

Konvertierungsalgorithmus für automobilen Forschungsscheinwerfer

Dipl.-Ing. Steffen Michenfelder

Marvin Neumeyer (B.Sc.)

Prof. Dr. Cornelius Neumann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Lichttechnisches Institut (LTI)

Engesserstraße 13, Geb. 30.34

76131 Karlsruhe

Telefon: 0721/608-46735, Telefax: 0721/608-42590

Email: Steffen.Michenfelder@kit.edu Internet: www.lti.kit.edu

1. Einleitung

Die zentrale Aufgabenstellung der automobilen Lichttechnik besteht darin, die visuelle Leistungsfähigkeit des Fahrers im Verkehrsraum sicherzustellen. Dazu gilt es auf der einen Seite, durch eine gezielte Ausleuchtung die Kontraste zu generieren, die der Fahrer für die rechtzeitige Erkennung relevanter Objekte benötigt. Auf der anderen Seite dürfen die Scheinwerfer eines Fahrzeuges andere Verkehrsteilnehmer nicht in einem solchen Maß beeinträchtigen, sodass deren visuelle Leistungsfähigkeit sowie der Fahrkomfort vermindert wird. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Vermeidung physiologischer wie auch psychologischer Blendung.

Die dauerhafte Fahrt mit Fernlicht stellt aus Sicht des Fahrzeugführers außerhalb geschlossener Ortschaften die optimale Lösung dar. Es ist jedoch klar ersichtlich, dass bei der heutigen Verkehrsdichte eine solche Fahrt nicht realisierbar ist. Um entgegenkommende sowie vorausfahrende Fahrzeuge zu schützen, wurde 1915 zunächst das Abblendlicht gesetzlich vorgeschrieben. Es verfügte zu Beginn über eine symmetrische Hell-Dunkel Grenze (kurz: HDG), die die Reichweite der Scheinwerfer beschränkte. Höhere Geschwindigkeiten der Fahrzeuge sowie eine steigende

Verkehrsdichte führten 1957 zur Einführung des asymmetrischen Abblendlichts mit seinem charakteristischen Knick. Die Reichweite der Scheinwerfer auf der eigenen Fahrbahn konnte dadurch deutlich gesteigert werden, was zu einer höheren Sicherheit sowohl für den Fahrer selbst wie auch für Radfahrer und Fußgänger führte.

Der Adaptionsgrad automobiler Scheinwerfer wurde durch Applikationen wie dem Kurvenlicht und, in jüngerer Vergangenheit, den AFS-Funktionen weiter erhöht. Die Scheinwerfer passen sich hierbei Umweltbedingungen wie der Umgebungshelligkeit, Regen oder Nebel sowie wechselnder Straßengeometrien (Landstraße, Autobahn, Stadt) an.

Aktuelle Entwicklungen zielen darauf ab, den Schritt hin zu Scheinwerferlichtverteilungen zu machen, die dem Fernlicht möglichst nahe kommen. Mittelsameratechnik werden andere Verkehrsteilnehmer erkannt und entweder wird die Lichtverteilung an der Stelle gezielt abgedunkelt (vertikale HDG) oder die HDG wird so wie möglich an das erkannte Objekt gelegt (adaptive HDG).

Die möglichen Auswirkungen der angesprochenen Methoden zur Erhöhung der Effizienz und Leistungsfähigkeit von automobilen Scheinwerfersystemen auf den Fahrer bedürfen wissenschaftlicher Klärung. Hierfür stehen im Zuge der steigenden Innovationsgeschwindigkeit allerdings immer weniger Zeit und finanzielle Mittel zur Verfügung. Der folgende Artikel beschreibt die Entwicklung und den Aufbau eines Forschungsscheinwerfers, der am Lichttechnischen Institut in Karlsruhe realisiert wurde und ein vielseitiges Werkzeug für physiologische Untersuchungen an der Schnittstelle Mensch-Maschine darstellt.

2. Zielstellung

Der Forschungsscheinwerfer *Propix* führt die grundlegende Arbeit von Rechentn [1] fort, der 2006 am Lichttechnischen Institut in Karlsruhe den LED-Scheinwerfer Voxellight aus 128 einzelnen Modulen aufgebaut hat. Die LEDs konnten pulsweitenmoduliert und unabhängig voneinander angesteuert werden. Sowohl die begrenzte räumliche

Auflösung, die Notwendigkeit, die Module für definierte Lichtverteilungen mechanisch und händisch zu verstellen, wie auch der Gesamtlichtstrom von etwa 3000 lm genügen jedoch nicht mehr den Anforderungen aktueller Forschungsvorhaben. Die konsequente Weiterentwicklung führte daher von den 128 Lichtmodulen hin zu sechs Mikrospiegelarrays mit jeweils 2 Millionen Raumbereichen. *Propix* wurde hinsichtlich der folgenden Zielparameter entwickelt:

- Der Verkehrsraum soll matrixförmig unterteilt sein, um pixelgenau jede mögliche Lichtverteilung darstellen zu können
- Die Pixelanzahl des *Propix* Systems soll die derzeitiger LED-Matrixbeam Systeme deutlich übersteigen (aktuell: *Audi A8*, 25 Pixel)
- Der Lichtstrom soll höher als bei jeder aktuell verwendeten oder entworfenen Lichtverteilung sein; die Anforderungen an die maximale Beleuchtungsstärke in Höhe von 180 lx [7] müssen erfüllt sein
- Sensordaten des Fahrzeuges sollen ebenso wie Kameradaten in das System integriert werden können
- Entworfenene Lichtverteilungen sollen einfach und schnell in das *Propix*-System importiert werden können

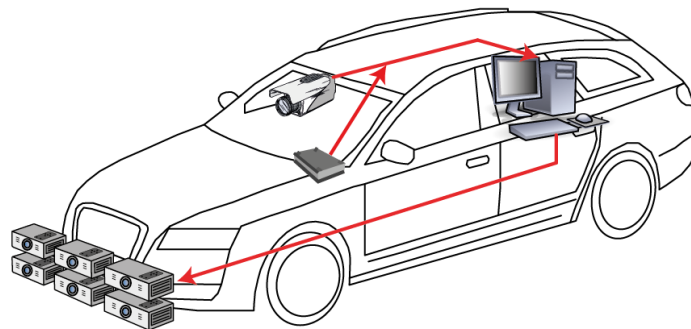


Abbildung 1 Skizze des Propix-Versuchsfahrzeuges mit Projektoren, Sensorintegration, Kamera zur Detektion von Verkehrsobjekten und Steuerrechner

Der letzte Punkt, die Integration von bestehenden Lichtverteilungen in das *Propix*-System, ist Gegenstand dieses Artikels. Für eine ausführliche Beschreibung des Systems sei auf die Literatur verwiesen ([2],[3],[4]).

3. Technische Umsetzung des Propix-Systems

Lichtquellen

Wegen der hohen Pixelanzahl und der damit verbundenen Freiheitsgrade wurden für das *Propix*-System Projektoren mit FullHD Auflösung verwendet. Damit liegt die Zahl der schaltbaren Pixel bei ca. 2 Mio. pro Projektor. Für die Modellierung aktueller Scheinwerfersysteme wird bei der Verwendung von Projektoren aufgrund geometrischer Rahmenbedingungen ein Lichtstrom von mehr als 10.000 lm benötigt. Um ausreichend Potential nach oben zu haben, wurden für das *Propix*-System sechs Projektoren mit einem jeweiligen Lichtstrom von 5.000 lm verwendet, sodass im Ganzen etwa 30.000 lm zur Verfügung stehen. Als Lichtquelle dient dem Projektor eine UHP (Ultra High Pressure)-Lampe.

Die eingesetzte DLP-Technik (1-Chip DMD) verwendet ein rotierendes Farbfilterrad, um farbige Bildern zu erzeugen. Bei Bewegungen der Beobachter relativ zum Bild entsteht ein subjektiv störender Regenbogeneffekt. Die Filterräder der Projektoren wurden aus diesem Grund demontiert, wodurch die Fähigkeit, verschiedene spektrale Charakteristiken der Lichtverteilungen zu untersuchen, mit dem *Propix*-System nicht zur Verfügung steht.

Räumliche Anordnung

Für die Anordnung der Projektor auf einem Rack vor dem Versuchsfahrzeug (siehe **Abbildung 1**) wurden folgende Punkte beachtet:

- Alle relevanten Objekte des Verkehrsraums müssen von den Projektoren beleuchtet werden können. In den horizontalen Seitenbereichen handelt es sich dabei vor allem um Verkehrszeichen und Fußgänger/Radfahrer, während vertikal der gesamte Bereich vom Vorfeld des Fahrzeuges bis hin zu den Überkopfschildern der Autobahnen abgedeckt werden muss.
- Die Beleuchtungsstärkewerte müssen hoch genug sein, um alle gängigen Lichtfunktionen darstellen zu können und zusätzlich noch Potential nach oben zu haben.
- Die Projektoren müssen sich teilweise überlappen, damit die Kalibrierung des gesamten Systems ermöglicht werden kann.

Die Projektoren wurden in einer 2x3 Anordnung in zwei horizontalen und drei vertikalen Reihen angeordnet. Die Überdeckungen und der Abstrahlbereich sind in (**Abbildung 2**) dargestellt. Die oberen drei Projektoren erzeugen das Fernlicht und Funktionen wie ein Markierungslicht, während die unteren drei Projektoren hauptsächlich für das Abblendlicht und Nahfeld-Funktionen verantwortlich sind. Die maximale Beleuchtungsstärke im Hotspot (HV0) liegt bei ca. 259 lx in einer Entfernung von 25 m.

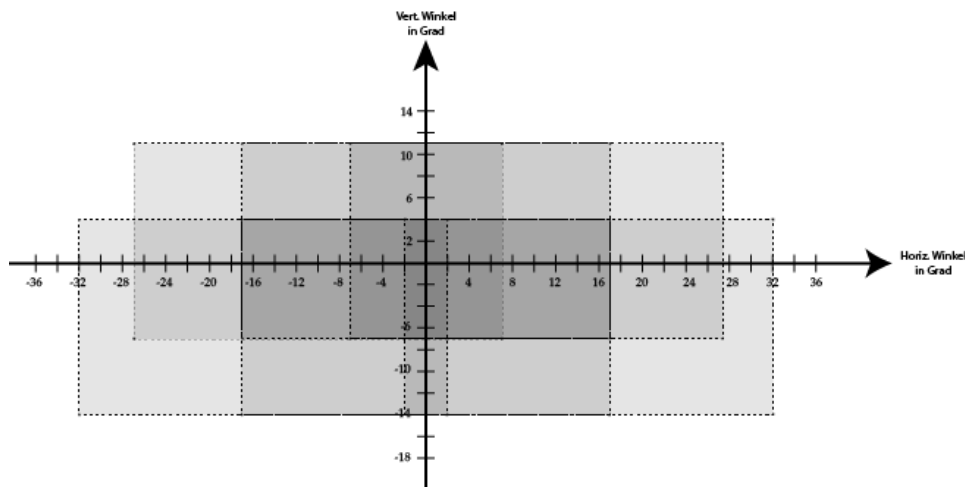


Abbildung 2 Räumliche Abstrahlcharakteristik der sechs Projektoren, die Überlagerung ist unterschiedliche Grauintensitäten dargestellt

4. Methodik des Konvertierungsalgorithmus

Eine wesentliche Aufgabe von *Propix* ist die Integration von zuvor berechneten und ausgelegten Lichtverteilungen in das Projektorensystem. Dabei stellen sich die folgenden Leitfragen:

- Wie können Lichtverteilungen mathematisch beschrieben werden?
- Welchen formalen Aufbau haben Lichtverteilungen allgemein?
- Wie können diese Lichtverteilungen durch das Matrixscheinwerfersystem *Propix* umgesetzt werden?
- Wie stark weichen die ursprüngliche Lichtverteilung und die durch das Matrixscheinwerfersystem *Propix* erzeugte Lichtverteilung voneinander ab?

Der vorliegende Artikel zeigt, dass das aktive Scheinwerfersystem *Propix* in bestimmten Bereichen in der Lage ist, jede beliebige Lichtverteilung zu erzeugen. Es wird dabei die

Entwicklung eines Algorithmus beschrieben, der eine beliebig komplexe Form einer Lichtverteilung durch das Abstrahlverhalten der Projektoren nachbildet. Die Funktionsfähigkeit des Algorithmus wird durch die Nachbildung einer ECE-Abblendlichtverteilung validiert.

Mathematische Modellierung eines Matrixscheinwerfersystems

Die Projektoren werden in ein gemeinsames, globales kartesisches Koordinatensystem eingeordnet und mithilfe von Abstrahlvektoren, die die Richtung eines durch den Matrixscheinwerfer abgestrahlten Pixels definieren, beschrieben. Die Beschreibung mit Hilfe der Abstrahlvektoren ermöglicht eine mathematische Modellierung der Projektoren. Die mathematischen Grundlagen hierzu wurden von Söhner [3] im Rahmen seiner Diplomarbeit ausgearbeitet, worauf für weitergehende Informationen verwiesen wird.

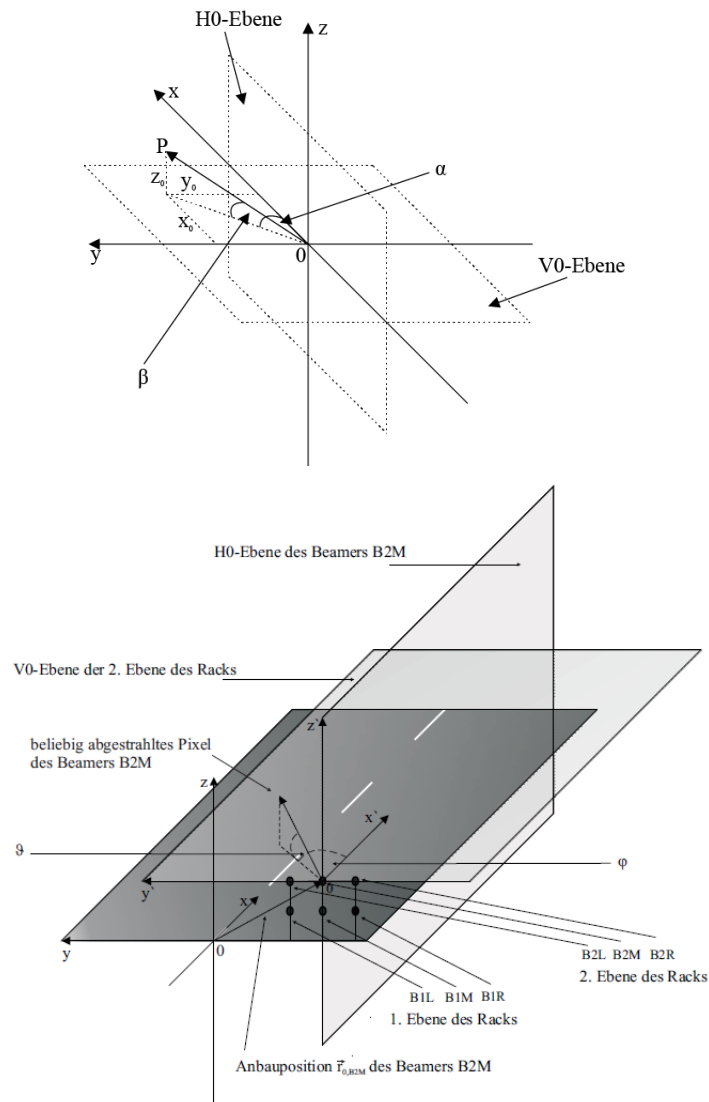


Abbildung 3 Zur mathematischen Modellierung des Projektorsystems [3][4]

Beschreibung von Lichtverteilungen mittels Rayfiles

Grundsätzlich definieren Ray-Files die Abstrahlcharakteristik einer Lichtquelle, beispielsweise eines Automobilscheinwerfers. Die Definition erfolgt durch eine Matrix, die als Rayfile bezeichnet wird. Die Matrix besteht aus sieben Spalten, die Zeilenanzahl entspricht der Anzahl an Lichtstrahlen zuzüglich einer Header-Zeile. Somit repräsentiert, abgesehen von der Header-Zeile, jede Zeile einen Lichtstrahl, der durch die sich in den Spalten befindenden Informationen genau charakterisiert ist. Die Charakterisierung geschieht durch die Betrachtung des Lichtstrahls als Vektor im dreidimensionalen Raum, zusätzlich wird jeder dieser Vektoren mit Hilfe einer Intensität vollständig als Lichtstrahl beschrieben.

Tabelle 1 Schematischer Aufbau eines Rayfiles mit N Strahlen und einem Gesamtlichtstrom Φ_{gesamt} ; die ersten drei Spalten beinhalten den Startvektor, 4-6 den Richtungsvektor und die siebte Spalte den Anteil am Gesamtlichtstrom

Zeile / Spalte	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
1.	0	0	0	0	Φ_{gesamt}	N	-1
2.	$x_{0;1}$	$y_{0;1}$	$z_{0;1}$	x_1	y_1	z_1	I_1
...
N.	$x_{0;N}$	$y_{0;N}$	$z_{0;N}$	x_N	y_N	z_N	I_N

Transformation in das Propix-System

Für die im weiteren Verlauf durchgeführte Simulation der Lichtverteilungen durch die Projektoren mit Hilfe der Ray-Files ist es notwendig, nur diejenigen Bereiche der Ray-Files nach zu modellieren, die überhaupt vom Projektionssystem abgedeckt werden können. Wird diese Selektion nicht durchgeführt, würde unnötigerweise eine zu große Datenmenge simuliert werden, die aus physikalischen Gründen gar nicht von den Projektoren abgedeckt werden kann.

Der maximal mögliche Bereich, den die Projektoren in der Horizontalen erreichen können, ist bestimmt durch die Summe aus dem Schwenkwinkel der äußeren Projektoren und der jeweiligen horizontalen Öffnungswinkel der Projektoren.

Die Ursprungseinträge aller Lichtstrahlen werden zu $x_0 = 0$, $y_0 = 0$ und $z_0 = 0$ gesetzt, es wird also das Fernfeld betrachtet. Dies ist berechtigt, da die Candela-Verteilung der Lichtstrahlen mit Hilfe der Projektoren nachmodelliert werden soll und sich diese im Unendlichen befindet. Durch diese Vereinfachung ist es ebenso gerechtfertigt, sowohl die Projektoren als auch die ursprünglichen Lichtquellen als Punktlichtquellen zu betrachten. Weiterhin werden nur die Lichtstrahlen selektiert, die eine Intensität größer Null besitzen, da ein Lichtstrahl mit Intensität gleich Null keine physikalische Relevanz besitzt, trotzdem jedoch erstellten Ray-Files vereinzelt aufzufinden ist.

Durch die mathematische Modellierung eines Matrixscheinwerfers sowie eines Matrixscheinwerfersystems und der Beschreibung und Erzeugung beliebiger Lichtverteilungen mittels Ray-Files ist das nötige Handwerkszeug vorhanden, um

beliebige Lichtverteilungen durch einen Matrixscheinwerfer respektive ein Matrixscheinwerfersystem nachzubilden. Die Erzeugung beliebiger Lichtverteilungen wird in den nachfolgenden Abschnitten allgemein beschrieben, bevor sie in anschließend anhand einer ECE konformen Abblendlichtverteilung praktisch verifiziert wird.

Die Modellierung beliebiger Lichtverteilungen durch einen Projektor kann in einer Vielzahl verschiedener Anwendungen eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Erzeugung von Lichtverteilungen, die im Straßenverkehr eingesetzt werden. Der Algorithmus kann aber ebenfalls zur Umsetzung beliebiger anderer, nicht im Automobilbereich angesiedelten Lichtverteilungen durch einen Projektor eingesetzt werden.

Modellierung der Lichtverteilungen durch eine Matchmatrix

Die Kenntnis der Position eines Pixels im dreidimensionalen Raum, gegeben durch die Beschreibung des Pixels als Richtungsvektor ermöglicht es, jede beliebige Lichtverteilungskurve, die von einem Projektor vollständig beleuchtet werden kann, nachzubilden. Das bedeutet, dass die Form der Lichtverteilungskurve genau dann durch einen Projektor erzeugt werden kann, wenn sie sich in dem vom Projektor erreichbaren Winkelbereich befindet. Die Richtungsvektoren des Projektors sind genau definiert und somit vorgegeben.

Es muss nun die durch die Ray-Files dargestellte Lichtverteilung, die durch beliebige Richtungsvektoren im Raum definiert ist, mit Hilfe der dem Projektor zugehörigen Richtungsvektoren dargestellt werden. Für ein festes Pixel gibt es die nachfolgenden Möglichkeiten:

- Kein Lichtstrahl des Ray-Files trifft ein vorher festgelegtes Pixel des Projektors
- Es existiert genau ein Lichtstrahl des Ray-Files, der ein vorher festgelegtes Pixel des Projektors trifft
- Es existiert mindestens ein Lichtstrahl des Ray-Files, der ein vorher festgelegtes Pixel des Projektors trifft

Nachdem festgestellt wurde, wie viele Lichtstrahlen n ein bestimmtes Pixel treffen, kann

die Anzahl der treffenden Lichtstrahlen für jedes Pixel in einer Matrix notiert werden. Diese Matrix wird im Folgenden als Matchmatrix bezeichnet. Um wieder ein vollständiges Ray-File zu erzeugen, ist es notwendig, den Richtungsvektoren eine Intensität zuzuweisen. Die Matchmatrix wird daher dahingehend verändert, dass sie anstatt die Treffer zu zählen, die Intensität aller Lichtstrahlen, die in den Bereich eines Pixels fallen und den gleichen Richtungsvektor zugewiesen bekommen, aufsummiert. Alle für ein Ray-File benötigten Informationen sind nun bekannt und müssen somit nur noch zusammengetragen werden.

Homogenisierung der Lichtverteilung

Da unter Umständen jeder Projektor einen anderen Winkelbereich der Lichtverteilung nachmodelliert, kann der Fall auftreten, dass sich die Winkelbereiche von mindestens zwei Projektoren überschneiden. Dadurch werden diese Winkelbereiche von mindestens zwei Projektoren nachgebildet, es kommt dann bei der Betrachtung der Lichtverteilung zu einer Kantenbildung. Die Homogenität wird durch eine prozentuale Reduzierung der Intensität, gegeben durch die 7. Spalte der Ray-Matrix, in den gewünschten Winkelbereichen erreicht. Die Folge ist allerdings eine mehr oder weniger zufällige Lichtstärkeverteilung, da nur die Homogenität angestrebt wurde. Da die Verteilung aber insgesamt homogenisiert wurde, handelt es sich lediglich um einen Skalierungsfaktor, der hinzugefügt werden muss. Der Wert der Lichtstärke im Hotspot der modellierten Lichtverteilung, der H0V0-Punkt, wird mit dem Hotspot der ursprünglichen Lichtverteilung verglichen und der Skalierungsfaktor dadurch bestimmt.

Damit sind die Erzeugung und Simulation der Lichtverteilung abgeschlossen, das Matrixscheinwerfersystem ist somit in der Lage, beliebige Lichtverteilungen simulativ nachzubilden.

Projektion der Lichtverteilung

Die Lichtverteilung soll in den realen Verkehrsraum abgestrahlt werden. Die simulierte Lichtverteilung muss dafür in eine reale Scheinwerferlichtverteilung umgesetzt werden,

die Projektoren somit ein Bild in den Verkehrsraum projizieren. Die 7. Spalte der Ray-Matrix beinhaltet die Intensität jedes Pixels. Eine Normierung auf den größten Intensitätswert in der 7. Spalte der Ray-Matrix, dem Hotspot der Lichtverteilung, generiert eine prozentuale Gewichtung der Intensitätswerte, wobei der Hotspot den Wert 1 aufweist. Die Projektoren können mittels Pulsweitenmodulation (PWM) 256 verschiedene Graustufenwerte darstellen. Die Grauwerte des Projektors werden auf die Intensitätswerte der nachmodellierten Lichtverteilung normiert. Als Ausgabe für die Projektoren wird daraus eine Bitmap Datei generiert.

Verifikation des Algorithmus anhand einer ECE-Lichtverteilung

Der zuvor beschriebene Algorithmus wurde auf ein ECE konformes Abblendlicht angewendet (**Abbildung 4** bzw. **Abbildung 6**). Die resultierenden Lichtverteilungen der Projektoren sind in **Abbildung 5** und **Abbildung 7** dargestellt. Die Abweichungen zwischen Soll und Ist bewegen sich im unteren einstelligen Prozentbereich. (Anmerkung: Einzelne Artefakte führen in der Vogelperspektive zu einer erhöhten Beleuchtungsstärke)

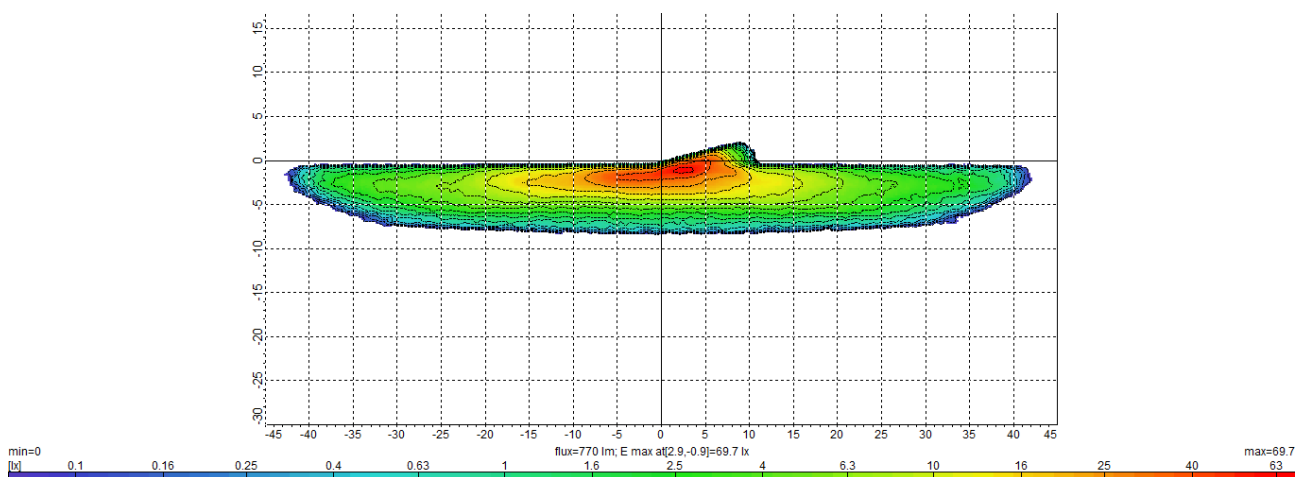


Abbildung 4 Beleuchtungsstärkeverteilung des ECE konformen Abblendlichts auf der 25 m Messwand

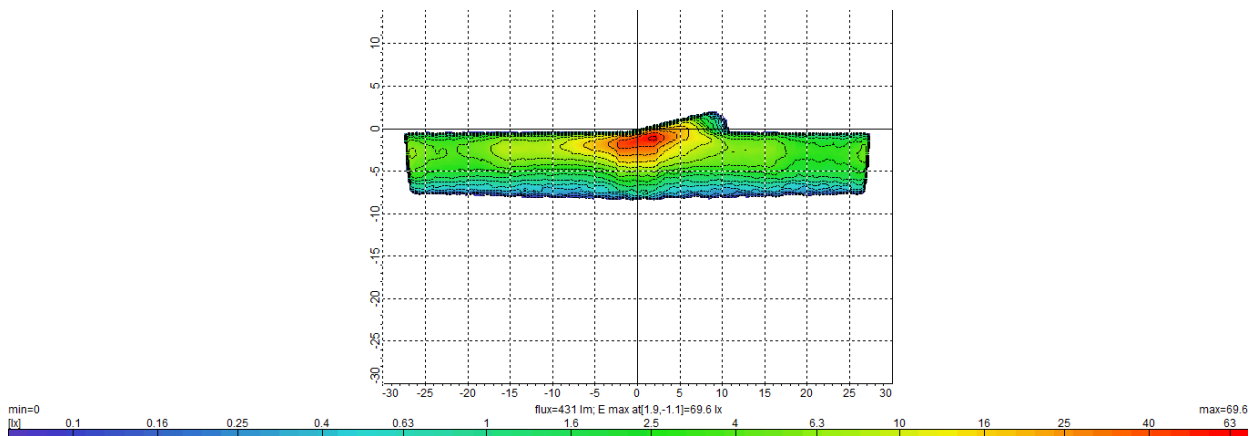


Abbildung 5 Nachmodellierung der Abblendlichtverteilung mit dem Matrixscheinwerfersystem (25 m Messwand)

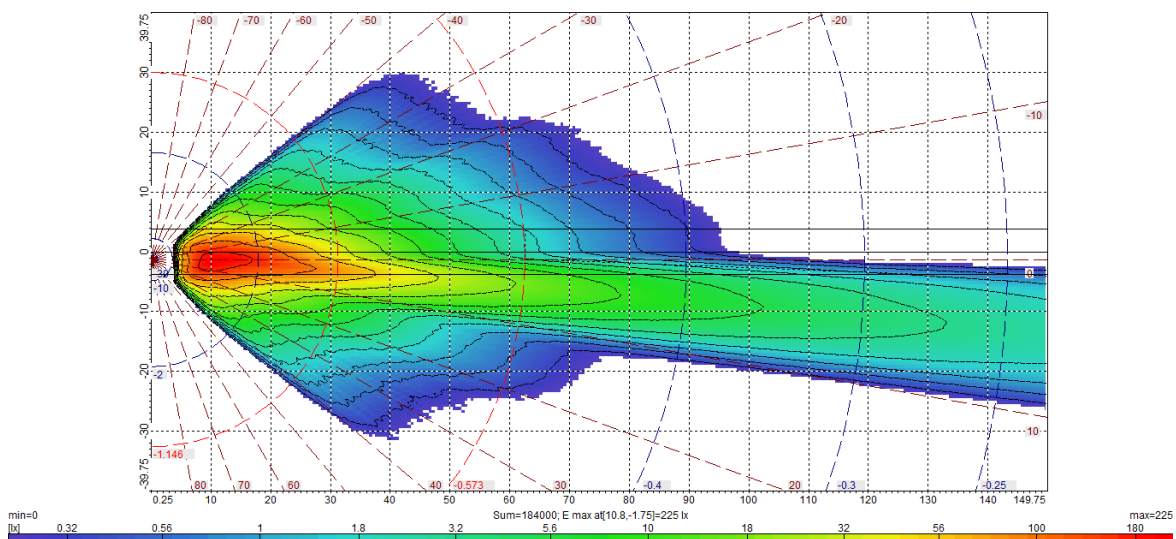


Abbildung 6 Beleuchtungsstärkeverteilung des ECE konformen Abblendlichts aus der Vogelperspektive

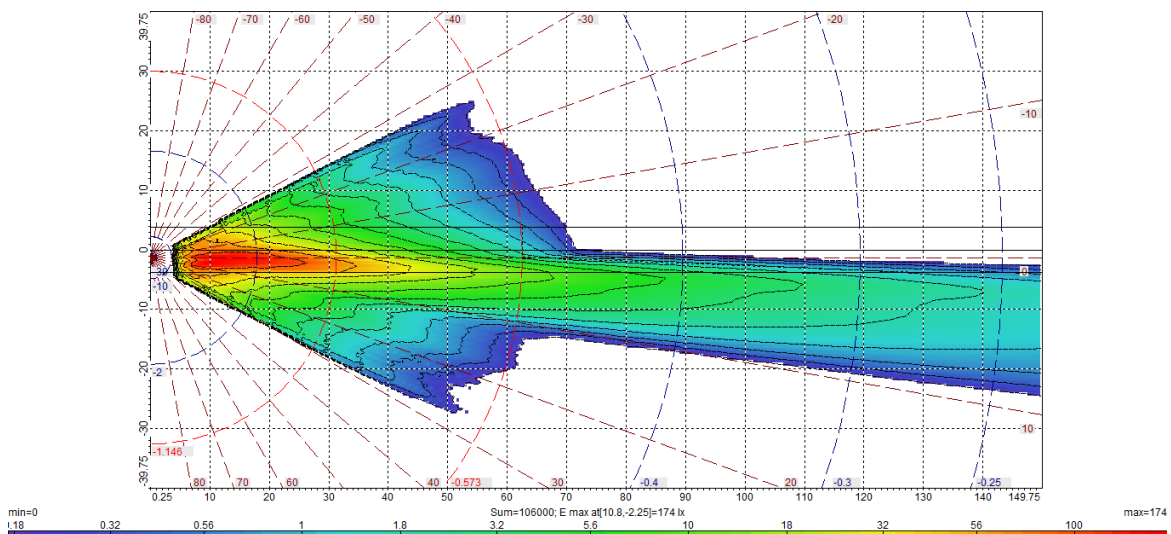


Abbildung 7 Nachmodellierung der Abblendlichtverteilung mit dem Matrixscheinwerfersystem (Vogelperspektive)

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, einen Algorithmus zu entwickeln, beliebige Lichtverteilungen für die Darstellung mittels des Matrixscheinwerfers *Propix* zu transformieren. Dabei ist jedoch auf die Systemgrenzen hinsichtlich Lichtstärkedynamik und Öffnungswinkel zu achten. Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, bestünde im Einsatz einer zusätzlichen Basisausleuchtung.

Der vorgestellte Algorithmus bietet Optimierungspotenzial hinsichtlich seiner Effizienz. Aktuell sind Ray-Files mit bis zu 5Mio Lichtstrahlen in einer tolerierbaren Simulationsdauer von einigen Stunden erstellbar. Das Matrixscheinwerfersystem sollte jedoch dahingehend erweitert werden, dass ein Einsatz als Forschungsscheinwerfer zur Erprobung von Lichtverteilungen im dynamischen Fall möglich ist. Dazu wird es notwendig sein, die Bilder für die Projektoren in Echtzeit zu generieren.

Literaturangaben

- [1] Rechentn, Jean-Marc: „Systemdesign eines Kfz-LED-Scheinwerfers“; Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2006
- [2] Michenfelder, Steffen; Neumann, Cornelius: „Entwicklung eines Projektor-basierten Forschungsscheinwerfers zur Erprobung neuartiger Lichtverteilungen“; 5. VDI Fachtagung Optische Technologien, Karlsruhe, 2012
- [3] Michenfelder, Steffen; Neumann, Cornelius: „Pixel Lighting – An Automotive Lighting Research Head Lamp“; International Symposium of Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2013
- [4] Michenfelder, Steffen: „Propix – An Automotive Projector Pixel Lighting“; Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Ausgabe 11/2013
- [5] Neumeyer, Marvin: „Erzeugung beliebiger Lichtverteilungen durch ein Matrixscheinwerfer-system am Beispiel einer ECE-Abblendlichtverteilung“; Diplomarbeit, Karlsruher Institut f. Technologie, 2012
- [6] Söhner, Sebastian: „Entwicklung eines Matrixscheinwerfersystems zur Umsetzung eines maskierten Fernlichts“; Diplomarbeit, Karlsruher Institut f. Technologie, 2012
- [7] Huhn, Wolfgang: „Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugschein-werfer im Rahmen der ECE-Regelungen“; Herbert Utz Verlag, München, 1999