

Experimentelle Studie zu Protanopie (Rotblindheit) und Wahrnehmung von Bremsleuchten

FA 82.716

Forschungsstellen: Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Lichttechnisches Institut – Angewandte
Lichttechnik (Prof. Dr. rer. nat. U. Lem-
mer)

Hochschule Aalen, Kompetenzzentrum
"Vision Research" (Prof. Dr. med. U.
Schiefer)

Bearbeiter: Helmer, M. / Trampert, K. / Schiefer,
U. / Ungewiß, J. / Baumann, M. / Feß-
ler, J.

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen, Ber-
gisch Gladbach

Abschluss: Oktober 2021

1 Motivation und Hintergrund

Ziel der Studie ist es, in einer experimentellen Studie aufzuzeigen, wie stark sich eine Protanopie (Rotblindheit) auf die Erkennbarkeit von Bremsleuchten auswirkt und welche Relevanz gegebenenfalls 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 die Studie untersuchen, ob hier gegebenenfalls Handlungsempfehlungen für den Gesetzgeber erkennbar sind.

Einem normalsichtigen Menschen stehen zum Farbsehen drei verschiedene Rezeptoren zur Verfügung. Ist ein Rezeptor beeinträchtigt, liegt eine Farbfehlsichtigkeit vor. Bei der Protanomalie (eingeschränkte Funktion) beziehungsweise Protanopie (vollständiger Ausfall) ist der L-Zapfen betroffen. Bei der Protanomalie handelt es sich um die zweithäufigste angeborene Farbwahrnehmungsstörung, wobei im europäischen Raum etwa 1 % aller Männer und 0,02 % aller Frauen betroffen sind.

Zur Feststellung einer Farbfehlsichtigkeit und dessen Schwere stehen etablierte Messsysteme zur Verfügung. Die Anforderungen an das Sehvermögen für den Erwerb einer Fahrerlaubnis sind in § 12 Abs. 2 Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV) geregelt, variieren jedoch mit der zu erwerbenden Fahrerlaubnisklasse.

Im Straßenverkehr hat die Farbe Rot eine Signalfunktion. Das Übersehen von roten Signalen stellt folglich ein erhöhtes Gefährdungspotenzial dar. Bei rotsinngestörten Personen ist dies aufgrund der Verschiebung der Farb- und Helligkeitsempfindung vor allem für Rot im Vergleich zu Normalsichtigen als kritisch zu erachten, wobei im Besonderen Auffahrunfälle aufgrund des mutmaßlich schlechter wahrnehmbaren Bremssignals als kritische Situationen genannt werden.

In der Literatur zeigen sich nicht eindeutige und teilweise widersprüchliche Studienergebnisse und Schlussfolgerungen. So sprechen sich einige Autoren unabhängig vom Grad der Rot-sinnstörung dafür aus, dass Protanope generell keine Fahrerlaubnis erwerben dürfen. Andere jedoch fordern dies nur für die Fahrerlaubnisklassen D, D1, DE, D1E sowie die Fahrerlaubnis zur Fahrgastbeförderung FzF in Verbindung mit einer Mindestanforderung an den Anomaliequotienten.

Aus gesetzlicher Sicht regelt die Regelung 7 der United Nations Economic Commission for Europe, kurz UNECE, die Anforderungen für Schluss- und Bremsleuchten. Hier wird neben der Mindest- und Maximallichtstärke auch der Bereich des roten Farbborts festgelegt. Zum Einsatz kommen hier unterschiedliche Lichtquellen, vornehmlich Glühlampen oder LED-Quellen.

2 Forschungshypothesen

Für Rotsinngestörte steigt aufgrund der veränderten Rotwahrnehmung die Wahrscheinlichkeit, rote Bremsleuchten nicht rechtzeitig oder gar nicht erkennen zu können.

Daher lauten die Nullhypothesen:

$H_{0,1}$: 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 der ermittelten Kontraste zwischen protanopen Probanden und Probanden mit normalem Farbsehvermögen.

3 Versuchskonzept

3.1 Allgemeines Versuchskonzept

Ausgehend von den formulierten Nullhypothesen wurde eine Vergleichsstudie zwischen einer protanopen und einer normalsichtigen Probandengruppe geplant. Zur Sicherstellung der Eindeutigkeit der Erkenntnisse sind alle Parameter entspre-

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

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.

Die Erkennbarkeit eines Bremssignals hängt vom wahrgenommenen Kontrast zwischen der Leuchtdichte der Bremsleuchte und der des Umfelds 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.

Die Studie ist als Laborstudie geplant, sodass potenzielle Störeinflüsse reduziert, die Umgebungsbedingungen kontrolliert und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bestmöglich gewährleistet wird. Daher wird auf eine möglichst realistische Umsetzung geachtet, sodass die Heckleuchten in einem maßstabsgetreuen modellhaften Nachbau eines Fahrzeughecks integriert sind. Die Heckleuchten sind so ausgewählt, dass diese ein möglichst ähnliches Erscheinungsbild der Schluss- und Bremsleuchten in beiden Technologien aufweisen. Somit ist sichergestellt, dass ein potenzieller Unterschied rein auf die relative spektrale Zusammensetzung der Lichtquelle zurückgeführt werden kann. Die gestellten Anforderungen sind von der Heckleuchte des Seat Leon III erfüllt. Daher bilden diese Heckleuchten die Basis für die Studie.

Aus den Hypothesen ergibt sich ein Within-Subject-Design mit Messwiederholung. Dies bedeutet, dass alle Versuchsbedingungen von jedem Probanden durchlaufen werden. Dieses Vorgehen ist ökonomisch und 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 die zu manipulierende, Variable ist der Helligkeitskontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchten. Zur Schwellenbestimmung wird die Konstanzmethode nach Fechner verwendet.

3.2 Untersuchungsmethodik

Alle Probanden werden einer kompletten ophthalmologisch-optischen Untersuchung zur Fahreignung gemäß FeV/DOG-Empfehlungen unterzogen, in der die anamnestischen Daten erhoben werden. Die Einteilung der Probanden erfolgt auf Basis der Untersuchungsergebnisse des Farbsehvermögens mittels Anomaloskop. Zusätzlich wird eine semi-automatisierte kinetische Perimetrie (SKP) ausschließlich entlang des horizontalen Meridians einschließlich Reaktionszeitkorrektur mit verschiedenen Messmarken durchgeführt.

Innerhalb der Studie werden die Einflussparameter Umfeldhelligkeit (Tag/Nacht), Lichtquellentechnologie (Glühlampe/LED) sowie die Kontraststufen des Bremsleuchtniveaus randomisiert variiert.

Für diese Studie wird der Kontrast nach Weber K_W als Maß zum Erkennen von Helligkeitsunterschieden herangezogen. Die Wahrnehmbarkeit steigt mit zunehmendem Lichtstärkeunterschied zwischen Schluss- und Bremsleuchte, das heißt mit steigendem Kontrast. Der kritischste darstellbare Kontrast liegt dann vor, wenn Schluss- und Bremsleuchte gleich hell und nicht zu unterscheiden sind. Rechnerisch ergibt sich ein Kontrast von $K_W = 0$, der sogenannte Catch-Trial, bei welchem kein Reiz vorhanden ist.

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

Daher wird für diese 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 aus den effektiven Kontrasten von $K_W = 4$ für 12 cd und $K_W = 2,5$ für 17 cd Schlussleuchtniveau abgeleitet werden. Die 20 Kontraststufen sind möglichst gleichmäßig über die zur Verfügung stehende Spannbreite zwischen 12 cd und 120 cd verteilt, wobei die Kontraste $K_W = 0$, $K_W = 2,5$ und $K_W = 4$ abgedeckt sind.

3.3 Versuchsablauf

Nach der augenärztlichen Untersuchung findet der lichttechnische Teil der Studie statt. Jeder Proband wird zunächst schriftlich und im Anschluss daran nochmals mündlich durch die Versuchsleitung instruiert. Den Probanden wird mitgeteilt, dass die aufgebaute Situation eine innerstädtische Hinterherfahrt darstellt. Des Weiteren werden sie darüber in Kenntnis gesetzt, dass in gewissen zeitlichen Abständen die Bremsleuchten des vorausfahrenden Fahrzeugs aufleuchten. Ihre Aufgabe ist es, unmittelbar nach dem Aufleuchten der Bremsleuchte kräftig auf das Bremspedal zu treten. Dieser Vorgang wird mehrfach und in unterschiedlichen Helligkeiten der Bremsleuchte, das heißt Kontraststufen, wiederholt.

Die zu untersuchenden Situationen werden nacheinander untersucht. Zu Beginn jeder Situation erfolgt für den Probanden eine Adaptionsphase. Für die Tag-Situation beträgt die Adaptionszeit 3 Minuten. Für die Nacht-Situation beträgt die Adaptionszeit 10 Minuten. Nach jeder Situation erfolgt eine Erholungspause für den Probanden von mindestens 5 min.

Während eines Studiendurchgangs wird die Zeit aufgezeichnet, die der Proband benötigt, um auf eine ihm dargebotene Bremsituation zu reagieren. Folglich errechnet sich die Reaktionszeit

aus dem Abstand zwischen dem Zeitpunkt der Darbietung und dem Betätigungszeitpunkt des Pedals durch den Probanden.

4 Ergebnisse

4.1 Probandenkollektiv

Insgesamt konnten sechs farbnormale Kontrollpersonen und fünf protanope Probanden in die Studie aufgenommen werden. 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 verfügen über ein ausreichendes Sehvermögen gemäß FeV.

4.2 Lichttechnische Untersuchung

Ist die Kontraststufe hoch genug, sodass die Bremsleuchte gut erkennbar ist, kann der Proband schnell auf dieses 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.

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 normalem Sehvermögen einen höheren Kontrast benötigt. Sofern ein Einfluss einer vorliegenden Protanopie auf die Wahrnehmung der Bremsleuchten vorliegt, müsste sich dieser Aspekt anhand der aufgenommenen Daten zeigen lassen.

Zur Bestimmung der Absolutschwelle wird üblicherweise die 50 %-Schwelle angenommen. Das bedeutet, dass die dargebotene Bremsleuchte in 50 % der Fälle erkannt und in 50 % der Fälle nicht erkannt wird. Aufgrund der Sicherheitsrelevanz der Fragestellung ist die Wahrnehmungswahrscheinlichkeit möglichst hoch zu wählen. Am konservativsten wäre es, die Schwelle auf 100 % zu setzen. Realistisch ist diese Schwelle nicht, da aufgrund von Unaufmerksamkeit falsche beziehungsweise keine Probandenreaktionen auftreten können. Um diesem Aspekt gerecht zu werden und die Schwelle nicht unverhältnismäßig hoch zu wählen, wird im Rahmen der Studie die 80 %-Schwelle zusätzlich herangezogen.

Da die Wahrnehmung von Lichtsignalen abhängig von der Umfeldhelligkeit ist, werden die Kontraststufen beider Technologien sowohl in einer Tag- wie auch in einer Nachtsituation dargeboten. Anhand der Ergebnisse zeigt sich, dass eine Unterteilung zwischen Tag und Nacht für die weitere Auswertung nicht notwendig ist.

4.2.1 Überprüfung der Nullhypothese bezüglich der Kontrastschwellen

Zur Untersuchung der ersten Nullhypothese werden die ermittelten Schwellenkontraste in einem Histogramm, unterteilt in die beiden Probandengruppen, aufgetragen. Die Ergebnisse sind in Bild 1 und 2 zu sehen.

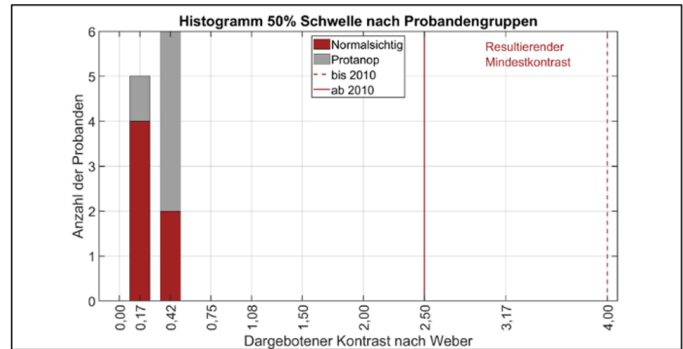


Bild 1: Histogramm 50 %-Schwelle nach Probandengruppen sortiert kumuliert über alle Situationen

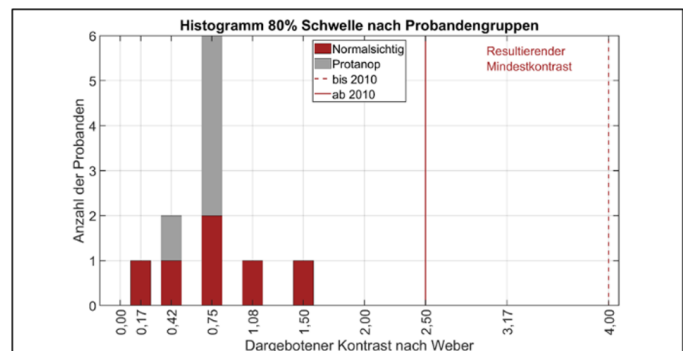


Bild 2: Histogramm 80 %-Schwelle nach Probandengruppen sortiert kumuliert über alle Situationen

Die Histogramme zeigen, dass eine Trennung beider Probandengruppen nicht möglich ist. Außerdem zeigt sich, dass die bestimmten Schwellenkontraste unterhalb der gesetzlich möglichen Mindestkontraste liegen. Anhand der hier aufgezeigten Ergebnisse muss die erste Nullhypothese folglich angenommen werden. Das bedeutet: Es gibt in Bezug auf die ermittelten Kontrastschwellen des Bremssignals 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 betrachtenden Ergebnisse nicht nachgewiesen werden.

4.2.2 Überprüfung der Nullhypothese bezüglich der Lichtquellentechnologie

Zur Untersuchung dieser Hypothese werden die Daten technologiespezifisch geteilt und die 80 %-Schwelle in Bild 3 und 4 betrachtet.

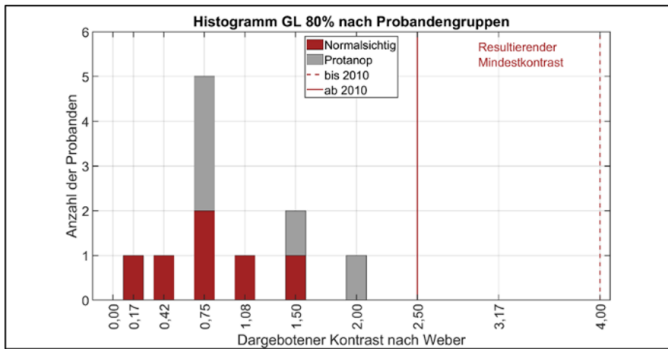


Bild 3: Histogramm 80 % Glühlampe nach Probandengruppen sortiert

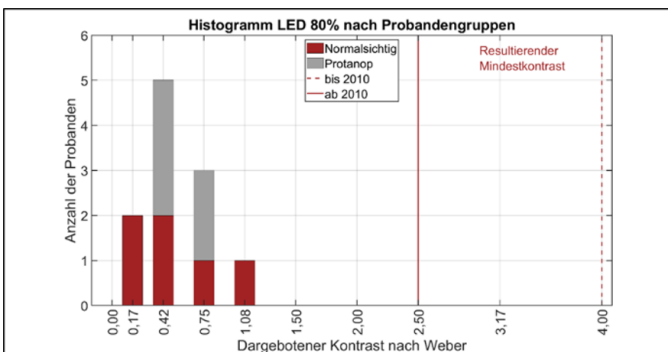


Bild 4: Histogramm 80 % LED nach Probandengruppen sortiert

Die technologiespezifische Betrachtung zeigt, dass keine Trennbarkeit hinsichtlich der ermittelten Schwellenkontraste zwischen den beiden Probandengruppen möglich ist. Sowohl die ermittelten Schwellenkontraste der protanopen wie auch der normalsichtigen Probanden verteilen sich ähnlich über die angegebenen Bereiche. Zudem liegen die ermittelten Schwellenkontraste 80 % unterhalb des gesetzlich möglichen Mindestkontrasts. 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.

4.2.3 Überprüfung der Nullhypothese bezüglich der Reaktionszeit

Sofern die vorliegende Protanopie einen Einfluss auf die Reaktionszeit hat, sollte sich das funktionell in Abhängigkeit der präsentierten Kontraststufe widerspiegeln. Aufgrund des prognostizierten Wahrnehmungsdefizits ist davon auszugehen, dass sich die Kontrastschwelle für protanope Personen zu höheren Kontrasten verschiebt.

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 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 gegeben.

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

5 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis der im Rahmen dieser Studie ermittelten Daten kann kein sicherheitsrelevanter Einfluss von Protanopie auf die Wahrnehmung von Kfz-Bremsleuchten im Straßenverkehr nachgewiesen werden. Die Daten bieten keine Grundlage für eine Änderung der derzeit geltenden gesetzlichen Regelungen. Die Autoren schließen sich allerdings der Auflage an, bei bekannter und diagnostizierter Protanopie oder Protanomalie den Patienten auf eine achtsame Fahrweise hinzuweisen.

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.

Zwar liegt der ermittelte Schwellenkontrast der Wahrnehmung knapp unter diesem theoretisch möglichen Mindestkontrast der Regelung, da es sich allerdings um eine Laborstudie handelt, in welcher sich die Probanden einzig auf das Erkennen des Bremssignals konzentrieren sollten, konnte der Einfluss von Nebenaufgaben, wie das Führen eines Fahrzeugs, nicht abgebildet werden. Üblicherweise werden solche Ergebnisse aus Laborstudien mit einem Praxisfaktor multipliziert. Mit welchem Faktor die 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 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. Um diesem Problem entgegenzuwirken wäre es denkbar, innerhalb der UNECE einen Mindestkontrast zwischen Schluss- und Bremsleuchte vorzuschreiben. Wie hoch dieser sein muss, wäre in einer weiteren Studie zu untersuchen.