

# Flickerempfindung bei Veränderung der Lichtverteilungen von Kfz-Scheinwerfern

Johannes L. Foltin, Robert Bosch GmbH, Postfach 1661, D-71226 Leonberg, GERMANY, E-Mail: johannes.foltin@de.bosch.com;

Christoph Schierz, Technische Universität Ilmenau, Postfach 100565, D-98684 Ilmenau, GERMANY, E-Mail: christoph.schierz@tu-ilmenau.de

## 1 Einleitung

Adaptive Fernlichtassistenten im Kraftfahrzeug können die Lichtverteilung des Scheinwerfers anpassen und so für den Fahrer eine an die Fahrzeugumgebung optimierte Lichtverteilung einstellen (Abb. 1). Wenn jedoch ein Fernlichtassistent zu schnell zwischen verschiedenen Lichtverteilungen wechselt, stört es den Fahrer, der anschließend das Assistenzsystem – und damit die verbesserte Sicht – deaktiviert.

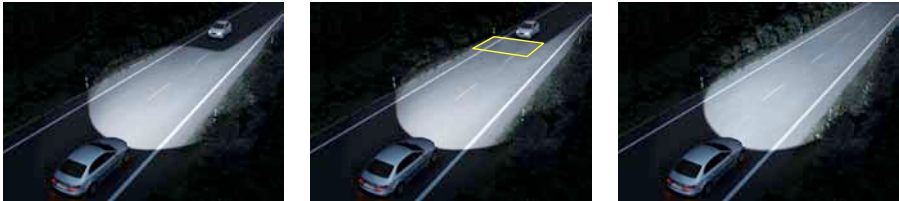


Abb. 1: Darstellungen von Abblendlicht (links), adaptivem System mit verbesserter Reichweite im Vergleich zu Abblendlicht (Mitte) und Fernlicht (rechts)

Es stellt sich bei der Entwicklung moderner Fernlichtassistenten die Frage, wie dynamisch diese ausgelegt werden dürfen, ohne den Fahrer durch die Veränderungen der Lichtverteilung zu belasten. Ziel ist die Erstellung eines Modells zur objektiven Bewertung der Flickerempfindung bei Änderung der Lichtverteilung durch Fernlichtassistenten. Der Schwerpunkt liegt hier auf klassischen Fernlichtassistenten, die automatisch zwischen Abblendlicht und Fernlicht umschalten.

## 2 Stand der Technik

Flackernde Beleuchtung ruft visuellen Diskomfort in Form von Flicker hervor. Es gibt bereits Modelle und Messgeräte zur Bewertung von Flicker bei flackernder Innenraumbelichtung, die beispielsweise durch Schwankungen in der elektrischen Spannungsversorgung hervorgerufen werden /Norm10/, /Momb00/. Die Stärke der Flickerempfindung hängt dabei von der Intensität der Helligkeitsänderung (Spannungsschwankung), der Flickerfrequenz und der Form des Störsignals (z.B. Sinus, Rechteck) ab. Die Grundlage dieser Flickermeter bildet unter anderem /Rash70/.

Die Eingangsgröße des Flickermodells aus /Norm10/ (im Folgenden „Flickermeter“ genannt) ist die elektrische Spannungsversorgung einer 60 Watt Glühlampe. Über verschiedene Filterstufen wird aus der Spannung am Eingang die Reaktion der Glühlampe auf Spannungsschwankungen nachgebildet, sowie die menschliche Wahrnehmung auf die daraus resultierenden Helligkeitsschwankungen. Die Ausgangsgrößen des Flickermeters sind unter anderen die „Kurzzeit-Flickerstärke“  $P_{st}$  und die „Langzeit-Flickerstärke“  $P_{lt}$ . Die Kurzzeit-Flickerstärke wird über einen Zeitraum von einer bis zehn Minuten ermittelt, die Langzeit-Flickerstärke über einen Zeitraum von beispielsweise zwei Stunden.

Die klassischen Flickermodelle können nicht unverändert für die Abschätzung des Flickerempfindens bei Veränderung der Lichtverteilungen von Kraftfahrzeugscheinwerfern genutzt werden: An Stelle einer Änderung der gesamten homogenen Umgebungshelligkeit wird bei Fernlichtassistenten vorwiegend die Beleuchtung der Straße und ihrer inhomogenen unmittelbaren Umgebung verändert.

### 3 Forschungshypothesen

Das Flickermeter /Norm10/ kann für die Bewertung von Flicker bei inhomogener Beleuchtung, wie sie im nächtlichen Straßenverkehr vorkommt, angepasst werden. Weiterhin ist die Stärke des empfundenen Diskomforts beim Wechsel von Lichtverteilungen durch einen Fernlichtassistenten von der Umschaltfrequenz, sowie der Stärke der Lichtverteilungsänderung, abhängig.

### 4 Untersuchungsmethode

Zur Prüfung der Hypothesen wird eine Flickeruntersuchung in Form einer Probandenstudie durchgeführt. Der Einfluss anderer Faktoren auf den Diskomfort der Versuchspersonen wird konstant gehalten, indem die Untersuchung im Labor stattfindet. Die Bewertung der Probanden wird analysiert, um den Zusammenhang von Flickerempfindung, Frequenz und Stärke der Lichtverteilungsänderung bei adaptiven Fernlichtassistenten zu ermitteln. Die Bewertung der Versuchspersonen wird mit den simulierten Messdaten des Flickermeters /Norm10/ verglichen, um das Flickermodell für klassische Fernlichtassistenten anzupassen.

Die Versuchsperson sitzt vor einer Projektionsleinwand auf der durch eine periodisch wechselnde Darstellung von Lichtverteilungen im Frequenzbereich zwischen 1/16 Hz und 1 Hz eine Flickerempfindung hervorgerufen wird.

Es werden drei verschiedene Flickerszenen bewertet: „homogene Beleuchtung“, „schematische Straßendarstellung“ und „Fotografie“ (siehe Abb. 2). Die „homogene Beleuchtung“ ist eine graue Fläche, deren Helligkeit periodisch um ca. 10% geändert wird (Auflösungsgenauigkeit des vorhandenen Leuchtdichte-Messgeräts). Die „schematische Straßendarstellung“ stellt eine acht Meter breite homogen ausgeleuchtete Straße aus Fahrerperspektive dar, deren scharfe Hell-Dunkel-Grenze kontinuierlich verändert werden kann. Zwischen den Darstellungen von Abblendlicht und Fernlicht ändert sich ausschließlich die Helligkeit eines kleinen Dreiecks. Die Flickerszene „Fotografie“ ist die reale Darstellung von Abblendlicht und Fernlicht aus Fahrerperspektive. Die Vorfeld-Helligkeit entspricht der Vorfeldhelligkeit beim Autofahren bei Nacht und ist bei allen drei Szenen gleich eingestellt.



Abb. 2: verwendete Szenen: homogene Beleuchtung (links), schematische Straßendarstellung (Mitte) Fotografie (rechts)

Die homogene Ausleuchtung wird benötigt, um die Bewertungen der Probanden mit den Ergebnissen des Flickermeters vergleichen zu können. Mittels der schematischen

Darstellung einer beleuchteten Straße kann die Abhängigkeit der Bewertung von sowohl der Frequenz, als auch der Stärke der Lichtverteilungsänderung, ermittelt werden. Fotografien werden eingesetzt, um eine realistische Straßendarstellung mit natürlichen Inhomogenitäten zu erhalten, woraus das Flickermodell für Fernlichtassistenten abgeleitet werden kann.

Eine Ablenkung ähnlich zum Autofahren wird erreicht, indem die Versuchsperson über ein Lenkrad mit einer (Seh-)Aufgabe interagiert, die ebenfalls auf der Leinwand dargestellt wird. Die Aufgabe besteht aus drei senkrechten Linien, die sich horizontal über die Leinwand bewegen, wobei eine Linie von der Versuchsperson gesteuert wird (Abb. 3). Diese Sehzeichen wurden so auf die Leinwand positioniert, dass die Blickrichtung der Probanden ungefähr dem Fixationsbereich beim Autofahren aus /Diem04/ entspricht.

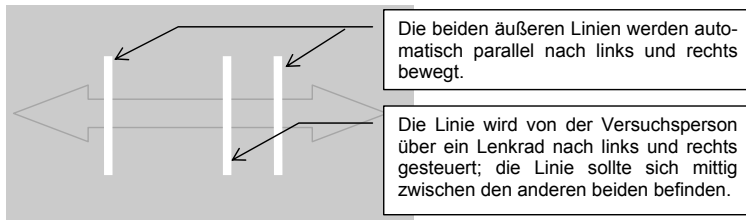


Abb. 3: Schematische Darstellung der Aufgabe während der Untersuchung

Jede Teiluntersuchung dauert eine Minute, was der minimalen Messdauer der Kurzzeit-Flickerstärke  $P_{st}$  des Flickermeters entspricht. Im Anschluss bewertet die Versuchsperson die Flickerempfindung auf einer kontinuierlichen Skala zwischen „kaum wahrnehmbar“ und „sehr störend“. Die Mitte der Skala ist mit „gerade noch nicht störend“ gekennzeichnet. Eine ausführliche Darstellung einer ähnlichen Versuchsanordnung kann man /FoES11/ entnehmen.

## 5 Ergebnisse der Untersuchung

Die Untersuchung wurde mit 29 Versuchspersonen durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse bei adaptiven Fernlichtassistenten vorgestellt und anschließend ein Flickermodell für die Bewertung klassischer Fernlichtassistenten entwickelt.

### 5.1 Flickerempfindung bei adaptiven Fernlichtassistenten

Abb. 4 zeigt die mittlere Probandenbewertung (Median) der Flickerszene „schematische Straßendarstellung“ in Abhängigkeit von Frequenz und Stärke der Lichtverteilungsänderung als Kreise. Hilfskreise teilen die einzelnen Bewertungen in positive (außen: „kaum wahrnehmbar“) und negative Bewertung (innen: „sehr störend“) auf. Ein Kreis in der Mitte kennzeichnet die Störschwelle. Die Anstiegszeit der Hell-Dunkel-Grenze ist die Stärke der Lichtverteilungsänderung. Die Bewertung der Anstiegszeit von null Sekunden entspricht der Bewertung des klassischen Fernlichtassistenten bei der Flickerszene „schematische Straßendarstellung“ (vgl. Abb. 5 Mitte).

Schnelle Wechsel zwischen Lichtverteilungen (z.B. 1 Hz) wurden negativ bewertet, langsame Wechsel dagegen durchweg positiv (z.B. 1/16 Hz). An der Flickerfrequenz von 1/4 Hz liegt die Störschwelle der Teiluntersuchung.

Betrachtet man einzelne Frequenzen kann man eine geringe Abhängigkeit der Bewertung von der Stärke der Lichtverteilungsänderung erkennen. Die Bewertung der Frequenz 1/8 Hz steigt monoton von 0,4 beim klassischen Fernlichtassistenten (Anstiegszeit Null Sekunden) auf 1,0 bei einer Anstiegszeit von zwei Sekunden (Bewertung Null entspricht

der Störschwelle). Die Form des Flicker-Stimulus scheint einen geringeren Einfluss auf die Bewertung zu haben als beim Flickermeter. Mehrere Versuchspersonen äußerten, dass der fließende Übergang zwischen Abblendlicht und Fernlicht anfangs ungewohnt gewesen ist, im Verlauf der Untersuchung jedoch als angenehm empfunden wurde.

Mittlere Bewertung der Versuchspersonen abhängig von Frequenz und Anstiegs-/Abfallszeit der Hell-Dunkel-Grenze

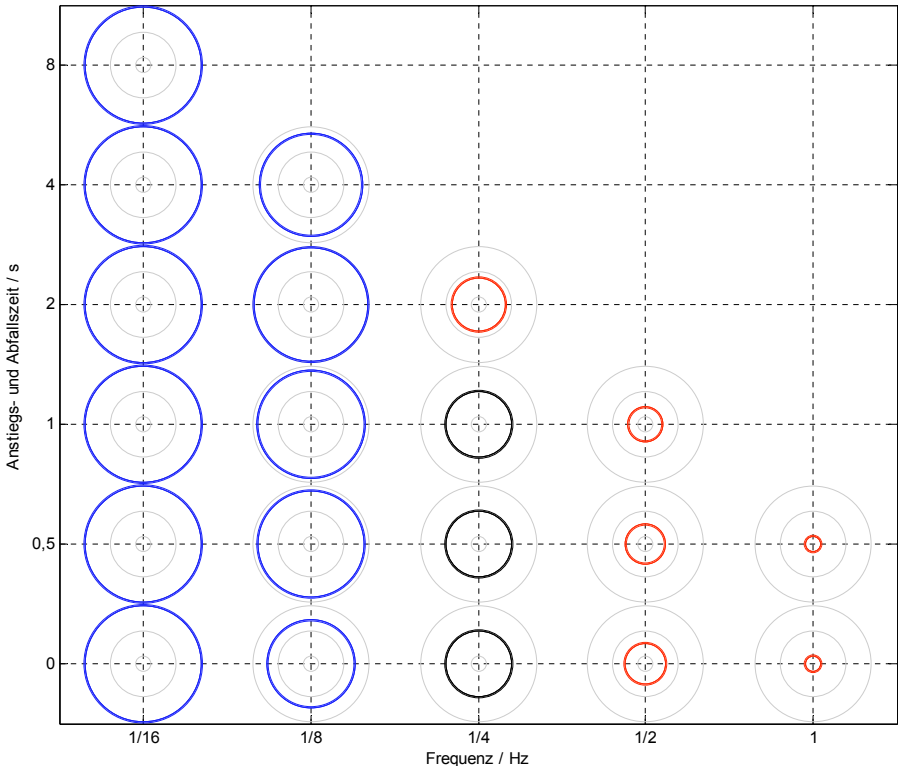


Abb. 4: mittlere Bewertung (Median) abhängig von Frequenz und Anstiegszeit der Hell-Dunkel-Grenze (HDG): positivste Bewertung am äußeren Kreis (blau), negativste Bewertung am inneren Kreis (rot), die Störschwelle liegt am mittleren Kreis (schwarz)

Die Flickersignale der Diagonalen in Abb. 4 (z.B. 1/4 Hz Flickerfrequenz, Anstiegszeit 2s), bei denen eine kontinuierliche langsame Änderung der Lichtverteilung stattfinden, werden schlechter bewertet als eine schnellere Änderung bei gleicher Frequenz. Wie groß dabei der Einfluss der Wechselwirkung der linearen Strukturen von sich horizontal bewogender Sehaufgabe (Abb. 3) und vertikal bewogender Hell-Dunkel-Grenze ist, muss noch geklärt werden: Die sich überlagernden Bewegungen wurden nach Aussage einzelner Versuchspersonen unangenehm empfunden. Die Pausen zwischen dem Wechsel der Lichtverteilungen haben sich daher positiv auf die Bewertung ausgewirkt.

Die Ergebnisse der Teiluntersuchung „schematische Straßendarstellung“ zeigen eine Abhängigkeit der Flickerempfindung von der Wechselfrequenz, sowie eine Abhängigkeit von der Stärke der Lichtverteilungsänderung.

## 5.2 Flickermodell für klassische Fernlichtassistenten

Die Bewertung der Flickerempfindung für klassische Fernlichtassistenten ist in Abb. 5 zu sehen. Negative Zahlenwerte entsprechen einem störenden Sinneseindruck, positive auf einen nicht störenden. Der Wert Null bedeutet "gerade noch nicht störend", der Zahlenwert +1 wurde „kaum wahrnehmbar“, der Zahlenwert -1 der Bewertung „sehr störend“ zugeordnet. Abb. 5 zeigt, dass die Flickerempfindung bei klassischen Fernlichtassistenten mit steigender Frequenz, d.h. einem zunehmend dynamischen Verhalten, größer wird.

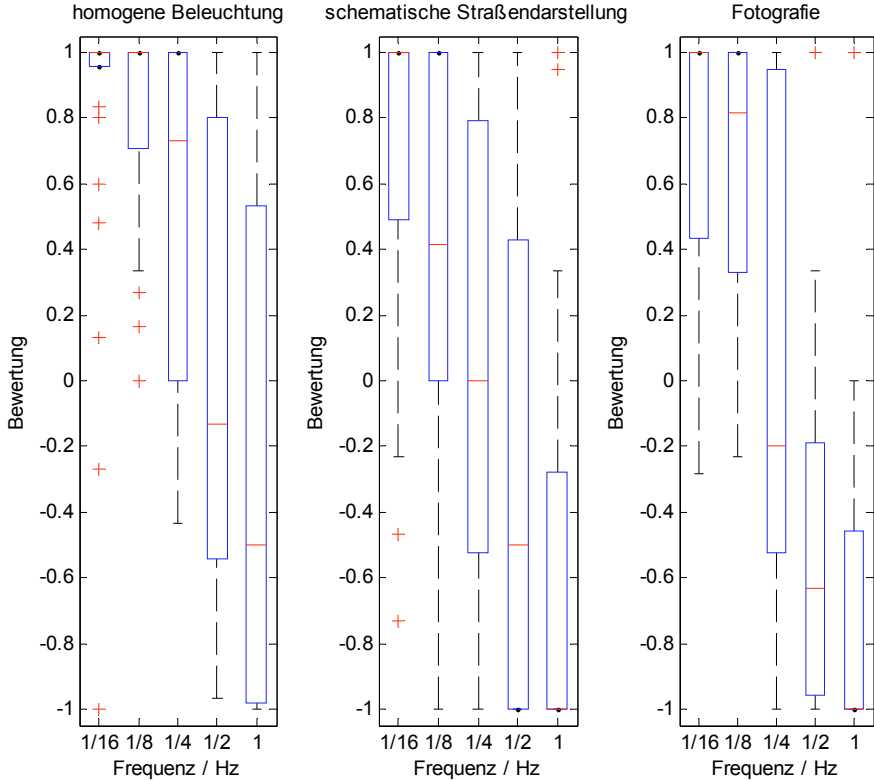


Abb. 5: Boxplot der Bewertungen der Flickerempfindung unterschiedlicher Szenen: homogene Beleuchtung (links), schematische Straßendarstellung (Mitte) und Fotografien (rechts).

In /Cai09/ werden die Spannungsänderung und die daraus resultierende Änderung des Lichtstroms einer 60 Watt Glühlampe gegenübergestellt. Damit kann man aus der prozentualen Änderung der Leuchtdichte der Leinwand bei homogener Ausleuchtung die äquivalente Spannungsänderung der Szene für das Flickermeter /Norm10/ ermitteln. Die Änderung der Leuchtdichte der Leinwand von 10% entspricht in /Cai09/ der Reaktion einer 60 Watt Glühlampe, wenn die Versorgungsspannung um 6,3% geändert wird.

Die Flickerbewertung der Versuchspersonen wird mit den Ergebnissen des Flickermeters bei einer rechteckförmigen Spannungsschwankung von 6,3% verglichen. Eine Kurzzeit-Flickerempfindung von  $P_{st} = 1$  gibt normalerweise die Störschwelle an, an der die Hälfte der Personen eine Störung durch die flackernde Beleuchtung empfinden. Diese Schwelle ist im Versuch deutlich höher und liegt zwischen  $P_{st,1min} = 6,7$  und  $7,6$ . Die größere Flickertoleranz kann unter anderem mit der Ablenkung durch die (Seh-) Aufgabe zusammenhängen.

Die Bewertung durch das Flickermeter hängt nichtlinear mit der Bewertung der Versuchspersonen zusammen. Durch lineare Interpolation zwischen den Messpunkten wird der Zusammenhang zwischen Kurzzeit-Flickerstärke  $P_{st}$  und der mittleren Bewertung der Probanden hergestellt. Messwerte außerhalb der Bewertungsspanne von homogener Beleuchtung werden extrapoliert. Das Flickermeter /Norm10/ wird um eine Anpassung an die Bewertungsskala der Untersuchung erweitert (siehe Abb. 6). Mit der Erweiterung können Spannungsschwankungen am Eingang des Flickermeters mit der Bewertungsskala des Versuchs bewertet werden.

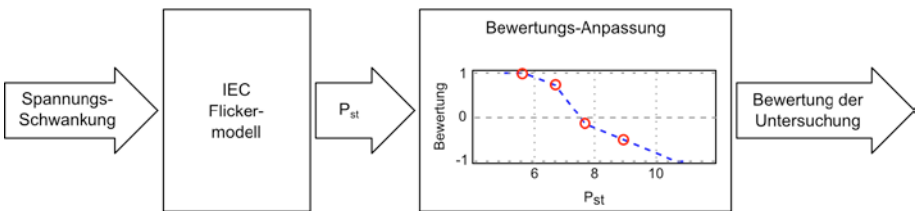


Abb. 6: Erweiterung des IEC Flickermodells um eine Bewertungs-Anpassung

Die Probandenbewertung der Flickerszene „Fotografie“ wird mit der Bewertungsanpassung in die dazugehörige Kurzzeit-Flickerempfindung  $P_{st}$  umgerechnet. Durch Simulation wurde daraus ein äquivalenter Spannungshub von 7,52% ermittelt. Die Übertragungsfunktion des neuen Flickermodells für die Bewertung von Fernlichtassistenten ist in Abb. 7 zu sehen.

Frequenzgang der Flickerempfindung bei klassischen Fernlichtassistenten (periodische Signalwechsel)

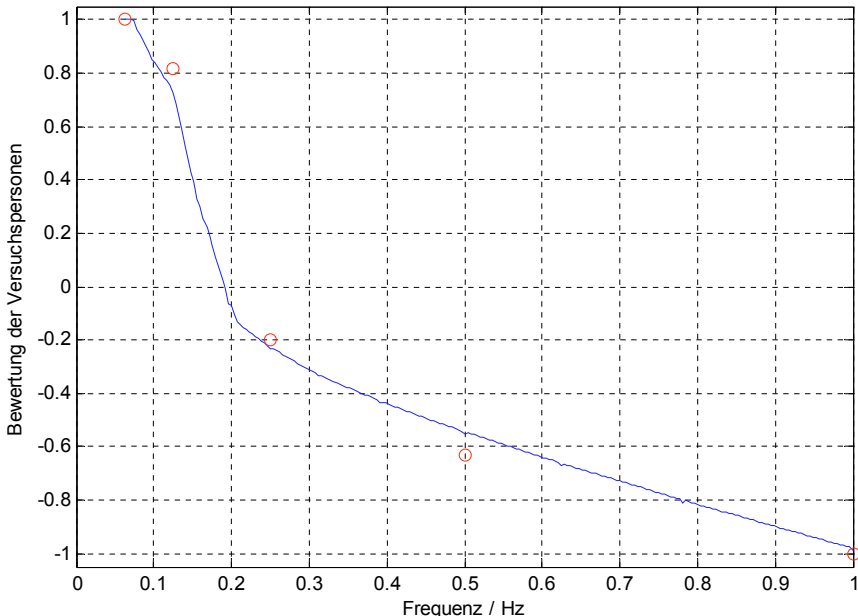


Abb. 7: Bewertung verschiedener Frequenzen periodischer rechteckförmiger Änderungen mit dem Flickermodell für Fernlichtassistenten (blau), sowie der mittleren Bewertung bei der Untersuchung (rot)

## 6 Diskussion und Ausblick

Es wurde die Abhängigkeit der Flickerempfindung von der Frequenz, sowie eine (geringere) Abhängigkeit der Stärke der Lichtverteilungsänderung gezeigt. Es bietet sich eine vergleichende Untersuchung mit anderer Sehaufgabe an, um den Einfluss der sich überlagernden linearen Strukturen bei der Flickerszene „schematische Straßendarstellung“ zu identifizieren. Die Durchführung einer Untersuchung in realer Umgebung kann zusätzlich den Einfluss der inhomogenen Umgebung ähnlich der Flickerszene „Fotografie“ in die Bewertung mit einfließen lassen, woraus ein realitätsnahes Modell entwickelt werden kann.

Es wurde unter Laborbedingungen ein Modell für die Bewertung der Kurzzeit-Flickerstärke  $P_{st}$  bei Fernlichtassistenten entwickelt. Das Fernlichtflickermodell wurde mit Daten periodischer Signale erstellt. Es kann durch die Verwendung des IEC-Flickermeters /Norm10/ auch für die Verwendung nicht-periodische Signale eingesetzt werden. Die Gültigkeit des neuen Fernlichtflickermodells im Feld muss durch weitere Untersuchungen verifiziert werden.

Die aus der Kurzzeit-Flickerstärke  $P_{st}$  berechnete Langzeit-Flickerstärke  $P_{lt}$  könnte als Charakterisierung eines Fernlichtassistenten und damit auch als Vergleichszahl zwischen verschiedenen Fernlichtassistenten genutzt werden.

Beim Flickermodell gibt es meist nur eine Wahrnehmungsgrenze und eine Störkurve. Durch Anpassung des Flickermeters an die Bewertung der Untersuchung kann die Bewertung über die kontinuierliche Skala zwischen „kaum wahrnehmbar“ und „sehr störend“ erfolgen. Wenn man ein Flickermodell für adaptive Fernlichtassistenten erstellt, können Kurven für verschiedene Flickerempfindungen erstellt werden, die für die Auslegung eines Fernlichtassistenten genutzt werden können.

Die Flickerbewertung der Flickerszene „schematische Straßendarstellung“ kann durch einen äquivalenten Spannungshub nicht zufriedenstellend beschrieben werden. Erklären kann man die Unterschiede der Bewertung zwischen den Szenen durch die Größe des Änderungsbereichs, der bei der „schematischen Straßendarstellung“ deutlich kleiner ist als bei der „Fotografie“ oder gar der „homogenen Beleuchtung“. Ein zusätzlicher frequenzabhängiger Gewichtungsfiler im Flickermeter könnte die Wahrnehmungskurve an die Szene der schematischen Straßendarstellung anpassen.

Das erstellte Flickermetermodell für die Bewertung klassischer Fernlichtassistenten könnte durch den vergleichsweise geringen Einfluss der Stärke der Lichtverteilungsänderung genutzt werden, um einen Orientierungswert für die Bewertung adaptiver Systeme zu erhalten. Offen ist noch, wie die Anpassung der Signale des adaptiven Fernlichtassistenten an die Schnittstelle zur Bewertung klassischer Fernlichtassistenten erfolgen kann.

## 7 Literaturverzeichnis

- /Cai09/ R. Cai, „Flicker Interaction Studies and Flickermeter Improvement“, Dissertation Technische Universität Eindhoven, 2009
- /Diem04/ C. Diem, „Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr“, Dissertation Technische Universität Darmstadt, Herbert Utz Verlag, 2004
- /FoES11/ J.L. Foltin, T. Ehlgren, Ch. Schierz, „Untersuchungsmethode zur Bewertung von Flicker bei geteiltem Beleuchtungsfeld (Method for Flicker Evaluation under Divided Illumination Condition)“, Lux junior 2011, Dörfeld/Ilm, 2011
- /Momb00/ W. Mombauer, „EMV: Messung von Spannungsschwankungen und Flickern mit dem IEC-Flickermeter“, VDE Verlag, 2000
- /Norm10/ „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-15: Prüf- und Messverfahren – Flickermeter – Funktionsbeschreibung und Auslegungsspezifikation (IEC 77A/722/FDIS:2012“, Deutsche Fassung FprEN 61000-4-15:2010, 2010
- /Rash70/ C. Rashbass, „The Visibility of Transient Changes of Luminance“, Journal of Physiology, 210, S. 165-186, 1970