die Verteilungen, kann von einem vergleichbaren Sehvermögen in Bezug auf die Erkennbarkeit von Bremsleuchten ausgegangen werden.

7.4.2 Bestimmung der Kontrastschwelle

Die Kontrastschwelle repräsentiert den Kontrast, der notwendig ist, die Bremsleuchten mit einer zu-

vor festgelegten Wahrscheinlichkeit wahrnehmen zu können. Gemäß der zugrundeliegenden psychometrischen Funktion wird in der Psychophysik zur Bestimmung der Absolutschwelle eine Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 50 % angenommen. Das heißt, dass der dargebotene Reiz bei dieser Schwelle in 50 % der Fälle erkannt wird und in 50 % der Fälle nicht.

In Bezug auf den hier zugrundeliegenden sicherheitsrelevanten Anwendungsfall im Straßenverkehr ist eine Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 50 % kritisch zu hinterfragen. Das Heranziehen dieses Schwellwertes würde bedeuten, dass die dargebotene Bremsleuchte in 50 % der Fälle erkannt und in 50 % der Fälle nicht erkannt werden würde. Die Bremsleuchte sollte im Hinblick auf die Sicherheitsrelevanz der Fragestellung jedoch so ausgelegt sein, dass es von allen Verkehrsteilnehmern sicher wahrgenommen werden kann. Ist das nicht der Fall, geht damit ein Sicherheitsrisiko einher, das vermieden werden muss. Aus diesem Grund ist die Wahrnehmungswahrscheinlichkeit für da sicherheitsrelevante Bremsleuchte möglichst hoch zu wählen.

Am konservativsten wäre es, die Schwelle auf 100 % zu setzen. Realistisch ist diese Schwelle allerdings nicht, da aufgrund von Unaufmerksamkeit falsche beziehungsweise keine Probandenreaktionen auftreten können. So ist jeder Messwert neben der unabhängigen Variablen, hier der Kontraststufe, auch durch Störgrößen beeinflusst. Störparameter sind möglichst zu vermeiden, bei Probandenstudien allerdings nie vollständig auszuschließen. Jede ermittelte Erkennungswahrscheinlichkeit ist folglich mit einer Verpasserwahrscheinlichkeit überlagert. Die Gründe für auftretende Verpasser können vielseitig sein. Es können beispielsweise technische Fehler des Aufbaus oder eine Unaufmerksamkeit des Probanden auftreten.

Um diesem Aspekt gerecht zu werden und die Schwelle nicht unverhältnismäßig hoch zu wählen, wird im Rahmen dieser Studie die 80 %-Schwelle herangezogen. Unter Berücksichtigung des verwendeten Versuchskonzepts ist damit schlechtestenfalls ein Verpasser je Stufe und Situation für die jeweils dreifach dargebotene Reizstärke zulässig. Um dem sicherheitskritischen Aspekt der Fragestellung Rechnung zu tragen, ist es denkbar, die ermittelten Schwellenkontraste im Nachgang mit einem weiteren Offset zu beaufschlagen. Dies wird in Kapitel 9 diskutiert. Zusätzlich wird die 50 %-Schwelle gemäß der in der Literatur üblichen Definition der Absolutschwelle betrachtet.

Die Bestimmung der personenbezogenen Kontrastschwelle zur Untersuchung der ersten Nullhypothese erfolgt durch die Berechnung der Wahrnehmungswahrscheinlichkeiten jeder Kontraststufe über alle Situationen. Liegt die Reaktionszeit zur Wahrnehmung des Bremssignals bei mehr als zwei Sekunden, wird dies als „Nicht Erkannt“ gewertet. Die relative Wahrnehmungswahrscheinlichkeit h_i der wahrgenommenen Bremsleuchte je Kontraststufe wird wie folgt bestimmt:

$$h_i = \frac{n_{i \text{ erkannt}}}{N_i} \quad \text{Gl. 7-1}$$

$n_{i \text{ erkannt}}$ entspricht der Anzahl der erkannten Bremsleuchte und N_i der gesamten Anzahl an dargebotenen Bremsleuchten einer Kontraststufe. Diese Wahrscheinlichkeiten sind exemplarisch für den zufällig ausgewählten Probanden Nummer 6 in Bild 7-7 dargestellt.

Zur Bestimmung des Schwellenkontrastes ist es, wie Bild 7-7 zeigt, notwendig, ein Kriterium festzulegen. Bei der Wahl des Kriteriums wird aufgrund der Sicherheitsrelevanz konservativ und nur auf Basis der dargebotenen Kontraststufen vorgegangen. Zur Bestimmung des Schwellenkontrastes wird da-

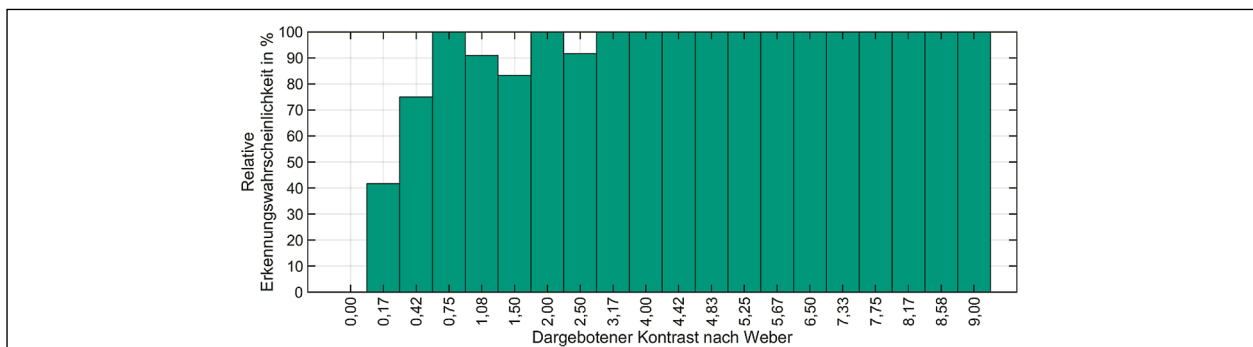


Bild 7-7 Relative Erkennungswahrscheinlichkeiten jeder dargebotenen Kontraststufe über KW, den ermittelten Weber-Kontrast, eines beliebig ausgewählten Probanden (Proband 6)

her festgelegt, dass die festgelegte Wahrnehmungswahrscheinlichkeit für höhere Kontraststufen nicht unterschritten werden darf. Folglich ist als Schwellenkontrast der höchste Kontrast zu wählen, bei welchem die festgelegte Wahrnehmungswahrscheinlichkeit nicht unterschritten wird.

7.4.3 Unterscheidung zwischen den Tag- und Nachtsituationen

Die Unterschiedsempfindlichkeit bei der Wahrnehmung von Lichtsignalen ist abhängig von der Umfeldhelligkeit (ECKERT 1993). Aus diesem Grund werden die Kontraststufen beider Technologien, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, sowohl in einer Tag- wie auch Nachtsituation dargeboten.

Daher wird im Folgenden zunächst untersucht, ob ein Unterschied zwischen den beiden Situationen besteht. Viel wichtiger ist jedoch zu untersuchen, ob Unterschiede innerhalb dieser Situationen zwischen den beiden Probandengruppen bestehen. Ist das der Fall, sind die Tag- und Nachtsituationen für die weitere Untersuchung immer getrennt voneinander zu betrachten.

Bild 7-8 bis Bild 7-11 zeigen die Histogramme für die 50 %- und 80 %-Schwelle unterteilt nach den Si-

tuationen Tag und Nacht. Der Vollständigkeit halber sind auch die Probandengruppen berücksichtigt.

Anhand dieser Histogramme lässt sich feststellen, dass nur geringe Unterschiede der Kontrastschwellen bestehen. Dies gilt gleichermaßen für die normalsichtigen wie auch protanopen Probanden. Alle Kontrastschwellen, sowohl die für die 50 % wie auch die 80 %-Schwelle, liegen aber unter dem gesetzlichen Mindestkontrast von einem $K_W = 2,5$. Aus diesem Grund kann geschlossen werden, dass die Unterteilung zwischen den Situationen Tag und Nacht für die weitere Auswertung nicht notwendig ist. Darüber hinaus hat das Vorhandensein einer Protanopie keinen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmbarkeitsschwelle einer Bremsleuchte in den beiden Situationen.

7.5 Überprüfung der Nullhypothesen

7.5.1 Kontrastschwelle

In diesem Kapitel soll die Nullhypothese $H_{0,1}$ untersucht werden. Die Nullhypothese $H_{0,1}$ lautet:

Es gibt in Bezug auf die ermittelten Kontrastschwellen des Bremssignals von Bremsleuchten keinen

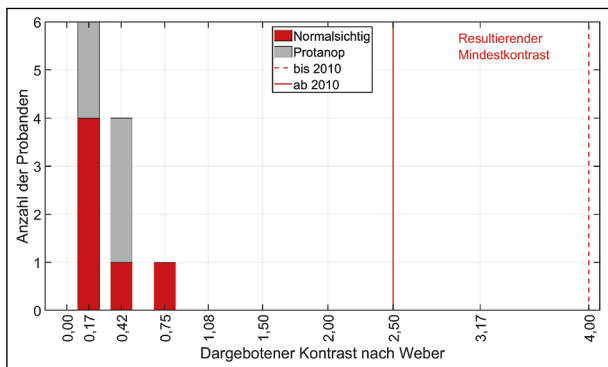


Bild 7-8 Histogramm 50 % Nacht nach Probandengruppen sortiert

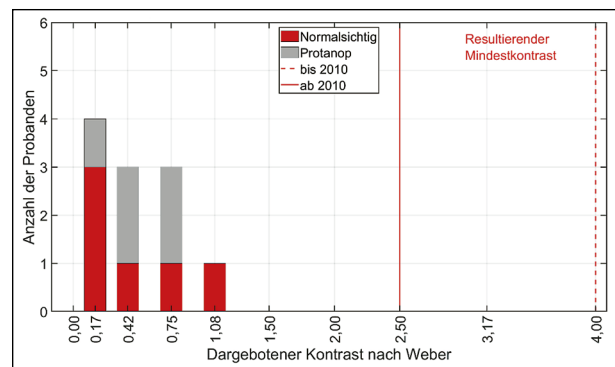


Bild 7-10 Histogramm 80 % Nacht nach Probandengruppen sortiert

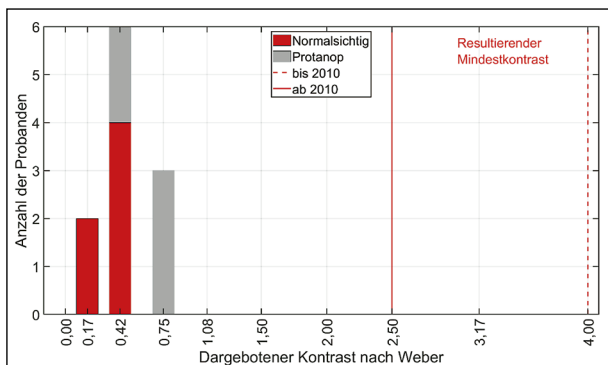


Bild 7-9 Histogramm 50 % Tag nach Probandengruppen sortiert

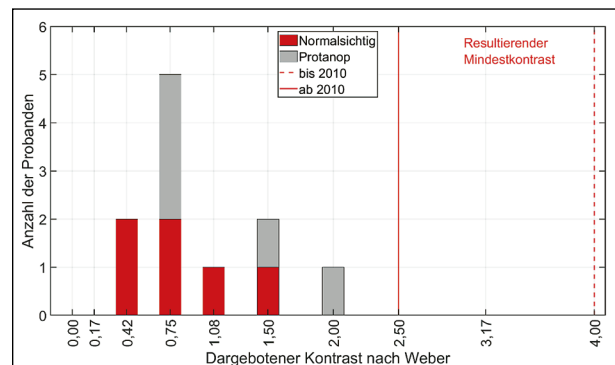


Bild 7-11 Histogramm 80 % Tag nach Probandengruppen sortiert

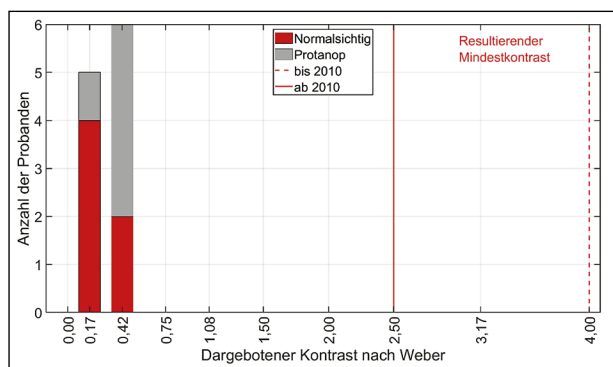


Bild 7-12 Histogramm 50 %-Schwelle nach Probandengruppen sortiert kumuliert über alle Situationen

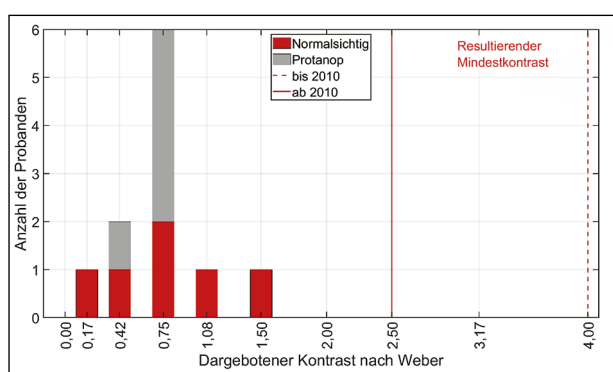


Bild 7-13 Histogramm 80 %-Schwelle nach Probandengruppen sortiert kumuliert über alle Situationen

Unterschied zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Sehvermögen.

Zur Untersuchung der ersten Nullhypothese werden die ermittelten Schwellenkontraste in einem Histogramm, unterteilt in die beiden Probandengruppen, aufgetragen. Die Ergebnisse sind in Bild 7-12 und Bild 7-13 zu sehen.

Das Histogramm für die 50 %-Schwelle zeigt, dass sich beide Probandengruppen auf die Weberkontraste 0,17 und 0,42 verteilen. Beide Werte liegen unter den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestkontrasten von 2,5 und 4,0. Eine Trennung der beiden Probandengruppen, wie dies in Bild 7-6 gezeigt, die notwendig wäre, um einen Einfluss der Protanopie auf die Wahrnehmbarkeit von Bremsleuchten nachzuweisen, ist folglich nicht möglich.

Das Histogramm für die 80 %-Schwelle zeigt, dass sich die Probandengruppen auch für diesen Fall gut durchmischen und sich die bestimmten Schwellenkontraste auf Weberkontraste zwischen 0,42 und 1,50 verteilen. Auch hier liegen die notwendigen Kontraste zur Wahrnehmung der Bremsleuchten unter den gesetzlich möglichen Mindestkontrasten. Eine Trennung der beiden Probandengruppen ist auch in diesem Fall nicht möglich.

Anhand der hier aufgezeigten Ergebnisse muss die erste formulierte Nullhypothese folglich angenommen werden. Das bedeutet: Es gibt in Bezug auf die ermittelten Kontrastschwellen des Bremsignals von Bremsleuchten keinen Unterschied zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Sehvermögen.

Ein Einfluss der Protanopie auf die Wahrnehmbarkeit von roten Bremsleuchten kann auf Basis der hier betrachteten Ergebnisse nicht nachgewiesen werden.

7.5.2 Lichtquellentechnologie

In diesem Kapitel soll die zweite Nullhypothese $H_{0,2}$ untersucht werden. Die Nullhypothese $H_{0,2}$ lautet:

Die verwendeten Technologien von Glühlampe und LED zeigen keinen Unterschied in Bezug auf die Kontrastschwellen zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

Zur Untersuchung dieser Hypothese werden die Daten technologiespezifisch geteilt und die 50 %- und 80 %-Schwellen betrachtet. Die zugehörigen Histogramme sind in Bild 7-14 bis Bild 7-17 dargestellt.

Anhand von Bild 7-14 wird ersichtlich, dass sich die ermittelten Schwellenkontraste aller Probanden für die Glühlampenversion von 0,17 bis 0,75 verteilen. Bild 7-15 zeigt das Histogramm der ermittelten Schwellenkontraste für die LED-Variante der Bremsleuchte. Die ermittelten Schwellenkontraste liegen bei 0,17 und 0,42. Eine klare Trennung beider Probandengruppen in Abhängigkeit vom ermittelten Schwellenkontrast ist in beiden Fällen nicht möglich.

Aus Bild 7-16 und Bild 7-17 kann abgelesen werden, dass die ermittelten Schwellenkontraste für die konservativere 80 %-Schwelle aller Probanden für die Glühlampenversion zwischen 0,17 bis 2,00 und für die LED-Version zwischen 0,17 und 1,08 liegen. Der Bereich der ermittelten Schwellenkontraste ist für die LED-Version kleiner.

Auch die technologiespezifische Betrachtung zeigt, dass keine Trennbarkeit hinsichtlich der ermittelten Schwellenkontraste zwischen den beiden Probandengruppen möglich ist. Die ermittelten Schwellenkontraste der protanopen wie auch der normalsichtigen Probanden verteilen sich ähnlich über die angegebenen Bereiche. Zudem liegen die ermittelten

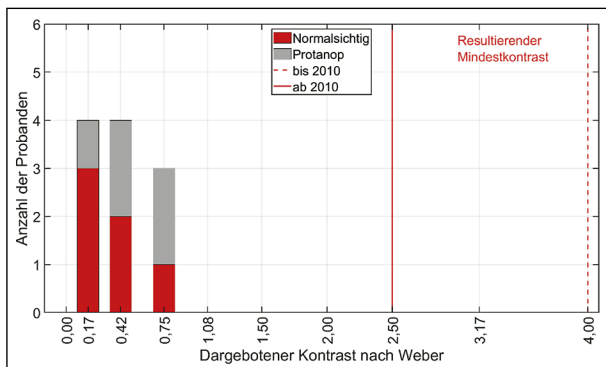


Bild 7-14 Histogramm 50 % Glühlampe nach Probandengruppen sortiert

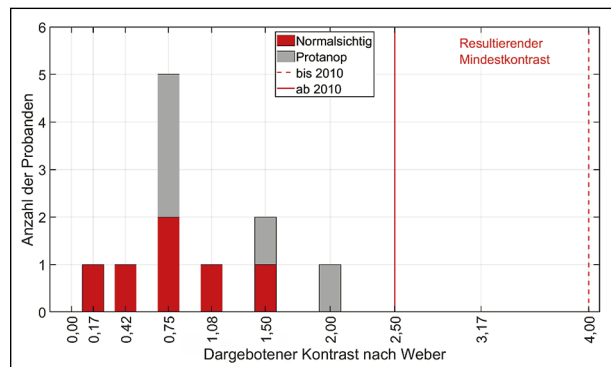


Bild 7-16 Histogramm 80 % Glühlampe nach Probandengruppen sortiert

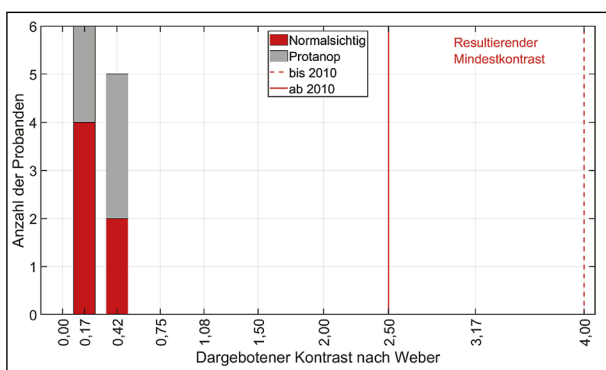


Bild 7-15 Histogramm 50 % LED nach Probandengruppen sortiert

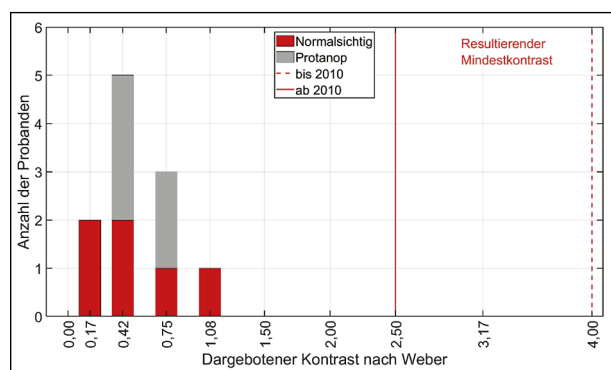


Bild 7-17 Histogramm 80 % LED nach Probandengruppen sortiert

Schwellenkontraste für die 50 %- und die 80 %-Schwelle in allen betrachteten Fällen unterhalb des gesetzlich möglichen Mindestkontrastes.

Daher ist auch die zweite Nullhypothese anzunehmen. Das heißt:

Die verwendeten Technologien von Glühlampe und LED zeigen keinen Unterschied in Bezug auf die Kontrastschwellen zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

Ein Einfluss der Protanopie bezüglich der verwendeten Lichtquellentechnologie auf die Wahrnehmbarkeit von Bremsleuchten kann auf Basis der hier betrachtenden Ergebnisse nicht erkannt werden.

7.5.3 Reaktionszeiten

In diesem Kapitel soll die dritte Nullhypothese $H_{0,3}$ untersucht werden. Die Nullhypothese $H_{0,3}$ lautet:

Bei separater Betrachtung von Glühlampe und LED gibt es jeweils keinen Unterschied der Reaktionszeit der ermittelten Kontraste zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

Sofern die vorliegende Protanopie einen Einfluss auf die Reaktionszeit hat, sollte sich das funktionell in Abhängigkeit der präsentierten Kontraststufe widerspiegeln. Aufgrund des prognostizierten Wahrnehmungsdefizites ist davon auszugehen, dass sich die Kontrastschwelle für protanope Personen zu höheren Kontrasten verschiebt. Auf Bild 7-18 bezogen bedeutet das, dass sich der Bereich von „Nicht erkannt“ vergrößert und in Richtung höherer Kontraste verschiebt. Reaktionszeiten können in diesem Bereich nicht ermittelt werden, da die Bremsleuchte vom Probanden nicht wahrgenommen wird und folglich auch keine Reaktion erfolgt. Insgesamt verschiebt sich dadurch die komplette Funktion im Vergleich zu denen von Normalsichtigen hin zu höheren Kontraststufen.

Das wird dazu führen, dass sich der Bereich „Verzögert“, also der Bereich in welchem der Schwellenkontrast zu erwarten ist, für protanope Personen hin zu höheren Kontraststufen vergrößert. Dies wiederum hat einen Einfluss auf die Reaktionszeit, die in diesem Bereich größer sein sollte als bei Probanden ohne diagnostizierte Protanopie. Ist die Reizstärke bzw. ist der Kontrast groß genug, sodass der Reiz sicher erkannt werden kann, sollten sich keine Unterschiede der ermittelten Reaktionszeiten zwi-

schen Protanopen und Normalsichtigen feststellen lassen. Dies konnte bereits in Kapitel 7.3 bestätigt werden.

Bisher sind keine merklichen Unterschiede hinsichtlich der dargebotenen Kontraststufe nachgewiesen worden. Gleiches gilt auch für die Unterscheidung zwischen den beiden Technologien Glühlampe und LED. Aus diesem Grund werden die Messwerte beider Technologien im Folgenden nicht weiter unterschieden.

Bild 7-19 und Bild 7-20 zeigen die Boxplots der ermittelten Reaktionszeiten je dargebotener Kontraststufe für beide Probandengruppen. Wie vermutet, sind die ermittelten Reaktionszeiten für die niedrigen Kontraststufen höher als für die höheren Kontraststufen. Dies gilt gleichermaßen für beide Probandengruppen. Anhand dieser Bilder lassen sich daher keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Probandengruppen aufzeigen.

Welche Kontraststufe konkret zur weiteren Untersuchung herangezogen werden soll, ist in der Nullhy-

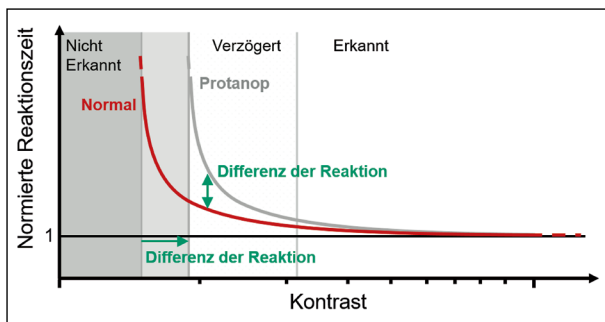


Bild 7-18 Schema des erwarteten normierten Reaktionsverhaltens über dem Kontrast getrennt nach medizinischer Einteilung. Durch die Annahme der höheren Kontrastschwelle ergeben sich längere Reaktionszeiten in nicht stark überschwelligem Kontraststufen.

pothese nicht eindeutig beschrieben worden. Um den Bezug zur sicherheitskritischen Fragestellung herzustellen, ist es sinnvoll, die Veränderung der Reaktionszeit durch eine Protanopie auf die gesetzlich minimal mögliche zu bewertende Kontraststufe von 2,5 gemäß der UN-Regelung Nr. 7 von 2010 zu betrachten. Kann nachgewiesen werden, dass die ermittelten Reaktionszeiten bei dieser Kontraststufe für beide Probandengruppen vergleichbar sind, heißt das, dass beide Gruppen die Bremsleuchte in diesem Fall gleich gut erkannt haben. Ist die Reaktionszeit für diese Kontraststufe vergleichbar mit den Reaktionszeiten der höheren und gleichermaßen gut sichtbaren Kontraststufen, kann ein Gefährdungspotenzial aufgrund einer diagnostizierten Protanopie hier nicht belegt werden.

Der für die Kontraststufe von 2,5 berechnete Mittelwert der Reaktionszeit für die normalsichtige Probandengruppe beträgt 1,09 s mit einer Standardabweichung von 0,07 s. Für die protanope Probandengruppe beträgt der Mittelwert der Reaktionszeit 1,05 s mit einer Standardabweichung von 0,08 s. Die mittleren Reaktionszeiten der fünf höchsten, gut sichtbaren Kontraststufen liegen für normalsichtige Probanden zwischen 0,98 s und 1,05 s. Es lassen sich folglich keine merklichen Unterschiede feststellen. Ein Einfluss der Protanopie auf die Reaktionszeit bei dieser kritischen Kontraststufe ist somit nicht belegbar.

Daher ist auch die dritte Nullhypothese für diesen Anwendungsfall der gesetzlich geregelten Bremsleuchten anzunehmen. Das heißt:

Bei separater Betrachtung von Glühlampe und LED ist kein Unterschied der Reaktionszeit der ermittelten Kontraste zwischen protanopen Probanden und

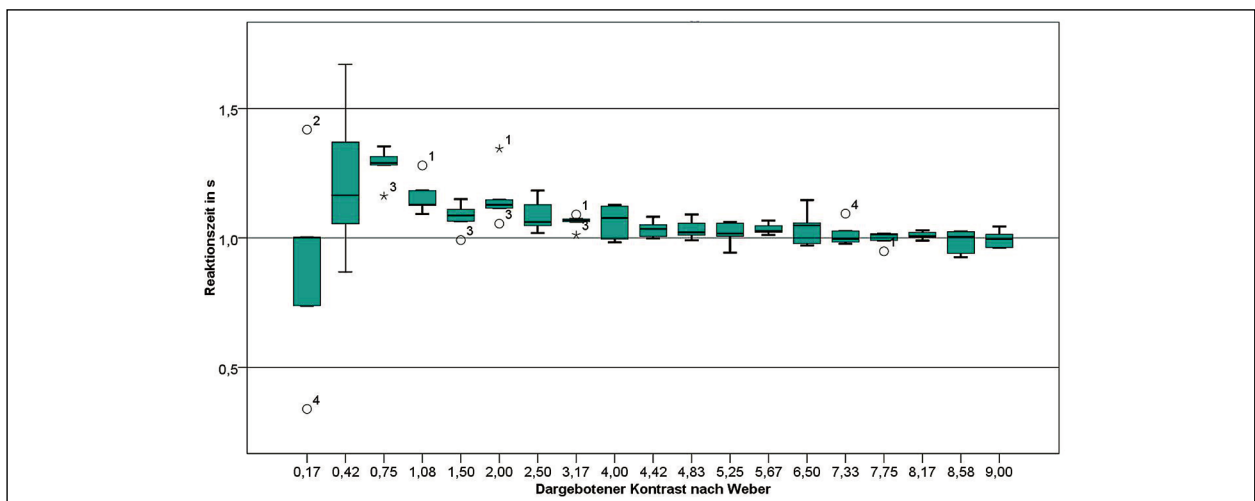


Bild 7-19 Boxplots der Reaktionszeiten für die normalsichtige Probandengruppe in Abhängigkeit des dargebotenen Weberkontrastes

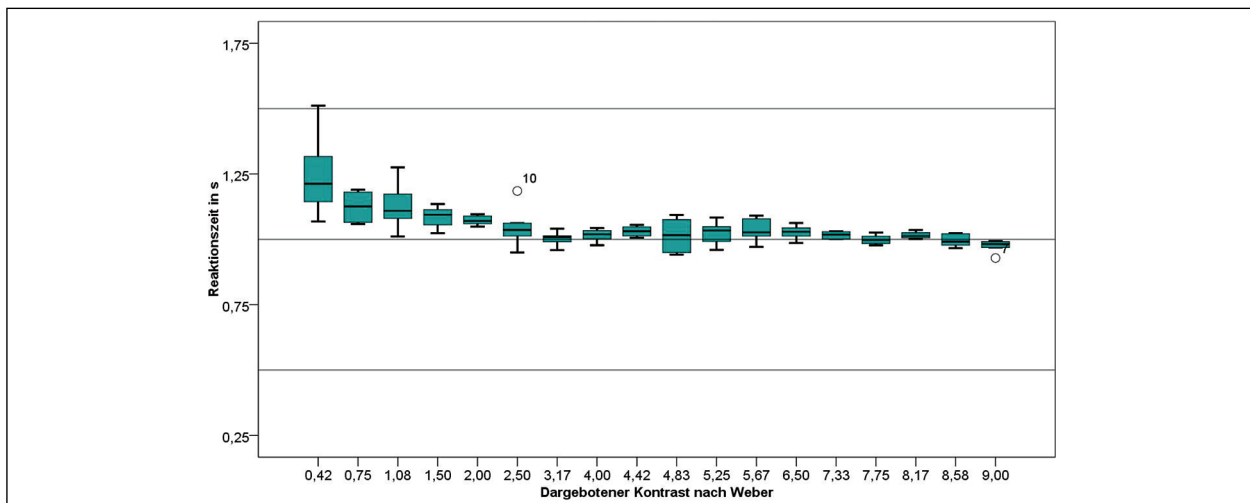


Bild 7-20 Boxplots der Reaktionszeiten für die protanope Probandengruppe in Abhängigkeit des dargebotenen Weberkontrastes

Probanden mit normalem Farbsehvermögen zu belegen.

Ein Einfluss der Protanopie bezüglich der Reaktionszeit der ermittelten Kontraste kann auf Basis der hier betrachtenden Ergebnisse nicht erkannt werden.

8 Diskussion

8.1 Augenärztliche Untersuchungen

Im Rahmen der Untersuchung mit dem HMC-Anomaloskop wurde gemäß den Anforderungen bezüglich des Farbsehvermögens beim Fahrerlaubniserwerb bei den Fahrzeugklassen für Berufskraftfahrer der Anomaliequotient bestimmt. Ist der ermittelte Anomaliequotient kleiner als 0,5, liegt eine Protanopie oder ausgeprägte Protanomalie vor, die bis zum 30.06.2011 das Nichterfüllen der Anforderungen für die Fahrzeugklassen D1, D1E, D, DE, FzF bedeutete.

Aufgrund der methodischen Vorgehensweise zur Bestimmung der Parameter, die zur Berechnung des Anomaliequotienten notwendig sind, ergeben sich für jeden Probanden immer zwei Anomaliequotienten. Dies liegt daran, dass der Proband die Aufgabe hat, innerhalb des Prüffeldes das Mischfeld gleich dem Vergleichsfeld einzustellen. Das bedeutet, dass die beiden Felder so aufeinander abzustimmen sind, dass sie in Farbe und Helligkeit gleich aussehen. Daher ergeben sich im Rahmen der Untersuchung zwei Parameterdimensionen, die sich in zwei Anomaliequotienten widerspiegeln.

Alle ermittelten Anomaliequotienten sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse wird deutlich, dass ein Anomaliequotient der Probanden der Gruppe Protanop im Bereich von 0 bis 0,7 liegt und der zweite Anomaliequotient mindestens größer als 300 beziehungsweise ∞ ist. Entsprechend der Definition des Anomaliequotienten nach KRASTEL (KRASTEL et al. 2009) liegt der Anomaliequotient für Protanomale zwischen 0 und 0,7 und der für Deuteranomale über 1,4 bis ∞ . Die ermittelten Anomaliequotienten erscheinen folglich widersprüchlich beziehungsweise uneindeutig. Das liegt daran, dass in der Formel (5-1) zur Bestimmung des Anomaliequotienten die Korrelation von Farbe und Helligkeit unberücksichtigt lässt. Insbesondere für Personen mit einer Farbfehlsichtigkeit ändert sich aufgrund des stark eingeschränkten beziehungsweise fehlenden Rezeptors nicht nur Farbwarnnehmung, sondern auch der Helligkeitseindruck. Das bedeutet, dass der Abgleich zwischen Mischfeld und Vergleichsfeld bei diesen Personen nur dann gelingen kann, wenn auch die Helligkeit des Mischfeldes variiert wird. Dies wird bei der Befundung der Farbfehlsichtigkeit mit dem Anomaloskop methodisch korrekt umgesetzt und kann im Pitt-Diagramm grafisch dargestellt werden, ohne dass weder die Dimension Farbe noch die Dimension Helligkeit verloren geht.

Der Anomaliequotient alleine kann dies nicht leisten, da er die Helligkeit des Mischlichtes, wie auch KRASTEL (KRASTEL 2006) feststellt, nicht berücksichtigt. Auch ist es mathematisch nicht möglich, einen mehrdimensionalen Zusammenhang auf eine einzige Zahl zu reduzieren. Aus diesem Grund ist das Heranziehen des Anomaliequotienten als ein-

zigen Grenzwert zur Eignungsbeurteilung besonders für Personen mit einer stark ausgeprägten Anomalie oder Anopie ungeeignet.

Während alle Protanopie-Patienten durch ein einheitliches, klassisches Befundergebnis am HMC-Anomaloskop gekennzeichnet sind, zeigen sich in Bezug auf die Rot/weiß-Dissoziations-Perimetrie und die damit verbundene Maßzahl „red/white ratio“ (RWR) deutliche Unterschiede.

Während für reizstarke Marken generell ein Decken-Effekt (ceiling effect) aufgetreten ist, war für die in diese Studien eingeschlossenen Protanopen (mit einer Ausnahme: PRO-22) eine deutliche Reduktion der RWR, also ein deutlicher Einbruch der horizontalen Gesichtsfeldausdehnung für reizschwache rote Reize gegenüber reizschwachen weißen Reizen zu verzeichnen.

Von besonderer Bedeutung erscheint die Tatsache, dass bei einem Protanopie-Patienten (PRO-22) der zuvor geschilderte Empfindlichkeitseinbruch nicht zu beobachten war. Das Fixationsverhalten dieses Patienten wurde genau kontrolliert, sodass Fixationsabweichungen ausgeschlossen werden können. Der Effekt konnte zudem bei einer Neueinbestellung des Patienten reproduziert werden. Bei dieser Gelegenheit zeigt sich zudem selbst für noch reizschwächere rote Prüfmarken keine deutliche Gesichtsfeldeinschränkung gegenüber dem weißen Pendant.

Erwähnenswert erscheint zudem, dass ein ähnlicher Befund, allerdings unter Verwendung des (noch weiter im langwelligen Bereich durchlässigen) Filterglases RG662, bei einem weiteren Patienten mit einer am Anomaloskop gesicherten Protanopie (PRO-01) beobachtet wird. Bedauerlicherweise konnte bei diesem Patienten die Untersuchungen wegen akuter familiärer Probleme zum damaligen Zeitpunkt nicht mit dem ansonsten verwendeten Rotfilterglas (RG610) komplettiert werden.

Dieses abweichende Verhalten mit fehlender RWR-Reduktion bei Verwendung reizschwacher Testmarken dieser beiden Patienten (PRO-01 und PRO-22) könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei dieser Subgruppe die Rotzapfen-Funktionsbeeinträchtigung bzw. der Rotzapfen-Ausfall auf den unmittelbar (peri-)fovealen Bereich beschränkt ist. Dies würde erklären, dass auch bei dieser Gruppe der Anomaloskop-Befund ebenso pathologisch ist wie bei den anderen Protanopen, weil dieses Gerät mit

seinen beiden halbkreisförmigen Test- und Vergleichslichtfeldern ausschließlich den zentralen 4°-Bereich (Sehwinkel) erfasst.

Diese Fragestellung könnte ggf. durch eine zapfen-selektive Mikroperimetrie am „adaptive optics Scanning Laser Ophthalmoscope“ (aoSLO) für die beiden postulierten verschiedenen Protanopie-Subtypen geklärt werden (SABESAN et al. 2016, TUTEN et al. 2017).

8.2 Selbsteinschätzung Farbfehlsichtiger

Interessant aus Literatur und dieser Studie sind die Ergebnisse der Selbsteinschätzung der protanopen zu normalsichtigen Probanden.

Die protanopen Personen sind sich ihrer Farbfehlsichtigkeit und deren Einfluss auf das Sehvermögen bewusst, wie in Bild 6-3 ersichtlich ist. Diese deutliche Einschränkung durch die Farbfehlsichtigkeit führt hingegen zu keiner subjektiven Einschränkung der allgemeinen Sehleistung der protanopen Probanden im Vergleich zu den Normalsichtigen, wie Bild 6-3 belegt. Dies lässt den Schluss zu, dass protanope Personen der Meinung sind, aufgrund der eingeschränkten Farbwahrnehmung allgemeine Sehaufgaben ohne signifikante Einschränkungen trotzdem erfüllen zu können. Somit ist es auch schlüssig, dass Protanope keine Einschränkungen bei der Teilnahme am Straßenverkehr für sich erkennen. Diese Selbsteinschätzung der uneingeschränkten Fahreignung korrespondiert mit der in dieser Studie nicht nachweisbaren Einschränkung der für die Fahreignung relevanten Sehleistung.

8.3 Lichttechnische Studie im Vergleich zu anderen Studien aus der Literatur

Die Arbeiten von COLE (COLE 2016) und VERRIEST (VERRIEST et al. 1980) lassen die Vermutung zu, dass eine Unterscheidung zwischen normalsichtigen und protanopen Probanden möglich ist. Dieser Unterschied würde sich erwartungsgemäß dahingehend äußern, dass die ermittelten Kontrastschwellen der protanopen Probanden höher liegen als die der normalsichtigen Probanden.

Im Rahmen dieser Studie kann allerdings kein solcher Unterschied festgestellt werden. Ein möglicher Grund könnte sein, dass die beiden Autoren einerseits die Erkennbarkeitsentfernung als Maß der Wahrnehmbarkeit herangezogen haben, andererseits die lichttechnischen Parameter der Lichtquellen und die Umgebung der Studien von COLE und VERRIEST zu dieser Studie nicht vergleichbar sind. Das macht es schwer möglich, die Studien direkt miteinander zu vergleichen. Im Gegensatz zu COLE (COLE 2016) kommt VERRIEST (VERRIEST et al. 1980) zu dem Schluss, dass protanope Personen prinzipiell nicht vom Straßenverkehr auszuschließen sind.

ATCHISON et al. (2003) untersucht den Einfluss einer Protanopie auf die Reaktionszeit auf Ampelsignalanlagen. Im Gegensatz zu der hier durchgeführten Studie konnte ATCHISON deutlich längere Reaktionszeiten bei protanopen Personen feststellen. Grund hierfür könnte sein, dass die Lichtstärken der dargestellten Ampelsignale bei rotem und grünem Licht 0,32 cd bis 0,64 cd und für gelbes Licht 0,96 cd bis 1,92 cd betragen. Damit liegen diese Lichtstärken teilweise deutlich unterhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Mindestlichtstärken für Bremsleuchten. In der Studie von ATCHISON liegen die gewählten Lichtstärken mutmaßlich näher im Schwellenbereich, sodass sich hier ein Einfluss auf die Reaktionszeit zeigt. Eine generelle Herabsetzung der im Rahmen dieser Studie dargebotenen Lichtstärken auf das Niveau der Atchison-Studie hätte es unter Umständen ermöglicht, Unterschiede zwischen den beiden Probandengruppen hinsichtlich der Kontrastwahrnehmung aufzuzeigen. Allerdings sind die Lichtstärken nicht mit realen Lichtstärken für Bremsleuchten vergleichbar und folglich nicht repräsentativ. Eine Aussage, ob die Bremsleuchten des vorausfahrenden Fahrzeugs für Protanope hell genug sind und diese sicher erkannt werden können, könnte auf dieser Basis nicht abgeleitet werden.

Anhand der ermittelten Daten innerhalb der durchgeführten Studie lässt dies den Schluss zu, dass die gesetzlich vorgeschriebenen Mindestlichtstärken für Bremsleuchten für normalsichtige und auch für protanope Probanden ausreichend sind.

8.4 Vergleich lichttechnischer Parameter

Die eingestellten lichttechnischen Parameter der Schluss- und Bremsleuchten werden nun mit denen, die für die ophthalmologische Untersuchung im Rahmen der Untersuchungen mit dem Perimeter verwendet werden, verglichen. Als Größe zur Einstellung der Lichtfunktionen in der experimentellen Studie wird die Lichtstärke I in cd verwendet.

Für die verwendeten Goldmann-Messmarken sind als Leuchtdichte L in cd/m^2 angegeben. Der Raumwinkel der verwendeten Goldmann-Marke III beträgt $25,7^\circ$, was im verwendeten Perimeter einer Fläche von 4 mm^2 entspricht. Die Sollleuchtdichte für die weiße Marke III4e ist standardmäßig $320 \text{ cd}/\text{m}^2$, die Leuchtdichte der dunkleren weißen Marke III1e beträgt $10 \text{ cd}/\text{m}^2$.

Die gemessenen Leuchtdichten für die weiße Goldmann-Marke III4e betragen $306,9 \text{ cd}/\text{m}^2$, für die angepasste rote Goldmann-Marke III4e $104,3 \text{ cd}/\text{m}^2$, für weiße Goldmann-Marke III1e $20,2 \text{ cd}/\text{m}^2$ und die entsprechende rote $12,8 \text{ cd}/\text{m}^2$. In diese Werte ist auch die Leuchtdichte des Hintergrundes, die sich auf der gesamten Oberfläche der Innenseite des Perimeters auf $10 \text{ cd}/\text{m}^2$ beläuft, inkludiert.

Um einen Vergleich der Werte des Perimeters und denen der Versuchsumgebung durchzuführen, werden die Leuchtdichten der Marken zunächst in Lichtstärken umgerechnet. Unter der Annahme eines homogen ausgeleuchteten Flecks und einer bedingt durch den Untergrund lambertschen Abstrahlcharakteristik, das heißt einer Abstrahlcharakteristik, die von einer idealen diffusen Reflexion ausgeht, erfolgt die Umrechnung in die Lichtstärke I_v anhand der vereinfachten Berechnungsvorschrift

$$I_v = A \cdot L_v \cdot \pi \quad \text{Gl. 8-1}$$

mit der Fläche A und den Leuchtdichten L_v der Messmarken. Die sich ergebenden Lichtstärken der jeweiligen Marken können in guter Näherung angenommen werden. Für die Goldmann-Marke III resultieren folgende Lichtstärken:

	Weiss	Rot
III 4e	$3,9 \cdot 10^{-3} \text{ cd}$	$1,3 \cdot 10^{-3} \text{ cd}$
III 1e	$0,25 \cdot 10^{-3} \text{ cd}$	$0,16 \cdot 10^{-3} \text{ cd}$

Tab. 8-1 Resultierende Lichtstärken aus Umrechnung der Leuchtdichten der Messmarken mit Goldmann-Eigenschaft

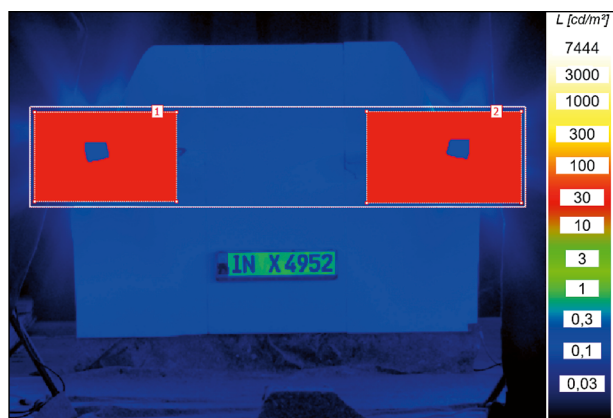


Bild 8-1 Leuchtdichteaufnahme des Schlusslichtes in Glühlampen-Ausführung bei 12 cd

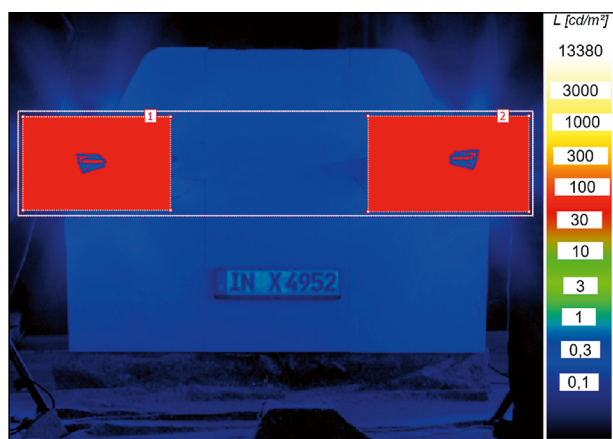


Bild 8-2 Leuchtdichteaufnahme des Schlusslichtes in LED-Ausführung bei 12 cd

Ein direkter Vergleich mit den gesetzlich minimalen Lichtstärken einer Schlussleuchte in Hauptabstrahlrichtung zeigt, dass diese um mindestens drei Zehnerpotenzen unter dem gesetzlich minimal zulässigen Wert von 4 cd für eine Schlussleuchte liegen.

Zusätzlich wird noch ein Vergleich auf Basis der Leuchtdichte gezogen. Hierzu werden die Leuchtdichteaufnahmen der Schlussleuchten hinsichtlich der auftretenden mittleren Leuchtdichten und der Ausdehnung der leuchtenden Fläche untersucht. Dazu werden die Aufnahmen der Schlussleuchte in Glühlampen- und LED-Ausführung in mesopischer Umgebung herangezogen.

Bild 8-1 und Bild 8-2 zeigen die Leuchtdichteaufnahmen der Fahrzeugsilhouette bei einem Schlussleuchtniveau von 12 cd. Zur Bestimmung der Leuchtdichte werden die Regionen im direkten Umfeld (erkennbar als rechteckige Markierung) der Schlussleuchten betrachtet. Die Erfassung der leuchtenden Fläche wird über einen Schwellwert von 80 cd/m² definiert.

Bild	Minimale Leuchtdichte in cd/m ²	Maximale Leuchtdichte in cd/m ²	Mittlere Leuchtdichte in cd/m ²	Streuung in cd/m ²
Glühlampe (links)	81	7.444	1.493	1.633
Glühlampe (rechts)	80	5.460	1.407	1.257
LED (links)	80	13.380	1.162	2.696
LED (rechts)	80	13.370	1.139	2.665

Tab. 8-2 Ermittelte mittlere Leuchtdichten der Schlussleuchten bei 12 cd

Die Messwerte sind in Tabelle 8-2 zusammengefasst. Die mittlere Leuchtdichte der Glühlampenversion liegt bei 1.407 cd/m² für die linke Schlussleuchte und bei 1.493 cd/m² für die rechte Schlussleuchte. Die maximal auftretenden Leuchtdichten bei der hier verwendeten Messauflösung betragen 7.444 cd/m² für die linke Leuchte und 5.460 cd/m² für die rechte Leuchte.

Werden die Leuchtdichten der Messpunkte des Perimeters von 104,3 cd/m² für die Marke III4e bzw. 12,8 cd/m² für die Marke III1e in Relation zu den Leuchtdichten für Schlussleuchten betrachtet, so wird ersichtlich, dass die mittleren Leuchtdichten der Schlussleuchten um einen Faktor 10 bei der LED- und einen Faktor 14 bei der Glühlampen-Ausführung größer sind.

Für eine Vergleichbarkeit der Untersuchungen am realen Fahrzeug und der Messungen mit dem Perimeter müsste das Schlussleuchtniveau somit mindestens um einen Faktor 10 unterhalb des gesetzlich erlaubten Mindestniveaus herabgesenkt werden. Fahrzeuge, die mit solch dunklen Schlussleuchten, beispielsweise aufgrund von Defekten, am Straßenverkehr teilnehmen, würden nicht nur für Protanope, sondern für alle Verkehrsteilnehmer eine Gefahr darstellen.

Anhand der Ergebnisse der ophthalmologisch-optischen Untersuchung lassen sich zudem Hinweise ableiten, dass die Wahrnehmungsunterschiede zwischen Protanopen und Normalsichtigen abhängig von der Leuchtdichte des Objektes sind. Für die im Rahmen der ophthalmologisch-optischen Untersuchung betrachteten reizstarken Goldmann-Messmarken zeigen sich keine Wahrnehmungsunterschiede zwischen beiden Probandengruppen. Anders verhält es sich mit den reizschwachen Goldmann-Messmarken. Hier zeigen sich die Wahrnehmungsunterschiede zwischen den Probandengruppen.

pen insofern, dass Protanope im Vergleich zu den Normalsichtigen schlechter abschneiden. Die Leuchtdichten für Schluss- und Bremsleuchten liegen jedoch um ein Vielfaches höher als die der Goldmann-Messmarken, sodass im Rahmen der Hauptuntersuchung keine Wahrnehmungsunterschiede festgestellt werden. Insofern stimmen die Aussagen der Ergebnisse der ophthalmologisch-optischen Untersuchung mit denen der Ergebnisse der lichttechnischen Untersuchung überein.

8.5 Wahl der Kontraststufen

Ziel der verwendeten Versuchsumgebung war die Klärung der Frage, ob eine Protanopie einen sicherheitsrelevanten Einfluss auf die Erkennbarkeit von Bremsleuchten hat. Dies beinhaltet auch die Fragestellung, ob die gesetzlichen Grenzen der Lichtstärken für Bremsleuchten für diese Personengruppe zum sichereren Erkennen ausreichend sind.

Wie oben beschrieben, stellt der Fall einer kombinierten Schluss-Bremsleuchte innerhalb einer Fläche den kritischsten Fall da. Daher ist das Niveau der Lichtstärke der Bremsleuchte hier im Verhältnis zur Schlussleuchte zu betrachten.

Die hier durchgeführte Studie ist nach Kenntnis der Autoren die erste, die die Wahrnehmbarkeit von Kontrastschwellen der Lichtstärke zwischen Schluss- und Bremsleuchte bewertet. Zudem ist es die erste Studie, die anhand der dargebotenen Kontraste zwischen Schluss- und Bremsleuchte überprüft, ob die gesetzlichen Mindest- und Maximalwerte zum Erkennen eines Bremsvorgangs ausreichend sind.

Folglich standen vor Versuchsbeginn keine Daten zur Verfügung, auf Basis derer eine erste Abschätzung geeigneter Kontraststufen erfolgen konnte. Die Kontraststufen sind daraufhin so gewählt, dass sowohl der Bereich unter als auch über den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestlichtstärken für die Bremsleuchte abgedeckt ist. Liegt die ermittelte Kontrastschwelle unterhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Mindestlichtstärke für die Bremsleuchte, kann geschlussfolgert werden, dass die gesetzlich vorgeschriebenen Mindestlichtstärken ausreichend hoch sind. Liegt die ermittelte Kontrastschwelle oberhalb dieses Grenzwertes, kann ein Gefährdungspotenzial nicht ausgeschlossen werden. Die Notwendigkeit einer Anpassung der

gesetzlich vorgeschriebenen Mindestlichtstärken oder ein Verbot der Teilnahme am Straßenverkehr für bestimmte Personengruppen wären ggf. die Folge.

Außer Frage steht, dass die Ergebnisse dieser Studie als Grundlage für Folgestudien genutzt werden können. Mit dem jetzigen Wissen über den Korridor, in welchem die Kontrastschwellen für den Anwendungsfall zu erwarten sind, könnte die Kontrastschwelle in Folgestudien präziser bestimmt werden als das im Rahmen dieser Studie erfolgt ist. Im Rahmen dieser Studie hat sich hinsichtlich der gewählten Kontraststufen ein Zielkonflikt ergeben. Um die Schwelle möglichst präzise zu bestimmen, ist die Anzahl der Kontraststufen möglichst groß zu wählen. Allerdings liegt gemäß der Theorie der Psychophysik zur Bestimmung von Wahrnehmungsschwellen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde, sodass jede Kontraststufe innerhalb der Stufe mehrfach dargeboten muss. Damit vervielfacht sich die Anzahl der darzubietenden Kontraste im Rahmen der Studie. Hinzu kommt außerdem, dass weitere Abhängigkeiten von Parametern bestehen. So hat der Einfluss der verwendeten Lichtquelle innerhalb der Schluss- und Bremsleuchte sowie ein Einfluss der Umfeldhelligkeit nicht ausgeschlossen werden können. Daher sind diese Parameter im Versuchsdesign berücksichtigt worden, sodass sich die Anzahl der Reizpräsentationen für den Probanden weiter erhöhte. Dem entgegen steht, dass die Validität der Studienergebnisse zu gewährleisten ist. Damit es zu keiner Überbeanspruchung der Konzentrationsfähigkeit des Probanden kommt, ist die Anzahl der Reizpräsentationen respektive der Entscheidungen für den Probanden so gering wie möglich zu halten. Unter Berücksichtigung der zu variierenden Parameter ist die Anzahl der abzutestenden Stufen auf Basis von Erfahrungswerten festgelegt worden.

Ob ein Reiz für den Beobachter wahrnehmbar ist, ist nicht nur abhängig vom wahrgenommenen Kontrast, sondern auch von der Umfeldleuchtdichte. Im Rahmen der durchgeführten Studie ist dies über die beiden Situationen Tag und Nacht berücksichtigt. Aufgrund der soeben beschriebenen Abhängigkeit lässt sich vermuten, dass auch die zu bestimmenden Kontrastschwellen variieren. Folglich wäre es denkbar gewesen, die dargebotenen Kontrastschwellen entsprechend den Umgebungshelligkeiten anzupassen. Allerdings bestand vor Studienbeginn auch hier das Problem, dass aus

anderen Studien kein Erwartungskorridor abgeleitet werden konnte. Daher wurde im Rahmen dieser Studie darauf verzichtet. Anhand der Studienergebnisse zeigt sich, wie in Kapitel 7.4.3 beschrieben, dass keine merklichen Unterschiede zwischen der Tag- und Nachtsituation bestehen. Eine Anpassung der Kontraststufen wäre folglich nicht notwendig gewesen.

8.6 Probandenkollektiv

Das Probandenkollektiv der Studie umfasst 11 ausgewertete Probanden. Folglich handelt es sich um ein relativ kleines Probandenkollektiv.

Die Aussagekraft hängt nicht maßgeblich von der Größe des Probandenkollektivs ab, sondern beispielsweise auch von der Wahl der Randparameter. Daher wird im Rahmen der Studie immer das Worst-Case-Szenario gewählt. Für den Fall, dass Unterschiede zwischen den Probandengruppen vorhanden seien, hätten sich diese zumindest in Tendenzen widerspiegeln müssen. Dies ist allerdings nicht der Fall.

Mit einem Durchschnittsalter von 25 Jahren handelt es sich um ein relativ junges Probandenkollektiv. Dies lässt sich dadurch begründen, dass ältere Probanden erfahrungsgemäß schwerer motivierbar sind als jüngere Probanden. Zudem wird die Gruppe der älteren Probanden sehr inhomogen, da die Spannbreite weiterer Augenerkrankungen mutmaßlich zunimmt. Der Einschluss von älteren Probanden hätte aufgrund der erhöhten Wahrscheinlichkeit von Augenkrankheiten dazu geführt, dass die Aussagekraft der Ergebnisse herabgesetzt wird. Mögliche Erkrankungen hätten die Vergleichbarkeit zu anderen Probanden eingeschränkt oder hätten die Ergebnisse ungewollt beeinflussen können.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass jüngere Probanden in den meisten Fällen über eine geringere Fahrerfahrung als Ältere verfügen. Aufgrund von mehr Fahrerfahrung können kritische Situationen mutmaßlich besser eingeschätzt werden, sodass mögliche Unzulänglichkeiten, wie beispielsweise eine Rotblindheit, besser kompensiert werden. Dem entgegen steht, dass mit zunehmendem Alter aufgrund der Linsentrübung von einem Einfluss auf das Kontrastsehvermögen beziehungsweise der Kontrastsensitivität auszugehen ist.

9 Zusammenfassung

Ob es einen Einfluss von Protanopie (Rotblindheit) auf die Erkennbarkeit des Bremssignals von roten Bremsleuchten gibt und ob hier die verschiedenen Lichtquellentechnologien (Glühlampe und LED) einen Einfluss haben, wird im Rahmen dieser Arbeit mittels Probandenstudien untersucht.

Dabei wird in einem Laborexperiment eine realitätsnahe und kritische Situation (die innerstädtische Fahrt hinter einem in 15 m vorausfahrenden, plötzlich bremsendem Fahrzeug) nachgestellt.

Die freien Randparameter sind unter Berücksichtigung gesetzlicher und realistischer Bedingungen gewählt. Zur Sicherstellung der Eindeutigkeit der Erkenntnisse sind alle Randparameter möglichst kritisch hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Sicherheitsrisiko ausgewählt. Die Randparameter sind daher so gewählt, um möglichst ein Worst-Case-Szenario zu untersuchen.

Die Nullhypothesen zur obigen Fragestellung lauten:

$H_{0,1}$: Es gibt in Bezug auf die ermittelten Kontrastschwellen des Bremssignals von Bremsleuchten keinen Unterschied zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Sehvermögen.

$H_{0,2}$: Die verwendeten Technologien von Glühlampe und LED zeigen keinen Unterschied in Bezug auf die Kontrastschwellen zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

$H_{0,3}$: Bei separater Betrachtung von Glühlampe und LED gibt es jeweils keinen Unterschied der Reaktionszeit zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

Der für die Durchführung der Studie verwendete Aufbau setzt sich aus einer maßstabsgetreuen Nachbildung eines Fahrzeuges mit Heckleuchten jeweils in Glühlampen bzw. LED-Ausführung und einem im Abstand von 15 m Metern positionierten Fahrzeugsitz mit Pedalen und Lenkrad zusammen.

Die Umgebung ist abgedunkelt und gegen den Einfall von Tageslicht geschützt. Um die Situation als Tag- und als Nachtfahrt darbieten zu können, werden zusätzliche Lichtquellen zur Beleuchtung der Silhouette und zur Ausleuchtung des Vorfeldes verwendet.

Um die erhobenen Daten hinsichtlich ihrer spektralen Abhängigkeit unterscheiden zu können, sind die Heckleuchten in LED- und Glühlampenausführung dahingehend angepasst, dass eine Unterscheidung aufgrund anderer visueller Merkmale nicht möglich ist. Für den Wechsel zwischen Schlussleuchte und Bremsleuchte ist ein Design gewählt, bei dem sich die beiden Funktionen nur durch eine Helligkeitsänderung unterscheiden. Dies entspricht dem schwieriger wahrnehmbaren Helligkeitskontrast innerhalb der Fläche.

Mit der Wahl des Helligkeitskontrastes innerhalb der Fläche ist die Verwendung der hochgesetzten Bremsleuchte im Rahmen dieser Probandenstudie ausgeschlossen, da die hochgesetzte Bremsleuchte einen Helligkeitskontrast gegenüber der Referenzfläche erzeugt hätte. Dies ist realitätsnah, da Stand heute auch Fahrzeuge, historisch oder klassenbedingt, ohne hochgesetzte Bremsleuchte am Straßenverkehr teilnehmen. Aus diesen Gründen wird der Versuch ohne hochgesetzte Bremsleuchte durchgeführt.

Der Versuchsumfang beträgt insgesamt vier Situationen mit den möglichen Kombinationen aus Tag/Nacht und Glühlampe/LED. Pro Situation werden dem Probanden je 20 Bremsleuchterniveaus im Bereich zwischen 12 cd und 120 cd mit je zwei Wiederholungen dargeboten. Auf die Darbietung soll die Reaktion des Probanden in Form einer Betätigung des Bremspedals erfolgen. Die Zeit zwischen Darbietung und Reaktion des Probanden ist als Reaktionszeit gespeichert und wird als Messgröße für die Auswertung verwendet.

Die gemessenen Reaktionszeiten der Probanden werden anschließend auf die individuelle minimale Reaktionszeit normiert und hinsichtlich der formulierten Nullhypothesen analysiert.

Für die erste Nullhypothese, welche die Hauptfragestellung repräsentiert, werden die relativen Erkennungswahrscheinlichkeiten der Kontraststufen ermittelt. Die Kontrastschwelle wird für eine Erkennungswahrscheinlichkeit von 50 % und 80 % ermittelt. Ein Unterschied zwischen beiden Probandengruppen kann anhand der Ergebnisse nicht festgestellt werden und führt zur Annahme der ersten Nullhypothese. Die Ergebnisse für alle Probanden zeigen zusätzlich, dass der Wechsel zwischen Schluss- und Bremsleuchte sicher wahrgenommen werden kann. Dies gilt sowohl für den aus den

Regelungen ableitbaren Mindestkontrast von 2,5 (seit 2010) bzw. von 4 (bis 2010).

Die zweite Nullhypothese soll die Frage des Einflusses der relativen spektralen Verteilung der üblicherweise verwendeten Lichtquellentechnologie, Glühlampe und LED, auf die Wahrnehmbarkeit von Schluss- und Bremsleuchten für protanope Personen klären. Hierzu wird der Reaktionsunterschied sowohl bei starker Überschwelligkeit der Kontraste als auch bei technologiesensitiven Kontrastschwellen untersucht. Die ermittelten technologiespezifischen Kontrastschwellen zeigen keine Trennbarkeit innerhalb als auch zwischen den Technologien. Daher kann kein Einfluss der Technologie auf die Wahrnehmung von Bremsdarbietungen zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden, sodass die Nullhypothese $H_{0,2}$ ebenfalls angenommen ist.

In der Analyse für die dritte Nullhypothese wird das allgemeine Reaktionsverhalten genauer untersucht. Hierzu werden die Reaktionszeiten über den Kontraststufen situationsspezifisch betrachtet. Eine Unterscheidbarkeit zwischen den Probandengruppen ist anhand der Ergebnisse nicht gegeben, sodass die dritte Nullhypothese ebenfalls bejaht wird.

In Bezug auf die ophthalmologisch-optische Untersuchung lässt sich festhalten, dass die konventionelle, standardisierte klinische Untersuchung des Farbsehvermögens mit dem Anomaloskop hervorragend geeignet ist, hereditäre Farbsinnstörungen zu diagnostizieren und z. B. auch zwischen einer Protanomalie und Protanopie zu differenzieren.

Auf Basis der im Rahmen dieser Studie ermittelten Daten kann kein sicherheitsrelevanter Einfluss von Protanopie auf die Wahrnehmung von Kfz-Bremsleuchten (UN-Regelung Nr. 7) im Straßenverkehr nachgewiesen werden. Die Daten bieten keine Grundlage für eine Änderung der derzeit geltenden gesetzlichen Regelungen.

10 Handlungsempfehlung für Protanopie im Straßenverkehr

Bis zum 30.6.2011 durften Personen mit einer Protanopie oder ausgeprägten Protanomalie Fahrzeuge der Klasse D, DE, D1, D1E und FzF nicht

führen. Im Zuge einer Anpassung an das europäische Recht wurde die Anlage 6 der Fahrerlaubnis-Verordnung dahingehend geändert, dass seit dem 01.07.2011 mit einer vorliegenden Rotblindheit oder Rotsehschwäche alle Fahrerlaubnisklassen der Gruppe 2 (C1, C1E, C, CE, D1, D1E, D, DE, FzF) erworben werden können. Bei Rotblindheit oder Rotschwäche mit einem Anomalquotienten unter 0,5 ist lediglich eine Aufklärung des Betroffenen über die mögliche Gefährdung erforderlich.

Da befürchtet wird, dass Protanope aufgrund ihres Defizits Schwierigkeiten beim rechtzeitigen Erkennen von Bremsleuchten haben und somit vermehrt in Auffahrunfälle involviert sind, wurde diese Studie durchgeführt, die die Frage klären sollte, ob eine Anpassung der Anlage 6 der Fahrerlaubnis-Verordnung notwendig ist.

Die Studie zeigt die Tendenz, dass die im Straßenverkehr eingesetzten roten Lichtquellen der Bremsleuchte und der Schlussleuchte in dem hier untersuchten sicherheitsrelevanten Bereich ausreichend hoch sind, sodass die Einschränkungen der Sehleistung durch eine Protanopie bzw. Pro-anomalie nicht zum Tragen kommen. Die Einschränkungen der Wahrnehmung durch ein Protanopie ist erst in einem deutlich geringeren Leuchtdichtebereich nahe der Wahrnehmungsschwelle von Bedeutung. Da die gesetzlichen Anforderungen für Brems- und Schlussleuchten Mindestlichtstärken fordern, konnten in dieser Studie keine Unterschiede zwischen protanopen und normalsichtigen Personen nachgewiesen werden. Es zeigt sich jedoch, dass der Kontrast zum Umfeld, das heißt der Kontrast innerhalb der Leuchte, von größerer Bedeutung ist.

Die auf Basis dieser Laborstudie ermittelten Daten rechtfertigen keine Änderung der Anlage 6 der Fahrerlaubnis-Verordnung für protanope oder protanomale Personen. Allerdings ist die Verwendung des Anomaliequotienten als alleiniges Kriterium zur Befundung einer stark ausgeprägten Anomalie beziehungsweise einer Anopie fraglich. Unter Umständen ist es sinnvoller, die Diagnose über das Pitt-Diagramm zu stellen und die methodische Vorgehensweise bei der Untersuchung mit dem Anomaloskop anzupassen.

Die Autoren schließen sich allerdings der Auflage an, bei bekannter und diagnostizierter Protanopie oder Protanomalie den Patienten auf eine achtsame Fahrweise hinzuweisen.

11 Ausblick

Wie beschrieben, ist in der Studie das lichttechnische Design der verwendeten Heckleuchten möglichst kritisch hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit ausgelegt worden. Die so ausgelegten Leuchten erfüllen alle geforderten Werte der aktuellen gesetzlichen Regelung UN-Regelung Nr. 7. Besonders kritisch ist der Fall, wenn Schluss- und Bremsleuchte dieselbe Fläche nutzen, das heißt, wenn die Bremsleuchte nur über ein Aufleuchten der Schlussleuchten realisiert wird.

Die Wahrnehmungsschwelle ist in diesem Falle über den Helligkeitskontrast, das heißt den Unterschied zwischen dem Niveau der Schluss- und Bremsleuchten innerhalb einer Fläche, definiert. Aus der gesetzlichen Regelungen UNECE R7 ergibt sich seit 2010 als theoretisch kleinster möglicher Kontrast ein Verhältnis von 2,5 zwischen dem Schluss- und Bremsleuchtniveau.

Im Rahmen der Studie wurde der Kontrast über einen Helligkeitskontrast innerhalb einer Fläche angeboten, der im Vergleich zum Helligkeitskontrast gegenüber einer Referenzfläche schwerer wahrnehmbar ist und somit den Worst-Case darstellt. Durch Ermittlung der Schwellenkontraste, das heißt der Kontraste, die notwendig sind, um die Bremsleuchte ausgehend von der Schlussleuchte sicher erkennen zu können, kann geschlussfolgert werden, ob der gesetzlich mögliche Mindestkontrast ausreichend ist oder nicht.

Mithilfe der Laborstudie kann gezeigt werden, dass die ermittelten Schwellenkontraste beider Probandengruppen kleiner sind als der gesetzlich mögliche Mindestkontrast von 2,5 gemäß der UN-Regelung Nr. 7 von 2010. Das bedeutet, dass beide Probandengruppen die Bremsleuchte bei diesem Kontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchte sicher erkennen können.

Allerdings liegt der ermittelte Schwellenkontrast der Wahrnehmung knapp unter diesem theoretisch möglichen Mindestkontrast der Regelung UNECE R7. Da es sich allerdings um eine Laborstudie handelt, in der sich die Probanden einzig auf das Erkennen der Bremssignale konzentrieren sollen, kann der Einfluss von Nebenaufgaben, wie das Führen eines Fahrzeugs, nicht abgebildet werden. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse in den Straßenverkehr ist daher infrage zu stellen.

Üblicherweise werden solche Ergebnisse aus Laborstudien daher mit einem Praxisfaktor multipliziert (ADRIAN 1989; SCHMEDDING 1992; KLEINERT 2017; ÖNEL 2020), der die Ablenkung durch Nebenaufgaben ausgleicht. Für gewöhnlich liegen die Praxisfaktoren nach ADRIAN (ADRIAN 1989) und SCHMEDDING (SCHMEDDING 1992) zwischen 3 und 10. Mit welchem Faktor die ermittelten Schwellenkontraste im hier vorliegenden Fall multipliziert werden sollten, ist unklar und sollte untersucht werden. Mit Anwendung eines minimalen Praxisfaktors von 3 lägen die ermittelten Schwellenkontraste für beide Personengruppen bereits über dem gesetzlich möglichen Mindestkontrast von 2,5. Ein Gefährdungspotenzial kann daher nicht ausgeschlossen werden. Hieraus lässt sich ggf. ein mögliches Gefährdungspotenzial für diese Art von Schluss-Bremsleuchtenfunktionen ableiten. Dies bedeutet, dass nach heutigem Stand regelkonforme Schluss-Bremsleuchten bei ungünstiger Kombination nicht sicher wahrgenommen werden können.

Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, werden in den Heckleuchten zur Umsetzung von Schluss- und Bremsleuchte aus Kostengründen verschiedene Lichtquellentechnologien verwendet. Aus design-technischen Gründen wird die Schlussleuchte meist in LED und die Bremsleuchte mithilfe einer Glühlampe umgesetzt. Technologiebedingt kann dies dazu führen, dass Schlussleuchten Lichtstärken im oberen zulässigen Bereich erreichen, wohingegen Bremsleuchten sich im unteren zulässigen Bereich befinden. Der Kontrast zwischen den Schluss- und Bremsleuchten ist folglich relativ klein und nahe dem gesetzlich minimal möglichen Kontrast.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, wäre es denkbar, innerhalb der UNECE R 7 einen Mindestkontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchten vorzuschreiben. Wie hoch dieser sein muss, wäre in einer weiteren Studie zu untersuchen, die den Worst-Case-Fall, also kombinierte aneinandergebaute Schluss- und Bremsleuchten, abbildet.

Bei Auslegung dieses gesetzlich vorgeschriebenen Mindestkontrastes gilt es zu beachten, dass der Aspekt der Erkennbarkeit dem Aspekt der Blendung gegenübersteht. Wird der Kontrast zu hoch gewählt beziehungsweise werden künftig höhere Mindest- oder Maximallichtstärken festgelegt, können diese so hell sein, dass andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden. Dann wäre zwar der Bremsvorgang aufgrund von höheren zugelassenen Lichtstärken für Bremsleuchten mutmaßlich besser er-

kennbar, allerdings wäre der Kontrast innerhalb des Gesichtsfeldes des Beobachters aufgrund einer zu hellen Bremsleuchte so groß, dass physiologische Blendung auftritt und andere Objekte oder Verkehrsteilnehmer übersehen werden könnten. Damit steigt das Gefahrenpotenzial durch Blendung, was zwingend vermieden werden muss.

Des Weiteren sind, wie bereits als Schlussfolgerung von MARRÉ (NEUBAUER 1979) auf Basis der durchgeführten Unfallanalysen angeregt, auch weitere Parameter wie beispielsweise die Form oder die Größe von Schluss- und Bremsleuchten in Studien mit dem Ziel zu untersuchen, die Detektierbarkeit von Schluss- und Bremsleuchten zu verbessern. Aus Sicht der Autoren ist in diesem Zusammenhang auch der Parameter der Anordnung der Schluss- und Bremsleuchtenflächen relevant. Daher gilt es auch zu prüfen, welche Anordnung und unter Umständen auch welche Abstände zwischen den leuchtenden Flächen für Schluss- und Bremsleuchten zu einer besseren Detektierbarkeit beitragen.

Literatur

- ADRIAN, W. (1989), Visibility of targets: Model for calculation. In: *Lighting Research & Technology*, 21 (4), 181–188, doi: 10.1177/096032718902100404.
- ATCHISON, D. A., PEDERSEN, C. A., DAIN, S. J. & WOOD, J. M. (2003), Traffic signal color recognition is a problem for both protan and deutan color-vision deficient. In: *Human factors*, 45 (3), 495–503, doi: 10.1518/hfes.45.3.495.27247.
- BECKER-CARUS, C. & WENDT, M. (Hrsg.) (2017), *Allgemeine Psychologie*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- BIRCH, J. (2012), Worldwide prevalence of red-green color deficiency. In: *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 29 (3), 313–320, doi: 10.1364/JOSA.29.000313.
- COLE, B. L. (2002), Protan colour vision deficiency and road accidents. In: *Clinical and Experimental Optometry*, 85 (4), 246–253.

- COLE, B. L. (2016), Colour blindness and driving. In: *Clinical & experimental optometry*, 99 (5), 484–487, doi: 10.1111/cxo.12396.
- DIN-Normenausschuss Lichttechnik (1986), *Begriffe der physiologischen Optik*, 01 .040.11 (5340). Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- ECKERT, M. (1993), *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Verl. Technik, Berlin.
- FECHNER, G. T. (1860), *Elemente der Psychophysik*. Breitkopf und Härtel, Leipzig.
- GRUNDLER, W. & STRASBURGER, H., Zentrale Sehschärfe und visuelle Fahreignungsdiagnostik. In: *Deutsche Optikerzeitung*, 78–84.
- KARNATH, H.-O. & ACKERMANN, H. (Hrsg.) (2012), *Kognitive Neurowissenschaften*. Mit ... 28 Tabellen. Springer, Berlin.
- KLEBELSBERG, D. (1982), *Verkehrspsychologie*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- KLEINERT, B. (2017), *Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen*. Dissertation. Universitätsbibliothek Ilmenau, Ilmenau.
- KRASTEL, H. (2006), *Anomaloskop. Leitfaden für die Untersuchung in der Praxis*. https://www.oculus.de/uploads/media/oculus_hmc_anomaloskop_kurzanleitung.pdf.
- KRASTEL, H., JÄGER, W., HUBER, J. & BRAUN, S. (1986), Rasterperimetrie mit Farbreizen. In: *Fortschritte der Ophthalmologie Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft* (83), 690–701.
- KRASTEL, H., JÄGER, W. & RAUSCH, E. (1987), On clinical application of coloured stimuli in automated computerized perimetry. In: *Folia* (14), 275–278.
- KRASTEL, H., KOLLING, G., SCHIEFER, U. & BACH, M. (2009), Qualitätsanforderungen an die Untersuchung des Farbsinns. In: *Der Ophthalmologe : Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft*, 106 (12), 1083–1102, doi: 10.1007/s00347-009-1976-3.
- LACHENMAYR, B. (2003), Anforderungen an das Sehvermögen des Kraftfahrers. In: *Deutsches Ärzteblatt*, 624–634.
- LACHENMAYR, B. & FREIBLER, G. (2019), Empfehlungen der DOG Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft und des BVA Berufsverband der Augenärzte Deutschlands. Anleitung für die augenärztliche Untersuchung und Beurteilung zur Eignung zum Führen von Kraftfahrzeugen. 7. vollständig überarbeitete Auflage, München.
- NEITZ, J. & NEITZ, M. (2011), The genetics of normal and defective color vision. In: *Vision Research*, 51 (7), 633–651, doi: 10.1016/j.visres.2010.12.002.
- NEUBAUER, O. (1979), *Kompensationsmöglichkeiten der Rotblinden als Lenker von Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr*. Forschungsauftrag.
- ÖNEL, S. (2020), *Bewertung von inhomogenen Leuchtdichtefeldern*. Universitätsverlag der TU Berlin, Berlin.
- RL 2006/126/EG, Richtlinie 2006/126/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 2006. über den Führerschein (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR). In: *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft*, 2006 (L403/18).
- SACHSENWEGER, M. & KLAUß, V. (2003), *Augenheilkunde*. Thieme, Stuttgart.
- SCHMEDDING, K. (1992), Die Bedeutung des Praxisfaktors in der lichttechnischen Analyse. Der Versuch einer Eingrenzung. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, 30 (7/8), 201–203.
- SCHMIDT, F. & SCHAIBLE, H.-G. (2006), *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- THIENES, G. (1998), *Motorische Schnelligkeit bei zyklischen Bewegungsabläufen*. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 1998. Lit, Münster.
- United Nations Economic Commission for Europe (2012), *ECE Regulation No. 7 Revision 6. Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be fitted and/or be used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions* (7). <https://www.un->

ece.org/trans/main/wp29/wp29regs0-20.html (19.06.2020).

VERRIEST, G., NEUBAUER, O., MARRE, M. & UVIJLS, A. (1980), New investigations concerning the relationships between congenital colour vision defects and road traffic security. In: *International Ophthalmology*, 2 (2), 87–99, doi: 10.1007/BF00137452.

VONTHEIN, R., RAUSCHER, S., PAETZOLD, J., NOWOMIEJSKA, K., KRAPP, E., HERMANN, A., SADOWSKI, B., CHAUMETTE, C., WILD, J. M. & SCHIEFER, U. (2007), The normal age-corrected and reaction time-corrected isopter derived by semi-automated kinetic perimetry. In: *Ophthalmology*, 114 (6), 1065–1072, doi: 10.1016/j.ophtha.2006.09.030.

Bilder

Bild 1-1 Relative Empfindlichkeit der drei Rezeptoren im Auge (NEITZ & NEITZ 2011)

Bild 1-2 Farbempfindung bei verschiedenen Formen der Farbsinnstörung im Vergleich zur Farbwahrnehmung eines Farbtüchtigen (Sachsenweger & Klauß 2003)

Bild 1-3 Beispielhafte Spektren für eine LED-basierte (rot) und eine glühlampenbasierte Bremsleuchte (schwarz)

Bild 3-1 Qualitative Darstellung der beiden Helligkeitskontraste, oben: Helligkeitskontrast gegenüber einer Referenzfläche, unten: Helligkeitskontrast innerhalb der Fläche

Bild 4-1 Grundriss Versuchsaufbau, LQ1- Lichtquelle zur Beleuchtung der Fahrzeugsilhouette, LQ2 - Lichtquellen zur Realisierung der Vorfeldbeleuchtung

Bild 4-2 Nachgestellte Tag-Situation aus Probandensicht für die photopische Bedingung mit eingeschaltetem Bremslicht

Bild 4-3 Leuchtdichteverteilung für die Tag-Situation mit eingeschaltetem Bremslicht

Bild 4-4 Nachgestellte Nacht-Situation aus Probandensicht für die mesopische

Bedingung mit eingeschaltetem Bremslicht

Bild 4-5 Leuchtdichteverteilung für die Nacht-Situation mit eingeschaltetem Bremslicht

Bild 4-6 Signalbild der Seat Leon Heckleuchte mit aktiviertem Bremslicht in der Glühlampenversion

Bild 4-7 Signalbild der Seat Leon Heckleuchte mit aktiviertem Bremslicht in der LED-Version

Bild 4-8 Segmente der Seat Leon III Heckleuchte in LED-Version mit eingeschaltetem Bremslicht; (I) Kotflügelsegment, (II) Heckklappensegment, (III) Innensegment, (IV) Signatur

Bild 4-9 Segmente des Moduls in Glühlampenausführung mit eingeschaltetem Bremslicht; (I) Kotflügelsegment, (II) Heckklappensegment, (IV) Signatur

Bild 4-10 Schlusslicht der Glühlampen-Version ausschließlich im Kotflügelsegment

Bild 4-11 Schlusslicht der LED-Version ausschließlich im Kotflügelsegment . . . 21

Bild 5-1 Prinzipieller zeitlicher Ablauf bei der Reizdarbietung inkl. arrhythmischer Interstimulusintervalle

Bild 5-2 Kompletter Versuchsablauf eines Probanden

Bild 5-3 Ermittlung der Reaktionszeit

Bild 6-1 Im Rahmen der Studie identifizierte, ausgeschlossene und letztendlich eingeschlossene Versuchspersonen, nebst Häufigkeitsangaben, Ausschlussgründen sowie pseudonymisierter Kennung der jeweiligen Versuchspersonen

Bild 6-2 Vergleichende Gegenüberstellung des NEI-VFQ 25 General Vision-Score für die drei Farbsinngruppen; diese Skala „Allgemeine Sehkraft“ umfasst zwei Aspekte. Eine Frage lautet z. B.: „Wie würden Sie heute Ihre Sehkraft bewerten, die Sie mit Brille oder Kontaktlinse haben?“. Die Ergebnisse für normale Trichromasie (links), Protanopie (Mitte) und Proanomalie (rechts) sind als

	Box & Whisker Plots dargestellt: Die horizontale Linie symbolisiert den Median, der untere und obere Rand der Box das 25. bzw. 75. Perzentil, und die Whisker (senkrechte Striche) repräsentieren jeweils den 1,5-fachen Betrag des Interquartilsabstands. Die einzelnen Messwerte sind durch runde Symbole dargestellt.	Bild 7-8	Histogramm 50 % Nacht nach Probandengruppen sortiert
		Bild 7-9	Histogramm 50 % Tag nach Probandengruppen sortiert
		Bild 7-10	Histogramm 80 % Nacht nach Probandengruppen sortiert
		Bild 7-11	Histogramm 80 % Tag nach Probandengruppen sortiert
Bild 6-3	Vergleichende Gegenüberstellung des NEI-VFQ 25 Score für den Aspekt „Driving“ („Probleme mit dem Autofahren“). Dieser umfasst drei Aspekte des Autofahrens (Probleme bei Nacht/bei fremden Strecken/bei bekannten Strecken) s. Legende Bild 6-2	Bild 7-12	Histogramm 50 %-Schwelle nach Probandengruppen sortiert kumuliert über alle Situationen
Bild 6-4	Vergleichende Gegenüberstellung des NEI-VFQ 25 Score für die (einzige) farb-sinnbezogene Frage 12 des Fragebogens: „Haben Sie aufgrund Ihrer Sehkraft Schwierigkeiten, Ihre eigene Kleidung farblich zusammenzustellen?“ siehe Legende Bild 6-2	Bild 7-13	Histogramm 80 %-Schwelle nach Probandengruppen sortiert kumuliert über alle Situationen
Bild 7-1	Reaktionszeiten über den Kontraststufen dreier Probanden. Jeder Datenpunkt stellt hierbei eine Reaktionszeit dar.	Bild 7-14	Histogramm 50 % Glühlampe nach Probandengruppen sortiert
Bild 7-2	Qualitativer Verlauf der Reaktionszeiten über dem dargebotenen Kontrast	Bild 7-15	Histogramm 50 % LED nach Probandengruppen sortiert
Bild 7-3	Relative Normierungswerte der fünf höchsten Kontraststufen nach Situationen getrennt. Die situationsspezifischen Mittelwerte werden durch den Probandenmittelwert geteilt.	Bild 7-16	Histogramm 80 % Glühlampe nach Probandengruppen sortiert
Bild 7-4	Histogramm der Anzahl der Normierungswerten in 50 ms Intervallen	Bild 7-17	Histogramm 80 % LED nach Probandengruppen sortiert
Bild 7-5	Histogramm der Anzahl medizinisch eingeteilten Normierungswerte in 50 ms Intervallen	Bild 7-18	Schema des erwarteten normierten Reaktionsverhaltens über dem Kontrast getrennt nach medizinischer Einteilung. Durch die Annahme der höheren Kontrastschwelle ergeben sich längere Reaktionszeiten in nicht stark überschwelligen Kontraststufen.
Bild 7-6	Qualitative Darstellung der vermuteten Verteilung der Probandenschwellen über dem Kontrast	Bild 7-19	Boxplots der Reaktionszeiten für die normalsichtige Probandengruppe in Abhängigkeit des dargebotenen Weberkontrastes
Bild 7-7	Relative Erkennungswahrscheinlichkeiten jeder dargebotenen Kontraststufe über KW, den ermittelten Weber-Kontrast, eines beliebig ausgewählten Probanden	Bild 7-20	Boxplots der Reaktionszeiten für die protanope Probandengruppe in Abhängigkeit des dargebotenen Weberkontrastes
		Bild 8-1	Leuchtdichteaufnahme des Schlusslichtes in Glühlampen-Ausführung bei 12 cd
		Bild 8-2	Leuchtdichteaufnahme des Schlusslichtes in LED-Ausführung bei 12 cd
		Bild 15-1	Beispieldaten nach Studiendurchlauf eines Probanden

Tabellen

- Tab. 5-1 Übersicht über alle Reihenfolgenmöglichkeiten, in welchen die Probanden die Studie durchlaufen
- Tab. 5-2 Kontraststufe mit zugehöriger Lichtstärke des Bremslichts und berechneter Kontrast nach Weber für den Helligkeitskontrast innerhalb der Fläche zwischen Schluss- und Bremslicht
- Tab. 6-1 Ermittelte Anomaliequotienten aller Probanden für das rechte Auge (RA) und das linke Auge (LA) sowie die Zuordnung in die Probandengruppe
- Tab. 8-1 Resultierende Lichtstärken aus Umrechnung der Leuchtdichten der Messmarken mit Goldmann-Eigenschaft
- Tab. 8-2 Ermittelte mittlere Leuchtdichten der Schlusslichter bei 12 cd
- Tab. 15-1 Auflistung der rot/weiß-Dissoziations-Ergebnisse (RWR) aller Versuchspersonen, nebst deren individueller Kennung (PRO-ID), aufgeschlüsselt nach Stimuluseigenschaften (III4e und III1e), Farbsehvermögen, Alter und Untersuchungsauge (RE = rechtes Auge, LE = linkes Auge, BE = beide Augen). Neben den Einzelergebnissen ist auch der Median für die jeweilige Gesamtgruppe (Group median) sowie, als Streuungsmaß, der Interquartilsabstand (IQR), bezogen auf das jeweilige Farbsehvermögen, angegeben
- Tab. 15-2 Auflistung der Mediane aller Reaktionszeiten (RT, Angabe in Sekunden) aller Versuchspersonen, nebst deren individueller Kennung (PRO-ID), aufgeschlüsselt nach Stimuluseigenschaften (III4e und III1e sowie weiß und rot), Farbsehvermögen, Alter und Untersuchungsauge (RE = rechtes Auge, LE = linkes Auge, BE = beide Augen). Neben den Einzelergebnissen ist auch der Median für die jeweilige Gesamtgruppe (Group median) sowie, als Streuungsmaß, der Interquartilsabstand (IQR), bezogen auf das Farbsehvermögen, angegeben

Anhang

15.1 Instruktion Probanden



Informationsblatt für Probanden

Sehr geehrte/r Teilnehmer/in,

vielen Dank für die Teilnahme an dem Versuch des Lichttechnischen Institutes in Zusammenarbeit mit der Hochschule Aalen. Bitte lesen Sie die nachfolgend aufgeführten Informationen aufmerksam durch.

Organisation

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Lichttechnisches Institut (LTI)
Abteilung: Optische Technologien im Automobil (OTIA)
Engesserstraße 13
76131 Karlsruhe

Projektleitung:
Melanie Helmer

Ansprechpartner vor Ort

Hochschule Aalen
Kompetenzzentrum „Vision Research“

Anton-Huber-Str. 23
73430 Aalen

Allgemeine Informationen:

Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Messergebnisse ist es erforderlich, dass alle Teilnehmer mit den gleichen Voraussetzungen an der Studie teilnehmen. Sprechen Sie daher nach Ihrer Teilnahme an dem Versuch auf keinen Fall mit anderen Teilnehmern über Einzelheiten der Studie.

Versuchsumgebung

Für die Durchführung der Studie nehmen Sie bitte im Nachbau eines Fahrzeugcockpits Platz. In einer Entfernung von 15m vor Ihnen befindet sich die Silhouette eines Fahrzeughecks. Der Raum ist verdunkelt, um für jeden Probanden eine einheitliche Situation zu schaffen. Der Versuch ist in vier Abschnitte untergliedert, zwischen diesen jeweils eine kurze Pause zu Ihrer Erholung stattfindet.

Aufgabenstellung:

Nachdem Sie auf dem Fahrersitz Platz genommen haben, stellen Sie diese bitte so ein, dass Sie mit den Füßen bequem die Pedale und mit den Händen das Lenkrad erreichen können. Gerne wird Sie bei Bedarf ein Ansprechpartner dabei unterstützen.

Den linken Fuß können Sie auf der dafür vorgesehen Ablage ruhen lassen, den rechten Fuß können Sie auf dem Gaspedal ruhen lassen. Die Hände können der Situation entsprechend am Lenkrad positioniert werden. Der Kopf ist geradeaus gerichtet, Ihre Augen fixieren entsprechend Abbildung 1 die Mitte des Fahrzeuges. Der Versuchsleiter wird Sie nach jedem Durchgang erneut darauf hinweisen.

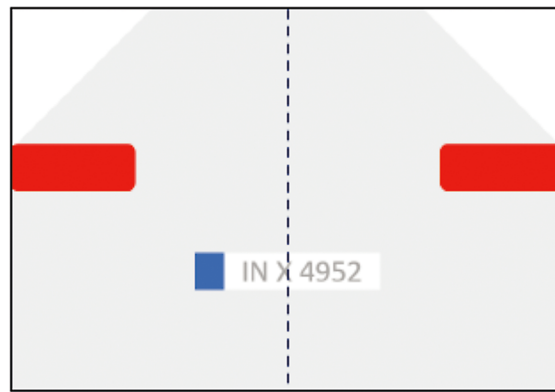


Abbildung 1 Darstellung Fahrzeugsilhouette

Zu Beginn wird das Schlusslicht des vorrausfahrenden Fahrzeuges eingeschaltet. Im Verlauf eines Durchgangs werden die Bremsleuchten des vorrausfahrenden Fahrzeuges einige Male aufleuchten, um entsprechend des Realverkehrs einen Bremsvorgang zu simulieren. Unmittelbar dann, sobald Sie das Aufleuchten des Bremslichts bemerken, treten Sie bitte mit ihrem rechten Fuß auf das Bremspedal. Drücken Sie bitte kräftig und mindestens eine Sekunde auf das Bremspedal. Danach können Sie den Fuß wieder vom Pedal nehmen und in die Ruheposition zurückstellen. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrere Male, das Ende eines Durchgangs wird Ihnen von der betreuenden Person angesagt.

Abschließende Informationen:

Sollten Sie noch weitere Fragen zur Studie haben oder sofern noch Unklarheiten bestehen, wenden Sie sich bitte an das betreuende Personal. Sollten Sie sich während der Durchführung unwohl fühlen, teilen Sie dies bitte dem anwesenden Betreuer mit.

15.2 Datenstruktur

Die vom Messprotokoll erzeugten Daten werden beispielhaft in Bild 1-51 dargestellt.

ID_NR	ID_Durchgang	Durchgang	Datum	Situation	E_Silhouette	Quelle	Stufe	Akzeptanzintervall_m	Reaktionszeit_m	ISI_ms	In_Akzeptanzintervall	ID_Proband	Neu	Schwelle
123	123	24.01.2020	12:40	Nacht	10	Glühlampe	1	4000	10062,5	10000	Nicht erkannt	PRO03	4000	
149	149	24.01.2020	12:45	Nacht	10	Glühlampe	1	4000	11000	10000	Nicht erkannt	PRO03	4000	
165	165	24.01.2020	12:48	Nacht	10	Glühlampe	1	4000	13000	12000	Nicht erkannt	PRO03	4000	
131	131	24.01.2020	12:41	Nacht	10	Glühlampe	2	4000	10000	9000	Nicht erkannt	PRO03	8000	
142	142	24.01.2020	12:43	Nacht	10	Glühlampe	2	4000	9000	8000	Nicht erkannt	PRO03	8000	
174	174	24.01.2020	12:49	Nacht	10	Glühlampe	2	4000	11000	10000	Nicht erkannt	PRO03	8000	
128	128	24.01.2020	12:41	Nacht	10	Glühlampe	3	4000	775	9000	Erkannt	PRO03	12000	
146	146	24.01.2020	12:44	Nacht	10	Glühlampe	3	4000	1437,5	9000	Erkannt	PRO03	12000	
179	179	24.01.2020	12:50	Nacht	10	Glühlampe	3	4000	1262,5	11000	Erkannt	PRO03	12000	
135	135	24.01.2020	12:42	Nacht	10	Glühlampe	4	4000	1150	11000	Erkannt	PRO03	16000	
143	143	24.01.2020	12:44	Nacht	10	Glühlampe	4	4000	737,5	10000	Erkannt	PRO03	16000	
167	167	24.01.2020	12:48	Nacht	10	Glühlampe	4	4000	1337,5	13000	Erkannt	PRO03	16000	

Bild 15-1 Beispieldaten nach Studiendurchlauf eines Probanden

Die markierten Spalten zeigen die relevanten Teile dieses Datenscripts, welche wie folgt charakterisiert sind:

1. Simulierte Situation: Tag/Nacht
2. Genutzte Lichtquelle: Glühlampe/LED
3. Aussteuerungsstufe: 1...20 (€N) à 3 Wiederholungen
4. Reaktionszeit in Millisekunden

15.3 Messwerte der semi-automatisierten kinetischen Perimetrie

			RA		LA		BA	
			RWR _{III4e}	RWR _{III1e}	RWR _{III4e}	RWR _{III1e}	RWR _{III4e}	RWR _{III1e}
PRO-ID	Farbsinn	Alter	Median	Median	Median	Median	Median	Median
Normale Trichromasie								
PRO-10	Normale Trichromasie	37,7	0,965	0,724	0,965	0,811	0,972	0,794
PRO-11	Normale Trichromasie	28,4	0,987	0,807	0,964	0,795	0,978	0,785
PRO-12	Normale Trichromasie	32,6	0,970	0,870	0,986	0,831	0,962	0,816
PRO-13	Normale Trichromasie	26,0	0,955	0,802	0,960	0,794	0,951	0,702
PRO-14	Normale Trichromasie	23,5	0,986	0,815	0,985	0,911	0,988	0,966
PRO-15	Normale Trichromasie	49,1	0,984	0,749	0,942	0,672	0,968	0,793
Gruppen-Median			0,977	0,805	0,965	0,803	0,970	0,794
Gruppen-IQR*			0,019	0,051	0,019	0,032	0,013	0,024
Protanopie								
PRO-03	Protanopie	21,8	0,928	0,442	0,904	0,392	0,868	0,388
PRO-04	Protanopie	24,1	0,941	0,496	0,939	0,479	0,913	0,303
PRO-06	Protanopie	28,6	0,941	0,406	0,918	0,459	0,861	0,399
PRO-09	Protanopie	22,1	0,924	0,504	0,937	0,503	0,891	0,383
PRO-22	Protanopie	22,0	0,986	0,964	0,949	0,965	0,891	0,874
Gruppen-Median			0,941	0,496	0,937	0,479	0,891	0,388
Gruppen-IQR *			0,013	0,062	0,021	0,044	0,023	0,016

Tab. 15-1 Auflistung der rot/weiß-Dissoziations-Ergebnisse (RWR) aller Versuchspersonen, nebst deren individueller Kennung (PRO-ID), aufgeschlüsselt nach Stimuluseigenschaften (III4e und III1e), Farbsehvermögen, Alter und Untersuchungsaug (RE = rechtes Auge, LE = linkes Auge, BE = beide Augen). Neben den Einzelergebnissen ist auch der Median für die jeweilige Gesamtgruppe (Group median) sowie, als Streuungsmaß, der Interquartilsabstand (IQR), bezogen auf das jeweilige Farbsehvermögen, angegeben

			RA		LA		BA	
			RWR _{III4e}	RWR _{III1e}	RWR _{III4e}	RWR _{III1e}	RWR _{III4e}	RWR _{III1e}
PRO-ID	Farbsinn	Alter	Median	Median	Median	Median	Median	Median
Protanomalie								
PRO-08	Extreme Protanomalie	32,4	0,887	0,576	0,897	0,407	0,882	0,271
PRO-20	Protanomalie	26,9	0,816	0,424	0,792	0,434	0,764	0,280
Gruppen-Median			0,852	0,500	0,845	0,421	0,823	0,276
Gruppen-IQR*			0,036	0,076	0,053	0,014	0,059	0,005

Tab. 15-1 Fortsetzung

PRO-ID	III4e		III1e	
	Weiß	Rot	Weiß	Rot
Normalsichtig				
PRO-10	0,504	0,424	0,593	0,583
PRO-11	0,398	0,487	0,683	0,574
PRO-12	0,480	0,358	0,671	0,576
PRO-13	1,104	0,616	0,558	0,639
PRO-14	0,397	0,479	0,438	0,500
PRO-15	0,855	0,694	0,726	0,880
Gruppen-Median	0,492	0,483	0,632	0,580
Gruppen-IQR**	0,349	0,146	0,113	0,051
Protanopie				
PRO-03	0,474	0,612	0,582	1,295
PRO-04	0,628	0,589	0,627	0,502
PRO-06	0,497	0,670	0,543	0,826
PRO-09	0,619	0,531	0,436	0,717
PRO-22	0,449	0,442	0,457	0,679
Gruppen-Median	0,497	0,589	0,543	0,717
Gruppen-IQR**	0,145	0,081	0,125	0,147
Protanomalie				
PRO-08	0,367	0,431	0,561	0,548
PRO-20	0,437	0,461	0,537	0,706
Gruppen-Median	0,402	0,446	0,549	0,627
Gruppen-IQR**	0,035	0,015	0,012	0,079

Tab. 15-2 Auflistung der Mediane aller Reaktionszeiten (RT, Angabe in Sekunden) aller Versuchspersonen, nebst deren individueller Kennung (PRO-ID), aufgeschlüsselt nach Stimuluseigenschaften (III4e und III1e sowie weiß und rot), Farbsehvermögen, Alter und Untersuchungsauge (RE = rechtes Auge, LE = linkes Auge, BE = beide Augen). Neben den Einzelergebnissen ist auch der Median für die jeweilige Gesamtgruppe (Group median) sowie, als Streuungsmaß, der Interquartilsabstand (IQR), bezogen auf das Farbsehvermögen, angegeben

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Mensch und Sicherheit“

2019

M 289: Entwicklung und Überprüfung eines Instruments zur kontinuierlichen Erfassung des Verkehrsklimas

Schade, Rößger, Schlag, Follmer, Eggs
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 290: Leistungen des Rettungsdienstes 2016/17 – Analyse des Leistungsniveaus im Rettungsdienst für die Jahre 2016 und 2017

Schmiedel, Behrendt € 18,50

M 291: Versorgung psychischer Unfallfolgen

Auerbach, Surges € 15,50

M 292: Einfluss gleichaltriger Bezugspersonen (Peers) auf das Mobilitäts- und Fahrverhalten junger Fahrerinnen und Fahrer

Baumann, Geber, Klimmt, Czerwinski € 18,00

M 293: Fahranfänger – Weiterführende Maßnahmen nach dem Fahrerlaubniswerb – Abschlussbericht

Projektgruppe „Hochrisikophase Fahranfänger“ € 17,50

2020

M 294: Förderung eigenständiger Mobilität von Erwachsenen mit geistiger Behinderung

Markowetz, Wolf, Schwaferts, Luginer, Mayer, Rosin, Buchberger
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 295: Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitssystemen in Pkw 2017

Gruschwitz, Hölscher, Raudszus, Schulz € 14,50

M 296: Leichte Sprache in der theoretischen Fahrerlaubnisprüfung

Schrauth, Zielinski, Mederer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 297: Häufigkeit von Ablenkung beim Autofahren

Kreußlein, Schleinitz, Krems € 17,50

M 298: Zahlungsbereitschaft für Verkehrssicherheit

Obermeyer, Hirte, Korneli, Schade, Frießel € 18,00

M 299: Systematische Untersuchung sicherheitsrelevanter Fußgängerverhaltens

Schüller, Niestegge, Roßmerkel, Schade, Rößger, Rehberg, Maier € 24,50

M 300: Nutzungshäufigkeit von Smartphones durch Pkw-Fahrer Erhebung 2019

Kathmann, Johannsen, von Heel, Hermes, Vollrath, Huemer € 18,00

M 301: Motorräder – Mobilitätsstrukturen und Expositionsgrößen

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer € 16,00

M 302: Zielgruppengerechte Ansprache in der Verkehrssicherheitskommunikation über Influencer in den sozialen Medien

Duckwitz, Funk, Schliebs, Hermanns € 22,00

M 303: Kognitive Störungen und Verkehrssicherheit

Surges
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 305: Re-Evaluation des Alkoholverbots für Fahranfängerinnen und Fahranfänger

Evers, Straßgüt € 15,50

AKTUALISIERTE NEUAUFLAGE VON:

M 115: Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahreignung – gültig ab 31.12.2019

Gräcmann, Albrecht € 17,50

2021

M 304: Zum Unfallgeschehen von Motorrädern

Pöppel-Decker
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 306: Stand der Wissenschaft: Kinder im Straßenverkehr

Schmidt, Funk, Duderstadt, Schreiter, Sinner, Bahlmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 307: Evaluation des Zielgruppenprogramms „Aktion junge Fahrer“ (DVW) – Phase II

Funk, Rossnagel, Bender, Barth, Bochert, Detert, Erhardt, Hellwagner, Hummel, Karg, Kondrasch, Schubert, Zens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 308: Evaluation der Zielgruppenprogramme „Kind und Verkehr“ (DVR, DVW) und „Kinder im Straßenverkehr“ (DVW) – Phase II

Funk, Bender, Rossnagel, Barth, Bochert, Detert, Erhardt, Hellwagner, Hummel, Karg, Kondrasch, Schubert, Zens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 309: Entwicklung und Evaluation effizienter Trainingsmaßnahmen für ältere Verkehrsteilnehmer zur Förderung ihrer Fahrkompetenz

Schoch, Julier, Kenntner-Mabiala, Kaussner € 16,00

M 310: Erfassung der subjektiven Wahrnehmung und Bewertung verkehrssicherheitsrelevanter Leistungsmerkmale und Verhaltensweisen älterer Autofahrer – Entwicklung und Prüfung eines Selbsttests

Horn € 18,50

M 311: Safety Performance Indicators im Straßenverkehr – Überblick und Erfahrungen aus der internationalen Praxis

Funk, Orłowski, Braun, Rücker € 20,50

M 312: Konzept für eine regelmäßige Erhebung der Nutzungshäufigkeit von Smartphones bei Radfahrern und Fußgängern

Funk, Roßnagel, Maier, Crvelin, Kurz, Mohamed, Ott, Stamer, Stößel, Tomaselli
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 313: Analyse der Merkmale und des Unfallgeschehens von Pedelec Fahrern

Platho, Horn, Jänsch, Johannsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 314: SENIORWALK

Holte € 19,00

M 315: Untersuchungen zur wissenschaftlichen Begleitung des reformierten Fahrlehrerrechts

Bredow, Ewald, Thüs, Malone, Brünken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 316: **VERKEHRSKLIMA 2020**

Holte € 16,50

M 317: **Alternative Antriebstechnologien – Marktdurchdringung und Konsequenzen für die Straßenverkehrssicherheit**Pöppel-Decker, Bierbach, Piasecki, Schönebeck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 318: **Verkehrssicherheitsberatung älterer Kraftfahrerinnen und -fahrer in der hausärztlichen Praxis – Bestandsaufnahme**Schoch, Kenntner-Mabiala
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 319: **Protanopie und Protanomalie bei Berufskraftfahrern und Berufskraftfahrerinnen – Prävalenz und Unfallrisiko**Friedrichs, Schmidt, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 320: **Eignung von Fahrsimulatoren für die Untersuchung der Fahrkompetenz älterer Autofahrer**Maag, Kenntner-Mabiala, Kaussner, Hoffmann, Ebert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 321: **Entwicklung einer Methodik zur Untersuchung der Determinanten der Routenwahl von Radfahrern**Lux, Schleinitz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 323: **Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren**Hammer, Pleß, Will, Neukum, Merkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**2022**M 322: **Influencer in der Verkehrssicherheitskommunikation: Konzeptentwicklung und pilothafte Anwendung**

Duckwitz, Funk, Hielscher, Schröder, Schrauth, Seegers, Kraft, Geib, Fischer, Schnabel, Veigl € 19,50

M 324: **Interdisziplinärer Ansatz zur Analyse und Bewertung von Radverkehrsunfällen**Baier, Cekic, Engelen, Baier, Jürgensohn, Platho, Hamacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 325: **Eignung der Fahrsimulation zur Beurteilung der Fahr-sicherheit bei Tagesschläfrigkeit**Kenntner-Mabiala, Ebert, Wörle, Pearson, Metz, Kaussner, Hargutt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 326: **Kinderunfallatlas 2015–2019**

Suing, Auerbach, Färber, Treichel € 22,50

M 327: **Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitssystemen 2019**

Gruschwitz, Pirsig, Hölcher, Hoß, Wopen, Schulte € 17,50

M 328: **Evaluation des Carsharinggesetzes**Kurte, Esser, Wittowsky, Groth, Garde, Helmrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 329: **Nutzung von Mobiltelefonen beim Radfahren – Prävalenz, Nutzermerkmale und Gefahrenpotenziale**

Evers, Gaster, Holte, Suing, Surges € 17,50

M 330: **Ausbildungs- und Evaluationskonzept zur Optimierung der Fahrausbildung in Deutschland**Sturzbecher, Brünken, Bredow, Genschow, Ewald, Klüver, Thüs, Malone
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 331: **E-Learning Unterrichtskonzepte für die Fahranfänger-vorbereitung**Hilz, Malone, Brünken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.M 332: **Experimentelle Studie zu Protanopie und Wahrnehmung von Bremsleuchten**Helmer, Trampert, Schiefer, Ungewiß, Baumann, Feßler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

 Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
 Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
 Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.