

Vergleichende Beurteilung des Blendungsverhaltens von adaptiven Kfz-Scheinwerfersystemen in Kurven

Stefan Wolf, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau
Dietrich Gall: Fachgebiet Lichttechnik, PF 100565, 98684 Ilmenau

Frank Ewerhart: Robert Bosch GmbH, Abt. FV/SLH, PF 777777, 31139 Hildesheim

1 Einleitung

Das Fahren eines Kraftfahrzeuges ist bei Nacht mit einem deutlich höheren Unfallrisiko verbunden als bei Tag. Eine der wesentlichen Ursachen ist die verringerte Fahrersicht und damit verbunden ein zu spätes Erkennen von Fahrbahnverläufen und Objekten im Verkehrsraum. Mit der Einführung der Gasentladungslampe in den Automobilbereich gelang eine deutliche Verbesserung der Fahrersicht durch Erhöhung des Lichtstromes. Eine weitere Steigerung des Lichtstromes würde zu einer Verschärfung der Blendungsproblematik führen. Deswegen versucht man, das Licht „intelligent“ zu machen: Ziel zukünftiger Beleuchtungssysteme ist es, die Lichtverteilung an die Umfeldbedingungen im nächtlichen Straßenraum anzupassen.

In der Literatur sind verschiedene Lösungsansätze für dieses Problem beschrieben, die sich in der Art der Anpassung und in der genutzten Sensorart unterscheiden.

In einem gemeinsamen Projekt von der Robert Bosch GmbH und dem Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau galt es für kurvenreiche Landstraßen ein vorausschauendes Scheinwerfersystem (Kurvenlichtsystem) zu entwickeln und zu evaluieren. Dabei wird die Lichtstärkeverteilung der Scheinwerfer selbst nicht verändert, sondern der gesamte Abblendlicht-Scheinwerfer um eine horizontale und vertikale Achse drehbar gelagert. Besonderes Augenmerk lag auf der Art der verwendeten Sensortypen. Während alle Sensortypen, die Meßgrößen am Fahrzeug selbst ermitteln (Lenkwinkel-, Raddrehzahldifferenz- oder Beschleunigungssensoren), den Straßenverlauf nur unmittelbar am bzw. hinter dem Fahrzeug bestimmen können, die Scheinwerfer aber bis über 60 m vor dem Auto wirksam sind, verspricht hier eine Videosensorik neue Möglichkeiten der vorausschauenden, exakten Ansteuerung der Scheinwerferschwenkwinkel.

Demzufolge wurden 2 Kurvenlichtsysteme entwickelt, die auf unterschiedlichen Sensortypen basieren. Als Sensoren kamen ein Lenkwinkelsensor und eine Videosensorik zum Einsatz. Die Videosensorik hat die wesentliche Eigenschaft, daß sie Fahrbahnkrümmungen vor dem Fahrzeug, also vorausschauend, bestimmen kann.

Ausgehend von einem statischen Modell, bei dem die optimalen Schwenkwinkel durch Standversuche bestimmt wurden, erfolgte eine Optimierung der Systeme unter dynamischen Bedingungen. Dabei wurden Fragen zur Güte der Fahrbahnausleuchtung subjektiv und durch Messung der Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten am Straßenrand untersucht. Sowohl die subjektive Bewertung als auch die Messung der Erkennbarkeitsentfernung zeigen wesentliche Vorteile der Kurvenlichtsysteme vor allem in Linkskurven.

Mit dem lenkwinkelbasierten System, und noch deutlicher mit dem Videosystem wird eine entscheidende Vergrößerung der Erkennbarkeitsentfernung erreicht. In Rechtskurven sind diese Verbesserungen auch vorhanden und auch statistisch signifikant nachweisbar, fallen aber wegen der asymmetrischen Gestaltung der Scheinwerfer und des Straßenraums und den daraus resultierenden geringeren Scheinwerferschwenkwinkeln kleiner aus als in Linkskurven.

Eine weitere wesentliche Komponente der Beurteilung waren subjektive Bewertungen zur Akzeptanz bzw. Annehmlichkeit durch Versuchspersonen. Von diesen Versuchspersonen wurden die

Kurvenlichtsysteme als angenehmer und sicherer empfunden als das starre System, die Bewertungen für das Videosystem fielen deutlich positiver aus als für das Lenkwinkelsystem.

Dieser Beitrag beschäftigt sich vorrangig mit der Bewertung der Kurvenlichtsysteme aus der Sicht des Gegenverkehrs. Hier steht die Frage, ob die Vorteile für den Fahrzeugfahrer eventuell durch eine erhöhte Blendung des Gegenverkehrs erkaufte werden müssen, oder ob durch das Kurvenlicht sogar eine Blendungsreduzierung möglich ist. Es werden die Bewertungsverfahren und die Ergebnisse für einen Scheinwerfertyp präsentiert.

2 Bewertungsverfahren

Die Blendung des Gegenverkehrs stellt in der Praxis einen doppelt dynamischen Vorgang dar, da sich sowohl das Versuchsfahrzeug (die potenzielle Blendquelle) als auch der Beobachter (der Geblendete) bewegen. Schon die geometrischen Verhältnisse sind äußerst komplexer Natur. Während für die Begegnung zweier Fahrzeuge auf gerader Strecke nur der Abstand zwischen den Fahrzeugen als Variable zu betrachten ist, kommt bei einer Fahrt auf einer Straße mit konstanter Krümmung (also eine Kreisfahrt, Abbildung 1, links) noch der Kurvenradius hinzu.

Reale Straßen bestehen aber aus Geraden, Abschnitten mit konstanter Krümmung, Bereichen mit variabler Krümmung und den Übergängen zwischen allen Varianten (Abbildung 1, rechts). Der für die Blendung wichtige geometrische Parameter, der Blendwinkel Θ ist somit eine Funktion von

- der Position des Versuchsfahrzeuges,
- dem Abstand der beiden Fahrzeuge und
- dem Verlauf des Kurvenradiuses zwischen beiden Fahrzeugen, welcher wiederum von der Position der Fahrzeuge relativ zur Kurve abhängt.

Eine vollständige experimentelle Blendungsbewertung durch subjektive Beurteilung oder direkter Messung ist somit nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar. Es wurde deshalb eine Situation mit stehendem Versuchsfahrzeug und sich bewegenden Beobachter ausgewählt, für die alle drei, im folgenden beschriebenen Bewertungsverfahren angewandt wurden, und die Ergebnisse untereinander verglichen. Die Bewertungen der realen Kurvendurchfahrten unter Berücksichtigung des doppelt dynamischen Charakters erfolgte dann nur durch eine Simulationsrechnung.

Die drei Bewertungsverfahren waren:

- subjektive Bewertung mittels psychometrischer Skala
- Messung der Blendbeleuchtungsstärke & Blendwinkel und Berechnung der Schwellenleuchtdichteerhöhung aus den Meßdaten
- Simulation des Begegnungsvorganges basierend auf realen Geometriedaten und Berechnung der Blendbeleuchtungsstärke und Blendwinkel aus den Simulationsergebnissen und den lichttechnischen Scheinwerferdaten.

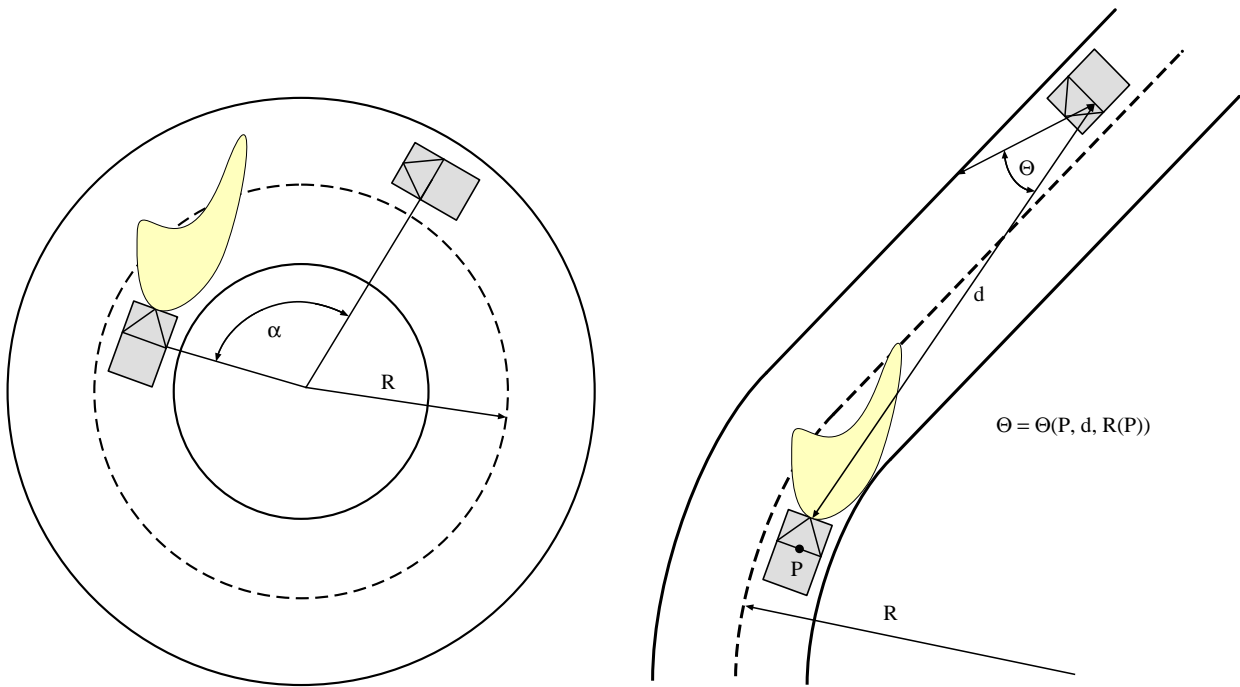


Abbildung 1: Geometrische Verhältnisse bei der Begegnung zweier Fahrzeuge während einer Kreisfahrt und auf realen Straßen

2.1 Subjektive Bewertung

Bei der subjektiven Bewertung wird die psychologische Blendung bestimmt. Die Messung erfolgt mittels einer psychometrischen Skala durch Befragung von mehreren Versuchspersonen. Die hier verwendete psychometrische Skala besteht aus 5 Werten (Noten 1 bis 5), wobei den einzelnen Werten die Urteile „Blendung nicht vorhanden“, „gering“, „erträglich“, „störend“ und „unerträglich“ zugeordnet sind. Die Versuchspersonen werden gebeten, ihren Blendeindruck auf dieser Skala zu notieren.

2.2 Messung

Für die meßtechnische Blendungsbewertung ist ein Kriterium notwendig, das die Höhe der Blendung beschreibt. Ein mögliches Meßkriterium ist die relative Schwellenleuchtdichteerhöhung. Man geht davon aus, daß ein Sehobjekt eine Mindestleuchtdichte haben muß, um gesehen zu werden. Diese Mindestleuchtdichte ist u.a. von der Sehobjektgröße und dem Kontrast zum Umfeld abhängig und soll an dieser Stelle von ihrem Absolutwert her nicht interessieren. Wird ein Beobachter von einer Lichtquelle geblendet, erhöht sich diese Mindestleuchtdichte um den Betrag ΔL_S . Die Zusammenhänge zwischen der Blendbeleuchtungsstärke E_B , dem Blendwinkel Θ und der Schwellenleuchtdichte ΔL_S sind in [1] und [2] beschrieben und sollen hier benutzt werden.

Abbildung 2 zeigt den funktionellen Zusammenhang zwischen der Schwellenleuchtdichteerhöhung ΔL_S und der Blendbeleuchtungsstärke. Für den blendfreien Fall ($E_B \rightarrow 0$) beträgt $\Delta L_S = \Delta L_{S0}$ und für große Blendbeleuchtungsstärken wird ΔL_S direkt proportional zu E_B . Der allgemeine Fall läßt sich durch die Gleichung

$$\Delta L_S = \Delta L_{S0} \cdot (1 + E_B/C_E) \quad (1)$$

beschreiben. Der Wert C_E stellt die Blendbeleuchtungsstärke dar, bei der die Schwellenleuchtdichteerhöhung gerade 100 % erreicht hat.

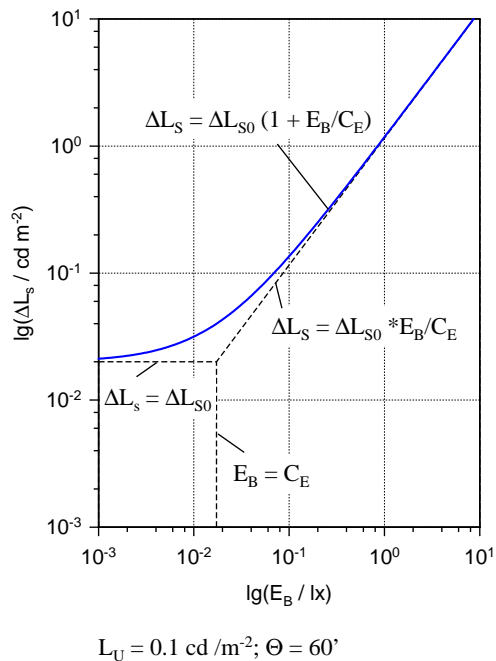


Abbildung 2: Schwellenleuchtdichteerhöhung als Funktion der Blendbeleuchtungsstärke (aus [2])

2.3 Simulation

Ziel der Simulation ist es, den zeitlichen Verlauf der Schwellenleuchtdichteerhöhung für eine Vielzahl von Beobachtern (Gegenverkehr) bei der Begegnung mit dem Versuchsfahrzeug, welchen mit den adaptiven Scheinwerfersystemen (Kurvenlichtsystemen) ausgerüstet ist, in realen Kurvenverläufen zu berechnen. Dazu müssen der Straßenverlauf und die aktuellen Scheinwerferschwenkwinkel erfaßt werden. Der zeitliche Verlauf der Positionen der Beobachter auf der Gegenfahrbahn können dann unter Vorgabe einer Beobachtersgeschwindigkeit und der Startpositionen berechnet werden. Mit Hilfe der Lichtbündelquerschnitte der Scheinwerfer und der Schwenkwinkel kann dann die Blendbeleuchtungsstärke berechnet werden. Die Blendwinkel werden durch Annahme einer Blickrichtung des Beobachters und aus den Positionen der beiden Fahrzeuge auf der Straße bestimmt.

Der Straßenverlauf wird durch eine Rekonstruktion des gefahrenen Weges des Versuchsfahrzeugs bestimmt. Dazu werden die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Lenkwinkel und die Einzelradgeschwindigkeiten jeweils als Funktion der Zeit während einer Meßfahrt auf einer kurvenreichen Versuchsstrecke erfaßt. All diese Informationen sind auf einem fahrzeuginternen Bus-System (CAN-Bus) verfügbar, ebenfalls sind die aktuellen Scheinwerferschwenkwinkel als CAN-Botschaften vorhanden. Die relevanten CAN-Botschaften werden durch einen Meßrechner mitgeschrieben und stehen als Grundlage für die Simulation zur Verfügung.

Die gesamte Simulation läuft in 4 Schritten ab:

1. Erfassung der CAN-Daten in Echtzeit während einer Versuchsfahrt
2. Analyse der CAN-Daten (im Labor)
3. Berechnung von zweidimensionalen (2D) Geometriedaten für die gesamte Testfahrt
4. Animation und Berechnungen von Beleuchtungsstärken und Blendungskennzahlen in einem dreidimensionalen (3D) Modell

Der C_E -Wert ist abhängig vom Blendwinkel Θ zwischen der Blickrichtung und der Blendlichtquelle und der Umfeldleuchtdichte L_U . Die Winkelabhängigkeit wird nach [1] durch die Gleichung

$$C_E = C_{E0}(L_U) \cdot \Theta^{2,2} \quad (2)$$

beschrieben.

Der Wert für C_{E0} wurde aus [2] für eine Umfeldleuchtdichte $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ entnommen und beträgt $C_{E0} = 4.8 \cdot 10^{-6} \text{ lux/min}^{2,2}$.

Der Blendwinkel wird unter der Annahme einer Blickrichtung auf den rechten Fahrbahnrand in 30 m Entfernung bestimmt und die Blendbeleuchtungsstärke E_B gemessen. Mit diesen Werten läßt sich die relative Schwellenleuchtdichteerhöhung als Blendungsmaß bestimmen.

Nach der Erfassung und Analyse der CAN-Daten sind die Fahrbahnkrümmung und die Scheinwerferschwenkwinkel der beiden Kurvenlichtsysteme als Funktion der gefahrenen Wegstrecke vorhanden. Aus dem Verlauf der Fahrbahnkrümmung läßt sich durch numerische Integration die gefahrene Wegstrecke rekonstruieren.

Für die Berechnung der Positionen der anderen Objekte (Straßenmarkierungen, Scheinwerferpositionen, Beobachteraue) werden Annahmen für die relativen Positionen zum Versuchsfahrzeug benötigt. Im einzelnen sind das folgende Festlegungen:

- Das Versuchsfahrzeug fährt immer in der Mitte der rechten Fahrspur.
- Die Fahrspurbreite (FSB) beträgt 3,0 m.
- Der Abstand der Scheinwerfer am Versuchsfahrzeug (ASW) beträgt 1,20 m.
- Der Gegenverkehr fährt in der Mitte der Gegenfahrspur.
- Der Fahrer sitzt 35 cm versetzt zur Fahrzeugmitte (OFB).

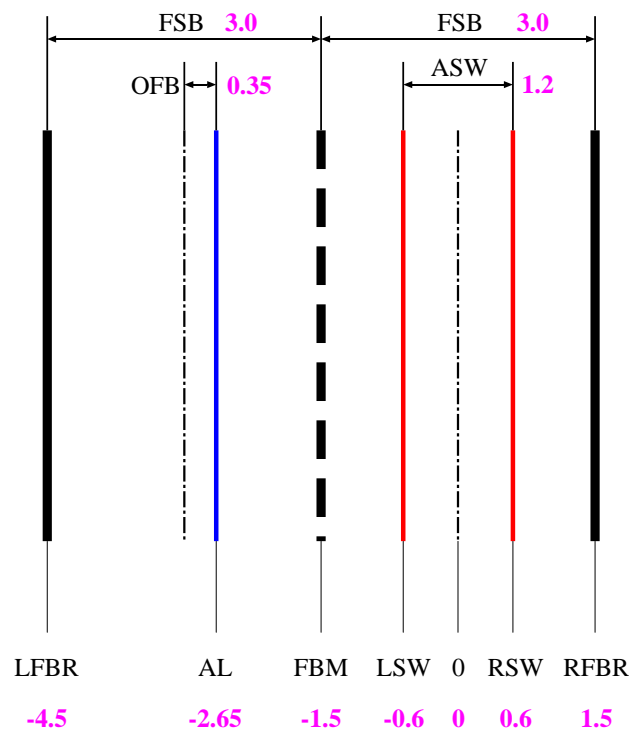


Abbildung 3: Annahmen zur Fahrbahngeometrie

Daraus ergeben sich folgende Offsets zur Längsachse des Versuchsfahrzeugs:

Mitte Versuchsfahrzeug	±0,00 m	Rechter Fahrbahnrand (RFBR)	+1,50 m
Linker Fahrbahnrand (LFBR)	-4,50 m	Fahrbahnmitte (FBM)	-1,50 m
Rechter Scheinwerfer (RSW)	+0,60 m	Linker Scheinwerfer (LSW)	-0,60 m
Augenlinie (AL)	-2,65 m		

Abbildung 3 zeigt noch einmal die Annahmen zur Fahrbahngeometrie.

Als Ergebnisse der gesamten Simulation liegt eine Tabelle und eine animierte Grafik vor. In der Ausgabetablelle werden für jeden berechneten Zeitpunkt und jeden Beobachter folgende Ergebnisse gesichert:

- Zeit t (für alle Beobachter gleich)
- direkter Abstand zwischen Scheinwerfermitte Versuchsfahrzeug und Beobachter
- Abstand zwischen Versuchsfahrzeug und Beobachter als zu fahrende Wegstrecke
- vertikaler Beleuchtungswinkel
- mittlerer Blendwinkel
- Blendbeleuchtungsstärke der starren Scheinwerfer
- Schwellenleuchtdichteerhöhung der starren Scheinwerfer
- Blendbeleuchtungsstärken der Kurvenlichtsysteme
- Schwellenleuchtdichteerhöhungen der Kurvenlichtsysteme

Ein Beispiel der grafischen Ausgabe ist in Abbildung 4 zu sehen. Dafür wurde eine Chart Publishing Software („Xact“ der Firma Scilab GmbH Hamburg) verwendet, die eine Programmierschnittstelle besitzt, über welche alle benötigten Funktionen „ferngesteuert“ werden können. Diese Schnittstelle wird vom eigentlichen Berechnungsprogramm benutzt um Daten in Tabellen einzutragen und die Grafiken darzustellen.

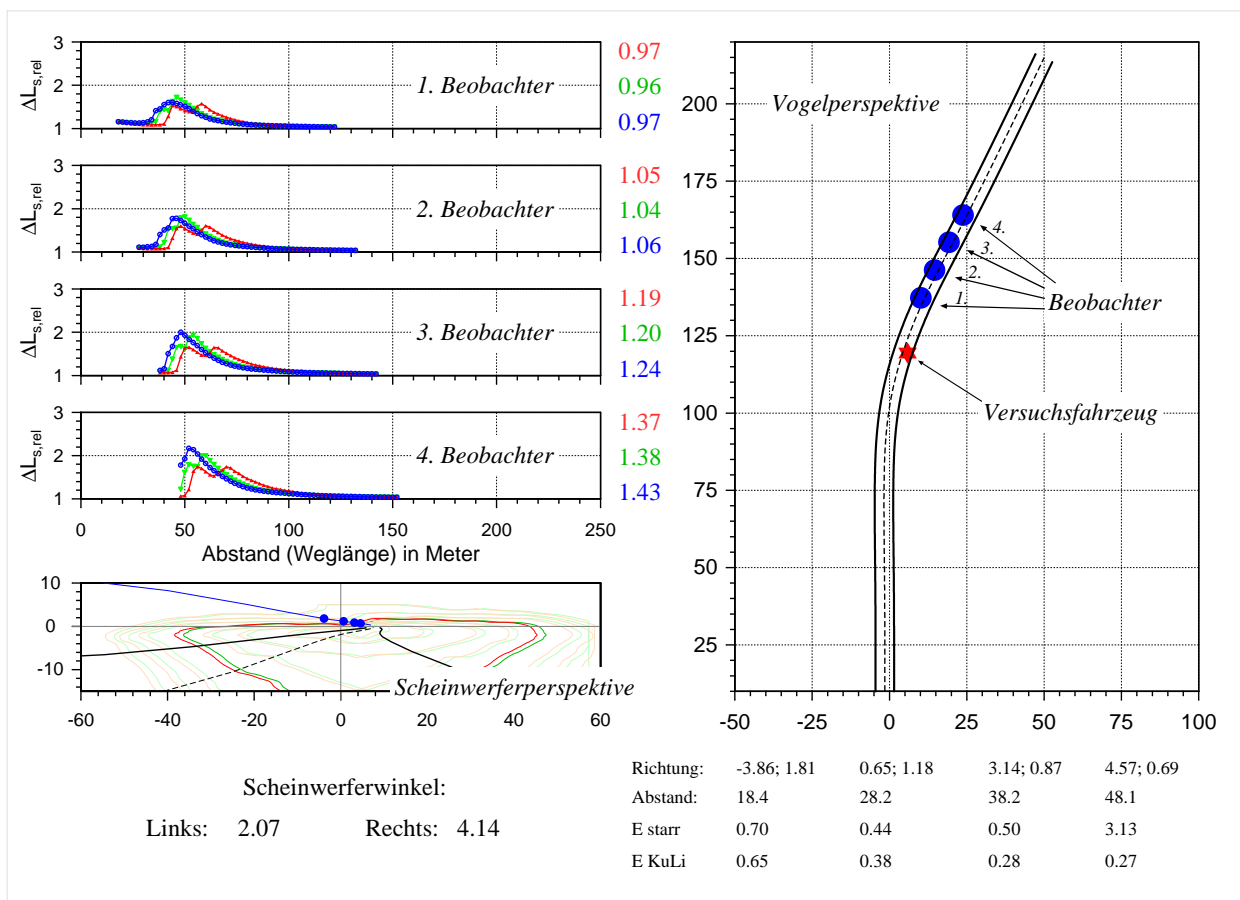


Abbildung 4: Grafische Ausgaben der Animation und Berechnungen im 3D-Modell

Die in Abbildung 4 dargestellte Ausgabe ist eine Xact-Grafik die mehrere Diagramme und Textfelder enthält. Auf der rechten Seite ist die Vogelperspektive zu sehen. Diese besteht aus einem

x-y-Diagramm, in welchem die Fahrbahnmarkierungen als Linien und die Positionen des Versuchsfahrzeugs und der Beobachter als Marker eingetragen sind. Die Daten der Fahrbahnmarkierungen liegen von der 2D-Berechnung komplett vor und werden während der 3D-Animation nicht verändert. Die Positionen der Fahrzeuge werden laufend aktualisiert. Ebenfalls zu jedem berechneten Zeitpunkt werden die Daten unterhalb der Vogelperspektive aktualisiert. Dort sind für jeden der vier Beobachter die relative Lage gegenüber dem Versuchsfahrzeug, der Abstand zu diesem und die Blendbeleuchtungsstärken für das starre und ein Kurvenlichtsystem (hier Video) zu sehen.

Das Diagramm links unten stellt die Scheinwerferperspektive dar. Der Punkt (0, 0) entspricht der verlängerten Fahrzeuglängsachse des Versuchsfahrzeugs auf Höhe der Scheinwerfer. Dargestellt sind die Lichtbündelquerschnitte (Beleuchtungsstärkeverteilung auf einer vertikalen Wand in 25 m Entfernung) des rechten und linken Scheinwerfers als 3D-Höhenliniendiagramme. Diese werden um die aktuellen Scheinwerferschwenkwinkel horizontal verschoben. Die 1 lux-Linie ist durch eine größere Linienbreite hervorgehoben. Ebenfalls zu sehen ist die Lage der Fahrbahnmarkierungen und die Augenlinie. Die gefüllten Kreise kennzeichnen die aktuellen Positionen der Beobachter.

Die vier Diagramme links oben zeigen den Verlauf der Schwellenleuchtdichteerhöhung als Funktion des Abstandes (als Fahrweg) der Beobachter vom Versuchsfahrzeug. Da sich beide Fahrzeuge mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, kann diese auch als zeitlicher Verlauf interpretiert werden. Das Integral der Schwellenleuchtdichteerhöhung über der Zeit (Abschnitt 2.4) ist für die drei verwendeten Scheinwerfersysteme rechts neben den Diagrammen $\Delta L_{S,rel}(s)$ zu sehen.

Diese gesamte Grafik wird zu jedem berechneten Zeitpunkt als Bitmap gespeichert. Nach Abschluß der Berechnungen können die Einzelgrafiken, die ja den zeitlichen Verlauf des Begegnungsvorgangs beschreiben, zu einer Filmsequenz (.avi) zusammengefaßt werden.

2.4 Integrale Blendwerte

Für die Bildung eines globalen, zeitunabhängigen Blendungsurteils aus der Sicht der Beobachter (Gegenverkehr) sind entsprechende Maßzahlen erforderlich. Über die Thematik der dynamischen Blendung liegen bisher aber keine umfassenden, gesicherten Erkenntnisse vor. Es ist bekannt, daß die Belichtung unter bestimmten Voraussetzungen eine blendungsbeschreibende Größe ist [3]. Für die Auswertung der Beleuchtungsstärke- und Schwellenleuchtdichteerhöhungsverläufe werden an dieser Stelle 4 Maßzahlen definiert:

- integrierte Schwellenleuchtdichteerhöhung
- Belichtung
- maximale Schwellenleuchtdichteerhöhung
- Blendungsdauer

Die Berechnung der *integrierte Schwellenleuchtdichteerhöhung* erfolgt nach folgender Gleichung:

$$\Delta L_{S,int} = \int (\Delta L_{S,rel} - 1) dt \quad (3)$$

Dabei bleiben Schwellenleuchtdichteerhöhungen unter 5% ($\Delta L_{S,rel} < 1,05$) unberücksichtigt.

Bei der Berechnung der *Belichtung*

$$H = \int E_{Bl} dt \quad (4)$$

werden ebenfalls die Einzelsituationen mit $\Delta L_{S,rel} < 1,05$ nicht mit einbezogen.

Die *maximale Schwellenleuchtdichtererhöhung* $\Delta L_{S,rel,max}$ bedarf keiner weiteren Erläuterung und als Kriterium für die *Blendungsdauer* wurde $\Delta L_{S,rel} \geq 1,25$ festgelegt. Diese 4 Kennziffern sollen im weiteren als **integrale Blendwerte** bezeichnet werden.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich der Bewertungsverfahren

Der Vergleich der Bewertungsverfahren wird mit einer Situation nahe dem Kurvenausgang einer Rechtskurve durchgeführt.

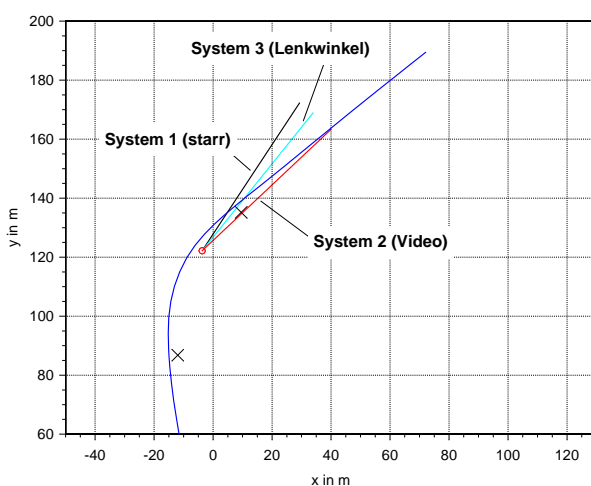


Abbildung 5: Position des Versuchsfahrzeuges und Scheinwerferrichtungen in Kurve 8 ($R = 39$ m, Rechtskurve)

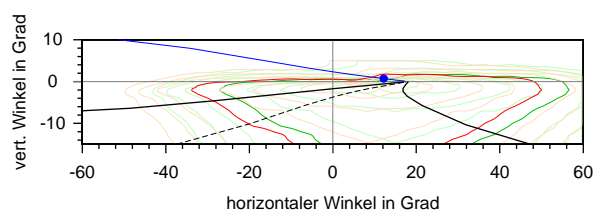


Abbildung 6: Lichtbündelquerschnitt und Augenlinie für die in Abb. 5 gezeigte Situation mit starren Scheinwerfern (Beobachterabstand zum Versuchsfahrzeug $a = 45$ m)

Die Abbildungen 5 und 6 veranschaulichen die betrachtete Situation. Abbildung 6 zeigt die LBQ's der geschwenkten Scheinwerfer mit dem videobasierten System 2. Der eingezeichnete Beobachter befindet sich in 45 m Entfernung zum Versuchsfahrzeug.

Diese Situation verdeutlicht auch die Probleme bei der Messung der Blendbeleuchtungsstärke. Der Beobachter befindet sich direkt an der Hell-Dunkel-Grenze von einem der beiden Scheinwerfer, wo jede geringe Abweichung der Scheinwerfersollrichtung und jede Fahrbahnunebenheit gravierende Meßfehler verursacht.

Die gemessenen Blendbeleuchtungsstärken und die daraus berechneten Schwellenleuchtdichtererhöhungen sind in Abbildung 7 dargestellt. Zu erkennen ist eine Reduzierung der Blendung im Bereich bis 45 m Fahrzeugabstand für beide Kurvenlichtsysteme gegenüber dem starren System. Bei größeren Fahrzeugabständen verursachen die Kurvenlichtsysteme eine höhere Blendung in dieser Situation. Auffällig ist auch, daß das videobasierte System fast immer bessere Blendungswerte erreicht als das lenkwinkelbasierte System 3.

Abbildung 8 zeigt die nach dem in Abschnitt 2.3 beschriebenen Verfahren berechneten Blendbeleuchtungsstärken und Schwellenleuchtdichtererhöhungen. Dabei stand das Versuchsfahrzeug fest

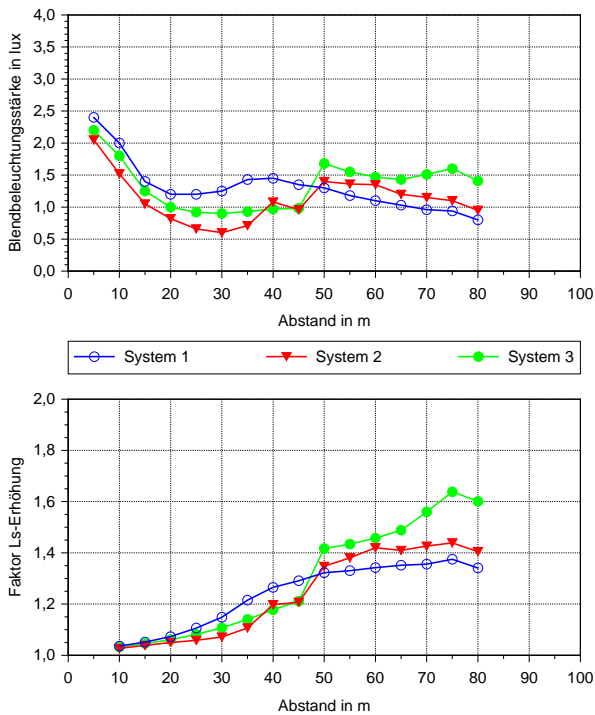


Abbildung 7: Gemessene Blendbeleuchtungsstärken und daraus berechnete Schwellenleuchtdichteerhöhungen für die in Abb. 5 gezeigte Situation

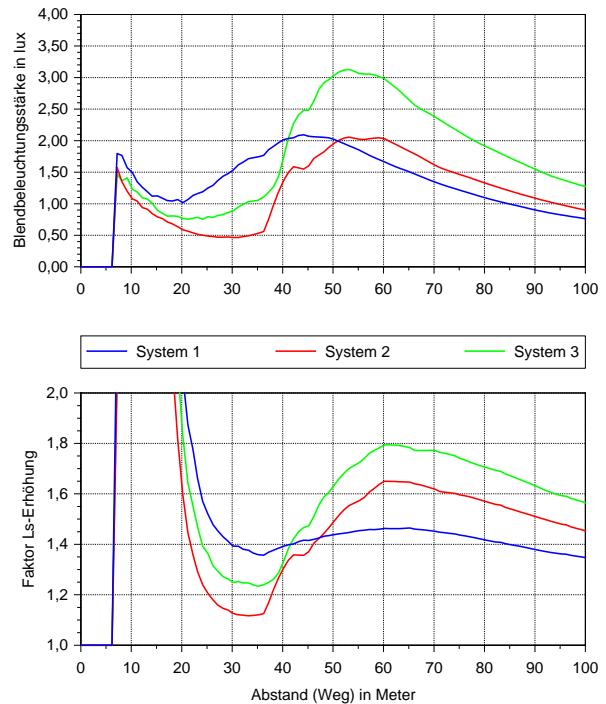


Abbildung 8: Berechnete Blendbeleuchtungsstärken und Schwellenleuchtdichteerhöhungen für die in Abb. 5 gezeigte Situation

an der angegebenen Position, während der Beobachter sich entlang des Straßenverlaufs bewegte. Die Annahmen über das Blickverhalten sind in Abschnitt 2.3 beschrieben (30 m Entfernung, rechter Fahrbahnrand).

Der Vergleich der Absolutwerte der Blendbeleuchtungsstärken zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung von den berechneten und gemessenen Werten im Bereich bis 35 m Fahrzeugabstand. Danach gibt es deutliche Abweichungen, welche vorwiegend der Messung aus o.g. Gründen zugeordnet werden müssen.

Die Aussagen über das Blendungsverhalten der Systeme untereinander sind mit den auf Meßwerten basierten Daten insofern identisch, daß bis ca. 45 m eine Blendungsreduzierung mit den Kurvenlichtsystemen erreicht wird. Bei größeren Entfernungen kehren sich die Verhältnisse auch hier um. Ebenfalls sind die Rangfolgen der Scheinwerfersysteme bei beiden Entfernungsbereichen zwischen berechneten und gemessenen Werten identisch.

Die aus den Simulationsdaten berechneten Schwellenleuchtdichteerhöhungen zeigen im Entfernungsbereich bis 30 m unrealistisch hohe Werte. Ursache hierfür ist die unterschiedliche Annahme der Blickrichtung bei der Simulation und Messung. Bei der Messung wurde für diesen Entfernungsbereich der Fixationspunkt auf dem rechten Fahrbahnrand (aus Sicht des Beobachters) in Höhe des Versuchsfahrzeugs angenommen. Bei der Simulation wird von einer festen Entfernung Beobachter – Blickpunkt von 30 m ausgegangen. Da nach dem Versuchsfahrzeug, aus der Sicht des Beobachters, eine Linkskurve folgt, verschiebt sich auch die Blickrichtung nach links, wodurch sehr kleine Blendwinkel entstehen. Diese sind für die extrem hohen Schwellenleuchtdichten verantwortlich.

Für Entfernungen größer als 30 m gelten die gleichen Aussagen für die Schwellenleuchtdichteerhöhung wie für die Blendbeleuchtungsstärke, der Vergleich der Systeme untereinander liefert

bei den messungsbasierten und rein rechnerischen Daten identische Aussagen. Die Ursachen für die Abweichung der Absolutwerte wurden genannt.

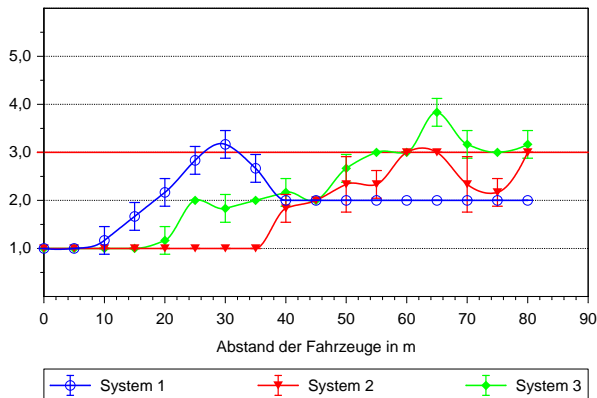


Abbildung 9: Subjektives Beobachterurteil für die in Abb. 5 gezeigte Situation

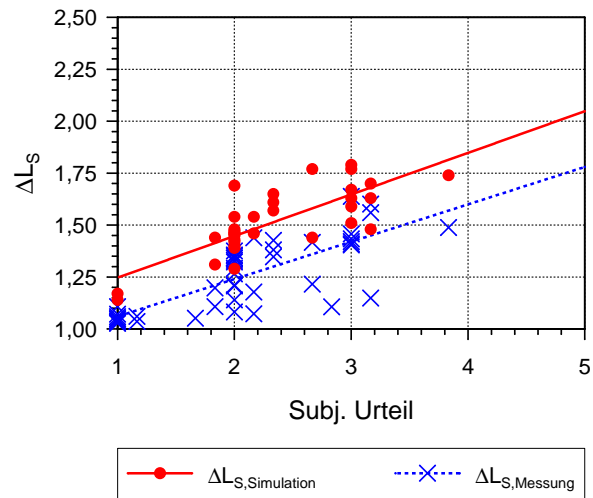


Abbildung 10: Aus den Meßdaten und den Simulationsergebnissen berechneten Schwellenleuchtdichteerhöhungen als Funktion des subjektiven Blendungsurteils

Die Ergebnisse des dritten Bewertungsverfahrens, der subjektiven Bewertung durch Versuchspersonen, sind in Abbildung 9 dargestellt. Der mögliche Wertebereich liegt hier zwischen 1 („Blendung nicht vorhanden“) und 5 („Blendung unerträglich“). Auch hier teilt sich der Entfernungsbereich bei ca. 45 m in zwei Bereiche: Bei kürzeren Abständen der Fahrzeuge wird mit Kurvenlichtsystemen eine Blendungsreduzierung erreicht und bei größeren erhält das starre System die bessere Bewertung. Auch hier wird das Videosystem immer besser oder gleich gut zum Lenkwinkelsystem beurteilt.

3.2 Vergleich der Blendungsbewertungsverfahren

Auch wenn die Schwellenwerterhöhung und die Messung mittels psychometrischer Skala (subjektive Bewertung) unterschiedliche Blendungsarten beschreiben, ist eine Korrelation zwischen beiden Ergebnissen zu erwarten. Abbildung 10 zeigt die Schwellenleuchtdichteerhöhungen, die aus den gemessenen und berechneten Daten bestimmt wurden, als Funktion des subjektiven Blendurteils (Mittelwert von 3 Probanden). Dabei wurden die unrealistischen Werte der Simulation für Abstände < 30 m nicht berücksichtigt. Eingezeichnet sind außer den Einzelwerten jeweils eine lineare Regression. Die Korrelationskoeffizienten betragen 0,78 (Simulation) bzw. 0,77 (auf Messung basierend). Die Irrtumswahrscheinlichkeit ist in beiden Fällen kleiner als 0,1%. Die beiden Regressionsgeraden verlaufen fast parallel, wobei die Messung geringere Schwellenleuchtdichteerhöhungen ergibt. Eine mögliche Ursache könnte die Art der Messung der Blendbeleuchtungsstärke sein. Hier kann nur die Gesamtbeleuchtungsstärke beider Scheinwerfer gemessen, und ein mittlerer Blendwinkel angenommen werden. Bei der Simulation werden die Einzelbeleuchtungsstärken mit den dazugehörigen Blendwinkel verwendet. Außerdem ergab die Simulation geringfügig höhere Blendbeleuchtungsstärken als die Messung.

Die Korrelation der Schwellenleuchtdichteerhöhung (Simulation) und der subjektiven Urteile lassen folgende Zuordnung zwischen beiden Bewertungen zu:

subjektives Urteil	relative Schwellenleuchtdichteerhöhung
Blendung nicht vorhanden	$\leq 25\%$
Blendung gering	$\approx 40\%$
Blendung erträglich	$\approx 60\%$
Blendung störend	$\approx 80\%$
Blendung unerträglich	$\geq 100\%$

Der direkte Vergleich aller 3 Bewertungsverfahren zeigt, daß die Annahmen für die Berechnung der Schwellenleuchtdichteerhöhung (zulässige Schwellenleuchtdichteerhöhung 100 %, Umfeldleuchtdichte $L_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$ und Blickrichtung auf rechten Fahrbahnrand in 30 m Entfernung) berechtigt sind.

3.3 Blendungsverhalten der Kurvenlichtsysteme in Rechtskurven

Mit Hilfe der Simulationsrechnung wurden die Verläufe der Schwellenleuchtdichteerhöhungen und der Blendbeleuchtungsstärke für 20 Beobachter bei der Begegnung mit einem Kurvenlichtfahrzeug berechnet. Der Abstand der Beobachter beträgt jeweils 10 m. Untersucht wurden Kurven mit den Radien $R = 39 \text{ m}$, $R = 103 \text{ m}$, $R = 300 \text{ m}$ und $R = 450 \text{ m}$. Alle Ergebnisse mit Vogel- und Scheinwerferperspektive und den Diagrammen können an dieser Stelle nicht dargestellt werden, es erfolgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Aussagen.

Dazu erfolgte ein Paarvergleich (Wilcoxon-Test) der 4 integralen Blendwerte zwischen den Systemen 1 (starr) \leftrightarrow 2 (Video), 3 (Lenkwinkel) \leftrightarrow 1 (starr) und 2 (Video) \leftrightarrow 3 (Lenkwinkel).

Die Ergebnisse für Rechtskurven sind in der Abbildung 11 dargestellt. Dabei wurde jeder Beobachter und jede Kurve als ein Fall betrachtet. Daraus ergeben sich 20 Beobachter \times 4 Kurven = 80 Fälle. Die positiven Ränge in Abbildung 11 entsprechen also der Anzahl von Fällen, in denen das erste System besser ist als das zweite. Negative Ränge bedeuten den umgekehrten Sachverhalt.

Wie man sehen kann, sind beide Kurvenlichtsysteme bezüglich Blendung besser als das starre System. Ebenfalls zeigt das videobasierte System eindeutig ein geringeres Blendungsverhalten als das lenkwinkelbasierte Kurvenlichtsystem. Dabei spielt es keine Rolle, welchen der 4 integralen Blendwerte man betrachtet, alle liefern das gleiche Ergebnis. Alle Vergleiche sind mit einer Ausnahme mindestens sehr signifikant. Die Ausnahme bildet der Vergleich der Blendungsdauer vom lenkwinkelbasierten System zu den starren Scheinwerfern, dieser ist nicht signifikant. Nach diesem Kriterium wären beide als gleichwertig einzustufen.

3.4 Blendungsverhalten der Kurvenlichtsysteme in Linkskurven

Die Ergebnisse der Berechnungen in Linkskurven sind in Abbildung 12 gezeigt. Hier treffen die gleichen Aussagen wie für die Rechtskurven zu. Beide Kurvenlichtsysteme erhalten eine bessere Blendungsbewertung als die starren Scheinwerfer, wobei das videobasierte System wieder besser als das lenkwinkelbasierte System bewertet wird. Hier sind alle Paarvergleiche höchst signifikant.

Für Linkskurven erscheint das Ergebnis zunächst paradox, da die Scheinwerfer nach links, also in Richtung des Gegenverkehrs, geschwenkt werden. Trotzdem werden geringere Blendbeleuchtungsstärken berechnet. Die Ursache dafür ist in der Lichtstärkeverteilung des untersuchten Scheinwerfertyps zu finden. Diese Scheinwerfer weisen eine sehr gute Ausleuchtung des linken Fahrbahnrandes auf, wozu die Lichtstärke zwischen -2° und -20° horizontalem Winkel (links von der Scheinwerferhauptachse) leicht ansteigt. Für den Gegenverkehr in Linkskurven bedeutet

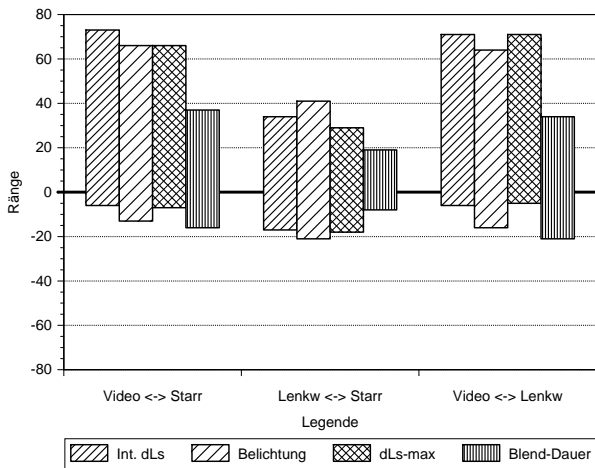


Abbildung 11: Paarvergleich der Scheinwerfersysteme für Blendungsverhalten in Rechtskurven

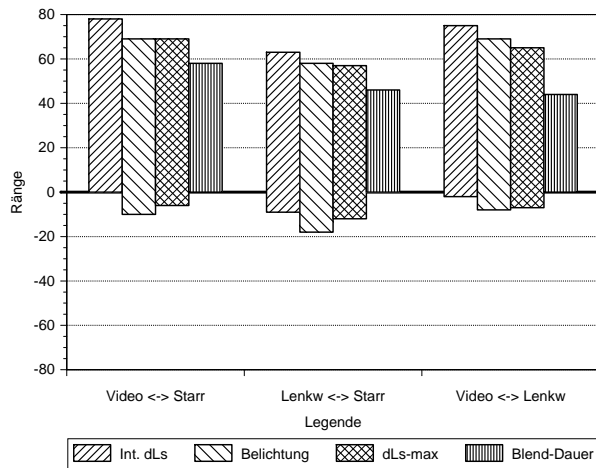


Abbildung 12: Paarvergleich der Scheinwerfersysteme für Blendungsverhalten in Linkskurven

das eine geringfügig höhere Blendung als auf gerader Straße. Die Kurvenlichtsysteme kompensieren dieser Effekt und so wird eine Blendungsreduzierung erreicht. Bei anderen Scheinwerfertypen mit anderen Lichtstärkeverteilungen ist diese signifikante Blendungsreduzierung gegenüber den starren Scheinwerfer in Linkskurven möglicherweise nicht nachweisbar.

4 Zusammenfassung

Aus allen durchgeführten Blendungsuntersuchungen kann geschlußfolgert werden, daß die vorliegenden Kurvenlichtsysteme keine höhere Blendung des Gegenverkehrs verursachen als die starren Scheinwerfer. In Abhängigkeit von der Lichtstärkeverteilung der Scheinwerfer kann sogar eine Blendungsreduzierung erreicht werden.

Literatur

- [1] Schmidt-Clausen, H. J.; Bindels, J. T. H. Die Schwellenleuchtdichteerhöhung als Blendungsbewertungskriterium, Lichttechnik 23. Jahrgang Nr. 10/1971, S. 547ff.
- [2] Schmidt-Clausen, H. J. Die Schwellenleuchtdichte-Erhöhung als Blendungsbewertungskriterium, DIE FARBE 26 (1977), Nr. 3/6, S. 115ff.
- [3] Rosenhahn, E.-O. Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen, Dissertation TU Darmstadt 1999, Herbert Utz Verlag GmbH, München