

Untersuchungsmethode zur Bewertung von Flicker bei geteiltem Beleuchtungsfeld

(Method for Flicker Evaluation under Divided Illumination Condition)

Johannes L. Foltin, Dr. Tobias Ehlgen, Robert Bosch GmbH, Germany

Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz, Technische Universität Ilmenau, Germany

Kurzfassung

Bei Nacht ist der Anteil an schweren Verkehrsunfällen höher als bei Tage. Gründe hierfür sind häufig eine nicht angepasste Geschwindigkeit und eine geringe Fernlichtnutzung. Durch neuartige Scheinwerfersysteme und Fernlichtassistenten soll die durchschnittliche Sichtweite erhöht werden, so dass der Fahrer früher auf Gefahren reagieren kann. Exemplarisch seien hier neben dem klassischen Fernlichtassistenten die adaptive Hell-Dunkel-Grenze und das blendfreie Fernlicht genannt [Kal+07].

Häufiges Umschalten zwischen Abblendlicht und Fernlicht, sowie eine schnelle Anpassung der Hell-Dunkel-Grenze, kann hektisch und störend wirken. Um die Akzeptanz des Assistenzsystems und den erlebten Komfort des Fahrers zu erhöhen, muss der Diskomfort minimiert werden. Visueller Diskomfort kann durch eine geringe Sichtweite, aber auch durch Bewegung und Blinken von Objekten hervorgerufen werden [Sal+97]. Spannungsschwankungen im Stromversorgungsnetz können eine flackernde Beleuchtung (Flicker) verursachen, die meist als störend empfunden wird [Cai09]. Kfz-Scheinwerfer beleuchten bei Nacht vorwiegend die Straße, was zusammen mit dem unbeleuchteten Hintergrund zu einer geteilten Beleuchtungssituation führt. Aufbauend auf der in [Norm10, Cai09] vorgestellten Flickermessung, wird der durch die dynamische Veränderung von Lichtverteilungen hervorgerufene Diskomfort gemessen.

In der vorgestellten empirischen Studie wird die Störschwelle bei geteilter Beleuchtungssituation abhängig von Schaltfrequenz und Geschwindigkeit der Helligkeitsänderungen für die Bewertung von Fernlichtassistenzsystemen ermittelt. Der Einfluss der Sichtweite und anderer Faktoren auf den Diskomfort soll mit der Durchführung einer Laboruntersuchung beseitigt werden. Während der Untersuchung wird die Beleuchtungssituation mit einem Projektor dynamisch variiert. Die Versuchspersonen bearbeiten eine Sehaufgabe, damit sie sich nicht auf die sich ändernden Beleuchtungsverhältnisse konzentrieren. Die subjektive Bewertung des Diskomforts der Versuchspersonen wird durch Befragung ermittelt.

Abstract

At night the relative amount of serious accidents is higher than in daytime. Two common reasons for the higher risk are an inadequate velocity and little usage of high beam. New headlight technologies and headlight assistants systems increase the average sight distance, so that the driver is able to react earlier to dangerous situations. For instance, the regular high beam assistant as well as the Adaptive Cut-Off-Line and the glare free high beam systems [Kal+07] are already available on the market.

Switching between low and high beam as well as fast adaptation of the cut-off-line can appear hectic and annoying to the driver. To increase acceptance and convenience of automatic headlight systems, the discomfort has to be minimized. This visual discomfort is known to be caused by adverse sight conditions or by moving or flickering objects, which distract the driver's attention [Sal+97]. This can be similar to voltage fluctuations in power networks that also cause disturbing flicker in illumination [Cai09]. In case of the headlight systems, the road is mainly illuminated whereas the background scene stays unlighted which results in a divided illumination. Based upon results presented in [Norm10, Cai09], the discomfort caused by the switching in headlight systems is analyzed.

In an experimental study the threshold of irritation, depending on switching frequency and rate of brightness change, is determined under divided illumination conditions for evaluation of headlight assistant systems. The influence of sight condition as well as other parameters on discomfort is eliminated by performing the study in the laboratory. The illumination scene is varied dynamically during the study using a projector. The test persons perform a visual task in order to not concentrate on the changing illumination. Personal judgement of discomfort is determined using a questionnaire.

Einleitung

Die relative Häufigkeit schwerer Unfälle steigt bei Nacht gegenüber dem Tag deutlich an. Gründe hierfür sind häufig neben einer nicht angepassten Geschwindigkeit auch eine geringe Fernlichtnutzung. Die erhöhte Unfallgefahr kann teilweise auf die schlechten Sichtbedingungen bei Nacht zurückgeführt werden [Ket+09, Jeb+08].

Die durchschnittliche Sichtweite soll durch neuartige Scheinwerfersysteme und Fernlichtassistenten erhöht werden, so dass der Fahrer früher auf Gefahren reagieren kann. Der Gebrauch des Fernlichts kann durch (adaptive) Fernlichtassistenten deutlich erhöht und damit die Sichtweite verbessert werden [Sch+09]. Neben dem klassischen Fernlichtassistenten sind mittlerweile die adaptive Hell-Dunkel-Grenze und das blendfreie Fernlicht [Kal+07, Sch+09] erhältlich. Die Assistenzsysteme erfassen das Fahrzeugumfeld mittels einer Kamera und stellen eine passende Lichtverteilung ein [Sch+09, WHW09a].

Die Güte von Lichtverteilungen, wie Abblendlicht und Fernlicht, können in statischen Versuchen beispielsweise über die Kriterien Helligkeit, Reichweite und Blendungsverhalten bewertet werden [Dah01, Man+07]. Die Qualität eines Scheinwerfersystems kann in die Bereiche „Sicherheit“ und „Komfort“ unterteilt werden [Ham+00]. Unter dem Sicherheitsaspekt kann man die Reichweite und den Ausleuchtungsbereich der Scheinwerfer verstehen [Ham+00], ebenso wie die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer (vgl. [Bhi+77]). Zum Komfort werden in [Ham+00] die Leuchtdichte der Straße und insbesondere die Homogenität der Ausleuchtung durch die Scheinwerfer gezählt.

In [Man+07] werden Assistenzfunktionen (z.B. Fernlichtassistent) ausschließlich über deren Vorhandensein bewertet, wobei die Qualität der Scheinwerferansteuerung nicht bewertet wird. Zur Bewertung verschiedener Scheinwerferansteuerungen („Ausleuchtungsstrategien“) werden in [Ros05] Maßzahlen eingeführt, mit denen die Effizienz, zeitliche Konstanz und die Änderungsrate über die Anzahl der sich ändernden Mikrospiegel (Pixel), welche die Lichtverteilung steuern, ermittelt wird [Ros05].

Schnelles Umschalten zwischen Abblendlicht und Fernlicht bei Fernlichtassistenten kann als störend empfunden werden. Es stellt sich die Frage, wie sehr der Fahrer durch die sich ändernde Beleuchtung gestört wird und wie dynamisch ein Fernlichtassistent ausgelegt werden kann, ohne dass Diskomfort beim Fahrer erzeugt wird.

Flicker, der durch schnell ändernde Beleuchtungsverhältnisse hervorgerufen wird, ist meist störend [Sal+97]. Flicker durch Helligkeitsänderungen in der Beleuchtung kann beispielsweise durch Spannungsschwankungen hervorgerufen werden [Cai09]. Für die Bewertung von Spannungsschwankungen, gibt es Flickermeter, mit denen die Akzeptanz der Spannungsschwankung (Helligkeits-Änderung), über eine Störschwelle der Empfindung des Menschen bewertet wird. Dabei wird die Versorgungsspannung gemessen und über verschiedene Filter nichtlinear umgeformt, sodass mittels statistischer Methoden die Beeinträchtigung durch Spannungsschwankungen ausgewertet werden kann [Norm10].

Das Flickermeter-Modell besteht aus drei logischen Komponenten [Han+05] (siehe Abbildung 1):

1. Lampenmodell (Glühlampe 230V, 60W)
2. Modell der menschlichen Wahrnehmung
3. statistische Auswertung

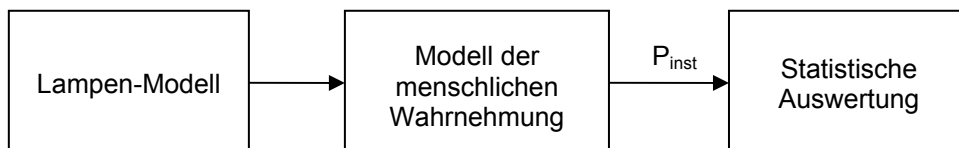


Abbildung 1: schematische Darstellung der drei logischen Komponenten des Flickermeters [Norm10] nach [Han+05]

Das in [Norm10] beschriebene Flickermeter ist auf die Bewertung der Flickerempfindung bei Beleuchtung durch eine Glühlampe mit 60 Watt Leistung bei vorgegebener Netzspannung und -frequenz ausgelegt. Das Lampenmodell und das Modell der menschlichen Wahrnehmung sind in [Norm10] durch gemeinsame Filter verknüpft. Durch Anpassung des Flickermeters können jedoch die Auswirkungen auf andere Lampentypen gemessen werden [Cai09, Per+07b].

Zur Entwicklung und Auslegung eines adaptiven Fernlichtassistenten soll ein angepasstes Flickermeter-Modell entwickelt werden, um den erlebten (Dis-) Komfort des Systems objektiv zu bestimmen. Es wird im Folgenden eine Untersuchung vorgestellt, mit deren Ergebnisse Anpassungen vorgenommen werden können, um das Lampenmodell des Flickermeters für Fernlichtassistenten zu modifizieren.

Herleitung und Definition der Untersuchung

In diesem Abschnitt werden nach einer Einführung in Komfort und Diskomfort der Aufbau und der Ablauf der Untersuchung vorgestellt.

Komfort und Diskomfort

Komfort muss nicht das Gegenteil oder die Abwesenheit von Diskomfort sein, denn beide Empfindungen können gleichzeitig auftreten. Komfort wird mit „Gefallen“, Diskomfort mit „Erleiden“ in Verbindung gebracht. Ein angenehmes Komfortgefühl kann sich nur bei geringem Diskomfort einstellen [Zha+96, Bub03, Bub02]. Diskomfort („Erleiden“) wird häufig mit physiologischen und biomechanischen Einflussfaktoren in Verbindung gebracht [Zha+96]. Visueller Diskomfort wird beispielsweise durch blinkende Objekte, aber auch durch flackernde Beleuchtung hervorgerufen [Sal+97, vgl. Cai09]. Änderungen in der Sichtweite und die damit verbundene Anpassung des Sehapparats können ebenso visuellen Diskomfort hervorrufen (vgl. „Task Difficulty“ [Sal+97] S.880).

Bei der Untersuchung zur Anpassung des Flickermeters wird der Grad der Störung, d.h. des unangenehmen Reizes für den Fahrer durch einen schnellen Wechsel der Lichtverteilungen, ermittelt. Bei der Entwicklung und Anpassung einer Scheinwerferansteuerung muss der Diskomfort für den Fahrer vermieden werden. Eine komfortable Ansteuerung soll in diesem Zusammenhang bedeuten, dass durch den Fernlichtassistenten möglichst wenig Diskomfort hervorgerufen wird, was den Fahrer stören würde.

Mit den Methoden der Psychophysik kann man nur den Bereich des Diskomforts untersuchen, nicht den Bereich des Komforts [Bub03 S.6]. Bei der Untersuchung von Beanspruchung können drei Kategorien von Messmethoden unterschieden werden [Spr08 S.67]:

1. subjektive Messmethoden (Selbstreport)
2. performancebasierte Messmethoden
3. physiologische Messmethoden

Komfort kann über subjektive Messmethoden, wie einem Fragebogen, gemessen werden. Diskomfort kann über performancebasierte (z.B. Fähigkeit Spur zu halten) und physiologische Messmethoden (Reaktion des Körpers) ermittelt werden [Bub02, Spr08]. Bei der Planung und Auswertung des Versuchs muss beachtet werden, dass Diskomfort (insbesondere beim Sitzen) von der Dauer des Reizes abhängt [Zha+96, Bub03].

In der beschriebenen Untersuchung wird der erlebte Diskomfort bewertet, weshalb sowohl performancebasierte als auch physiologische Messmethoden eingesetzt werden. Zusätzlich werden Fragebögen eingesetzt, um die subjektiv empfundene Störung zu ermitteln. Man geht dabei davon aus, dass die Versuchspersonen den Grad der Störung beschreiben können (vgl. [Gel+90]), oder zumindest benennen können, ob sie sich gestört fühlen oder nicht (vgl. [Joh+79] nach [Spr08 S.70], Störschwelle für [Norm10]).

Versuchsaufbau

Komfort kommt durch unterschiedliche Sinneseindrücke zu Stande, wobei neben dem Auge viele weitere Sinnesorgane z.B. zur Erfassung der Eigenbewegung (Vestibularorgan) oder Vibrationen (Mechanorezeptoren) genutzt werden [Bub03]. Um den Einfluss der Faktoren, die nicht mit der Scheinwerfer-Ansteuerung zusammenhängen zu minimieren werden diese konstant gehalten.

Die Ansteuerung der Scheinwerfer ist stark vom Auftreten und Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer abhängig. Um vergleichbare Ergebnisse bei den Versuchspersonen zu erhalten, muss die Umgebung der Untersuchung bei allen Versuchen möglichst gleich sein. Bei der Durchführung einer Laboruntersuchung können diese Faktoren kontrolliert werden und auch den möglichen Einfluss der sich ändernden Sichtweite auf den visuellen Diskomfort konstant gehalten werden (vgl. [Sal+97]). Die Sichtweite, die ein Fahrer bei Nutzung eines Scheinwerfersystems hat, kann auf andere Weise, beispielsweise durch Analyse der Lichtverteilungen, bewertet werden (z.B. [Bhi+77, Dah01]).

Die Anpassung des Flickermeters basiert in [Cai09] ebenfalls auf Messungen im Labor. Über die Durchführung einer Laboruntersuchung können Vergleiche zwischen Ergebnissen dieser Untersuchung mit Ergebnissen des „klassischen“ Flickermeters [Norm10] vorgenommen werden.

Eine Laboruntersuchung mit einer Projektionsleinwand in einer festen Entfernung wird verwendet, um den Einfluss der Sichtweitenänderung auf den Diskomfort zu entfernen. So wird bei der Untersuchung ausschließlich der Flickereinfluss, hervorgerufen durch die Änderung der Lichtverteilung, gemessen. Der schematische Versuchsaufbau der Laboruntersuchung ist in Abbildung 2 zu sehen.

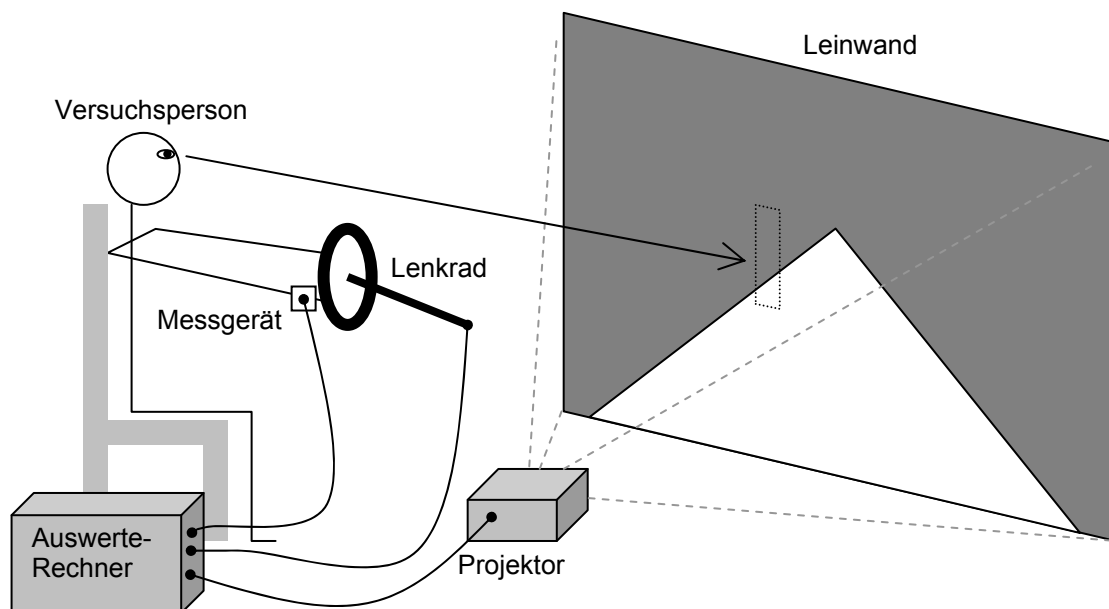


Abbildung 2: Versuchsaufbau der Laboruntersuchung

Die Versuchsperson sitzt vor einer Leinwand, auf der als Flicker-Stimulus mit einem Projektor eine sich periodisch ändernde Szene dargestellt wird. Die Versuchsperson interagiert über ein Lenkrad und einen Simulations-Auswerte-Rechner mit der dargestellten Szene. Parallel zur Simulation nimmt ein Messgerät die physiologische Reaktion der Versuchsperson auf. Zur Vereinfachung der Untersuchung wird ausschließlich die Reaktion auf Helligkeitsunterschiede, nicht auf Farben, gemessen und ausgewertet.

Diskomfort durch Beanspruchung äußert sich in physiologischen Reaktionen, die objektiv an der Versuchsperson gemessen werden können (vgl. [Spr08]). Es gibt verschiedene Messgrößen, die für die Bewertung des Flickers bei Fernlichtassistenten verwendet werden könnten (nicht abschließend):

- Hautleitwert [Spr08]
- Blutdruck und Herzfrequenz [Spr08]
- Durchblutung des Auges [Per+09]
- Pupillendurchmesser [Ema+04, Per+07a]

In [Spr08] wurden zur Bewertung der Beanspruchung einer Versuchsperson durch Infrarot-Nachtsichtsysteme im Fahrzeug der Hautleitwert und der Blutdruck gemessen. Der Leitwert der Haut steigt mit wachsender Beanspruchung. Die Messung des Hautleitwertes zeichnet sich in der Untersuchung durch eine schnelle messbare Reaktion des Körpers auf den Stimulus aus [Spr08].

Über Laufzeitmessungen des Pulses an zwei verschiedenen Stellen des Körpers kann, nach einer Kalibrierungsphase, der Blutdruck der Versuchsperson kontinuierlich gemessen werden. Die Reaktion des Körpers ist bei der Messung von Beanspruchungen in [Spr08] langsamer als die Reaktion des Hautleitwertes.

Mittels Lasermessung kann die Durchblutung von Gefäßen nahe dem optischen Nerv im Auge gemessen werden. In [Per+09] wird von der Durchblutung auf den empfundenen Grad der Flickerempfindung geschlossen.

In [Per+07a] wird, aufbauend auf einem physiologischen Modell der Anpassung des Pupillendurchmessers, die Flicker-Empfindung berechnet. Die Simulationsergebnisse sind vielversprechend, sodass man als physiologische objektive Messgröße den Pupillendurchmesser und dessen Änderung auswerten könnte.

Die Untersuchungsergebnisse sollen später für die Bewertung von (adaptiven) Fernlichtassistenten eingesetzt werden können. Daher soll eine Verifikation über einen Feldversuch durchgeführt werden können. Im Feldversuch sollte der Fahrer vom Messinstrument nicht eingeschränkt werden [Spr08]. Daher wird auf die etablierte Messung des Hautleitwertes zurückgegriffen.

Diskomfort äußert sich in physiologischen Reaktionen [Spr08, Bub02], jedoch wird bei der Bewertung von psychologischer Blendung der Selbstreport mit einer sogenannten De Boer-Skala [Gel+90] eingesetzt. Das Flickermeter [Norm10] beruht ebenso auf Befragungen von Versuchspersonen. Die Befragung der Versuchspersonen nach der subjektiven Einschätzung wird in dieser Untersuchung daher zusätzlich durchgeführt. Dies bietet den Vorteil, dass mit relativ geringem Durchführungs- und Auswertungs-Aufwand die subjektive Meinung der Versuchspersonen direkt erfragt werden kann [Spr08].

Die Versuchsperson soll verschiedene Stimuli bewerten, wobei die Bewertung jedes einzelnen Stimulus direkt nach dem jeweiligen Teilversuch stattfindet. Die Frage an die Versuchsperson wird auf der Projektionsfläche eingeblendet, dass sowohl die Antworten auf die vorherigen Fragen verborgen bleiben, als auch der Einfluss des Versuchsleiters gering gehalten wird (vgl. [Bor+06]).

Nebenaufgabe

Im Straßenverkehr besteht die Primäraufgabe des Fahrers in der Fahrzeugführung [Woe+07]. Der Fahrer konzentriert sich nicht ausschließlich auf die Beleuchtungsverhältnisse (sonst wäre der Anteil der Fahrten mit Fernlicht vermutlich höher). Daher wird die Versuchsperson während der Laboruntersuchung ebenso durch die Bearbeitung einer Aufgabe von der sich ändernden Beleuchtung abgelenkt.

Neben der Messung der physiologischen Reaktion soll der Einfluss des Flickers auf die Fahrleistung gemessen werden. Die Aufgabe wird so definiert, dass mit ihr eine Performance-Messung möglich ist.

Über die dargestellte Szene wird auf der Projektionsfläche ein Rechteck projiziert, das sich horizontal über die Szene bewegt (siehe Abbildung 3, Abbildung 4). Die Versuchsperson muss ein kleines auf die Szene projiziertes Rechteck innerhalb des sich bewegenden Rechtecks halten, indem sie über ein Lenkrad Einfluss auf die Position des kleinen Rechtecks ausübt. Die Rechtecke bestehen aus vielen abwechselnd weißen und schwarzen kleineren Rechtecken, um unabhängig von der Beleuchtungssituation des Hintergrundes einen ausreichenden Kontrast zum Hintergrund bereitzustellen (siehe Abbildung 3).

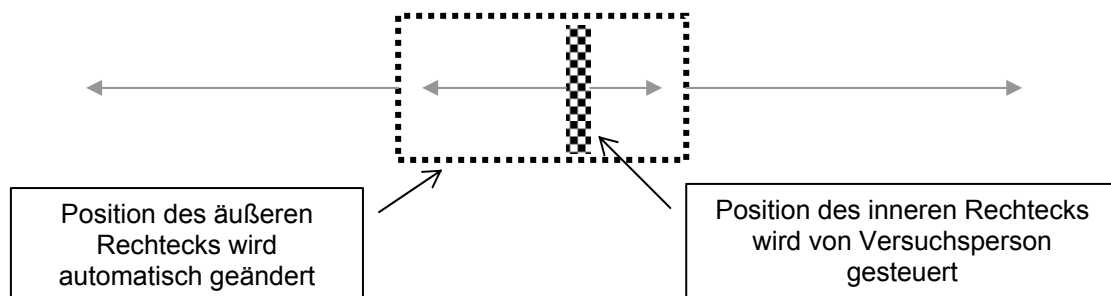


Abbildung 3: schematische Darstellung der Rechtecke, die für die zu bearbeitende Aufgabe horizontal bewegt werden

Während der Fahrt fixiert der Fahrer meist einen Punkt, den sogenannten Fixationspunkt, an. Die Lage des Fixationspunktes ist abhängig vom Fahrer, aber auch von der Ausleuchtung und dem Straßenverlauf [Ewe02 S.12ff., Woe+07]. Die Versuchsperson blickt auf die Rechtecke, die sich innerhalb auf der Projektionsfläche in der dargestellten Szene befinden, um die Aufgabe zu bearbeiten. Um den Versuch realitätsnah zu gestalten, bewegt sich das Rechteck, auf das die Versuchsperson blickt, auf der durchschnittlichen Höhe des Fixpunktes beim Auto fahren (siehe Abbildung 4). Das Rechteck ist so hoch, dass es einen großen Teil der Höhe des Fixationsbereichs abdeckt, sodass die Versuchsperson zur Bearbeitung der Aufgabe eine vertraute Blick-/Fixationshöhe einnehmen kann. Das Flackern in der Untersuchung tritt damit in dem Bereich des Sichtfeldes auf, wo es im realen Straßenverkehr bei Änderung der Lichtverteilung auftritt. Man erhält dadurch Ergebnisse, die mit der Realität vergleichbar sind.

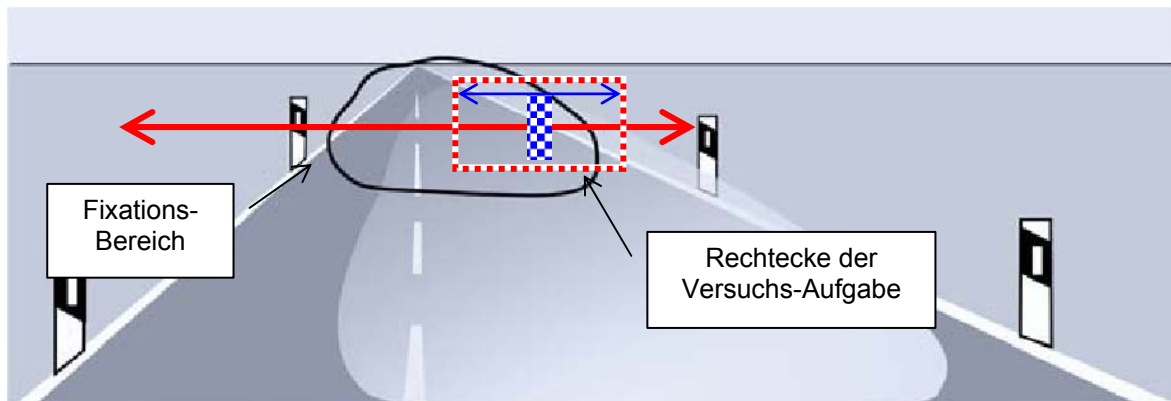


Abbildung 4: Fixationsbereich aus [Woe+07] (modifiziert) und zwei Rechtecke für die Aufgabe; Rechtecke sind auf Höhe des Fixationsbereichs – in dieser Abbildung eingefärbt, bei der Untersuchung schwarz-weiß

Die beschriebene Aufgabe der Versuchsperson kann für eine Performance-Messung genutzt werden. Das Messkriterium ist die Abweichung des kleinen Rechtecks, das die Versuchsperson steuert, von der Mitte des umschließenden sich selbst bewegenden Rechtecks. Zusätzlich kann ausgewertet werden, welchen Einfluss die Versuchsdauer und Flickerfrequenz auf die Leistungsfähigkeit der Versuchsperson haben.

Die Versuchspersonen bewerten nach jedem Teilversuch die dargestellte Szene zum Einen auf das Vorhandensein einer Störung durch die Änderung der Beleuchtungsverhältnisse (vgl. Flicker-Kurve [Cai09, Norm10]) und zum Anderen den Grad der Störung über eine übersetzte De Boer-Skala (siehe Tabelle 1 rechte Spalte).

Tabelle 1: Skalenwert (links), de Boer-Skala englisch aus [Gel+90] (Mitte), eingesetzte Skala nach [Bae06] (rechts)

Zahlenwert	Beschreibung (engl.)	Genutzte deutsche Übersetzung
1	Unbearable	Unerträglich
2		
3	Disturbing	Störend
4		
5	Just Acceptable	Gerade zulässig
6		
7	Satisfactory	Befriedigend
8		
9	Just Noticeable	Unmerklich

Untersuchte Szenen

Das Flickermeter, wie es im Standard [Norm10] definiert ist, gilt nur für eine Glühlampe. Es kann nicht ohne Modifikation für die Bewertung der Reaktion auf Spannungsschwankungen bei anderen Lampentypen eingesetzt werden [Cai09, Per+07b]. Bei der Laboruntersuchung zur Anpassung des Flickermeters an die Bewertung von (adaptiven) Fernlichtassistenten kommen verschiedene Szenen zum Einsatz, die von der Versuchsperson bewertet werden. Dabei werden bei der Projektion zusätzlich zum geteilten Beleuchtungsfeld auch die vollständige Ausleuchtung der Projektionsfläche sowie Fotografien verwendet, um für die Anpassung des Flickermeters die Brücke zwischen der Literatur (insbesondere [Norm10]) und der Realität (Fernlichtassistent im Straßenverkehr) zu schlagen.

Bei der Fahrt auf einer Straße ist, im Vergleich zum Flicker auf Grund von Spannungsschwankungen, nicht das gesamte Sichtfeld beleuchtet. Es kommt zu einem geteilten Beleuchtungsfeld (vgl. [Dam95]), wobei Teile der Straße beim Umschalten zwischen Abblendlicht und Fernlicht unterschiedlich stark beleuchtet werden (siehe Abbildung 5). Abblendlicht hat, abhängig von der Einbauhöhe, eine geometrische Reichweite von ca. 65 Metern [Dam95, Jeb+08]. Die geometrische Reichweite von Fernlicht auf einer ebenen Straße ist (theoretisch) unendlich. Wird zwischen Abblendlicht und Fernlicht hin- und hergeschaltet, ergeben sich insbesondere im Bereich ab 65 Metern (geometrische Reichweite des Abblendlichts) Unterschiede.

Das Flickermeter [Norm10] bewertet modellbasiert Helligkeits-Schwankungen von Beleuchtungsmitteln. Die Helligkeit der Lichtquelle von Scheinwerfern ändert sich in der Regel nicht (insbesondere bei Projektionssystemen mit Hochdruck-Gasentladungslampen). Verschiedene Lichtverteilungen werden dort über Blenden- oder Walzenmodule subtraktiv erzeugt (vgl. [Kal+07]). An Stelle der Helligkeit ändert sich der Lichtstrom in gewissen Raumwinkелеlementen, d.h. einer Fläche auf dem Projektionsschirm (vgl. [Ros05]). Ziel der Untersuchung des geteilten Beleuchtungsfeld ist die Abhängigkeit der Flickerempfindung von der relativen Anzahl der sich verändernden Raumwinkелеlemente zu ermitteln (vgl. Maßzahlen [Ros05]).

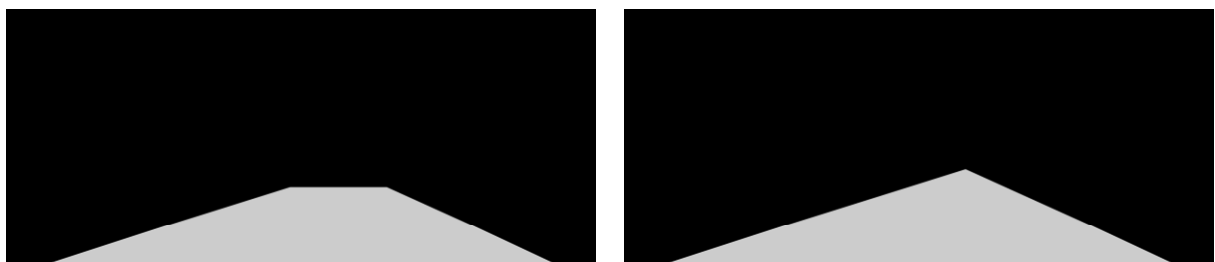


Abbildung 5: schematische Darstellung der Lichtverteilung von Abblendlicht (links) und Fernlicht (rechts) auf einer Straße aus Fahrerperspektive zur Untersuchung mit geteiltem Beleuchtungsfeld

Für die Untersuchung wird zwischen einer schematischen Darstellung von einer mit Abblendlicht oder Fernlicht beleuchteten acht Meter breiten Straße aus Fahrerperspektive umgeschaltet (siehe Abbildung 5, vgl. [Dam95]). Die Leuchtdichte der Straße beträgt $0,1 \text{ cd/m}^2$ [Dam95 S.60f.].

Adaptive Fernlichtassistenten wie die adaptive Hell-Dunkel-Grenze [Kal+07] erzeugen einen fließenden Übergang zwischen Abblendlicht und Fernlicht, indem der vertikale Abstrahlwinkel des Lichts über beispielsweise eine Blende angepasst wird. In der Untersuchung werden adaptive Fernlichtassistenten modelliert, indem ebenfalls der

vertikale Abstrahlwinkel angepasst wird. Dies entspricht einer kontinuierlichen Änderung der maximalen Höhe des Ausleuchtungsbereichs auf der Projektionsfläche (siehe Abbildung 6).

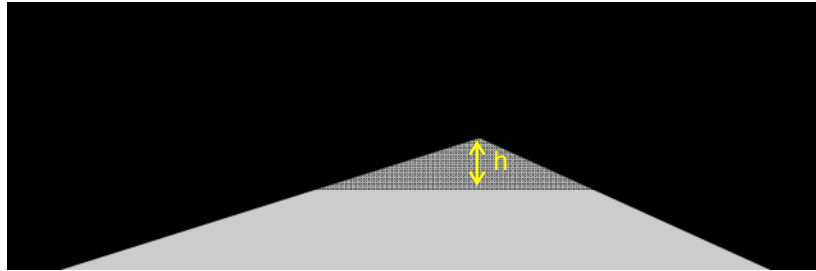


Abbildung 6: lineare Höhenänderung auf Projektionsschirm als Folge der linearen Änderung des Abstrahlwinkels bei adaptiven Fernlichtassistenten

Während der Untersuchung wird die Höhe auf der Projektionsfläche linear verändert, was ähnlich einer linearen Änderung des Abstrahlwinkels bei einem adaptiven Fernlichtassistenten ist. Die Änderungsrate der Höhe pro Zeit h' berechnet sich aus der Höhendifferenz zwischen den schematischen Darstellungen von Abblendlicht und Fernlicht Δh und der Zeitdauer für die Änderung Δt (siehe Abbildung 7).

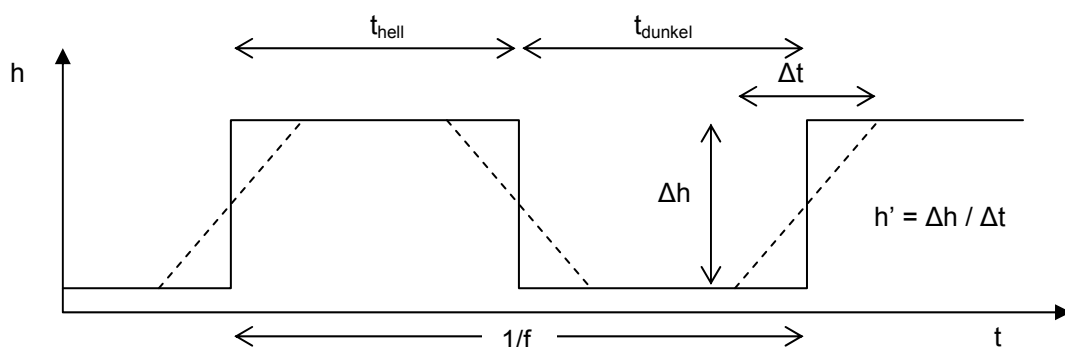


Abbildung 7: Definition des Ansteuerungsfrequenz f und Berechnung des Gradienten h' als Höhenänderung pro Zeit; Übergangsbereich bei adaptiven Fernlichtassistenten (gestrichelte rampenförmige Linie), hartes Umschalten zwischen Abblendlicht und Fernlicht bei klassischem Fernlichtassistenten (Rechteck-Signal)

Normalerweise werden mit einem Flickermeter Helligkeits-Schwankungen ausgewertet, die sich auf das gesamte Sichtfeld beziehen (vgl. [Cai09]). Um die Ergebnisse des geteilten Beleuchtungsfeldes mit denen des gesamten Sichtfeldes zu vergleichen, werden zusätzlich Messungen bei einer vollständigen Ausleuchtung der Projektionsfläche durchgeführt (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: Helligkeitsänderung des gesamten projizierten Bereichs für Vergleichsmessung; L_{dunkel} links und L_{hell} rechts (siehe Formel 1)

Bei der Bewertung anderer Lampentypen wird in [Cai09] die relative Helligkeitsschwankung berechnet. Bei der geteilten Beleuchtung ist dies nicht möglich, da hier ausschließlich die Größe der beleuchteten Projektionsfläche variiert wird. Aus der relativen Änderung der Größenverhältnisse kann auf die relative Änderung der Helligkeit für eine Vergleichsmessung geschlossen werden (siehe Formel 1). Die durchschnittliche Leuchtdichte bei der Vergleichsmessung entspricht der Leuchtdichte der Straße bei geteiltem Beleuchtungsfeld.

Formel 1: Berechnung der relativen Helligkeitsänderung für Vergleichsmessung bei vollständiger Beleuchtung aus der relativen Größenänderung bei geteiltem Beleuchtungsfeld

$$\frac{A_{\text{Fernlicht}}}{A_{\text{Abblendlicht}}} = A_{\text{rel}} = L_{\text{rel}} = \frac{L_{\text{hell}}}{L_{\text{dunkel}}}$$

Die Bewertung des Flickers unter Laborbedingungen soll für die Flickerempfindung bei Fahrten im realen Straßenverkehr genutzt werden. Durch Verwendung von Fotografien aus Fahrerperspektive wird die Laboruntersuchung realitätsnäher, ohne weitere Änderungen an der Testumgebung vornehmen zu müssen (siehe Abbildung 9). Die Fotografien werden in der Helligkeit so angepasst, dass im Nachbereich vor dem Fahrzeug eine Helligkeit von ca. 0,1 cd/m² herrscht und damit der Helligkeit bei geteiltem Beleuchtungsfeld entspricht. Aus den miteinander vergleichbaren Messergebnissen kann ein Praxisfaktor ermittelt werden, mit dem die Ergebnisse des geteilten Beleuchtungsfeld an die Verhältnisse im realen Straßenverkehr angepasst werden könnten (vgl. Laboruntersuchung und Feldversuch in [Dam95 S.52]).

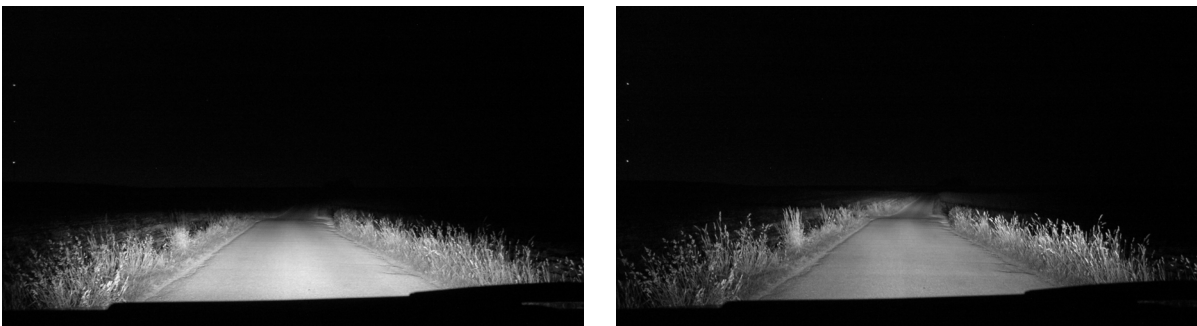


Abbildung 9: Abblendlicht (links) und Fernlicht (rechts) vom Fahrer aus gesehen

Der Frequenzbereich des Flickermeters [Norm10] beginnt bei 0,5 Hz (erster Referenzpunkt in [Norm10] S.12ff.), was für einen Fernlichtassistenten eine relativ schnelle Änderungsrate ist. Beginnend bei einer Frequenz von 0,5 Hz (eine Änderung der Lichtverteilung pro Sekunde) werden die Mess-Ergebnisse mit denen des Flickermeters verglichen und der Frequenzbereich auf den für Fernlichtassistenten relevanten niederen Bereich durch Messungen erweitert.

Neben einer gleichen Dauer von Abblendlicht (t_{dunkel}) und Fernlicht (t_{hell}) wie in Abbildung 7, werden auch Versuche durchgeführt, bei denen das Verhältnis der Dauern innerhalb eines Versuchs variiert. Dadurch soll sich, bei gleichbleibendem Verhältnis von t_{hell} und t_{dunkel} , die Versuchsperson nicht auf die Zeitpunkte des Wechsels zwischen Abblendlicht und Fernlicht einstellen können, wodurch realistischere Ergebnisse erwartet werden.

Untersuchungsmethoden

Während der Laboruntersuchung werden die Frequenz f der Umschaltung zwischen Abblendlicht und Fernlicht, sowie die Änderungsrate der Höhe h' geändert (siehe Abbildung 7). Die Versuchspersonen bewerten einzelne Kombinationen aus Frequenz und Höhen-Änderungsrate in Hinblick auf das Vorhandensein einer störenden Flickerempfindung, sowie den Grad der Störung auf einer De Boer-Skala ([Gel+90], Tabelle 1, siehe Abbildung 10). Durch diese Vorgehensweise erhält man verschiedene feste Messpunkte, die bei allen Szenen gleich sind, wodurch Unterschiede zwischen den einzelnen Szenen ermittelt werden können.

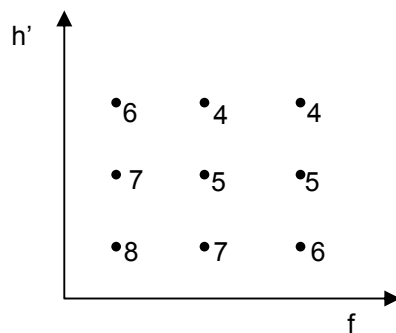


Abbildung 10: Beispiel Bewertung einzelne Kombinationen aus Ansteuerungsfrequenz f und Änderungsrate der Höhe h' mit De Boer-Skala [Gel+90]

Zusätzlich zur Einzelbewertung sollen die Versuchspersonen die Ansteuerungsfrequenz und die Änderungsrate der Höhe so einstellen, dass die Kombination einem vorgegebenen Wert der De Boer-Skala entspricht. Ausgehend von einer Anfangs-Frequenz wird die Frequenz immer weiter geändert, bis die gewünschte Empfindung eintritt (Änderungsrate der Höhe analog). Bei den Versuchen wird sowohl mit einer niedrigen Anfangsfrequenz gestartet, als auch mit einer hohen Anfangsfrequenz, um Einflüsse der Anfangsbedingungen zu vermeiden und den Einfluss der Stimulus-Dauer auf das Ergebnis zu verringern (Änderungsrate der Höhe analog; siehe Abbildung 11). Da die Versuchsperson während der Bewertung weiterhin die ursprüngliche Aufgabe bearbeitet, bietet sich eine verbale Signalisierung an. Nach der Signalisierung der Versuchsperson werden der Frequenzwert und der Wert der Änderungsrate der Höhe ausgelesen.

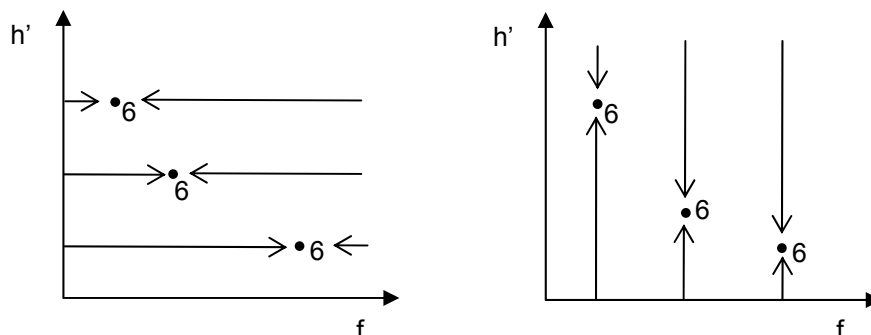


Abbildung 11: Beispiel kontinuierliche Variation von Frequenz (links) und Änderungsrate der Höhe (rechts) zur Einstellung vorgegebener Werte der De Boer-Skala

Nach jeder untersuchten Szene wird die Versuchsperson gefragt, ob sie sich durch das eingestellte Systemverhalten gestört fühlt bzw. mit welchem Grad der Störung auf der De Boer-Skala die Einstellung korreliert. Durch geschlossene Fragen (vgl. [Bor+06]) nach dem Grad der Störung können die Ergebnisse gut miteinander verglichen werden. Die Versuchspersonen können nach jeder Teiluntersuchung Anmerkungen äußern, die vom Versuchsleiter notiert werden.

Eine Versuchsperson soll verschiedene Stimuli bewerten. Da es sich um eine abhängige Stichprobe handelt und Diskomfort auch von der Dauer des Reizes abhängig ist [Zha+96, Bub03], müssen alle Teilversuche in (quasi-) zufälliger Reihenfolge erfolgen [Bor+06].

Bei der vorgestellten Laboruntersuchung werden zwei verschiedene Untersuchungsmethoden eingesetzt (Bewertung vorgegebener Einstellung, Einstellung vorgegebener Bewertung). Die Versuche der beiden Untersuchungs-Methoden werden nicht vermischt, damit sich die Versuchspersonen auf eine Untersuchungsmethode einstellen können. Vor einer Untersuchung hat die Versuchsperson eine kurze Trainingsphase, bei der sie sich auf die jeweilige Untersuchungsmethode einstellen kann. Die Reihenfolge der Untersuchungsmethode wird zufällig zwischen den verschiedenen Versuchspersonen variiert.

Innerhalb einer Untersuchungsmethode kommen verschiedene Szenen zum Einsatz (vollständige Ausleuchtung, geteiltes Beleuchtungsfeld, Fotografie). Die Versuchspersonen müssen sich ebenfalls auf die Szenen einstellen können. Die Versuche zu den verschiedenen Szenen werden untereinander nicht gemischt. Zu Beginn einer Szene gibt es eine Trainingsphase zur Adaptation. Die Reihenfolge der Szenen wird von Versuchsperson zu Versuchsperson innerhalb der Untersuchungsmethode zufällig variiert.

Frequenz und Änderungsrate der Höhe variieren zufällig innerhalb der verschiedenen Szenen. Einen Überblick über den beispielhaften Ablauf zweier Untersuchungen zeigt Abbildung 12.

Im Anschluss an die Untersuchung werden in einem Fragebogen weitere Merkmale zu den Fahrgewohnheiten und dem Fahrverhalten der Versuchspersonen abgefragt. Die Befragung findet nach der Untersuchung statt, um die Messergebnisse durch die Fragen nicht zu beeinflussen. Mit den Fragen werden Eigenschaften des Fahrers ermittelt, die auf die Bewertung von Scheinwerferassistenten Einfluss haben können: Versuchspersonen, die häufig nachts auf Landstraßen unterwegs sind, können sich möglicherweise besser in die gestellten Situationen einfinden, da insbesondere dort Wechsel zwischen Abblendlicht und Fernlicht stattfinden. Um der Erfahrung der Versuchspersonen Rechnung zu tragen, werden die Personen zu ihren Fahrgewohnheiten befragt. Neben der durchschnittlich zurückgelegten Gesamtstrecke pro Jahr sollen die Versuchspersonen ihren Anteil an Fahrten abhängig von Tageszeit (Tag, Nacht) und Streckenart (Autobahn, Landstraße, Stadtstraße; vgl. [Ali02, M-K02]) angeben. Die Einschätzung zur eigenen Fernlichtnutzung und bereits vorhandene Erfahrungen mit einem Fernlichtassistenten sind für die Auswertung aufschlussreich und werden ebenfalls erfragt. Die Erwartung einer Person kann einen Einfluss auf deren Komfort-Empfindung haben [Sal+97]. Daher kann das subjektive Empfinden des Flickereinflusses beim Fahren vom Fahrertyp abhängen. So könnte beispielsweise ein sportlicher Fahrer eine größere Systemdynamik akzeptieren oder erwarten als ein schonender Fahrer (vgl. [Ali02, M-K02]).

Versuchsperson 1			Versuchsperson 2		
Bewertung	Voll	Training	Einstellung	Geteilt	Training
		f_1, h'_1			DeBoer 3
		f_3, h'_2			DeBoer 7
	Geteilt	Training		Foto	Training
		f_2, h'_2			DeBoer 7
		f_1, h'_3			DeBoer 5
	Foto	Training		Voll	Training
		f_2, h'_2			DeBoer 5
		f_3, h'_3			DeBoer 3
Einstellung	Geteilt	Training	Bewertung	Foto	Training
		DeBoer 5			f_1, h'_3
		DeBoer 7			f_1, h'_1
	Voll	Training		Voll	Training
		DeBoer 3			f_3, h'_3
		DeBoer 5			f_2, h'_2
	Foto	Training		Geteilt	Training
		DeBoer 7			f_3, h'_2
		DeBoer 3			f_1, h'_3

Abbildung 12: Beispiel für Durchmischung von (Teil-)Versuchen bei zwei Versuchspersonen; Exemplarisch sind in der Abbildung jeweils nur zwei Kombinationen aus Frequenz und Höhen-Änderungsrate dargestellt

Zusammenfassung der Untersuchung

Aufbauend auf den Ergebnissen der hier vorgestellten Untersuchung soll das Lampenmodell des Flickermeters [Norm10] so angepasst werden [Cai09], dass eine objektive Bewertung der Ansteuerungsfunktion eines Fernlichtassistenten in Hinblick auf Diskomfort durch Änderung der Lichtverteilung möglich wird. Zusätzlich zur Störschwelle (vgl. [Norm10]) wird der Grad der Störung über Werte der De Boer-Skala [Gel+90] aus Tabelle 1 ausgedrückt (siehe Abbildung 13).

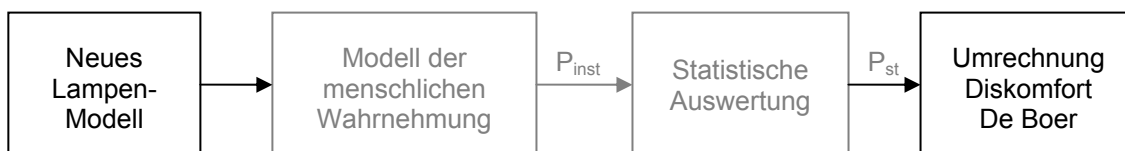


Abbildung 13: Flickermeter-Modell mit angepasstem Lampenmodell (Fernlichtassistent) und nachgeschalteter Auswertung zur Berechnung des Diskomforts (De Boer-Skala)

Die Untersuchung findet unter Laborbedingungen statt, um konstante Umgebungsbedingungen zu schaffen. Auf einer Projektionsfläche werden verschiedene Szenen dargestellt, die von der Versuchsperson hinsichtlich einer Störung durch Flicker bewertet werden. In den Szenen wird die Helligkeit bzw. die beleuchtete Fläche geändert, um eine Flicker-Empfindung bei der Versuchsperson hervorzurufen. Es werden Szenen eines geteilten Beleuchtungsfeldes (vgl. [Dam95]), einer vollständig ausgeleuchteten Fläche (vgl. [Cai09]) und von Fotografien für die Bewertung genutzt.

Die schematische Darstellung einer Straße als geteiltes Beleuchtungsfeld wird genutzt, um die Änderung der beleuchteten Fläche auf dem Projektionsschirm mit dem Grad der Flickerempfindung in Verbindung zu bringen.

Die Bewertung von Helligkeitsänderungen bei einer vollständig ausgeleuchteten Projektionsfläche wird eingesetzt, um eine Verbindung mit der sich ändernden Fläche beim geteilten Beleuchtungsfeld zu schaffen und Anpasswerte für das Flickermeter [Norm10] zu ermitteln.

Durch die Nutzung von Fotografien werden realitätsnahe Stimuli erzeugt, wie sie bei einem Fernlichtassistenten vorkommen könnten. Aus den Messergebnissen kann ein Praxisfaktor ermittelt werden, um mit Ergebnissen des geteilten Beleuchtungsfeldes unter Laborbedingungen ggf. die erwarteten Ergebnisse im Feld abzuschätzen.

Neben der klassischen Methode des Selbstreports werden performance-basierte und physiologische Messungen durchgeführt, um den empfundenen Diskomfort objektiv zu bewerten (vgl. theoretisches Modell in [Per+07a]) und Vergleichswerte für eine spätere Untersuchung im Feld zu erhalten.

Während der Untersuchung bearbeitet die Versuchsperson eine Aufgabe auf der Projektionsfläche, die ein ähnliches Blickverhalten wie beim Fahren eines Fahrzeugs erzeugen soll.

Die Messung der Flickerempfindung findet auf zwei Arten statt. Zum Einen bewertet die Versuchsperson einen Stimulus hinsichtlich des Grades der Störung, zum Anderen stellt die Versuchsperson den Stimulus so ein, dass ein vorgegebener Störungs-Grad erreicht wird. Durch die Bewertung eines vorgegebenen Stimulus können die Szenen untereinander verglichen werden. Durch die Einstellung eines vorgegebenen Störungs-Grades können Stör-Kurven zur Bewertung ermittelt werden.

Die hier vorgestellte Untersuchungsmethode kann beispielsweise in einen Programmablauf umgesetzt werden, um den Einfluss des Flickers bei einem (adaptiven) Fernlichtassistenten auf eine Versuchsperson unter Laborbedingungen zu messen.

Diskussion

Bei der Laboruntersuchung wird ausschließlich der Flickereinfluss, hervorgerufen durch die Änderung der Lichtverteilung, bewertet. Die Bewertung eines gesamten Scheinwerfersystems im Hinblick auf Komfort hängt jedoch nicht nur vom Wechsel der Lichtverteilungen ab. Ebenso kann beispielsweise die Sichtweite des Fahrers und deren Änderung einen Einfluss auf dessen Komfort-Empfinden haben [Sal+97]. In der Bewertung des Gesamt-Scheinwerfersystems kann die Sichtweite durch Auswertung der Lichtverteilungen (z.B. [Dah01, Bhi+77]) mit eingerechnet werden. Wie stark sich die jeweiligen Einflüsse auf das Empfinden des Fahrers auswirken, ist noch offen. Es bieten sich dafür weiterführende (Feld-) Versuche an, bei denen beispielsweise die Blickrichtung ausgewertet wird. Die berührungslose Messung der Blickrichtung zur Auswertung der Sichtweitenänderung in Hinblick auf visuellen Diskomfort kann aufschlussreiche Ergebnisse liefern, ohne den Fahrer beim Fahren zu beeinflussen. Negativ ist die teilweise lange Vorbereitungszeit zur Einstellung des Gerätes vor dem Versuch [Spr08].

Bei der vorgestellten Untersuchung werden Methoden zur Beanspruchungsmessung eingesetzt (physiologische Messung, Performance-Messung, vgl. [Spr08]), um ein objektives Maß zum Vergleich der Ergebnisse von Laboruntersuchung und späterer Feldstudie zu erhalten. Bei der Messung der physiologischen Reaktion könnten (zusätzlich zum Hautleitwert) noch weitere Größen gemessen werden. Vielversprechend könnte die Messung des Pupillendurchmessers sein, da hier bereits ein angepasstes Auge-Gehirn-Modell existiert [Ema+04, Per+07a]. In wie weit die vorgestellten physiologische Messgrößen geeignet sind Diskomfort an Stelle von Beanspruchung zu messen ist unklar. Um Vergleiche mit einer anschließenden Feldstudie vornehmen zu können, werden dennoch Messungen durchgeführt.

Das Flickermeter [Norm10] besitzt als Eingangsgröße eine elektrische Spannung. Zur Anpassung des Flickermeter-Modells an andere Lampen werden in [Cai09] Spannungs-Lichtstärke-Übertragungsfunktionen der jeweiligen Lampe gemessen. Die Messergebnisse müssten so angepasst werden, dass aus den Stimuli der Untersuchung (z.B. relative Helligkeitsänderung) eine äquivalente elektrische Spannung berechnet wird. Alternativ bietet sich die Verwendung eines Flickermeter-Modells an, das direkt die Helligkeit bewertet (z.B. [Ema+04, Per+07a, Per+07b]).

Die dem Flickermeter zugrunde liegende Untersuchung misst Flicker bis zu einer Frequenz von 5 Hz (vgl. [Ras70] S.182). Wie der darauf aufbauende Flickermeter-Standard [Norm10] bis auf 0,5 Hz erweitert wurde, ist unklar. Die vorliegende (Teil-) Untersuchung mit vollständiger Beleuchtung liefert Ergebnisse, mit denen der Frequenzbereich speziell für Fernlichtassistenten erweitert wird. In wie weit die klassischen Flickermodelle geeignet sind, Fernlichtassistenten zu bewerten, ist ebenfalls unklar, insbesondere da die Modulations-Frequenzen niedrig sind und sich das Adaptationsniveau des Fahrers im mesopischen Bereich befindet. Erste Abschätzungen der Verwendbarkeit des Flickermeter-Modells zur Bewertung von Fernlichtassistenten werden nach Durchführung der vorgestellten Studie möglich sein. Abweichungen im Wahrnehmungs-Modell des Flickermeters, hervorgerufen durch die abweichenden Einsatzbedingungen bei Fernlichtassistenten, werden sich bei einer Anpassung des Flickermeters im modifizierten Lampenmodell niederschlagen.

Bei der Untersuchung wurden ausschließlich Helligkeitsunterschiede betrachtet. Es gibt verschiedene Scheinwerfer mit unterschiedlichen Lichtquellen auf dem Markt. Exemplarisch seien hier die Glühlampe („Halogen-Scheinwerfer“), Hochdruck-Gasentladungslampe („Xenon-Scheinwerfer“) und Scheinwerfer auf Basis von Leuchtdioden („LED-Scheinwerfer“) genannt. Die unterschiedlichen Lichtquellen besitzen unterschiedliche spektrale Verteilungen. In der vorgestellten Untersuchung wird ausschließlich die Helligkeitsänderung bewertet. In einer weiteren Untersuchung kann der Einfluss der Lichtquelle auf die Flicker-Empfindung ermittelt werden (vgl. [Cai09]).

Bei der Untersuchung wird ein Unterschied in der Flickerempfindung (bei gleichbleibender Frequenz) zu Gunsten des adaptiven Fernlichtassistenten erwartet, da hier ein fließender Übergang zwischen den Lichtverteilungen stattfindet (vgl. rechteckige und sinusförmiger Modulation, [Norm10]). Dies könnte beispielsweise durch einen Formfaktor im Modell berücksichtigt werden.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse von geteiltem Beleuchtungsfeld und Fotografie kann ein Praxisfaktor berechnet werden, mit dem man die Abhängigkeit der geometrischen (Flicker-) Fläche von der Flickerempfindung in der Realität abschätzen kann (vgl. [Dam95]).

Die Laboruntersuchung kann, je nach Anzahl zu testender Frequenzen und Änderungsraten, lange dauern, wenn alle Kombinationen getestet werden sollen. Durch eine geschickte Auswahl kann die Dauer begrenzt werden:

- Aus den Flickerkurven [Cai09, Norm10] kann ableitet werden, dass zumindest im niedrigen Frequenzbereich ein exponentieller Zusammenhang zwischen Flickerfrequenz und Störkurve besteht. Daher bietet sich eine nichtlineare Abstufung der zu untersuchenden Flickerfrequenzen an.
- Als Vorteilhaft kann sich eine ungleichmäßige Verteilung der Höhen-Änderungsrate erweisen. Wenn der klassische Fernlichtassistent (große Änderungsrate) intensiv untersucht wird, kann durch (weniger) Messungen anderer Änderungsraten ein Formfaktor abgeschätzt werden, mit dem die Ergebnisse detaillierter untersuchten

klassischen Fernlichtassistenten auf adaptive Fernlichtassistenten übertragen werden können.

- Ist ausschließlich der relative Unterschied zwischen dem klassischen und adaptiven Fernlichtassistenten in Bezug auf Komfort relevant, kann man die Untersuchung auf die Bewertung bei geteiltem Beleuchtungsfeld beschränken. Aus den Messergebnissen können anschließend Formfaktoren für die verschiedenen Höhen-Änderungsraten ermittelt werden.
- Durch Beschränkung auf die Bewertung des klassischen Fernlichtassistenten, der zwischen Abblendlicht und Fernlicht hin- und herschaltet, können viele Versuche eingespart werden, da die Höhen-Änderungsrate konstant ist.
- Weiteres Einsparpotential zur Bewertung von Fernlichtassistenten kann durch Auslassen der Untersuchung von vollständiger Beleuchtung genutzt werden. Ein Vergleich mit dem klassischen Flickermeter scheint durch das Auslassen dann jedoch nicht mehr möglich.

Fernlichtassistenten sind stark von der eingesetzten Umgebung abhängig. Ein Fernlichtassistent sollte nur dann abblenden, wenn sich ein anderer Verkehrsteilnehmer im blendungsgefährdeten Bereich befindet. Abblenden, ohne dass sich ein anderer Verkehrsteilnehmer im Umfeld befindet (z.B. auf Grund einer Fehl-Detektion) ist ebenfalls störend und sollte in einer weiteren Studie untersucht werden.

Bei der Untersuchung wird Flicker beim Umschalten von Lichtverteilungen gemessen. Die Untersuchung findet unter Laborbedingungen statt, um verschiedene Einflussgrößen konstant zu halten. Eine anschließende vergleichende Feldstudie ist empfehlenswert, um die Ergebnisse der Laborstudie auf die Realität übertragen zu können. Die Ergebnisse der Untersuchung können als Basis zur Bewertung der Ansteuerungsqualität von Fernlicht-assistenzsystemen genutzt werden.

Literaturliste

- [Ali02] O. Aliefendioglu, *Testumgebung für die Elektronische Getriebesteuerung von Automatikgetrieben*, Dissertation TU Braunschweig, Shaker Verlag, 2002
- [Bae06] R. Baer (Hrsg.), *Grundlagen Beleuchtungstechnik*, 3. Auflage, Huss Medien, Berlin, 2006
- [Bhi+77] V. D. Bhise, E. I. Farber, C. S. Saunby, G. M. Troell, J. B. Walunas, A. Bernstein, *Modeling Vision with Headlights in a System Context*, SAE Technical Paper Series No. 770238, Society of Automotive Engineers, 1977
- [Bor+06] J. Bortz, N. Döring, *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*, Springer Verlag, 4. Auflage, 2006
- [Bub02] H. Bubb, *Umsetzung psychologischer Forschungsergebnisse in die ergonomische Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, vol. 48/1, S. 8-15, 2002
- [Bub03] H. Bubb, *Komfort und Diskomfort*, Ergonomie aktuell, vol. 004, S. 5-8, Lehrstuhl für Ergonomie, Garching, 2003
- [Cai09] R. Cai, *Flicker Interaction Studies and Flickermeter Improvement*, Dissertation TU Eindhoven, 2009
- [Dah01] Th. Dahlem, *Methoden zur Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern*, Dissertation Darmstadt, Herbert Utz Verlag, 2001

- [Dam95] J. Damasky, *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrerscheinwerfer*, Dissertation Darmstadt, 1995
- [Ema+04] A. E. Emanuel, L. Peretto, *A Simple Lamp-Eye-Brain Model for Flicker Observations*, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 19, no. 3, 2004
- [Ewe02] F. Ewerhart, *Entwicklung und vergleichende Bewertung einer videobasierten Kurvenlichtsteuerung für adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer*, Dissertation, TU Ilmenau, der Andere Verlag, 2002
- [Gel+90] A. W. Gellatly, D. J. Weintraub, *User Reconfigurations of the De Boer Rating Scale for Discomfort Glare*, University of Michigan Transportation Research Institute , Report Nr. UMTRI-90-20, 1990
- [Ham+00] M. Hamm, M. Lampen, *Safety and Comfort: Advanced Methods to Analyze Headlamp Light Performance*, SAE-Paper 2000-01-0320, SAE 2000 World Congress, 2000
- [Han+05] Z. Hanzelka, A. Bień, *Voltage Disturbances – Flicker Measurement*, Power Quality Application Guide, Copper Development Association (CDA) and European Copper Institute (ECI), 2005
- [Jeb+08] Ch. Jebas, S. Schellinger, K. Klinger, K. Manz, D. Kooß, *Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, F 66, 2008
- [Joh+79] G. Johanssen, N. Moray, R. Pew, J. Rasmussen, A. Sanders, C. Wickens, *Final Report of Experimental Psychology Group*, in N. Moray, *Mental workload. Its Theory and measurement*, Proceedings of the NATO Symposium on Theory and Measurement of Mental Workload (pp. 101-114), New York: Plenum Press, 1979
- [Kal+07] Kalze, F.-J., Schmidt, Ch., *Dynamic Cut-Off-Line geometry as the next Step in forward lighting beyond AFS*, 7th International Symposium on Automotive Lighting, 2007
- [Ket+09] C. Kettwich, N. Backmann, U. Lemmer, *In-depth analysis of accidents with respect to driver assistance systems*, 8th International Symposium on Automotive Lighting, pp. 463-472, 2009
- [Man+07] K. Manz, D. Kooß, K. Klinger, S. Schellinger, *Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, F 65, 2007
- [M-K02] J.-P. Müller-Kose, *Repräsentative Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe*, Dissertation Braunschweig, Shaker Verlag, 2002
- [Norm10] Entwurf Norm DIN EN 61000-4-15, *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-15: Prüf- und Messverfahren – Flickermeter – Funktionsbeschreibung und Auslegungsspezifikation (IEC 77A/722/FDIS:2010)*, deutsche Fassung FprEN 61000-4-15:2010, Oktober 2010
- [Per+07a] L. Peretto, E. Pivello, R. Tinarelli, A. E. Emanuel, *Theoretical Analysis of the Physiologic Mechanism of Luminous Variation in Eye-Brain System*, IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement, vol. 56, no. 1, 2007

- [Per+07b] L. Peretto, L. Rovati, G. Salvatori, R. Tinarelli, A. E. Emanuel, A *Measurement System for the Analysis of the Response of the Human Eye to the Light Flicker*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 56, No. 4, 2007
- [Per+09] L. Peretto, C. E. Riva, L. Rovati, G. Salvatori, R. Tinarelli, *Analysis of the Effect of Flicker on the Blood-Flow Variation in the Human Eye*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 9, 2009
- [Ras70] C. Rashbass, *The Visibility of Transient Changes of Luminance*, J. Physiol., vol. 210, S. 165-186, 1970
- [Ros05] J. Roslak, *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*, Dissertation, Universität Paderborn, 2005
- [Sal+97] Salvendy, G. (Hrsg.), Boyce, P. R., *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, Kapitel *Illumination*, Wiley & Sons, 1997
- [Sch+08] J. Schade, A. Engeln (Hrsg.), *Fortschritte in der Verkehrspsychologie*, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2008
- [Sch+09] Ch. Schmidt, F.-J. Kalze, T. Irmscher, *Illumination Strategies for Dynamic Headlamp Functions like Adaptive and Vertical Cut-Off-Line*, 8th International Symposium on Automotive Lighting, pp. 268-277, 2009
- [Spr08] R. Sprenger, *Empirische Forschungsmethoden für die Evaluation visueller Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug*, Dissertation, Universität Paderborn, 2008
- [WHW09a] H. Winner, S. Hakuli, G. Wolf (ed.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, chapter F 30, T. Q. Khanh, W. Huhn, *Sichtverbesserungssysteme*, S. 448-470, Vieweg+Teubner, 2009
- [Woe+07] B. Wördenweber, J. Wallaschek, P. Boyce, D. Hoffman, *Automotive Lighting and Human Vision*, Springer-Verlag, 2007
- [Zha+96] L. Zhang, M. G. Helander, C. G. Drury, *Identifying factors of comfort and discomfort in sitting*, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, vol. 38/3, pp. 377-389, 1996