

RE-AIMING

Ein Automatisches Rekalibrierungssystem

Julian Lerch M.Sc.

TU Darmstadt, Fachgebiet für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle
Verarbeitung

Dr.-Ing. Michael Hamm

TU Darmstadt, Fachgebiet für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle
Verarbeitung

Darmstadt, 03.04.2025

Abstract

Fahrzeugscheinwerfer beeinflussen maßgeblich die Verkehrssicherheit bei Nachtfahrten. Falsch eingestellte Lichtsysteme stellen eine der Hauptursachen für eingeschränkte Sicht und gefährliche Blendung dar. Das vorliegende Whitepaper analysiert die Grenzen bestehender Kalibriermethoden und stellt ein innovatives Re-Aiming-System vor, das eine softwaregestützte, kontinuierliche Nachregelung der Scheinwerferausrichtung im Fahrbetrieb ermöglicht. Es kombiniert hochauflösende Pixel-Scheinwerfer, Frontkameras und KI-basierte Bildverarbeitung zu einem geschlossenen Regelkreis, der Marker in der Lichtverteilung erkennt, analysiert und die Lichtverteilung gezielt anpasst. Durch die vollständige Systemintegration gelingt eine hochpräzise und adaptive Ausrichtung, die sowohl Sichtweite als auch Blendungsfreiheit optimiert. Damit leistet das Re-Aiming-System einen Beitrag zur Verbesserung der Lichttechnik moderner Fahrzeuge und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit.

Inhalt

1	Motivation	1
	Relevanz des Problems	1
	Zielsetzung dieses Whitepapers.....	3
2	Problematik.....	3
3	Beschreibung des Systems.....	5
3.1	Komponentenbeschreibung.....	8
3.1.1	Lichtemittierende Einheit.....	10
3.1.2	Erfassungseinheit.....	10
3.1.3	Verarbeitungssystem.....	11
	Umgebungsüberwachung	11
	Fehlstellungsüberprüfung	13
	Korrektur der Fehlstellung	14
3.2	Beispielhafte Abläufe.....	15
	Aktivierung und Auslösebedingungen.....	15
	Musterprojektion und Erfassung	15
	Adaptive Prozessgestaltung.....	16
	Prozesstypen und Systemintegration	17
	Geeignete Kalibrierbedingungen	17
	Bildanalyse und Entscheidung.....	19
	Korrektur und Regelung.....	19
4	Einfluss auf Regelungen und technische Fahrzeugüberwachung.....	20
5	Fazit und zukünftige Perspektiven	21
6	Quellen	23

1 Motivation

Fahrzeugscheinwerfer spielen für die Verkehrssicherheit bei Nachtfahrten eine entscheidende Rolle. Daher sind sie ein zentraler Punkt aktueller Forschung. Diese beschäftigt sich im Frontbereich besonders mit der Erhöhung der Sichtweite, Helligkeit und Qualität der Sicht (bessere Detektion und Erkennung). Gleichzeitig dürfen die Scheinwerfer sowohl den Fahrer als auch weitere Verkehrsteilnehmer nicht blenden. Um die Verkehrssicherheit zu maximieren, müssen diese beiden Aspekte ausbalanciert und miteinander in Einklang gebracht werden. Für diesen Prozess spielt eine korrekte Einstellung des Scheinwerfers eine zentrale Rolle, da ein falsch eingestellter Scheinwerfer beide Ziele erheblich beeinträchtigen kann. Sowohl horizontale als auch vertikale Fehlstellungen verursachen erhebliche Probleme:

Zu tief eingestellte Scheinwerfer reduzieren die effektive Sichtweite des Fahrers, während zu hoch eingestellte Scheinwerfer eine übermäßige Blendung verursachen und entgegenkommende Verkehrsteilnehmer gefährden. In ähnlicher Weise kann eine falsche horizontale Einstellung die Sicht am Straßenrand einschränken, sowie eine zu starke Abweichung nach, aus Fahrersicht, links die Blendwirkung auf den Gegenverkehr erhöhen.

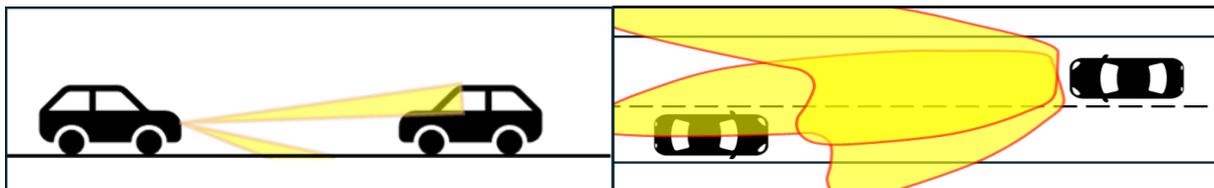


Abbildung 1: *Beispielhafte Darstellung fehlerhafter Scheinwerfereinstellungen.
Links - horizontale Fehlstellung, Rechts - vertikale Fehlstellung*

Relevanz des Problems

Trotz des technologischen Fortschritts bestätigen zahlreiche Studien am Fachgebiet Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung (ALSVV) der Technischen Universität Darmstadt [4] und Umfragen von Organisationen wie der FIA und des ADAC, dass Blendung ein großes Problem darstellt, welches von vielen Fahrern als mindestens störend bis unerträglich empfunden wird. Während dabei Fernlicht oft als Hauptursache für Blendung genannt wird, empfindet dennoch fast die Hälfte der befragten Autofahrer auch das Abblendlicht als übermäßig blendend. Dies zeigt, dass selbst moderne Scheinwerfersysteme, trotz angepasster Abblendlichtverteilung und Fernlichtassistenzsystemen, problematisch sein können. Da die Aussagen der Befragten keinerlei Rückschlüsse auf die Art der Blendung (physiologische/psychologische Blendung eng.: discomfort/disability glare) oder physikalisch messbare Parameter zulassen, kann nur von einer Vermischung mehrerer Ursachen ausgegangen werden. Mehrere Studien zeigen jedoch einstimmig, dass bei korrekt justierten Scheinwerfern keine relevante Blendung wahrgenommen wird. Dies belegen unter anderem die Arbeiten von Totzauer [1], Locher et al. [2], Bullough et al. [3], Zydek [4] sowie Locher und Kaley [5]. Dieser Umstand lässt darauf schließen, dass ein Großteil der Blendungsproblematik auf die Scheinwerfereinstellung zurückzuführen ist.

Beim Fernlicht zielen fortschrittliche Systeme wie das blendfreie Fernlicht darauf ab, die Blendung durch dynamische Anpassung der Lichtverteilung zu verringern. Die Wirksamkeit dieser Systeme hängt jedoch ebenfalls vollständig von der richtigen Ausrichtung der Scheinwerfer ab. Außerdem erfordern diese Technologien Sicherheitspuffer zwischen dem eigenen Licht und dem Gegenverkehr, was zu sichtbaren dunklen Lücken in der Beleuchtung führt. Je präziser die Scheinwerferausrichtung ist, desto kleiner können diese Lücken sein, so dass mehr Licht auf die Straße fällt und die Sicherheit insgesamt erhöht wird. Die Notwendigkeit einer präzisen Ausrichtung wird mit zukünftigen Beleuchtungstechnologien noch wichtiger. Diese entwickeln sich hin zu pixelbasierten Scheinwerfersystemen, die aus Tausenden von einzeln ansteuerbaren Segmenten (Pixeln) bestehen können. Diese Systeme ermöglichen eine hochdynamische und anpassungsfähige Lichtverteilung durch selektives Dimmen einzelner Pixel. Diese Scheinwerfer funktionieren dabei ähnlich wie Projektoren und erfordern eine präzise Synchronisation zwischen der Fahrzeugkamera und dem Scheinwerfersystem, um sicherzustellen, dass das Licht genau dorthin gelenkt wird, wo es benötigt wird. Eine Grundvoraussetzung für diese Technologie ist die hochpräzise Steuerung der Scheinwerferposition, um sicherzustellen, dass jedes Pixel das vorgesehene Ziel punktgenau beleuchtet.

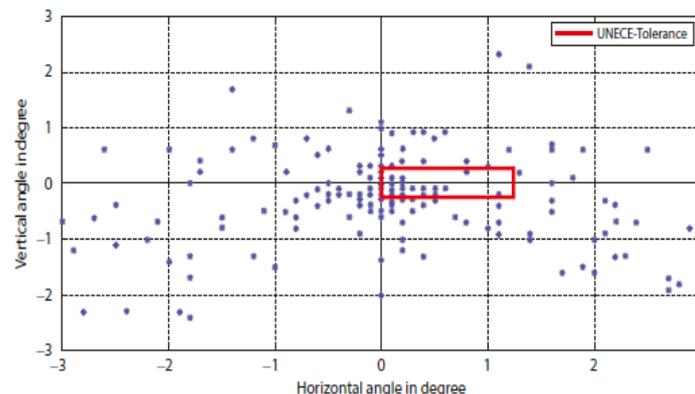


Abbildung 2: Horizontale und vertikale Abweichungen von Kfz-Scheinwerfern einer Untersuchung der TU Darmstadt [6]. In Rot: der zulässige UNECE-Toleranzbereich.

Empirische Daten zur Scheinwerfereinstellung untermauern die Dringlichkeit dieses Problems noch weiter. So ergab etwa eine Studie der Technischen Universität Darmstadt, dass 75% der in ihr untersuchten Fahrzeuge falsch eingestellte Scheinwerfer aufwiesen [6]. Regelmäßige Inspektionen, wie sie beispielsweise vom ADAC durchgeführt werden, zeigen weiterhin durchgehend hohe Raten von Fehleinstellungen, was die Notwendigkeit einer besseren Scheinwerferregelung und -einstellung unterstreicht.

Zielsetzung dieses Whitepapers

Angesichts der kritischen Rolle der korrekten Scheinwerfereinstellung für die Verkehrssicherheit wird in diesem Beitrag ein automatisiertes System skizziert, das die Scheinwerfereinstellung und Positionierung während der Fahrt kontrolliert und anpasst. Zusätzlich wird genau auf Anforderungen und Methoden eingegangen, die in einem derartigen System genutzt werden können. Dabei soll sowohl eine durchgehende Re-, sowie eine initiale Kalibrierung vor der Fahrt möglich sein. Ein solches Re-Aiming System würde sicherstellen, dass die Scheinwerfer wie vorgesehen eingestellt sind und wie gewünscht funktionieren bzw. alle Lichtfunktionen vollumfänglich in bester Weise genutzt werden können. Solch ein System kann damit dazu beitragen die Sicht bei Nacht zu verbessern und gleichzeitig die Blendung zu minimieren.

Durch die Implementierung dieser automatisierten Re-Aiming-Technologie kann die Effektivität von modernen Lichtsystemen maximiert und gleichzeitig die Blendung für andere Verkehrsteilnehmer minimiert werden.

Dieses Whitepaper dient dabei der wissenschaftlichen und technischen Dokumentation und soll als Referenz für zukünftige Entwicklungen im Bereich der dynamischen Scheinwerferausrichtung genutzt werden.

2 Problematik

Trotz der Bedeutung einer exakten Scheinwerferausrichtung ist die Gewährleistung einer langfristigen Präzision unter realen Fahrbedingungen nach wie vor eine große Herausforderung. Grundsätzlich gibt es Möglichkeiten eine präzise Scheinwerfereinstellung zu erreichen. Digitale Scheinwerfereinstellgeräte erlauben es Genauigkeiten von $0,2^\circ$ bis $0,1^\circ$ zu erreichen [7]. Dies erlaubt in der Fabrik eine initiale Einstellgenauigkeit, die sich im Bereich $\pm 0,2\%$ (ca. $\pm 0,1^\circ$) bewegt. [8].

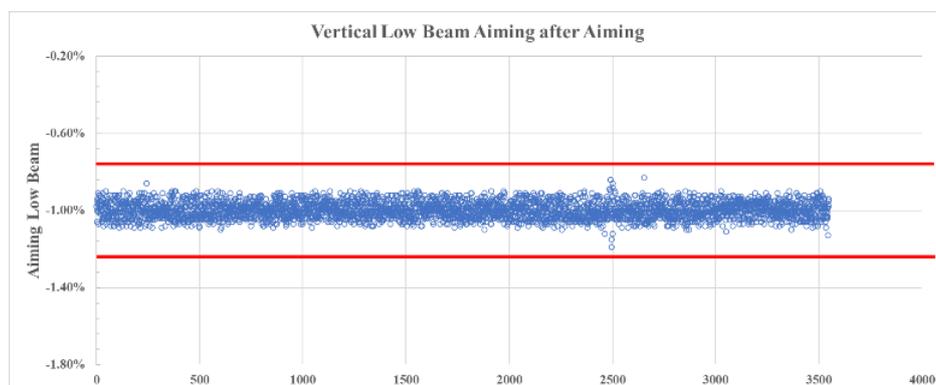


Abbildung 3: Vertikale Abblendlichteinstellung in der Produktionslinie eines OEM [8].

Diese hochpräzise Einstellung verschlechtert sich jedoch im Laufe der Zeit aufgrund verschiedener äußerer Einflüsse, was zu einer allmählichen Abnahme der Ausrichtungsgenauigkeit führt [6][9][10]. Im Alltagsbetrieb wirken sich zahlreiche mechanische und umweltbedingte Faktoren auf die Positionierung der Scheinwerfer aus.

Dabei lassen sich verschiedene externe und interne Einflussfaktoren als Hauptursachen für Fehlausrichtungen der Scheinwerfer identifizieren. Dazu gehören mechanische Beanspruchung während des Transports oder der Fahrt, sowie Verschleißbedingte Veränderungen bspw. der Halterungen [6][9][10]. Zusätzlich gibt es weitere externe und temporäre Einflüsse wie Tankfüllung, Fahrer, Insassen und Beladung, sowie Temperaturvariationen und Reifendruck [9][11].

All diese Faktoren können die ursprüngliche Scheinwerfereinstellung verändern und somit die präzise Lichtverteilung beeinträchtigen. Aktuelle Maßnahmen zur Scheinwerfereinstellung bestehen in manueller Kalibrierung durch den Fahrer oder automatisches Leveling. Beide Verfahren können jedoch nur eine statisch festgelegte, relative Anpassung auf der Grundlage von Neigungsänderungen des Fahrzeugs vornehmen; sie sind nicht in der Lage, die absolute Position des Scheinwerfers kontinuierlich zu überwachen und zu korrigieren, um die absolute Ausrichtung beizubehalten. Zusätzlich umfassen sie lediglich vertikale Ausrichtungsänderungen, während die horizontale Fehlausrichtung - ein ebenso kritischer Faktor für die Blendungsvermeidung und präzise Ausleuchtung - vernachlässigt wird.

Eine weitere Einstellmöglichkeit in Form einer professionellen Nachkalibrierung in Werkstätten ist leider ebenso unzuverlässig wie die manuelle Einstellung durch den Fahrer, da Einstellungen, Nachkalibrierungen und Ausrichtungskontrollen nur sporadisch erfolgen, uneinheitlich durchgeführt werden und in hohem Maße von den Fähigkeiten und der Präzision des Personals abhängen, das die Einstellung vornimmt. Untersuchungen zeigen, dass selbst nach einer professionellen Nachkalibrierung in einer Werkstatt ein erheblicher Anteil der Scheinwerfer falsch eingestellt bleibt [9]. Daher bleibt die langfristige, präzise Ausrichtung der Scheinwerfer unter realen Bedingungen eine große Herausforderung.

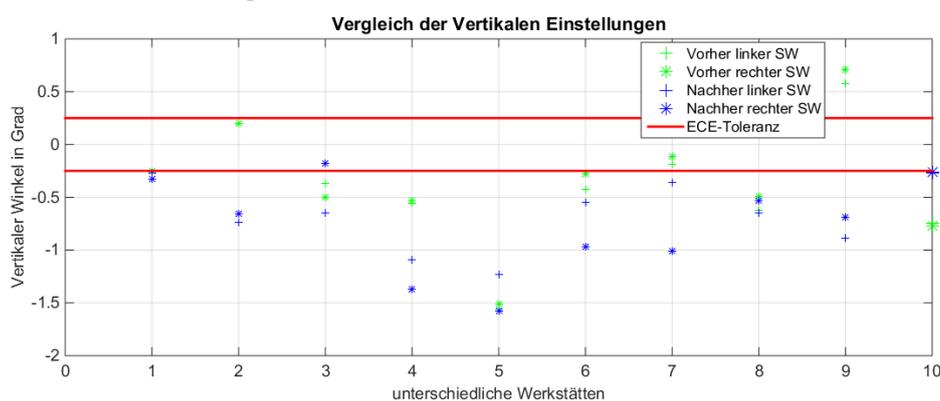


Abbildung 4: Vertikale Einstellung der Scheinwerfer in [9]
In Rot: ECE-Toleranzbereich

Angesichts der steigenden Nachfrage nach hochpräzisen Beleuchtungslösungen, die eine optimale Lichtqualität und Sicherheit gewährleisten, erweisen sich herkömmliche Methoden zur Scheinwerferausrichtung als unzureichend. Ihre Grenzen machen deutlich, dass ein automatisiertes System erforderlich ist, das die

Scheinwerferpositionierung kontinuierlich überwacht und korrigiert. Ein solches System, wie es das Re-Aiming-Konzept vorschlägt, würde nicht nur die Sicht bei Nacht verbessern und die Blendwirkung verringern, sondern auch die Wirksamkeit moderner Beleuchtungstechnologien maximieren und damit die Verkehrssicherheit für alle Verkehrsteilnehmer erhöhen.

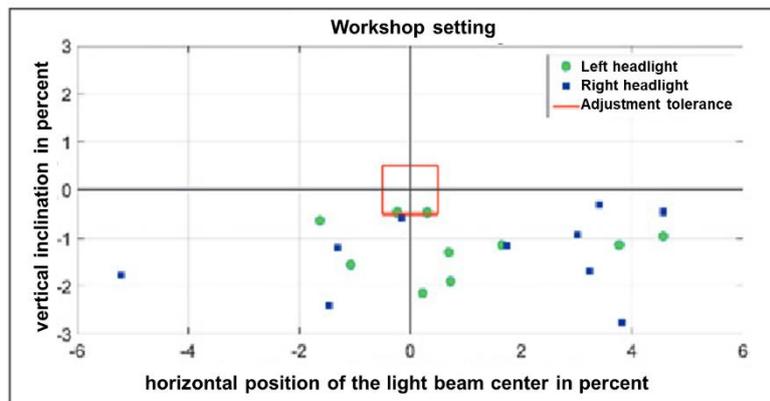


Abbildung 5: Horizontale und vertikale Scheinwerfereinstellung in [9]
In Rot: ECE-Toleranzbereich

3 Beschreibung des Systems

Die zuvor beschriebene Problemanalyse zeigt deutlich, dass bestehende Lösungen zur Scheinwerfereinstellung nicht in der Lage sind, die notwendige Präzision unter realen und dynamisch wechselnden Betriebsbedingungen langfristig aufrechtzuerhalten. Dies macht ein System notwendig, welches auch im laufenden Fahrbetrieb die Scheinwerfer kontinuierlich überwacht und bei Bedarf automatisch korrigiert da selbst initial korrekt eingestellte Systeme im Betrieb ihre korrekte Ausrichtung verlieren. Diese Entwicklung betrifft nicht nur klassische Scheinwerfersysteme, sondern insbesondere hochauflösende, adaptive Lichtsysteme, deren Leistungsfähigkeit entscheidend von einer exakten Kalibrierung abhängt. Damit steigen sowohl die Anforderungen an die Lichtqualität als auch an die Systemsicherheit – ein Umstand, dem bestehende Lösungen bislang nicht gerecht werden können.

Zahlreiche aktuelle Forschungsarbeiten zeigen, dass einzelne Teilaspekte der automatisierten Kalibrierung technisch bereits adressierbar sind. So demonstrieren Söhner [12] und Schäfer [13], dass eine automatische Kalibrierung von Scheinwerfern grundsätzlich realisierbar ist – bisher jedoch meist nur unter stationären Bedingungen, etwa vor einer Kalibrierwand, und ohne dynamische Anpassung während der Fahrt. Die Nutzung auffälliger Merkmale in der Lichtverteilung, wie beispielsweise der Hell-Dunkel-Grenze oder anderer scharfkantiger Licht-Schatten-Übergänge, wird in mehreren Arbeiten als geeignete Grundlage zur Erkennung und Korrektur von Fehlausrichtungen vorgeschlagen [12][13].

Insbesondere neuronale Netzwerke zeigen in dieser Hinsicht Potenzial: Thom et al. [14] konnten demonstrieren, dass KI-gestützte Bildverarbeitung auch im Fahrbetrieb eine

zuverlässige Erkennung und Bewertung von Lichtverteilungen ermöglicht. Darüber hinaus belegen Totzauer [1] und Schneider [15], dass aktiv projizierte Marker – also gezielt erzeugte Lichtmuster – besonders vorteilhaft für die Detektion sind. Sie bieten hohe Kontraste, klare Geometrien und sind gegenüber störenden Umgebungsbedingungen robuster als passive Lichtverteilungen. Diese Marker können sowohl klassische geometrische Formen als auch kodierte Muster umfassen. Ihre Erzeugung und Detektion – insbesondere die Verfolgung von Fahrzeugbewegungen anhand solcher Marker, beispielsweise mithilfe von Lasermodulen – wurde unter anderem von Totzauer [1] erfolgreich erprobt.

Trotz dieser Fortschritte fehlt bislang ein umfassendes, geschlossenes Systemkonzept, das all diese Technologien integriert und sowohl die statische Initialausrichtung als auch die dynamische Rekalibrierung unter realen Fahrbedingungen vollständig automatisiert umsetzt. Genau an dieser Stelle setzt das hier vorgestellte Re-Aiming-System an.

Ziel des hier vorgestellten Re-Aiming-Systems ist daher die Entwicklung eines automatisierten, softwarebasierten Gesamtkonzepts, das eine kontinuierliche und präzise Überwachung sowie Korrektur der Scheinwerferausrichtung ermöglicht. Durch die Integration moderner Sensorik, intelligenter Bildverarbeitung und dynamischer Lichtsteuerung soll das System in der Lage sein, jegliche Form der Fehlausrichtung – sei sie mechanischer, temperaturbedingter oder nutzungsinduzierter Natur – autonom zu identifizieren und zu kompensieren. Damit wird nicht nur die Sichtweite und -qualität optimiert, sondern auch das Risiko störender oder gefährlicher Blendung minimiert.

Im Gegensatz zu bisherigen Systemen, die lediglich eine statische oder manuell initiierte Kalibrierung erlauben, verfolgt der hier vorgestellte Ansatz ein adaptives, in den Fahrzeugbetrieb integriertes Kalibrierkonzept. Es erkennt geeignete Situationen zur Rekalibrierung selbstständig, analysiert kontinuierlich die projizierte Lichtverteilung und nimmt gegebenenfalls softwareseitige Korrekturen vor – ohne dass mechanische Komponenten nachgeregelt oder externe Eingriffe erforderlich wären. Die Lichtverteilung bleibt dadurch stets innerhalb der vorgegebenen Toleranzen und entspricht in ihrer Präzision der einer professionellen Werkseinstellung.

Das System verfolgt mehrere zentrale Zielsetzungen:

- eine automatische Initial- und Rekalibrierung ohne menschliches Zutun,
- die Eliminierung manueller Fehlerquellen bei der Scheinwerfereinstellung,
- eine kontinuierliche Echtzeitüberwachung der Lichtverteilung,
- eine dynamische, adaptive Anpassung an externe Einflüsse wie Beladung, Fahrzeugbewegungen und Straßenbeschaffenheit,
- eine Präzision auf dem Niveau professioneller Werkseinstellung ($\leq 0,1^\circ$),
- die Nutzung bereits vorhandener Fahrzeugkomponenten zur Effizienzsteigerung,

- sowie die vollständige Integration in bestehende Systeme, ohne zusätzliche Risiken wie Blendung, Ablenkung oder Störung für den Fahrer oder andere Verkehrsteilnehmer zu verursachen.

Diese Ziele erfordern ein Zusammenspiel aus hochauflösenden, steuerbaren Lichtquellen, bildgebenden Sensoren und intelligenter Verarbeitung. Das Re-Aiming-System nutzt dabei moderne Frontkameras, hochauflösende Pixel-LED-Scheinwerfer und KI-gestützte Bildverarbeitung, um einen geschlossenen Regelkreis zu realisieren: Die Lichtverteilung wird durch das System selbst erzeugt, erfasst, analysiert und bei Bedarf in Echtzeit angepasst – ohne mechanische Verschleißteile oder externe Eingriffe. Die Steuerung erfolgt softwarebasiert durch gezielte Ansteuerung einzelner Lichtpixel, sodass keine mechanische Nachregelung notwendig ist.

Im Folgenden wird dieses Gesamtkonzept strukturiert beschrieben. Zunächst erfolgt eine Darstellung des Kalibrieransatzes, auf dessen Grundlage sich die Systementwicklung aufbauen lässt. Anschließend werden die zentralen Systemkomponenten im Detail erläutert: die lichtemittierende Einheit, die Erfassungseinheit sowie das Verarbeitungssystem. Abschließend wird der Gesamtprozess anhand eines exemplarischen Ablaufszenarios zusammengeführt, das die praktische Umsetzung und das Zusammenspiel der Komponenten veranschaulicht.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein Zusammenspiel mehrerer technischer Teilsysteme erforderlich, die in einem geschlossenen Regelkreis miteinander kommunizieren. Die technische Umsetzung gliedert sich in drei zentrale Komponenten:

- eine lichtemittierende Einheit zur aktiven Projektion analysierbarer Lichtmuster
- eine Erfassungseinheit zur optischen und sensorischen Aufnahme der Lichtverteilung
- ein Verarbeitungssystem, das sämtliche Messdaten zusammenführt, analysiert und gegebenenfalls steuernd eingreift

Die folgenden Kapitel beschreiben diese drei Kernkomponenten des Re-Aiming-Systems im Detail und erläutern deren jeweilige Aufgabenbereiche, technische Anforderungen und Beitrag zur Systemleistung.

3.1 Komponentenbeschreibung

Die technische Realisierung des Re-Aimings basiert auf drei Hauptkomponenten, die präzise aufeinander abgestimmt werden müssen:

1. Lichtemittierende Einheit (Scheinwerfer)
2. Erfassungseinheit (Kamera und unterstützende Sensoren)
3. Verarbeitungssystem (Steuerung & Bildanalyse)

Die Synchronisation dieser Einheiten bildet die Grundlage für die kontinuierliche Erkennung und Korrektur von Fehlausrichtungen. Eine initiale Kalibrierung stellt sicher, dass die Koordinatensysteme der Scheinwerfer, der Erfassungseinheiten und der

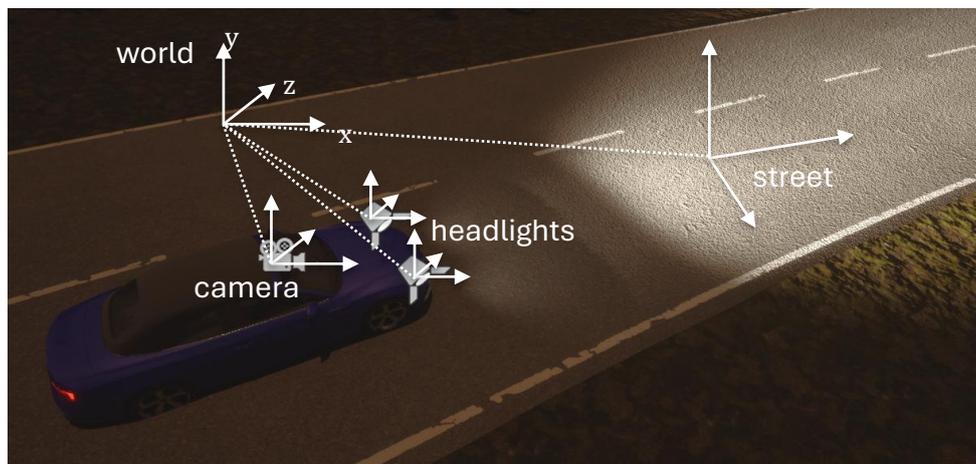


Abbildung 6: Darstellung der beteiligten Koordinatensysteme im Re-Aiming-System. Die Fahrzeugsysteme („headlights“, „camera“), das global System („world“) sowie die Straßenebene („street“). Transformationen zwischen diesen Systemen sind Grundlage für Scheinwerferausrichtung.

Fahrbahn als Projektionsfläche korrekt aufeinander abgestimmt sind und in ein gemeinsames Weltkoordinatensystem überführt werden können. Dies ist essenziell, um Verschiebungen und Rotationsfehler der Scheinwerfer präzise zu erfassen und nachzuverfolgen. Möglich wird die Kalibrierung nach der finalen Montage eines Fahrzeugs, z.B. während des Prozesses der Anlernung der Fahrerassistenzsysteme im Werk des Herstellers.

Diese Grundkalibrierung kann einmalig erfolgen und/oder durch selbstlernende Algorithmen kontinuierlich optimiert werden. Zur Positionsbestimmung können dabei klassische geometrische Methoden (z. B. Homographie, Triangulation) oder KI-gestützte Mustererkennung zum Einsatz kommen.

Jede der Systemkomponenten ist in ein eigenes, spezifisches Koordinatensystem eingebunden. Die Gesamtsystemleistung des Re-Aiming-Systems hängt demnach maßgeblich von der Erkennung und Bewertung der kalibrierrelevanten Zustände und Veränderungen ab. Neben den Komponenten selbst müssen auch die Koordinatensysteme des Gesamtfahrzeugs und der Straße berücksichtigt werden, da beide einer Vielzahl dynamischer Einflüsse unterliegen.

Das Koordinatensystem der Straße erfährt beispielsweise durch Kurven, Kuppen, Senken, wechselnde Straßenneigungen, Witterungseinflüsse oder Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit Veränderungen. Daher muss das Verarbeitungssystem eine Umgebungsüberwachung enthalten, die sich unter anderem auf das Koordinatensystem der Straße, wie Fahrzeugposition, Trajektorie, Topologie, als auch Oberflächenbeschaffenheit, Helligkeit, Kontrastfähigkeit durch Farbe und Oberfläche von Asphalt, Beton etc. bezieht.

Auch das Koordinatensystem des Fahrzeugs ist nicht statisch. Einflüsse, die auf das Gesamtkoordinatensystem Fahrzeug einwirken sind unter anderem Variationen in Beladung, Anzahl der Mitfahrenden, Karosseriedynamik sowie weitere Parameter, wie oben beschrieben. Diese Einflüsse könnten als Bestandsdaten aus der Grundkalibrierung im Werk vorhanden sein und mit den realen Daten abgeglichen werden oder durch die aktuellen Informationen der Fahrzeugsensoren beigesteuert werden. Innerhalb des Fahrzeugkoordinatensystems besitzen sowohl Scheinwerfer als auch Kamera eigene lokale Koordinatensysteme mit spezifischen Toleranzen.

Für das Scheinwerferkoordinatensystem sind insbesondere mechanisch/optische Einstellungen und Toleranzen der Komponenten in der Prozesskette innerhalb des Scheinwerfers relevant. Die Lichteinheit selbst besteht aus Unterkomponenten wie Lichterzeugung, optische Abbildung und mechanischem Einbau in das Scheinwerfergehäuse. Diese Toleranzen könnten bereits bei der Fahrzeugkalibrierung erfasst, dokumentiert und im Betrieb kontinuierlich überwacht werden.

Die Erfassungseinheit, z.B. eine Kamera, ist ebenfalls mit eigenen Toleranzen in das Koordinatensystem des Fahrzeugs eingebunden und erfährt, wie oben beschrieben innere und äußere mechanische Toleranzen, etwa durch Montagetoleranzen oder Aufhängung. Diese Aspekte müssen im laufenden Betrieb berücksichtigt und ggf. korrigiert werden.

Daher muss das Gesamtsystem in der Lage sein, alle relevanten Koordinatensysteme kontinuierlich zu überwachen und dynamisch zu referenzieren. Gleichzeitig könnten bei einer Erst-Kalibrierung im Werk weitere Daten erfasst werden, z.B. die Reaktion des Fahrzeugkoordinatensystems auf Beladung, Fahrer/Mitfahrer oder Tank-Kennlinie. Dies könnte zukünftige Korrekturen mit vorab ermittelten Startparametern verbessern und beschleunigen. Alle genannten Einflüsse und Faktoren fließen anschließend in eine Entscheidungslogik ein, anhand derer das System automatisch erkennt, ob und wann eine Rekalibrierung notwendig ist. Diese Bewertung erfolgt kontinuierlich und bildet die Grundlage für ein präzises, robustes und adaptives Re-Aiming im realen Fahrbetrieb.

3.1.1 Lichtemittierende Einheit

Die lichtemittierende Einheit ist für die Erzeugung sichtbarer Referenzpunkte (Marker) in der Lichtverteilung verantwortlich. Diese können signifikanten Punkten der Lichtverteilung, wie der Hell-Dunkel-Grenze oder dem HV-Punkt, entsprechen oder aktiv durch das System generiert werden.

Aktiv erzeugte Marker bieten den Vorteil einer höheren Präzision und können entweder durch Schattenprojektion oder Lichtmarkierungen realisiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass Ihre Form, Beschaffenheit, Kontraste, Größe und Entfernung eine Detektion mit Hilfe der Fahrzeugkamera und geeigneten Algorithmen möglich machen. Für eine bessere Detektion sollten die Muster über einzelne Punkte hinausgehen. Beispiele für geeignete Muster sind einfache geometrische Formen wie Kreise, Quadrate, Rechtecke, Dreiecke oder Linien, komplexere Muster wie Gitterstrukturen, Strichcodes oder Schachbrettartige, bis hin zu komplexen Mustern wie QR-Codes, ArUco-Markern, Freiformmuster, Dynamische Lichtsignaturen oder Kombinationen der zuvor genannten.

Dabei ist sicherzustellen, dass die aktiv erstellten Marker weder den Fahrer noch andere Verkehrsteilnehmer stören oder ablenken. Dies kann mit geeigneten Maßnahmen erreicht werden wie Projektion außerhalb des direkten Sichtfelds des Fahrers, Nutzung von Mustern oder Anordnungen, die nur aus der Kameraperspektive sichtbar sind, oder der Nutzung von sehr kurzen, hochfrequenten Lichtimpulsen (z.B. <math><16\text{ms}</math>), die vom menschlichen Beobachter nicht wahrnehmbar, von der gekoppelten Kamera jedoch detektierbar sind.

Zur Umsetzung eignen sich Systeme mit einzeln ansteuerbaren Pixelsegmenten – vergleichbar mit Projektoren oder Displays. Ideal sind hochauflösende, kontraststarke Systeme auf Basis von LED- oder Lasertechnologie, z. B. Matrix- oder Pixel-LED-Systeme, μ -LED-Systeme, DMD-Systeme, Lasersysteme, Multilens-Arrays (MLA) sowie vergleichbare Technologien.

3.1.2 Erfassungseinheit

Die Erfassungseinheit sammelt alle relevanten Informationen zur Analyse und Berechnung der Lichtverteilung. Ihre zentrale Komponente ist mindestens eine Fahrzeugkamera. Je nach Systemarchitektur kann die Erfassungseinheit eine Erweiterung durch zusätzliche Kameras oder Sensoren erfolgen, um die Robustheit der Erfassung zu erhöhen oder eine höhere Genauigkeit zu gewährleisten. Zu den möglichen unterstützenden Sensoren zählen Lidar und Radar zur Tiefenerfassung, Gyroskope, Neigungs- und Inertialsensoren, zur Erfassung dynamischer Bewegungen des Fahrzeugs (z. B. Nick- und Wankbewegungen) oder GPS-basierte Positionsbestimmung zur Unterstützung der globalen Kalibrierung für georeferenzierte Daten. Sonstige Erweiterungen um ähnliche Sensoren sind ebenso denkbar. Die Erfassungseinheit stellt somit die Schnittstelle zwischen physischer Welt und digitaler Verarbeitung dar, indem sie die gesammelten Daten an das nachfolgende Verarbeitungssystem weiterleitet.

3.1.3 Verarbeitungssystem

Das Verarbeitungssystem bildet die zentrale Steuerungseinheit des Re-Aiming-Systems und ist für den gesamten Rekalibrierungsprozess verantwortlich. Es analysiert die Sensordaten der Erfassungseinheit, erkennt Abweichungen in der Scheinwerferausrichtung und berechnet darauf basierend die notwendigen Korrekturen für die lichtemittierende Einheit.

Ihre Aufgabenbereiche umfassen:

- Überwachung der Umgebung
- Überwachung und Analyse von Fehlstellungen
- Korrektur der Fehlstellung

Durch die enge Verknüpfung von Umgebungsanalyse, Fehlstellungsdetektion, Bildverarbeitung und dynamischer Lichtsteuerung gewährleistet das Verarbeitungssystem eine kontinuierlich optimale Scheinwerferausrichtung. Es bildet somit das Herzstück der automatisierten Re-Aiming-Technologie, indem es eine präzise, zuverlässige und adaptiv gesteuerte Lichtverteilung ermöglicht.

Die gesamte Ebene des Verarbeitungssystems kann dabei auf zwei Arten durchlaufen werden. Erstens in Echtzeit, falls die genutzten Algorithmen und Methoden, sowie Hardware dies erlauben. Ansonsten kann eine Verarbeitung auf zwischengespeicherten Daten passieren. Die einzelnen Teilbereiche sollen nun im Folgenden genauer erläutert werden:

Umgebungsüberwachung

Die Umgebungsüberwachung stellt sicher, dass eine Rekalibrierung ausschließlich unter stabilen und geeigneten Bedingungen durchgeführt wird. Hierzu werden die gesammelten Umgebungsdaten kontinuierlich analysiert, um Kalibrierbarkeit und Störanfälligkeit der momentanen Fahrsituation zu bewerten. Dabei werden Szenarien, in denen die Lichtprojektion klar detektierbar ist, erkannt und Situationen, in denen Fehlmessungen oder störende Einflüsse zu ungenauen Kalibrierungen führen könnten, ausgeschlossen. Von besonderem Interesse sind dabei Faktoren wie Straßenbeschaffenheit und -geometrie, Fahrzeugbewegungen, Position des Fahrzeugs in Relation zur Straße, Witterungsverhältnisse, Lichteinflüsse und Verkehr.



Abbildung 7: Beispiele für die Szenarien Auswahl.
Links und Mitte: Re-Aiming kann aufgrund günstiger Umweltbedingungen durchgeführt werden. Rechts: Eine Ausführung ist aufgrund zu dichten Verkehrs nicht möglich.

Auf Basis der Kamerabilder kommen klassische Verfahren der Bildverarbeitung wie Kantenerkennung, Linienextraktion und Hough-Transformation zur Analyse der Straßengeometrie zum Einsatz. Ergänzend ermöglichen Textur- und Strukturmerkmale (z. B. Gabor-Filter, Local Binary Patterns) sowie merkmalsbasierte Methoden wie SIFT und SURF eine Einschätzung der Oberflächenbeschaffenheit. Diese Informationen helfen bei der Bewertung, ob die Straße für die Kalibrierung geeignet ist – etwa im Hinblick auf Vibrationen oder mangelnde Kontrastierung. Zur Erfassung dynamischer Veränderungen und Bewegungen kann die Berechnung des optischen Flusses herangezogen werden, um Bewegungsmuster im Bild zu identifizieren, beispielsweise durch Nick- oder Wankbewegungen des Fahrzeugs. Diese Analyse wird durch die Auswertung von Farbhistogrammen oder globalen Bildmerkmalen ergänzt, welche Hinweise auf Witterungseinflüsse wie Nebel, Gegenlicht oder stark variierende Beleuchtung liefern.

Besonders leistungsfähig sind KI-gestützte Verfahren wie Faltungsnetzwerke (eng.: Convolutional Neural Networks; CNN), die komplexe Szenenmerkmale extrahieren. Semantische Segmentierungsverfahren liefern zusätzlich eine pixelgenaue Einordnung der Bildinhalte in Klassen wie Fahrbahn, Markierung, Vegetation oder andere Fahrzeuge. Dies ermöglicht eine differenzierte Bewertung der Eignung für eine Kalibrierung. Neben der Einzelbildanalyse ist auch die zeitliche Auswertung von Bildfolgen relevant. Hier können rekurrente Netze (z. B. LSTM) zum Einsatz kommen, um Änderungen in Lichtverhältnissen oder Wetterbedingungen zu erfassen. Anomaly-Detection-Verfahren wie Autoencoder oder GANs helfen, ungewöhnliche Szenarien zu identifizieren und auszuschließen. Transformerbasierte Ansätze können globale Analysen der Bilder liefern und somit komplexe bildzusammenhänge erkennen.

Wie zuvor beschrieben kann die Bildverarbeitung zusätzlich durch nicht-optische Sensorik ergänzt werden. Diese müssen nahtlos in den Überwachungs- und Entscheidungsprozess eingefügt werden.

Zur Entscheidungsfindung selbst können sowohl regelbasierte Systeme als auch datengetriebene Modelle eingesetzt werden. Regelwerke bieten eine einfache und transparente Möglichkeit, harte Grenzwerte zu definieren, etwa dass eine Kalibrierung nur bei klarer Sicht, stabiler Fahrdynamik und erkannter Markierung durchgeführt wird. Alternativ oder ergänzend dazu ermöglichen Fuzzy-Logic-Systeme eine weichere Bewertung auf Basis unscharfer Zustände, insbesondere in Grenzbereichen wie leichter Regen oder beginnender Dämmerung. Die Kombination mehrerer Methoden in sogenannten Ensemble-Ansätzen erscheint sinnvoll. Ebenso könnte eine KI-Lösung mit beispielsweise trainiertem Agenten die Entscheidungsfindung übernehmen.

All diese Verfahren und Technologien dienen dem Ziel, nur dann eine Rekalibrierung zuzulassen, wenn die Bedingungen im Rahmen definierter Toleranzen stabil, eindeutig

und störungsfrei sind. Damit wird nicht nur die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Kalibrierung verbessert, sondern auch das Risiko fehlerhafter Anpassungen minimiert.

Fehlstellungsüberprüfung

Ziel der Fehlstellungsüberprüfung ist die präzise Bestimmung der aktuellen Ausrichtung der Scheinwerfer und ob eine relevante Abweichung vorliegt, die eine Rekalibrierung erforderlich macht. Ausgangspunkt ist die Detektion der durch die Scheinwerfer erzeugten Marker in den Kamerabildern. Dafür kommen eine Vielzahl spezifischer Verfahren aus der Bildverarbeitung, Geometrie, Künstlichen Intelligenz und statistischen Signalverarbeitung zum Einsatz. Die Marker müssen zuvor so gestaltet worden sein, dass sie eindeutig erkennbar und auswertbar sind – sowohl in Form als auch in Position und Kontrast.

Die Erkennung beginnt mit Bildvorverarbeitungsschritten, die zur Bildverbesserung beitragen und die Erkennung unterstützen. Hierfür werden die Marker isoliert, Bildrauschen reduziert und relevante Konturen oder Merkmale extrahiert. Anschließend wird die exakte Position, Orientierung und gegebenenfalls Verformung der Marker im Bild bestimmt. Hierfür bieten sich Techniken wie Histogrammangleichung, adaptive Kontrastverstärkung, Gauß- oder Medianfilterungen und ähnliches an.

Für die Detektion von Punkte, Linien oder Rechtecke eignen sich klassische Verfahren der Merkmalsextraktion wie Kantendetektion, wie Canny- oder Sobel-Filter und Gradienten Histogramme, Hough-Transformation oder Template Matching. Bei komplexeren, kodierten Mustern wie ArUco-Markern, QR-Codes oder Schachbrettmustern erfolgt die Erkennung typischerweise mit KI-gestützten Detektoren oder spezialisierten CNN-basierten Modellen, die Markerposition und -identität gleichzeitig bestimmen. Auch hier kann eine Kombination diverser Verfahren sinnvoll sein.

Da die Scheinwerfer-Fehleinstellung in horizontale und vertikale Abweichungen unterteilt werden kann, sind möglicherweise unterschiedliche Algorithmen und Methoden erforderlich. Eine Korrektur einer vertikalen Abweichung erfordert eine höhere Genauigkeit in der Auswertung des Anteils der horizontalen Projektion. Dazu können Multipixelprojektionen mit Schwerpunkt der präzisen Bestimmung der vertikalen Position auf der Straße dienen. Die Bestimmung der Fehleinstellung hat das Ziel, die Projektionen in der vertikalen Position genauer als $0,1^\circ$ zu erreichen.

Zur Berechnung der tatsächlichen Fehlstellung werden in erster Linie Verschiebungsvektoren und Rotationen betrachtet. Zusätzlich können dabei auch perspektivische Verzerrungen, Tiefeninformationen und Winkelveränderungen berücksichtigt werden. Hierbei wird mit Hilfe der Kameraparameter und unter Verwendung der Kalibrierdaten (z. B. einer vorher berechneten Homographie) auf die tatsächliche Position und Orientierung des Scheinwerfers im Weltkoordinatensystem geschlossen. Für diese Transformationen können klassische Verfahren wie das Perspective-n-Point-Verfahren (PnP), direkte Homographie Berechnungen, skalierte oder

angepasste Homographien oder Triangulation genutzt werden. Abseits von diesen klassischen Methoden besteht die Möglichkeit auf direkte Regressionsverfahren mit neuronalen Netzen zurückzugreifen, bei denen das Modell trainiert wird, direkt aus dem Bild oder Marker-Segment eine Verschiebung und Rotation zu schätzen – entweder als Vektor oder als vollständige Transformationsmatrix. Diese Methoden zeigen insbesondere bei schwieriger Beleuchtung oder teilverdeckten Markern Vorteile, da sie robustere Schätzungen ermöglichen.

Für eine präzise Erkennung ist es in der Regel nicht ausreichend, ein einzelnes Bild zu analysieren. Daher muss eine Auswertung über mehrere Bilddaten hinweg durchgeführt werden. Hierfür kommen (gleitende) Mittelwerte, gewichtete Mittelungen oder (Kalman-) Filter zum Einsatz. Eine zusätzliche Plausibilitätsprüfung prüft die physikalische Realisierbarkeit der berechneten Transformation, z. B. durch maximale Winkelabweichungen oder bekannte mechanische Grenzen. Robustheitssteigernd wirken auch Verfahren wie RANSAC, die fehlerhafte Einzeldetektionen erkennen und ausschließen.

In Kombination ermöglichen diese Verfahren eine hochpräzise, rein softwaregestützte Überwachung und Bewertung der Scheinwerferausrichtung. Sie bilden die Brücke zwischen realer Projektion und digitaler Steuerung und sind somit eine der zentralen Komponenten für ein robustes und wartungsfreies Re-Aiming-System. Damit stellt die Fehlstellungsüberwachung die direkte Verbindung zwischen optischer Erfassung und aktiver Lichtsteuerung dar und ermöglicht eine hochgenaue Ausrichtung der Scheinwerfer.

Korrektur der Fehlstellung

Die eigentliche Korrektur der Lichtverteilung kann auf zwei Arten realisiert werden. Bei der Nutzung von hochauflösenden Scheinwerfersystemen wird sie durch eine dynamische Software-Kompensation realisiert. Dabei werden einzelne Pixel der lichtemittierenden Einheit gezielt angesteuert, um Helligkeitsanpassungen vorzunehmen und die Lichtverteilung präzise zu ändern. Die Steuerung kann dabei lokal, durch die gezielte Anpassung einzelner Lichtsegmente, global, durch eine übergeordnete Neuberechnung der gesamten Lichtverteilung oder einer Mischung aus beidem durchgeführt werden. Diese Kombination sorgt für eine exakte und gleichzeitig harmonische Korrektur ohne abrupte Lichtveränderungen. Werden mechanische Stellmotoren zur Scheinwerfereinstellung genutzt, kann die ermittelte Fehlstellung an sie weitergegeben werden, um die Scheinwerfer wieder korrekt einzustellen. Ein entscheidender Faktor für die Gesamtstrategie des Verarbeitungssystems ist die Entscheidung, wann eine Kalibrierung durchgeführt wird. Nicht jede erkannte Abweichung erfordert eine sofortige Anpassung – in vielen Fällen reicht eine stabile Kalibrierung weiterhin aus. Falls jedoch eine signifikante Fehlausrichtung identifiziert wird, erfolgt eine schrittweise Anpassung der Lichtverteilung. Dabei wird darauf geachtet, dass keine abrupten Veränderungen auftreten, um eine gleichmäßige und unauffällige Justierung zu gewährleisten.

3.2 Beispielhafte Abläufe

Die folgenden Szenarien veranschaulichen beispielhafte Abläufe des Re-Aiming-Prozesses und zeigen das Zusammenspiel der zuvor beschriebenen Systemkomponenten und Verfahren. Diese Beispiele dienen als Referenz für mögliche Implementierungen und verdeutlichen die Funktionsweise des Systems unter realen Betriebsbedingungen. Das Prinzip des Re-Aimings ist dabei ausdrücklich nicht auf die hier vorgestellten Methodenkombinationen beschränkt, sondern lässt sich in unterschiedlichen Konfigurationen von Komponenten oder Teilkomponenten realisieren, sofern die grundlegenden Prinzipien und Überlegungen erfüllt sind.

Aktivierung und Auslösebedingungen

Das Re-Aiming-System kann auf verschiedene Arten aktiviert werden, z. B. automatisch beim Einschalten der Scheinwerfer, in regelmäßigen Zeitintervallen oder situativ anhand definierter Trigger. Mögliche Auslösemechanismen umfassen:

- permanente Aktivierung im Fahrbetrieb,
- zeit- oder fahrleistungsabhängige Intervalle,
- GPS-gesteuerte Aktivierungszonen,
- manuelle Auslösung durch den Fahrer.

Da nicht jede Fahrsituation für eine zuverlässige Kalibrierung geeignet ist, können vorab definierte oder KI-gestützt erkannte Streckenprofile mit günstigen Bedingungen – etwa Geradeausfahrt bei konstanter Geschwindigkeit und klarer Sicht – als geeignete Auslösebedingungen herangezogen werden.

Musterprojektion und Erfassung

Die lichtemittierende Einheit projiziert ein definiertes Lichtmuster auf die Fahrbahnoberfläche. Dieses Muster kann mit hoher Frequenz und extrem kurzer Anzeigedauer ausgesendet werden, sodass es für den menschlichen Beobachter nicht wahrnehmbar, jedoch von der gekoppelten Kamera zuverlässig erfasst werden kann. Alternativ kann das Muster länger oder dauerhaft projiziert werden. Falls es keine oder nur sehr wenige zeitliche Veränderung im Muster aufweist, kann es sich mit einiger Gewöhnung möglicherweise als gezielte Inhomogenität einfügen, die vom Fahrer nicht als störend wahrgenommen wird bzw. keine Aufmerksamkeit erregt. Dies muss durch weitere Studien abgesichert werden.

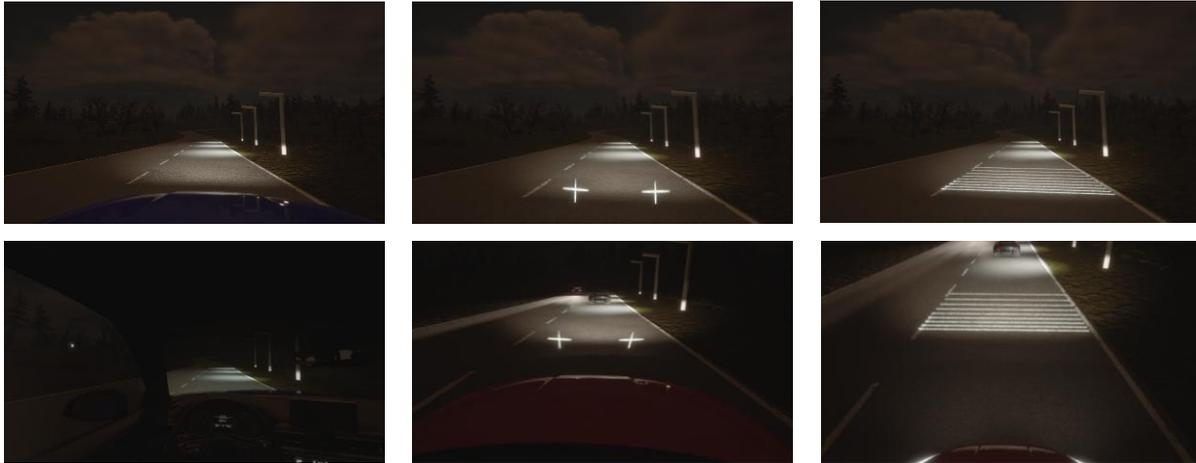


Abbildung 8: *Simulierte Beispiele für Marker auf der Straße.
Links (Blaues Fahrzeug) - Sicht des menschlichen Fahrers
Mitte und Rechts (rotes Fahrzeug) – Beispielmarkierungen wie sie die Kamera aufnehmen könnte*

Werden mehrere Muster zur vertikalen und horizontalen Korrektur eingesetzt, kann ein schleichender Übergang zwischen diesen eine kontinuierliche Analyse ermöglichen, ohne den Fahrer abzulenken. Die Projektion muss dabei so erfolgen, dass das Muster in der Kameraperspektive eindeutig identifizierbar bleibt – trotz realer Abbildungsfehler wie unscharfer oder asymmetrischer Lichtpixel.

Adaptive Prozessgestaltung

Je nach Art der auftretenden Fehlausrichtung können die Korrekturintervalle variiert werden. Langsam veränderliche Einflüsse wie thermische oder mechanische Drift im Scheinwerferkoordinatensystem lassen sich mit größeren Abständen überprüfen. Im Gegensatz dazu erfordern dynamische Veränderungen des Fahrzeug- oder Straßenkoordinatensystems kürzere Reaktionszeiten im Millisekundenbereich.

Eine weitere Möglichkeit, den Re-Aiming Prozess mit optimalen Bedingungen der beteiligten Koordinatensysteme vorzunehmen, sind retrospektive Auswertungen der gefahrenen Zustände. Ein Bildspeicher erlaubt die nachträgliche Analyse bereits durchfahrener Szenen, falls diese sich nachträglich als kalibriergeeignet erweisen. Dafür könnte, je nach Speicher, jeweils auf einige Sekunden, Minuten, oder ganze Fahrten zurückgegriffen werden. Dies erleichtert die nachträgliche Überprüfung der Koordinatensysteme als retrospektiv geeignet. Dann kann eine Fahrzeugsystem die Parameter und Toleranzen errechnen und die Korrektur der Fehlstellung initiieren. Durch den Einsatz von KI-gestützten Algorithmen lassen sich auch geeignete Situationen prädiktiv errechnen und die Korrektur in diesen Zeiträumen durchführen. Die Speicherung kann zusammenhängende Fahrabschnitte oder lediglich einzelne Kalibriergeeignete Bilder umfassen.

Prozesstypen und Systemintegration

Für die Ausführung des Re-Aimings sind verschiedene Prozessvarianten mit mehreren qualitativ unterschiedlichen Prozessen denkbar, die sich hinsichtlich ihrer Komplexität und Zielsetzung unterscheiden. So könnte beispielsweise ein Basisprozess unter Referenzbedingungen (z. B. ein Fahrer, konstantes Gewicht, gerade Strecke) definiert werden. Dieser lässt sich optional mit zusätzlicher Optimierung auf die auftretenden Toleranzen (Temperatur, Alterung, Setzverhalten etc.) ergänzen und erweitern. Denkbar sind auch vereinfachte Variationen beispielweise mit Beschränkung auf die Korrektur der vertikalen Fehlansrichtung, um insbesondere Blendung entlang der Hell-Dunkel-Grenze zu minimieren

Darüber hinaus könnten prozessgesteuerte Abläufe nach Werkstattbesuchen, Reparaturen oder regelmäßigen Inspektionen erstellt werden, bei denen einzelne Basisprozesse des Re-Aimings durchgeführt werden, um die jeweiligen Grundeinstellungen des Fahrzeugs wieder herzustellen und zu überprüfen..

Neben diesen grundlegenden Varianten könnte auch ein qualitativ und technisch aufwendigerer Prozess, bei dem das Fahrzeugkoordinatensystem selbst fortlaufend überwacht und korrigiert wird, realisiert werden. Hierbei müssen fahrzeuginterne Sensoren zur Erfassung von Beladung, Tankfüllstand, Nick- oder Wankbewegung integriert werden. Zur Erhöhung der Systemgenauigkeit und Robustheit ist darüber hinaus auch die direkte Integration zusätzlicher Sensorik innerhalb der einzelnen Systemkomponenten denkbar. Beispielsweise könnten Neigungssensoren innerhalb der Scheinwerfer oder der Kameraeinheit, vergleichbar mit MEMS-Beschleunigungssensoren in mobilen Endgeräten, zur Überwachung der internen Koordinatensysteme eingesetzt werden. Damit ließen sich Lageveränderungen oder mechanische Toleranzen unmittelbar und unabhängig vom äußeren Kontext erfassen.

Wenn neben dem Scheinwerfer- und Fahrzeugkoordinatensystem auch das Straßenkoordinatensystem aktiv berücksichtigt wird, könnte eine quasipermanente korrekte Ausrichtung erreicht werden. Hierzu sind die Einbindung externer Datenquellen wie GPS, digitaler Karten, Fahrtrouteninformationen, sowie KI-gesteuerter Algorithmen zur Szenenanalyse mit Bestimmung von aktueller Fahrzeugposition und Trajektorie möglich.

Geeignete Kalibrierbedingungen

Für eine präzise Kalibrierung müssen geeignete Kalibrierbedingungen erkannt oder geschaffen werden. So kann beispielsweise die Identifizierung von quasistatischen Koordinatensystemen für die Basis- oder Grundkorrektur große Bedeutung besitzen. Die Geradeausfahrt auf Landstraßen oder Autobahnen mit konstantem Geschwindigkeits- und varianzarmen Straßenprofil ist gerade für diese Korrekturen sehr vorteilhaft. Wird durch das System eine solche Situation erkannt, über einen ausreichend langen Zeitraum, live oder retrospektiv, kann das als Grundlage für durchzuführendes Re-Aiming

dienen. Bei dynamischen Korrekturen muss das System geeignet zur gefahrenen Geschwindigkeit und der Dynamik des Fahrzeugs und der Straßentopologie ausreichend schnell reagieren können, vermutlich im Millisekundenbereich oder schneller. Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 80km/h legt das Fahrzeug 22,22 m/s zurück. Die jeweiligen akzeptablen Toleranzen der Koordinatensysteme müssen dazu verglichen werden und die Erfassungs- und Reaktionsgeschwindigkeit des Systems muss auf diese Dynamik abgestimmt sein. Ziel ist eine Justiergenauigkeit von $\pm 0,1^\circ$, was hohe Anforderungen an die räumliche und zeitliche Auflösung stellt.

Zusätzlich zur Identifizierung von geeigneten Szenarien müssen in Form der projizierten Marker und Muster Bedingungen geschaffen werden, die eine sichere Erkennung und daraus abgeleitete Fehlstellungsberechnung erlauben. Die Steuerung des Scheinwerfers muss dabei das Muster so projizieren, dass es in der Aufnahme eindeutig identifizierbar ist. Dazu ist insbesondere zu berücksichtigen, wie einzelne Pixel des Scheinwerfers tatsächlich auf der Straße abgebildet werden.

Die Herausforderung bei der Gestaltung solcher Muster liegt darin, dass reale Pixel deutlich von idealisierten Darstellungen abweichen. Statt perfekter, scharf begrenzter, quadratischer Pixel entstehen in der Realität unscharfe, unregelmäßige Lichtflecken – häufig rund, oval oder asymmetrisch, vgl. hierzu Abbildung 9. Ihre konkrete Erscheinung hängt von der Optik und dem eingesetzten Projektionsmodul, sowie ob sich die Pixel mittig oder am Rand befinden, ab.

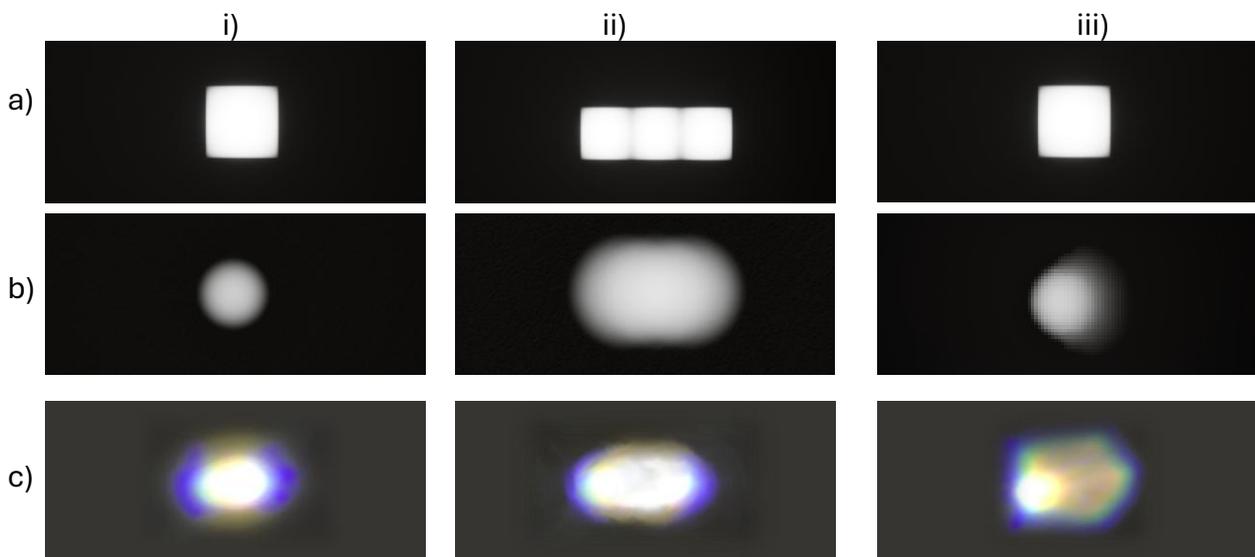


Abbildung 9: Projektion von Scheinwerferpixeln
 Reihe a): perfekte Pixel, Reihe b) realere simulierte Pixel, Reihe c) reale Pixel
 Spalte i): einzelne Pixel mittig, Spalte ii): Reihe von Pixeln,
 Spalte iii): einzelne Pixel am Rand der Lichtverteilung

Die Aufspaltung in Korrektur der horizontalen und vertikalen Fehleinstellung ermöglicht dabei eine Priorisierung. Vermutlich wird Blendung durch vertikale Fehleinstellungen und damit Bewegung der eher horizontalen Hell-Dunkelgrenze besonders oft erzeugt. Somit können Muster priorisiert dargestellt werden, die eine Korrektur von vertikaler

Fehleinstellung bevorzugt ermöglichen. Also vorzugsweise Linien, Punktlinien oder Kombinationen mit unterschiedlicher Ausdehnung horizontal und vertikal auf der Straße.

Die Korrektur von Fehleinstellungen senkrecht zur Hell-Dunkel-Grenze, z.B. Matrix-Segmente oder den Abblendlicht-Zwickel erfordert möglicherweise andere Muster. Dazu könnten andere Muster erzeugt und ausgewertet werden, die auf der Straße abgewickelt eine Darstellung von vorzugsweise Linien, Punktlinien oder Kombinationen mit unterschiedlicher Ausdehnung aber Präferenz in Fahrtrichtung (=vertikal) aufweisen.

Die nicht-ideale Form der projizierten Pixel erfordert besondere Sorgfalt bei der Mustererzeugung. Nur durch eine geeignete Anordnung und Auswertung der tatsächlichen Lichtverteilungen lassen sich aus den Kamerabildern verlässliche Rückschlüsse auf Fehlstellungen oder Justierabweichungen ziehen. Idealerweise hilft die Bewegung der Straßenoberfläche in den Kamerabildern ein Grundrauschen zu erzeugen, das Schmutzflecken oder Oberflächenfehler verwischen und in eine mittlere Straßendarstellung mit einer situativ „mittleren“ Leuchtdichte und Kontrastanalysefähigkeit zu überführen. Dies sollte ebenfalls, als Entscheidungsparameter berücksichtigt werden. Dazu können voreingestellte Erfahrungswerte und KI-basierte Abgleiche verwendet werden.

Bildanalyse und Entscheidung

Die Kamera erfasst kontinuierlich Bilddaten der Szene. Dabei werden nur jene Frames weiterverarbeitet, in denen die projizierten Muster sichtbar sein sollten. Wenn die Marker beispielsweise an immer der gleichen Stelle im Lichtbild eingestellt werden, ist eine geometrische Einschränkung möglicherweise vorteilhaft für eine schnelle Auswertung und Reaktion.

Geeignete Visual Computing Algorithmen, wie beispielsweise ein neuronales Netzwerk überprüfen, ob die aktuelle Szene für eine zuverlässige Kalibrierung geeignet ist. Dies kann zum Beispiel durch Referenz auf die unterschiedlichen Koordinatensysteme geschehen. Wird eine Szene als geeignet erkannt, wie die zuvor angesprochene Geradeausfahrt auf leerer Landstraße oder Autobahn mit klaren Sichtverhältnissen, erfolgt die Fehlstellungsüberprüfung. Dort erfolgt die Detektion der Marker sowie deren exakte Positionsbestimmung. Wird in dem gespeicherten Bild mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit die Markierung erkannt und ihre Position bestimmt, wird beides für den nächsten Schritt gespeichert. Für eine robustere Auswertung können unter anderem nicht nur Einzelbilder, sondern Bildfolgen oder Ganze Sets von Einzelbildern verwendet werden. Wenn z.B. eine definierte Anzahl an Bildern (<10, 10, 20, 50, >50) mit konsistent erkannten Markern vorliegt, wird die daraus resultierende Gesamtfehlstellung berechnet.

Korrektur und Regelung

Die durch die Bildanalyse ermittelte Abweichung dient als Grundlage für die anschließende Korrektur. In Systemen mit hochauflösenden Pixelscheinwerfern kann die Lichtverteilung durch gezielte Ansteuerung einzelner Segmente dynamisch angepasst

werden. Dadurch kann die Sollprojektion rein softwareseitig hergestellt werden. Alternativ kann durch Verwendung eines Schrittmotors, wie er in dynamischen Leuchtweiteregelungssystemen verwendet wird, die vertikale Korrektur eingestellt werden. Auch eine Kombination beider oder ähnlicher Systeme ist möglich, beispielsweise eine mechanische Regelung größerer Fehlstellungen in Kombination mit einer softwaregeregelter Feineinstellung.

Durch diese zyklische Auswertung – bestehend aus Aufnahme, Bewertung, Aggregation, Analyse und Korrektur – gelingt eine kontinuierliche, softwaregestützte Rekalibrierung der Lichtverteilungen. Der gesamte Prozess ist so gestaltet, dass er unbemerkt vom Fahrer abläuft und ein hochpräziser Betrieb über die gesamte Fahrzeuglebensdauer ermöglicht wird.

4 Einfluss auf Regelungen und technische Fahrzeugüberwachung

Das oben beschriebene System wird auch eine Ergänzung liefern zu den bisherigen gesetzlichen Regelungen. Insbesondere die ECE R48, die den Anbau lichttechnischer Einrichtungen am Fahrzeug und die Scheinwerfereinstellungen beschreibt, kann zukünftig ergänzt werden.

Das System verfügt mit dem Re-Aiming über eine Selbstdiagnose, die je nach Ausführung in unterschiedlichen Zeitabständen durchgeführt wird, da die Verbesserung der Scheinwerfereinstellung während des Fahrzeugbetriebs angestrebt wird. Während der periodischen Fahrzeugüberprüfung durch technische Dienste (PTI) kann gleichermaßen ein Re-Aiming durchgeführt werden, um die korrekte Scheinwerfereinstellung (horizontal/vertikal) zu bestätigen. Dazu können beispielsweise die bei der Kalibrierung in der Fabrik eingespeicherten Daten (Verhalten bei Beladung, Tank, Fahrergewicht, Federung, Chassis etc.) herangezogen werden. Damit kann die bisherige Einstellvorschrift für Fahrzeuge in ECE R.48 §6.1ff überarbeitet und ergänzt werden. Sowohl Einstellung, Toleranzen und Messmethode können vermutlich geändert werden und mit geringeren Abweichungen belegt werden. Insbesondere die großen Toleranzen bei der vertikalen Neigung (derzeit abhängig von der Anbauhöhe von 0,5%...3,5%) können mit einer genaueren Einstellfähigkeit verkleinert werden. Die bisherigen gesetzlichen Anforderungen werden für Fahrzeuge ohne Re-Aiming beibehalten und Fahrzeuge mit Re-Aiming-Prozess können durch eine Ergänzung mit aufgenommen werden.

Ebenfalls können Elemente der Functional Safety überprüft werden, z.B. auch die Einstellung anderer lichttechnischer Funktionen wie Matrix-Segmente, Bild- und Gefahrenprojektionen, Spurprojektionen etc.

Die ausgewählten Markierungen, Punkte, Striche, Kreuze etc. müssen bei der Fahrzeughomologation beschrieben sein und die photometrischen Eigenschaften dokumentiert und überprüft werden. Dies kann während der Typprüfung durch geeignete Testanforderungen in Photometrie, Gestalt, Schärfe und Position der jeweiligen Markierungen überprüft werden. Geeignet sind dafür die vorhandenen Laborbedingungen mit kalibrierten Mess-Einrichtungen, Goniometer etc. Erstmals sind identische technische Eigenschaften in einer Scheinwerfer-Lichtverteilung sowohl im Labor, in der Fertigung, in der Serienüberprüfung, in der periodischen technischen Überwachung und im Betrieb auf der Straße vorhanden.

Die für die Photometrie, die unterschiedlichen Kalibrierzustände, die Korrekturen im realen Straßenverkehr erforderlichen Testanforderungen sind noch nicht existent. Mit der Vorlage von ersten Prototypen zum Re-Aiming System können die finalen Spezifikationen anhand der konkreten Beispiele auf den Weg gebracht werden. Dazu sollten die Experten z.B. der GTB und Testhäuser in weiteren Arbeitsgruppen aktiviert werden.

5 Fazit und zukünftige Perspektiven

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass eine dauerhaft präzise Ausrichtung von Fahrzeugscheinwerfern unter realen Betriebsbedingungen mit herkömmlichen Methoden nicht gewährleistet werden kann. Mechanische Einflüsse, dynamische Fahrzustände sowie Umwelteinflüsse führen über kurz oder lang zu Fehlausrichtungen, die sich negativ auf Sichtweite, Lichtqualität und Blendungsfreiheit auswirken können. Gleichzeitig steigen durch moderne, hochauflösende Pixel-Systeme die Anforderungen an die Genauigkeit der Lichtverteilung erheblich.

Das hier vorgestellte Re-Aiming-System bietet eine ganzheitliche und vollständig softwarebasierte Lösung zur automatisierten Überwachung und Korrektur der Scheinwerferausrichtung während der Fahrt. Durch die intelligente Kombination aus lichtemittierender Einheit, optischer Erfassung und datengetriebener Verarbeitungseinheit gelingt es, ein geschlossenes Regelkreissystem zu realisieren, das die Lichtverteilung kontinuierlich analysiert, potenzielle Fehlausrichtungen erkennt und in Echtzeit ausgleicht. Besonders hervorzuheben ist dabei die Nutzung bereits im Fahrzeug vorhandener Komponenten – wie Frontkameras und Pixel-Scheinwerfer – sowie die Möglichkeit des konsequenten Verzichts auf mechanische Stellglieder, was das System wartungsfrei, robust und ressourcenschonend machen kann.

Im Ausblick eröffnet dieses System neue Potenziale für zukünftige Fahrzeugtechnologien. Die präzise, dynamische Lichtverteilung kann nicht nur zur weiteren Reduktion von Blendung beitragen, sondern auch die Effektivität assistierter und automatisierter Fahrfunktionen steigern, etwa durch gezielte Ausleuchtung von Objekten oder Fahrspuren. Darüber hinaus bildet das System eine solide Grundlage für adaptive Lichtsysteme, die auf wechselnde Umgebungsbedingungen oder

Verkehrssituationen reagieren. Die Integration zusätzlicher Sensorik, etwa zur Straßenzustandserkennung oder Fahrzeugkinematik, könnte das Re-Aiming-Prinzip perspektivisch noch erweitern und verfeinern.

Insgesamt liefert dieses Whitepaper damit einen Beitrag zur Entwicklung intelligenter, adaptiver Lichtsysteme im Fahrzeug und zeigt auf, wie durch datengetriebene Kalibriermechanismen die Verkehrssicherheit nachhaltig verbessert werden kann.

6 Quellen

- [1] Totzauer, A.: *Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht*. Herbert Utz Verlag (2013)
- [2] Locher, J., Aldiek, L., Stroop, P.: *Influence of Luminance and Illuminance on Headlamp Glare*. In: *Proceedings ISAL Tagung 2015*, S. 679–686, Darmstadt
- [3] Bullough, J.D., Van Derlofske, J., Dee, P., Chen, J., Akashi, Y.: *An Investigation of Headlamp Glare: Intensity, Spectrum and Size*. Technical Report HS-809 672, (2004)
- [4] Zydek, B.: *Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen*. Dissertation, Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt (2014)
- [5] Locher, J., Kaley, F.: *Disability and Discomfort Glare of Headlamps*. In: *Light & Engineering*, Vol. 18, No. 2 (2010)
- [6] Khanh, T.Q., Kobbert, J., Singer, T.: *Sichtverbesserungssysteme und Signaleinrichtungen*. In: *Handbuch Assistiertes und Automatisiertes Fahren*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 761–792 (2024)
- [7] Hinterwälder, C., Hamm, M.: *Analysis of Human Intra- and Interpersonal Aiming Accuracy of Cutoff Lines*. SAE Technical Paper 2021-01-0849 (2021). doi:10.4271/2021-01-0849
- [8] *The Aiming of Headlamps and Resulting Influences on Benchmarks and Road Users* Christian Hinterwälder, Michael Hamm, Jonas Kobbert, AUDI AG, Germany ISAL 2022, ISBN 978-3-8316-4953-2
- [8] Hinterwälder, C., Hamm, M., Kobbert, J.: *The Aiming of Headlamps and Resulting Influences on Benchmarks and Road Users*. In: *ISAL 2022*. ISBN 978-3-8316-4953-2
- [9] Kosmas, K., Kobbert, J., Khanh, T.Q.: *Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F 129 (2019)
- [10] Hamm, M., Hinterwaelder, C.: *Investigations on Headlamp and Car Body Tolerances in Real Life*. SAE Technical Paper (2020)
- [11] Hamm, M.: *Influence Parameters on Headlamp Performance in Rating Systems and Reality*. SAE Technical Paper 2017-01-1359 (2017). doi:10.4271/2017-01-135
- [12] Söhner, S.: *Entwicklung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation*. Cuvillier Verlag (2015)
- [13] Schäfer, S.: *ASSIST – Die erste Generation selbstjustierender Scheinwerfer*. Tagungsband Lux Junior (2015)

[14] Thom, M., Ulken, M., Krüger, L., Ritter, W.: *Headlight Range Calibration During Driving Operation*. In: *Proc. Int. Symposium on Automotive Lighting* (2011)

[15] Schneider, C.: *Entwicklung eines tiefenwahrnehmenden Scheinwerfer-Kamera-Systems*. Cuvillier Verlag (2019)