

Neues Modell zur Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern

Stephan Völker, Michael Freyer, Sabine Raphael

L-LAB / Universität Paderborn

Salzkottener Str. 1

33106 Paderborn

Einleitung

Obwohl in den vergangenen Jahren viele Untersuchungen zum Thema Blendung von Kraftfahrzeugscheinwerfern durchgeführt und veröffentlicht wurden, konnte die Frage, ob die Leuchtdichte als weitere beschreibende Größe für die Blendung notwendig ist, nicht geklärt werden. Bei der Verwendung realer Scheinwerfer wurden offenbar zu viele Parameter gleichzeitig verändert, um eindeutige Ergebnisse erzielen zu können. Nach wie vor galt und gilt für die psychologische und die physiologische Blendung die Hornhautbeleuchtungsstärke als die beschreibende photometrische Größe. Dass diese Annahme nur beschränkt Gültigkeit hat, wurde bereits auf der "Licht 2004" in Dortmund gezeigt /VöRa04/.

Während wir für die Innenbeleuchtung das UGR - Verfahren zur Bewertung der psychologischen Blendung von Leuchten nutzen, existiert für die Kraftfahrzeugbeleuchtung nur die in den 80er Jahren von Bindels/Schmidt-Clausen entwickelte Bewertung basierend auf der Hornhautbeleuchtungsstärke /BiSC74/. Da die Scheinwerfer zu dieser Zeit von ihrer Lichtaustrittsfläche noch sehr ähnlich waren, besaß das vorgeschlagene Modell für die damals untersuchten Systeme durchaus seine Gültigkeit. Mit den heute üblichen Projektionsystemen und den zukünftig möglichen DMD- oder LED-Array-Scheinwerfern kommt man jedoch sehr schnell an die Grenzen dieser Bewertungsmethode.

In dem vorliegenden Beitrag soll ein neues Modell vorgestellt werden, mit dem sich die psychologische Blendung aus Leuchtdichtedaten berechnen lässt. Damit liegt nun nicht nur für die Innen- und Straßenbeleuchtung sondern auch für die Kraftfahrzeugbeleuchtung ein Modell der Blendungsbewertung basierend auf Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtedaten vor.

Ziel

Um die Frage nach der Relevanz von Leuchtdichtegrenzen für den Scheinwerfer beantworten zu können, sollten zunächst die klassischen Experimente in Teilen wiederholt und darauf aufbauend Versuche zum Einfluss der Leuchtdichte durchgeführt werden.

Folgende Hypothesen waren zu prüfen:

1. Die psychologische Blendung, welche über eine psychometrische Skala erfasst wird, hängt signifikant von der Hornhautbeleuchtungsstärke, der Hintergrundleuchtdichte, dem Blendwinkel und dem Alter der Versuchspersonen ab.
2. Zusätzlich beeinflusst die Scheinwerfergröße bzw. deren Leuchtdichte und die Lampenart das Blendurteil wesentlich.

Die Überprüfung dieser Hypothesen fanden sowohl im Schwarzen Labor, als auch im Lichtkanal mit einem speziellem Versuchsscheinwerfer im Rahmen zweier Diplomarbeiten

(Freyer /Fr04/; Raphael /Ra04/) und zweier Studienarbeiten (Kliebisch/Stahl /KlSt04/; Seyring/Wernicke /SeWe04/ statt. Die Validierung und Modellbildung erfolgte anschließend anhand zuvor gemessener Scheinwerferbewertungen /Me00/, /Gr01/, /Lö03/.

I. Laborversuche

Versuchsaufbau

Den Aufbau für die Versuche zur Bestimmung des Blendurteils im ‚Schwarzen Labor‘ zeigt Abbildung 1. Zwei bzw. drei Grad horizontal neben einem Fixationspunkt war die Blendquelle angeordnet. Als Blendquelle diente sowohl ein weiterer Diaprojektor, mit dem verschiedene Blendquellengrößen simuliert werden konnten, als auch ein spezieller Aufbau mit einer Gasentladungslampe. Der Abstand der Blendquelle zur Versuchsperson betrug 3,1 m, der periphere Winkel zwischen Fixationspunkt und Blendquelle 2° . Die Blendquelle wies in allen Versuchen eine homogene Leuchtdichteverteilung auf.

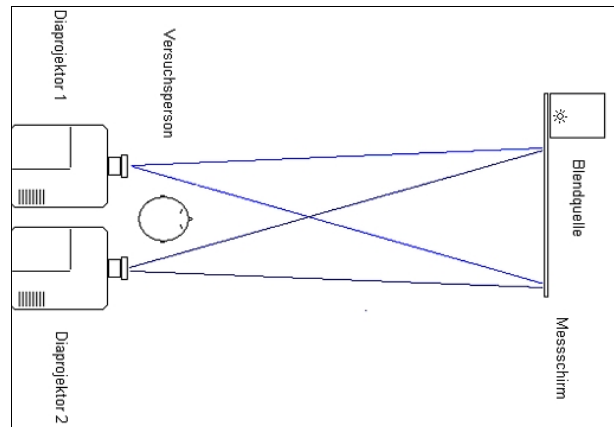


Abbildung 1: Versuchsaufbau im ‚Schwarzen Labor‘

Der Versuch dauerte etwa 30 Minuten. Die durchschnittliche Blendungszeit betrug 10 s. An den Versuchen nahmen 40 Versuchspersonen teil.

Versuchsmethodik

Für die durchgeführten Versuche wurde ein experimentelles Design verwendet. Als unabhängige Variable wurde die Leuchtdichte der Blendquelle systematisch variiert. Aufgrund der umgekehrten Proportionalität von Leuchtdichte und Fläche bei konstanter Beleuchtungsstärke musste mit Änderung der Leuchtdichte auch die Größe der Blendquelle verändert werden. Alle anderen Einflussgrößen auf die Blendung wurden konstant gehalten. Die während der Versuchsdurchführung gemessene Größe (Blendurteil) heißt abhängige Variable. Sie wurde mittels Fragebogen erfasst. Die Versuchsperson hatte dabei die Aufgabe, die Blendung zwischen unerträglich und unmerklich einzustufen. Um zu sehen, ob sich die abhängige Variable für unterschiedliche Leuchtdichten unterscheidet, wurde eine Varianzanalyse gerechnet.

Ergebnisse

Einfluss der Leuchtdichte auf das Blendurteil

In diesem Versuch wurde die Hornhautbeleuchtungsstärke auf 1 lx konstant gehalten und die mittlere Leuchtdichte einer homogenen Blendquelle zwischen 5.000 und 500.000 cd/m² variiert. Die Varianzanalyse ergab ein hoch signifikantes Ergebnis für die Abhängigkeit des subjektiven Blendurteils von der Leuchtdichte ($F_{(df=2)} = 70,3; p=0,000$).

Die Blendung wird nach Abbildung 2 mit zunehmender Leuchtdichte störender empfunden bzw. je größer der Scheinwerfer ist, desto geringer ist die Blendung bei gleicher Hornhautbeleuchtungsstärke (Abbildung 3).

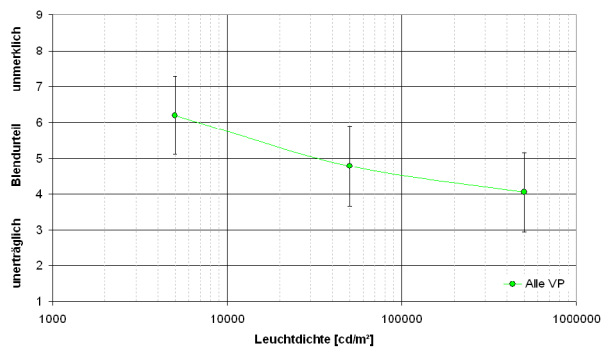


Abbildung 2: Subjektives Blendurteil in Abhängigkeit der Leuchtdichte des Scheinwerfers mit einfacher Standardabweichung

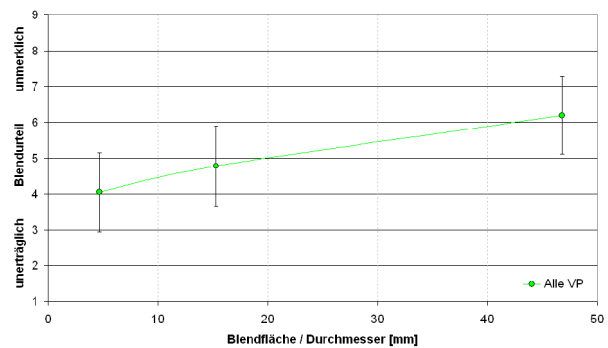


Abbildung 3: Subjektives Blendurteil in Abhängigkeit der Blendfläche mit einfacher Standardabweichung

Während die Blendquelle 1 mit einer Leuchtdichte von 5.000 cd/m² von den Versuchspersonen zwischen gering und erträglich eingestuft wird, bekommt die Blendquelle 3 mit einer Leuchtdichte von 500.000 cd/m² das Urteil: "Blendung erträglich bis störend".

II. Lichtkanalversuche mit Versuchsscheinwerfer Versuchsaufbau

Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau im Lichtkanal der Fa. Hella. Für die Versuchspersonen wurde die reale Straßensituation nachgebildet. Der Versuchsscheinwerfer stand in 25 m Entfernung vor den Versuchspersonen und befand sich auf der Blicklinie eines in 50 m befindlichen Scheinwerfers. Ebenfalls in 25 m war eine schwach leuchtende grüne LED in der Mitte der eigenen Fahrbahn als Fixationspunkt montiert.

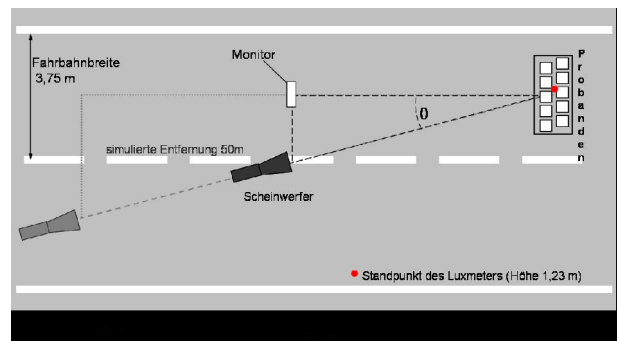


Abbildung 4: Versuchsaufbau im Lichtkanal

Versuchsmethodik

Die Versuchsmethodik ist identisch mit der im 'Schwarzen Labor'. Es wird ein experimentelles Design verwendet. Als Maß für die psychologische Blendung wurde das Blendurteil erfasst (abhängige Variable). Die Versuchspersonen hatten dabei die Aufgabe, die empfundene Blendung auf einer kontinuierlichen Skala (100 mm Linie) anzukreuzen. Die beiden Endwerte der Skala waren mit den verbalen Stützstellen "unmerklich" und "nicht tolerierbar" versehen. Als unabhängige Variable (Faktoren) wurden die Hornhautbeleuchtungsstärke (0 .. 3 lx) und die Größe der Blendquelle (Durchmesser 0,034..0,7°) systematisch variiert. An dem Versuch nahmen 40 Versuchspersonen teil, die in je vier Gruppen aufgeteilt wurden. Die Dauer des Versuches betrug 30 Minuten.

Ergebnisse

Einfluss der Beleuchtungsstärke

Wie die Varianzanalyse zeigt, stellt die Beleuchtungsstärke den wichtigsten Einflussfaktor ($F_{(df=3)} = 429,2$; $p = 0,000$) auf die psychologische Blendung dar. Mit zunehmender Beleuchtungsstärke am Auge des entgegenkommenden Kraftfahrers steigt die psychologische Blendung (Abbildung 5).

Einfluss der Größe bzw. der Leuchtdichte der Blendquelle

Aber auch für die Größe der Blendquelle lieferte die Varianzanalyse einen nicht zu vernachlässigenden F-Wert ($F_{(df=5)} = 95,7$; $p = 0,000$). Sie bestätigt damit, dass die Größe der Blendquelle neben der Beleuchtungsstärke eine wichtige Rolle bei der Bewertung der psychologischen Blendung spielt.

Neben dem Einfluss der Beleuchtungsstärke und der leuchtenden Fläche gibt es noch einen Interaktionseffekt zwischen der Beleuchtungsstärke und der leuchtenden Fläche ($F_{(df=3)} = 11,5$; $p = 0,000$). Grafisch erklärt sich diese Interaktion in den unterschiedlichen Verläufen der drei Kurven in Abbildung 5. Sie zeigt die Mittelwerte der subjektiven Bewertungen aller Versuchspersonen als Funktion des Durchmessers der Blendquelle. Für heute übliche Scheinwerfergrößen (Durchmesser: 40 - 200 mm) besteht ein signifikanter Einfluss der Blendquellengröße auf das Blendurteil. Je kleiner der Scheinwerfer, desto größer die psychologische Blendung. Steigt die Größe der Blendquelle über heute nicht übliche Scheinwerferflächen, so verringert sich der Einfluss des Durchmessers. Das Störempfinden bleibt annähernd konstant.

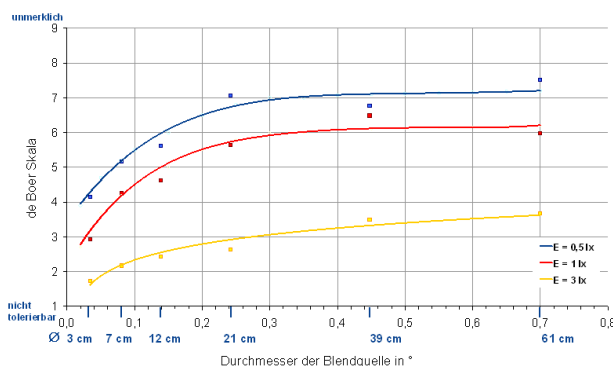


Abbildung 5: Psychologische Blendung über dem Durchmesser der Blendquelle in Grad bzw. dem Durchmesser eines Scheinwerfers in 50 m

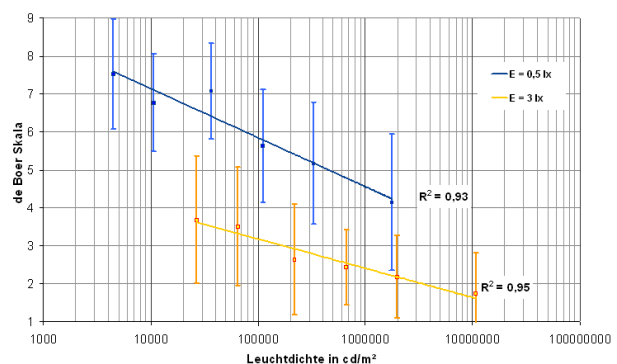


Abbildung 6: Psychologische Blendung über der mittleren Leuchtdichte des Scheinwerfers mit einfacher Standardabweichung

Wird die psychologische Blendung nicht über dem Durchmesser, sondern über der mittleren Leuchtdichte abgetragen, so erhält man Abbildung 6. Sie enthält zwar keine neuen Informationen, allegorisiert aber noch einmal die sehr hohe Korrelation zwischen der psychologischen Blendung und der Leuchtdichte. Mit zunehmender mittlerer Leuchtdichte der Blendquelle nimmt das subjektive Störgefühl bei konstanter Hornhautbeleuchtungsstärke zu.

III. Lichtkanalversuche mit realen Scheinwerfern

Versuchsaufbau

Statt des Versuchsscheinwerfers wurden in diesem Versuch reale Scheinwerfer verwendet, welche sich auf einer Walze in 50 m befanden. Diese Scheinwerfer wurden mit Lasern justiert und auf die übliche 1% Vorneigung eingestellt.

Ergebnisse

Einfluss der Beleuchtungsstärke

Abbildung 7 und 8 zeigen die Blendurteile der verschiedenen Untersuchungen sowohl beim Blick in den Scheinwerfer (foveale Blendung) als auch beim Blick auf die eigene Fahrbahn (periphere Blendung). Die Blendurteile wurden dabei über der im Punkt B50L gemessenen Hornhautbeleuchtungsstärke dargestellt.

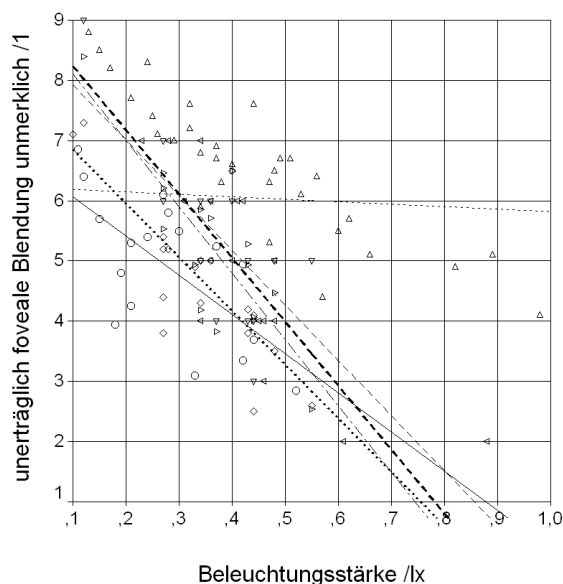


Abbildung 7: Blendurteil beim Blick in den Scheinwerfer als Funktion der Hornhautbeleuchtungsstärke (σ SD $\pm 1,7$ Bewertungsstufen)

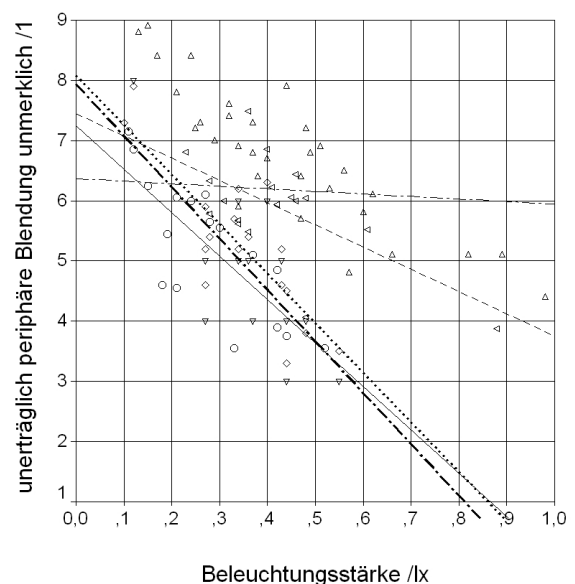


Abbildung 8: Blendung beim Blick auf die eigene Fahrbahn in Abhängigkeit der Hornhautbeleuchtungsstärke (SD $\pm 1,7$ Bewertungsstufen)

Die Diagramme zeigen, dass

1. die Hornhautbeleuchtungsstärke einen signifikanten Einfluss auf das Blendurteil sowohl beim Blick in den Scheinwerfer (foveale Blendung) als auch beim Blick auf die eigene Fahrbahn hat (periphere Blendung). Dies bestätigt die Ergebnisse der Laborversuche.
2. der Absolutwert des Blendurteils entscheidend vom dargebotenen Beleuchtungsstärkebereich abhängt. So kennzeichnen die Dreiecke nach oben einen Versuch, in dem die Beleuchtungsstärke zwischen 0,1 und 20 lx variiert wurde; bei allen anderen Versuchen lag die Hornhautbeleuchtungsstärke zwischen 0,1 und 1 lx. Damit sollte sinnvollerweise der Gültigkeitsbereich für diese Darstellung auf eine Hornhautbeleuchtungsstärke zwischen 0,1 und 1 lx begrenzt werden.
3. Beschränkt man sich auf den Beleuchtungsstärkebereich von 0,1 bis 1 lx, so ist eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit unterschiedlichen Versuchspersonen auch ohne

Ankerreize möglich, wie die beiden fetten Geraden bestätigen. Hier wurden dieselben Scheinwerfer verwendet, welche jedoch mit einem zeitlichen Abstand von 5 Monaten neu montiert und durch andere Versuchspersonen bewertet wurden. Damit sind Ankerreize für die Blendbeurteilung von Scheinwerfern nicht notwendig.

4. Die Abweichungen der Blendurteile von den Geraden lassen sich mithilfe der Leuchtdichte erklären. Liegen die Blendurteile unterhalb der Geraden, so weisen diese Scheinwerfer signifikant höhere Leuchtdichten auf, liegen sie über der Geraden, so waren ihre mittleren Leuchtdichten geringer. Somit bestätigt sich auch hier der in den Laborversuchen gefundene Einfluss der mittleren Leuchtdichte des Scheinwerfers.

Tabelle 1 zeigt die Determinationskoeffizienten zwischen der Hornhautbeleuchtungsstärke und dem Urteil beim Blick in den Scheinwerfer (foveale Blendung) und dem Urteil beim Blick auf die eigene Fahrbahn (periphere Blendung). Die Determinationskoeffizienten von durchschnittlich 0,6 weisen zwar auf einen hohen Zusammenhang zwischen Blendurteil und Hornhautbeleuchtungsstärke hin, lassen aber den Einfluss weiterer Faktoren vermuten.

R ²	02/00	07/00	10/00	02/03	07/03
foveale Blendung	0,62	0,6	0,67	0,44	0,63
periphere Blendung	0,65	0,51	0,39	0,6	0,63

Tabelle 1: Determinationskoeffizienten zwischen der Beleuchtungsstärke und den Blendungsurteilen

Einfluss der mittleren Leuchtdichte bzw. der Größe der Blendfläche

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen das Blendurteil jeweils beim Blick in den Scheinwerfer (foveale Blendung) und beim Blick auf die eigene Fahrbahn (periphere Blendung).

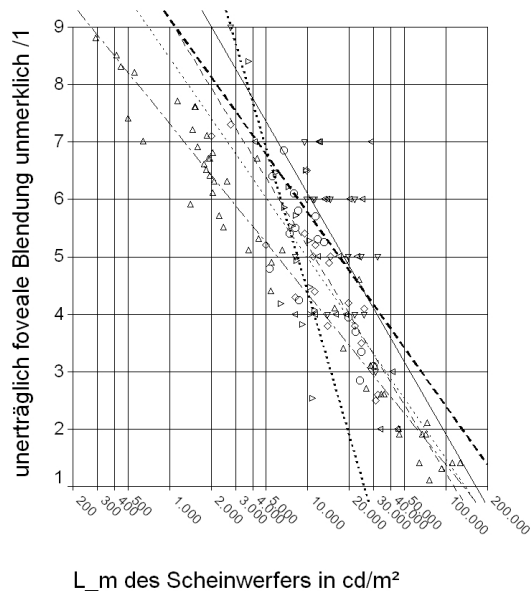


Abbildung 9: Subjektives Blendurteil beim Blick in den Scheinwerfer in Abhängigkeit der mittleren Leuchtdichte des Scheinwerfers

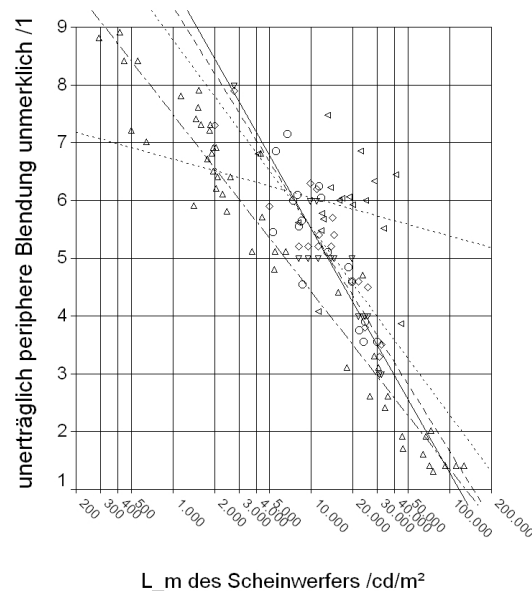


Abbildung 10: Blendung beim Blick auf die eigene Fahrbahn in Abhängigkeit der mittleren Leuchtdichte des Scheinwerfers

Erwartungsgemäß ergibt sich auch zwischen der mittleren Leuchtdichte der Scheinwerfer und dem Blendurteil ein hoher Zusammenhang, da Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte von realen Scheinwerfern nie unabhängig voneinander sind. Die einzelnen Versuche weisen Abweichungen von ± 1 Urteilswert auf. Dies liegt im Rahmen der mit dieser Methode erreichbaren Genauigkeit.

Tabelle 2 zeigt die Determinationskoeffizienten zwischen der mittleren Leuchtdichte der Scheinwerfer und dem Urteilswert jeweils beim Blick in den Scheinwerfer und am Scheinwerfer vorbei.

R ²	02/00	07/00	10/00	02/03	07/03
foveale Blendung	0,77	0,64	0,27	0,66	0,94
periphere Blendung	0,82	0,87	0,04	0,7	0,95

Tabelle 2: Determinationskoeffizienten zwischen Blendurteil und der mittleren Leuchtdichte

Folgende Aussagen lassen sich daraus ableiten:

1. Die hohen Determinationskoeffizienten bei der peripheren Blendung weisen mit Ausnahme des Versuches (10/00) auf eine hohe lineare Gesamtkorrelation hin.
2. Die Determinationskoeffizienten zwischen dem Blendurteil und der mittleren Leuchtdichte des Scheinwerfers sind bis auf den Versuch 10/00 höher, als zwischen dem Blendurteil und der Hornhautbeleuchtungsstärke.
3. Die Ursache für die deutliche Abweichung im Versuch 10/00 ist in den ausgewählten Scheinwerfern zu suchen. So wurden hier nicht nur Abblendlichtscheinwerfer bewertet, sondern auch Nebel- und Arbeitsscheinwerfer. Bei Einbeziehung von Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke konnte festgestellt werden, dass alle Scheinwerfer die unter der Regressionsgraden liegen, deutlich höhere Leuchtdichten besitzen als diejenigen, die auf der Geraden lagen. Andererseits wiesen Scheinwerfer, die über der Regressionsgraden lagen, deutlich geringere Beleuchtungsstärken auf, als diejenigen, die sich auf der Regressionsgraden befanden.

Damit lässt sich die Hypothese der Laborversuche bestätigen, dass sowohl die Beleuchtungsstärke, als auch die Leuchtdichte einen wesentlichen Einfluss auf das Blendurteil haben. Abbildung 11 zeigt das Blendurteil in Abhängigkeit der Hornhautbeleuchtungsstärke und der mittleren Leuchtdichte. Scheinwerfer mit hoher mittlerer Leuchtdichte aber geringer Beleuchtungsstärke (sehr kleine Scheinwerfer) führen ebenso zu mittleren Blendurteilen, wie Scheinwerfer mit hoher Beleuchtungsstärke und geringer mittlerer Leuchtdichte (sehr große Scheinwerfer). Erst die Kombination aus hoher Hornhautbeleuchtungsstärke und hoher mittlerer Leuchtdichte führte zu einer "störenden" Blendung.

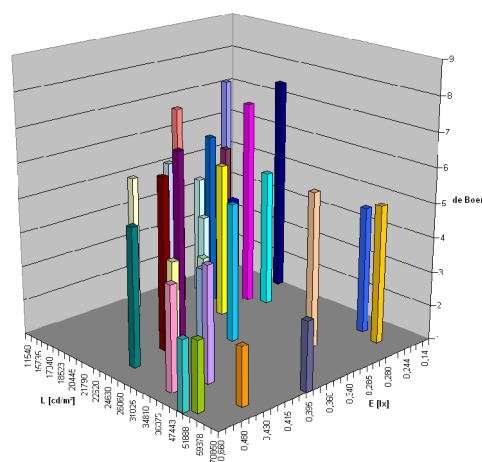


Abbildung 11: Blendurteil beim Blick in den Scheinwerfer in Abhängigkeit von der Hornhautbeleuchtungsstärke und der mittleren Leuchtdichte des Scheinwerfers

Zusammenfassung und Ausblick

Die Hornhautbeleuchtungsstärke ist der wichtigste Faktor für die psychologische Blendung. Wie gezeigt werden konnte, spielt jedoch auch die Größe der Scheinwerferfläche bzw. die Leuchtdichte für heute übliche Scheinwerfer mit einem Durchmesser von 40 bis 200 mm eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Je kleiner der Scheinwerfer, desto größer die psychologische Blendung. Will man die psychologische Blendung wirksam reduzieren, sind Leuchtdichteobergrenzen unumgänglich.

Das mathematische Modell für die Berechnung der psychologischen Blendung basierend auf den hier vorgestellten Daten, wird auf der Tagung Junior vorgestellt. Mit diesem Modell wird es möglich sein, die psychologische Blendung für alle heute üblichen und zukünftigen Scheinwerfer zu berechnen. Für die zukünftige Entwicklung von Scheinwerfern ist dieses Modell dringend erforderlich.

Literatur

- /VöRa04/ Völker, S.; Raphael, S., u. a.: Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte - eine kritische Diskussion des Blendungsmaßes für Kfz - Scheinwerfer. 16. Gemeinschaftstagung der lichttechnischen Gesellschaften der Niederlande, Deutschlands, Österreichs und der Schweiz, 19.-22.September Dortmund, 2004 Tagungsband
- /BiSC74/ Bindels, J. Th. H.; Schmidt-Clausen H.-J.: Assessment of discomfort glare in motor vehicle lighting. Lighting Research and Technology Vol 6 No 2 (1974)
- /Fr04/ Freyer, M.: Einfluss der Blendbeleuchtungsstärke und der Leuchtdichte auf die Blendung und den Schwellenkontrast bei homogenen und inhomogenem Umfeld. Diplomarbeit, L-LAB 2004
- /Ra04/ Raphael, S.: Blendungsbewertung von Scheinwerfern. Diplomarbeit, L-LAB/TU Ilmenau, 2004
- /SeWe04/ Seyring, C.; Wernicke, A.: Konzeption, Aufbau und Durchführung eines Versuches zur Ermittlung der physiologischen und psychologischen Blendung im Lichtkanal. Studien-arbeit L-LAB/TU Ilmenau 2004
- /KlSt04/ Kliebisch, D.; Stahl, F.: Abhängigkeit der physiologischen Blendung von der spektralen Verteilung der Lichtquelle (Lichtfarbe). Projektarbeit, L-LAB, TU-Ilmenau 2003
- /Me00/ Meyborg, M.: Untersuchung zum Blendverhalten unterschiedlicher Scheinwerfersysteme. Diplomarbeit, FH Wilhelmshafen, Hella KG 2000
- /Gr01/ Grote, U.: Physio-psychologische Untersuchungen zur Einführung der Leuchtdichte in die gesetzlichen Bestimmungen. Diplomarbeit Hella/Uni - GH Paderborn 2001
- /Lö03/ Löscher, C.: Berechnung und bewertender Vergleich unterschiedlicher Beleuchtungsstärken am Auge. Diplomarbeit, L-LAB, TU-Ilmenau 2003