



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Antrieb in der Entwicklung automobiler Scheinwerfersysteme ist der stets existente Anspruch, bestmögliche Sichtverhältnisse für den Fahrzeugführer zu schaffen, ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Dieser Sachverhalt ist als Zielkonflikt in der automobilen Lichttechnik bekannt [100] und definiert das unumstrittene Kriterium, das bei der Bewertung von Scheinwerfersystemen herangezogen wird [63], [118]. Die Lösungsansätze, die diesem Anspruch gerecht werden, bilden heute das Fundament wissenschaftlicher Arbeiten und Veröffentlichungen.

Aktuelle Forschungsfelder im Kontext automobiler Scheinwerfersysteme umfassen Untersuchungen zu blendfreien Fernlichtsystemen [55], [112], [121], zu laserbasierten Lichtfunktionen [3], [126], [75] und zur prädiktiven, energieeffizienten Lichtsteuerung [44], [6], [7], [76], [74]. In diesem Zusammenhang kann bereits von Innovationen gesprochen werden, da ein Großteil der untersuchten Systeme am Markt erhältlich ist.

Bei den blendfreien Fernlichtsystemen, die eine dauerhafte Fahrt mit Fernlicht durch eine aktive Entblendung der übrigen Verkehrsteilnehmer ermöglichen, etabliert sich neben den bereits diskutierten Fragestellungen zu den genutzten optischen Konzepten [94], [9], der Wahrnehmung der Funktionen [121], [87] und der Bewertung der Systeme [55], [112] das Themengebiet der Präzision der Systeme [42]. Einflüsse, die durch eine unbekannte oder toleranzbehaftete Scheinwerfereinstellung gegeben sind, können bei blendfreien Fernlichtsystemen in Form von Sicherheitsbereichen vorgehalten werden [55], [121], [101]. Eine kontinuierliche Überprüfung der Scheinwerferausrichtung ist als Innovation jedoch noch nicht verfügbar. Wird der Fokus auf alle gängigen Scheinwerfersysteme erweitert, kann unter Beachtung der jährlich durchgeführten *Lichttests* eine Stagnation der prozentual erfassten Mängel hinsichtlich der Scheinwerfereinstellung aufgezeigt werden [66], [65], [64], [20], [19], [18], was zwangsläufig den Nutzen der innovativen Lichtfunktionen limitiert [38].

Eine korrekte Grundeinstellung der Scheinwerfer ist für die Erfüllung des Zielkonflikts hinsichtlich Blendung [81] und Erkennbarkeitsentfernung [123] absolut notwendig. Durch die zunehmende Aktivierungsrate der blendfreien Fernlichtsysteme [55] in Verkehrsszenen mit erhöhter Verkehrsdichte rückt die Forderung nach präzisen Systemen noch stärker in den Fokus, da bei falsch eingestellten Scheinwerfern eine Blendung durch das Fernlicht möglich ist.



Der Trend zur Überprüfung der Ausrichtung der Scheinwerfersysteme erfährt seit kurzer Zeit zunehmende Beachtung [121], [71], [103], [120], [117]. Jedoch sind die Art der Kalibrierung und ein möglicher Serieneinsatz noch nicht abzusehen. Die Untersuchung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mit Fokus auf eine seriennahe Umsetzung scheint demnach erforderlich, um die Präzision der Scheinwerfersysteme im Feld dauerhaft zu gewährleisten.

## 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Untersuchungsfelder

Die aus den aktuellen Untersuchungsfeldern der automobilen Frontbeleuchtung abgeleitete Notwendigkeit einer Gewährleistung der Präzision der Scheinwerfersysteme legt den Schluss nahe, eine automatisierte Scheinwerfereinstellung im Kontext einer seriennahen Entwicklung zu untersuchen.

**Zielsetzung:** Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, ein Kalibrierverfahren zu entwickeln, das mittels einer Fahrerassistenzkamera und eines Serienscheinwerfersystems umgesetzt werden kann. Der Kalibrieransatz ist flexibel gegenüber gängigen Serienscheinwerfersystemen zu gestalten und soll ohne einen Eingriff in die Lichtverteilung des Scheinwerfers durchführbar sein. Darüber hinaus ist auf zusätzliche Sensorinformationen zur Bestimmung der Fehlstellung zu verzichten. Aufgrund der Nutzung der Fahrerassistenzkamera ist ein Bildverarbeitungsalgorithmus zu entwickeln, der die notwendigen Kalibrierinformationen aus der Lichtverteilung des Scheinwerfers extrahiert. Im Hinblick auf die Bewertung des Systems sind theoretische Betrachtungen und experimentelle Untersuchungen im Feld durchzuführen. Die Anwendbarkeit des Systems ist über einen Abgleich zwischen Kalibrierergebnissen und Referenzgrößen aufzuzeigen. Das hierfür notwendige Referenzmessverfahren ist ebenfalls zu entwickeln. Weiter soll über einen Vergleich der experimentell ermittelten Standardabweichungen des Kalibrierverfahrens mit den Werten aus der Literatur eine Beurteilung des Gesamtsystems erfolgen.

**Abgrenzung der Untersuchungsfelder:** Die automatisierte Scheinwerfereinstellung wird vom geometrischen Grundprinzip bis zum fertigen Kalibriersystem entwickelt und validiert. Die sich ergebenden Kalibrierszenarien werden im Zuge der experimentellen Untersuchungen erwähnt, aber nicht näher erläutert. Es wird keine explizite Verkehrsraumanalyse durchgeführt. Bezüglich der Entwicklung des Bildverarbeitungsalgorithmus wird ein unüberwachtes Verfahren verwendet. Alternative Vorgehensweisen auf der Basis neuronaler Netze sind der Literatur zu entnehmen [117]. Die Bildverarbeitung ist als Systembestandteil beispielhaft zu sehen, das Kalibrierverfahren selbst steht im Vordergrund. Im Zuge der standardisierten Bestimmung der Hell-Dunkel-Grenze wird ein Vergleich zwischen der aus dem Kamerabild extrahierten Hell-Dunkel-Grenze mit einer subjektiv bewerteten Hell-Dunkel-Grenze durch Probanden sowie mit einer rechnerisch bestimmten Hell-Dunkel-Grenze aus



den Leuchtdichteaufnahmen dargestellt. Es werden keine weiteren Untersuchungen zur standardisierten Bestimmung der Hell-Dunkel-Grenze durchgeführt, siehe hierzu [105], [95]. Zur Bewertung des Gesamtsystems werden die Standardabweichungen der Kalibrierergebnisse und die Vergleiche mit der Referenzmessung herangezogen. Auf etwaige Untersuchungen zur Erkennbarkeitsentfernung und zur Blendung sowie zur Reduzierung des Sicherheitsbereichs von blendfreien Fernlichtsystemen wird verzichtet.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in den Stand der Technik, die theoretische Betrachtung des Kalibrierverfahrens, die experimentellen Untersuchungen zum Gesamtsystem und abschließende Empfehlungen zur Serienentwicklung gegliedert.

Zu Beginn wird der Stand der Technik in Kapitel 2 dargestellt. Im Speziellen werden in diesem Teil der Arbeit die Grundlichtverteilungen und weitere Lichtfunktionen vorgestellt. Ferner werden statistische Befunde zur Scheinwerfereinstellung genannt und beispielhaft die Notwendigkeit der Scheinwerfereinstellung für einen Teil der präsentierten Lichtfunktionen herausgestellt.

Die nachfolgenden Ausführungen sehen unter anderem die Durchführung einer Anforderungsanalyse für eine automatisierte Scheinwerfereinstellung im Kontext einer seriennahen Entwicklung vor. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein der Literatur nicht bekanntes Kalibrierverfahren für Hauptscheinwerfer abgeleitet, Kapitel 3. Dem Kalibrieransatz wird ein Gleichungssystem zugeordnet, worin die Fehlstellungen der Hauptscheinwerfer als unbekannte Größen eingehen. Die Lösung des entsprechenden Gleichungssystems sowie eine Verifizierung der theoretischen Kalibrierergebnisse in einer Simulationsumgebung bilden den Hauptteil der theoretischen Untersuchungen, Kapitel 4.

In Kapitel 5 wird der Systemablauf der automatisierten Scheinwerfereinstellung dargestellt. Das System umfasst einen eigens für die Kalibrierung entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmus und eine Ansteuerlogik für die Scheinwerfer. In Kapitel 6 wird der prototypische Aufbau zweier Versuchsträger für die automatisierte Scheinwerfereinstellung vorgestellt. Das Kalibrierverfahren wird mit einem Serienscheinwerfersystem und mit einem in der Serienentwicklung befindlichen Prototypenscheinwerfersystem umgesetzt. Der in Kapitel 5 dargestellte Systemablauf wird unter der Verwendung des in Kapitel 4 abgeleiteten Berechnungsverfahrens im Labor und im Feld experimentell untersucht.

Abschließend werden auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen Empfehlungen für die Serienentwicklung gegeben, Kapitel 7, die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und mögliche zukünftige Untersuchungsfelder genannt, Kapitel 8.





## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik der automobilen Frontbeleuchtung gegeben. Themenschwerpunkte bilden grundlegende Informationen zum Hauptscheinwerfer, Abschnitt 2.1, sowie die Einführung der verschiedenen Lichtfunktionen, die auf Basis der genutzten Sensorik klassifiziert werden, Abschnitte 2.2 und 2.3. Zusätzlich wird die Scheinwerfereinstellung thematisiert, Abschnitt 2.4, und die Notwendigkeit der korrekten Scheinwerfergrundausrüstung hinsichtlich ausgewählter Lichtfunktionen aufgezeigt, Abschnitt 2.5.

### 2.1 Grundlagen Hauptscheinwerfer

Die Basisausleuchtung der automobilen Hauptscheinwerfer ist bei Dunkelheit durch das Abblendlicht und das Fernlicht gegeben. In Abschnitt 2.1.1 wird deren grundlegender Aufbau thematisiert und eine Definition des Begriffs „Hell-Dunkel-Grenze“ abgeleitet. Ausgehend von den genannten Grundlichtverteilungen werden die optischen Systeme zur Umsetzung der Ausleuchtung vorgestellt, Abschnitt 2.1.2. Ebenso wird eine Einführung in die genutzten Lichtquellen gegeben, Abschnitt 2.1.3.

#### 2.1.1 Grundlichtverteilungen

Das Abblendlicht, das Fernlicht und optional das Nebellicht sind die Grundlichtverteilungen, die jedem Fahrer zur Verfügung stehen [60] und manuell auswählbar sind [100].

Im weiteren Verlauf wird der Fokus auf die Grundlichtverteilungen Abblendlicht und Fernlicht gerichtet. Charakteristisch für die Lichtverteilungen ist das Lichtbild auf der Fahrbahn und auf einer Projektionsfläche 25 m vor dem Fahrzeug. In Abbildung 2.1 werden die Charakteristika in Form von schematischen Beleuchtungsstärkeverteilungen dargestellt. Die Beleuchtungsstärke  $E_v$  ist das photometrische Pendant der radiometrischen Größe der Bestrahlungsstärke  $E_e$  [51], die den Strahlungsfluss  $\Phi_e$  pro Fläche  $A$  definiert [50], Gleichung (2.1). Der Strahlungsfluss  $\Phi_e$  bzw. der Lichtstrom  $\Phi_v$  definieren die gesamte Menge an Licht, die eine Lichtquelle ausstrahlt. Die lichttechnischen Größen sind im Gegensatz zu den entsprechenden strahlungsphysikalischen Größen von der Wellenlänge des Lichts abhängig, was einem selektiven Empfänger entspricht [50], Gleichung (2.2).

$$E_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial A} \quad (2.1)$$

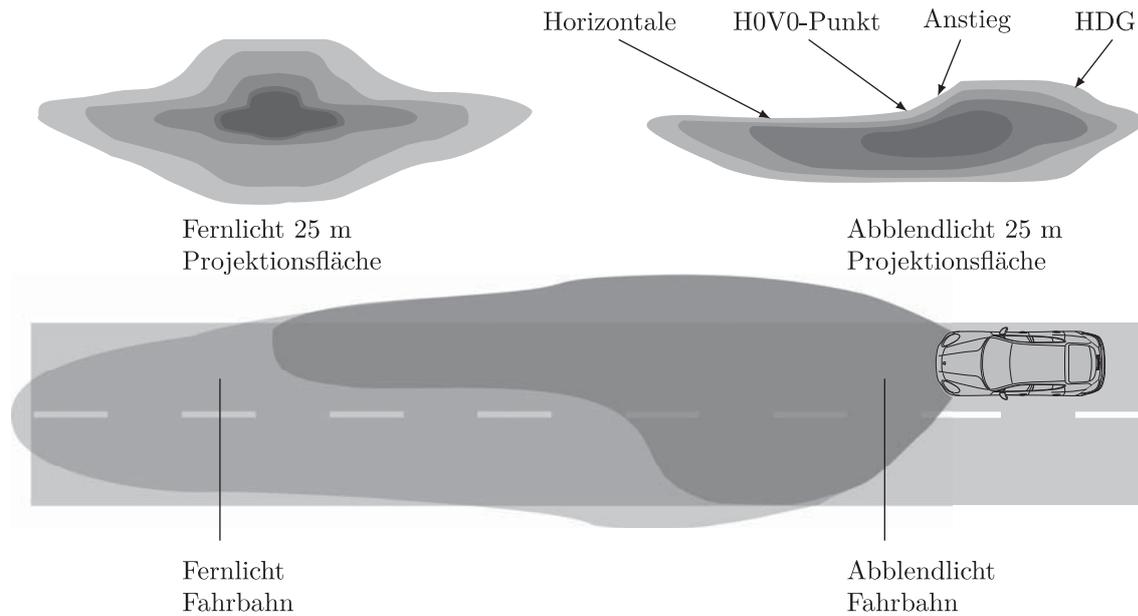


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Grundlichtverteilungen auf einer Projektionsfläche und auf der Fahrbahn

$$\Phi_v = 684 \frac{lm}{W} \cdot \int_{380}^{780} \Phi_e \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

Die Darstellung des Abblendlichts zeigt eine asymmetrische Lichtverteilung auf der Fahrbahn. Diese Art der Ausleuchtung wird durch den Zielkonflikt der automobilen Lichttechnik bedingt, der eine gute Sicht für den Fahrer bei gleichzeitiger Vermeidung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer verlangt [72], [60]. Die dargestellte asymmetrische Form kommt dieser Forderung nach, indem die geometrische Reichweite auf der eigenen Fahrspur erhöht und auf der Gegenfahrbahn verringert wird. Grundsätzlich stellt die Asymmetrie aber keine optimale Lösung des genannten Zielkonflikts dar [60]. Die schematische Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Projektionsfläche zeigt dieselbe Abblendlichtverteilung mit einer Asymmetrie am Übergang zwischen beleuchtetem und unbeleuchtetem Bereich. Dieser Bereich wird als Hell-Dunkel-Grenze, kurz HDG, bezeichnet [72], [50]. Die Form und Ausrichtung der HDG beeinflusst maßgeblich die Ausleuchtung im Verkehrsraum, worauf in den Abschnitten 2.2 und 2.3 unter dem Gesichtspunkt der Lichtfunktionen näher eingegangen wird. Das charakteristische Merkmal einer jeden Abblendlichtverteilung ist der H0V0-Punkt der HDG, der als Schnittpunkt zwischen dem horizontalen Teil und dem im Anschluss folgenden Anstieg der HDG [132] definiert werden kann. Der H0V0-Punkt ist der Ausgangspunkt für die Einstellung der Hauptscheinwerfer, siehe hierzu Abschnitt 2.4. Das Fernlicht zeigt im Vergleich zum Abblendlicht eine symmetrische Form und eine größere geometrische Reichweite.

Die limitierenden Faktoren der Lichtverteilungen sind die maximal zulässigen Beleuchtungsstärkewerte auf der definierten Projektionsfläche 25 m vor dem Scheinwerfer. Das Fernlicht darf einen maximalen Beleuchtungsstärkewert von 180 lx nach [132], [54] für Scheinwerfer mit Gasentladungslampen und von 240 lx nach [130], [129] für Scheinwerfer mit LED-Modulen oder Glühlampen nicht überschreiten. Für die Zulassung des Hauptscheinwerfers sind neben den maximalen Beleuchtungsstärkewerten weitere Minima- und Maximaanforderungen hinsichtlich der Beleuchtungsstärkeverteilung für definierte Winkelbereiche der Lichtverteilungen in einer Entfernung von 25 m zu erfüllen. Hierzu sei auf [129], [132] verwiesen.

### 2.1.2 Optische Systeme

Zur Umsetzung der in Abschnitt 2.1.1 definierten Grundlichtverteilungen werden Reflexions- und Projektionssysteme in einfacher oder multifunktionaler Ausführung eingesetzt [125]. Bei Reflexionssystemen, Abbildung 2.2, wird der Lichtstrom  $\Phi_v$ , Gleichung (2.2), der Lichtquelle durch die Geometrie eines Reflektors und optionaler Optiken auf der Abschlusscheibe im Verkehrsraum verteilt. Im Falle klarer Abschlusscheiben werden Frei-Form-Reflektoren verwendet, die einen segmentierten oder facettierten Aufbau haben. Bei Abschlusscheiben mit Zylinder- oder Prismenoptiken ist die Reflektorgeometrie elliptisch [125].

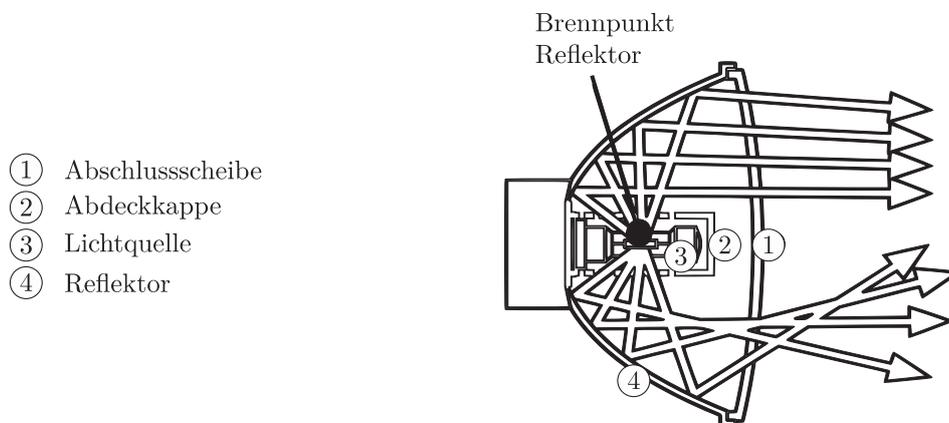


Abbildung 2.2: Reflexionssystem mit Frei-Form-Reflektor und klarer Abschlusscheibe, vergleiche [49]

Projektionssysteme sind aus einem elliptischen Reflektor, einer plankonvexen, asphärischen Linse und einer klaren Abschlusscheibe aufgebaut. Der Lichtstrom wird durch den Reflektor in die Brennpunktebene der Linse fokussiert. Eine integrierte Blende schattet das Licht oberhalb der HDG ab, wodurch eine Abblendlichtverteilung generiert wird, Abbildung 2.3. Über die Kontur der Blende kann die Form der HDG variabel gestaltet werden. Nach den gesetzlichen Regelungen sind HDGs mit einem 15°- und einem 45°-Anstieg erlaubt. Allerdings muss im Falle eines 45°-Anstiegs der linke Teil der HDG nach dem Anstieg horizontal verlaufen, um eine Blendung vorausfahrender Fahrzeuge zu verhindern [130], [129].

Den großflächigen Reflexionssystemen stehen Projektionssysteme mit einer Linsengröße von 40 mm bis 75 mm gegenüber [125], [134], die allerdings aufgrund ihres optischen Aufbaus größere Bautiefen bedingen. Zusätzlich muss bei Projektionscheinwerfern mit Farbfehlern der Linse gerechnet werden, die als chromatische Aberration bezeichnet werden und zu den Bildfehlern 1. Ordnung gehören [108]. Die Abhängigkeit des Brechungsindex  $n_v$  von der Wellenlänge  $\lambda$  führt zu einer stärkeren Brechung des kurzwelligen blauen Lichts im Vergleich zu langwelligem roten Licht. Die Folge ist bei außerparaxialen Lichtstrahlen eine chromatische Aberration [92], die den angesprochenen Farbsaum erzeugt.

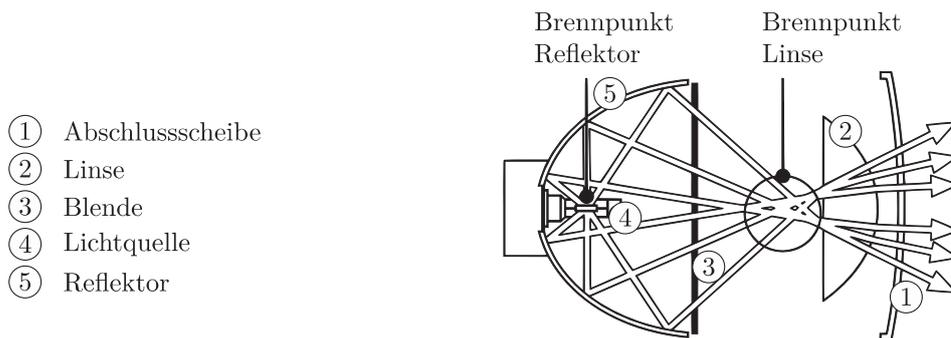


Abbildung 2.3: Projektionssystem, vergleiche [49]

Im Hinblick auf multifunktionale Ausführungen ermöglichen die Projektionssysteme durch eine bewegliche Blende eine Umsetzung des Abblendlichts und des Fernlichts in einem Modul [125]. Zusätzliche Stellmotoren realisieren das Schwenken der Lichtverteilung nach links und rechts sowie nach oben und unten und erweitern somit die Anwendbarkeit des Moduls für weitere Lichtfunktionen, siehe hierzu die Abschnitte 2.2 und 2.3. Eine Integration der Stellmotoren in das optische System bedarf einer spezifischen mechanischen Auslegung der Motoren zur Gewährleistung der Genauigkeit der Lichtverlagerung.

Trends in der automobilen Lichttechnik zeigen ein zunehmendes Streben nach modularen Konzepten mit dem Ziel, Entwicklungsrisiken zu reduzieren und Synergien durch Stückzahleffekte zu nutzen [125]. Demgegenüber steht der Ansatz, die mechanischen Komponenten der Scheinwerfer zu reduzieren, um das Gesamtgewicht und den Aufwand bei der Entwicklung zu verringern [21]. Im Audi A8 (Baujahr 2013) wird ein LED-Scheinwerfer angeboten, der aus mehreren Reflektormodulen besteht und entgegen des subtraktiven Ansatzes mittels eines Projektionssystems die notwendigen Lichtverteilungen additiv durch das Zu- und Abschalten der einzelnen Reflektorsegmente realisiert [16]. Die genannten Aspekte zeigen die Umsetzbarkeit der Lichtverteilungen mit Projektions- und Reflexionssystemen. Die Entscheidung für das jeweilige System unterliegt der individuellen Gewichtung der Hauptanforderungen, die die lichttechnische Qualität, das Design, die Prozessqualität, die Fahrzeugintegration, die Entwicklungszeit und die Entwicklungskosten umfassen [125].



### 2.1.3 Lichtquellen

In automobilen Hauptscheinwerfern werden Halogenlampen, Xenonlampen und lichtemittierende Dioden, kurz LEDs, eingesetzt. Halogenlampen sind wie Glühlampen thermische Strahler, die abhängig von der Temperatur Energie in Form von Strahlung abgeben. Nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz ist der Anteil der kurzwelligeren und damit sichtbaren Strahlung höher, je höher die Temperatur des Körpers ist [96]. Die spektrale Verteilung des Lichts sorgt für eine Farbtemperatur von 3.500 K, was als warmweiß wahrgenommen wird. Halogen- und Glühlampen besitzen einen Wolframdraht, der durch Anlegen eines Stroms zum Glühen gebracht wird. Dennoch unterscheiden sich die Lichtausbeute und die Lebensdauer beider Leuchtmittel. In Halogenlampen wird ein Halogenkreisprozess genutzt, der das Zerfallen des Wolframdrahts durch die thermische Beanspruchung verzögert und höhere Lichtausbeuten ermöglicht.

Nichtthermische Strahler emittieren Licht, indem angeregte Atome oder Moleküle von einem erhöhten Energieniveau in ein niedrigeres Energieniveau übergehen. Die Anregung wird bei Gasentladungslampen in einem Plasma erreicht, in dem ein Energieaustausch zwischen den Teilchen in Form von Stößen erfolgt. Das Plasma bildet sich durch die Ionisierung des Füllgases. Das Spektrum der Xenonlampe enthält charakteristische Spektrallinien, die hauptsächlich durch das Verdampfen der Metallhalogenide, die neben dem Xenon zum Füllgas der Lampe gehören, entstehen. Das Xenon hingegen ist während des Zündvorgangs zu Beginn hauptverantwortlich für die Ionisierung des Gases [32].

Bei LEDs, die ebenfalls zu den nichtthermischen Strahlern zählen, wird ein n- und p-dotiertes Halbleitermaterial zu einem pn-Übergang verbunden. Durch den Kontakt diffundieren die Elektronen als Majoritätsladungsträger des n-dotierten Halbleitermaterials in den Raumbereich des p-dotierten Halbleitermaterials. Für die Löcher ist der Prozess entsprechend umgekehrt. Die Folge sind Raumladungszonen, die ein elektrisches Feld am pn-Übergang erzeugen und der Diffusion entgegenwirken, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Durch das Anlegen einer Vorwärtsspannung rekombinieren die gebildeten Elektronen-Loch-Paare und Licht wird entsprechend der durch das Halbleitermaterial bedingten Bandlücke emittiert, was zu einem schmalbandigen Spektrum führt [97]. Das für den Scheinwerfer notwendige weiße Licht wird durch Lumineszenzkonvertierung [32] des höher energetischen blauen Lichts an einem gelben Phosphor erzeugt. Dieser Prozess wird Stokes-Verschiebung genannt [98] und streckt das Spektrum, wodurch Farbtemperaturen von 5.500 K erreicht werden können [106].

Xenonlampen und LEDs setzen im Fahrzeugbetrieb mit 12 V eine Ansteuerelektronik voraus. Bei Xenonlampen ist eine Zündspannung zwischen 10 kV und 20 kV notwendig, um das Gas zu ionisieren und den Lichtbogen zwischen den Elektroden zu entzünden. Nach der Zündung wird die Lichtquelle bei einer Wechselspannung mit 85 V bei 400 Hz betrieben [97]. Der endgültige Lichtstrom steht erst nach 3 s zur Verfügung [96] und wird durch einen anfänglich erhöhten Anlaufstrom schneller erreicht. Die Leistungsaufnahme liegt zu Beginn bei 75 W und verringert sich im Dauerbetrieb auf 35 W. Die Vorschalt elektronik sorgt für das Zünden der Lampe,

die Erhöhung des Anlaufstroms und die Versorgung im Dauerbetrieb. Spannungsschwankungen des Bordnetzes im Bereich zwischen 9 V und 16,5 V sind durch die Elektronik regelbar [97].

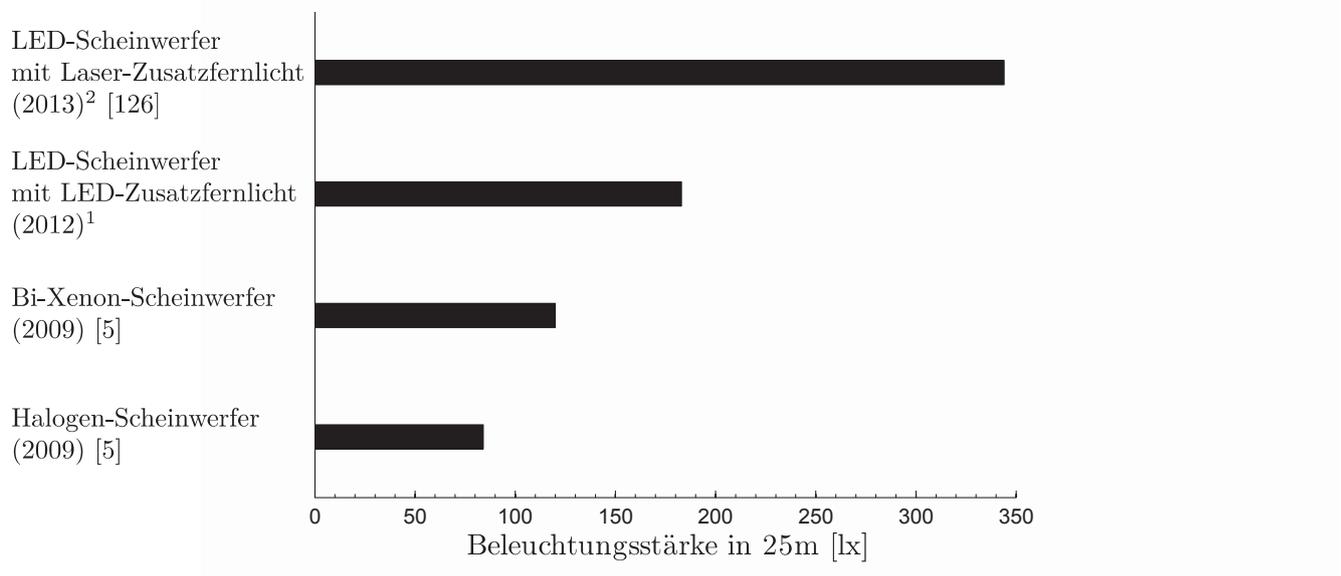


Abbildung 2.4: Darstellung der Steigerung der maximalen Beleuchtungsstärken in 25 m im Fernlicht

Bei LEDs ist ein konstanter Ansteuerstrom notwendig, der durch einen getakteten Stromregler umsetzbar ist und eine Dimmung der LEDs durch Pulsweitenmodulation zulässt [69]. Die Ansprechzeit, bis zu der eine LED ihren vollständigen Lichtstrom erreicht, liegt bei unter 1 ms und ist im Vergleich zu Glühlampen mit 200 ms deutlich kürzer [97]. Bei LED-Scheinwerfern werden Mehrchip-LEDs für die Grundlichtverteilungen eingesetzt, um die notwendigen Lichtströme zu gewährleisten und um zukünftig eine Variation der Lichtverteilung, insbesondere im Bereich der HDG, realisieren zu können [73]. Abbildung 2.4 zeigt die Steigerung der maximalen Beleuchtungsstärke in 25 m durch den Einsatz der vorgestellten Lichtquellen. Bei dem Laserzusatzfernlicht wird ein blauer Diodenlaser verwendet, der durch die angesprochene Lumineszenzkonvertierung an einem gelben Phosphor weißes Licht erzeugt.

<sup>1</sup>Porsche Dynamic Light System +, LED-Scheinwerfer mit Zusatzfernlicht, Porsche 911 (991).

<sup>2</sup>Nach [131] ist für einen Scheinwerfer eine maximal zulässige Gesamtbeleuchtungsstärke von 344 lx in 25 m Entfernung ableitbar.



## 2.2 Sensorgestützte und prädiktive Lichtfunktionen

Bei den sensorgestützten Lichtfunktionen handelt es sich um Erweiterungen der Grundlichtfunktionen Abblendlicht und Fernlicht. Die automatische Leuchtweitenregulierung, kurz ALWR, und das dynamische Kurvenlicht, kurz DKL, passen die Lichtverteilung der Straßengeometrie an, Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2, wohingegen beim adaptiven Frontbeleuchtungssystem, kurz AFS, und bei der prädiktiven Lichtsteuerung eine Reaktion auf die Geschwindigkeit, die Navigationsdaten und das Wetter erfolgt [112], [128], Abschnitte 2.2.3 und 2.2.4. Die vordefinierten Lichtverteilungen werden der aktuellen Verkehrsszene zugeordnet und sorgen durch eine geometrische Verlagerung oder Veränderung der HDG für eine Verbesserung der Ausleuchtung hinsichtlich Blendung und Erkennbarkeitsentfernung und vermitteln ein erhöhtes Sicherheitsgefühl [54], [72], [99], [124].

### 2.2.1 Automatische Leuchtweitenregulierung

Bei der ALWR wird die Ausrichtung der HDG durch eine interne Stellmotorik in der Vertikalen verändert. Der notwendige Verfahrenswinkel wird aus den Achswerten der Niveausensoren an der Vorder- und der Hinterachse des Fahrzeugs in dem entsprechenden Scheinwerfersteuergerät berechnet und über eine CAN<sup>3</sup>-Verbindung an den Scheinwerfer gesendet. Die ALWR verhindert die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer, die durch die Beladung und das Beschleunigen des Fahrzeugs hervorgerufen werden kann und gleicht die verringerte geometrische Reichweite durch den auftretenden Nickwinkel bei Bremsmanövern aus. Bei Scheinwerfern mit einem Lichtstrom über 2.000 lm ist das System ebenso gesetzlich vorgeschrieben wie eine Scheinwerferreinigungsanlage [96].

*Huhn* [54] präsentiert in seiner Arbeit ein Messverfahren, mit dem es möglich ist, die auftretenden Fahrzeugnickwinkel kontinuierlich zu ermitteln. Das Streckenprofil umfasst Stadt-, Land- und Autobahnfahrten. Es werden mehrere Fahrzeuge erfasst, wobei die Nickwinkel zwischen  $+1,49^\circ$  und  $-1,81^\circ$  liegen [54]. Aus den erfassten Daten errechnet *Huhn* die Zeitspanne, in der der linke Teil der HDG oberhalb des Horizonts liegt und definiert darüber einen Blendanteil je Stunde Fahrzeit für entgegenkommende Fahrzeuge. Die Ergebnisse zeigen innerorts ein Auftreten der Blendung infolge einer Beschleunigung bei durchschnittlich 5 % der Fahrzeit, der maximale Anteil liegt bei 11 %. Außerorts werden weitaus geringere Werte erreicht. *Huhn* identifiziert diesen dynamischen Effekt als Beitragsleister für eine erhöhte Blendung, da in Kombination mit einer Beladung des Kofferraums die Blendung des Gegenverkehrs auf 95 % der Fahrzeit gesteigert wird [54]. *Lehnert* gibt in seiner Arbeit für die Nickwinkel Werte zwischen  $+1,6^\circ$  und  $-1,4^\circ$  an und unterstreicht die Schwankungen durch den Einfluss der Faktoren Motorleistung und Fahrwerksauslegung [77]. Aus seinen Untersuchungen geht auf der Basis eines Beschleunigungsmanövers ein Blen-

---

<sup>3</sup>Controller Area Network.



dimpuls<sup>4</sup> hervor, der dem 25-Fachen der eigentlich zulässigen Blendung entspricht [77].

Zusätzlich ist eine ALWR im Fall einer Notbremsung unbedingt notwendig, da die geometrische Reichweite von 63,5 m bis 67,5 m durch das Nicken des Fahrzeugs auf 13 m bis 26 m reduziert wird. Jedoch sollte ein entsprechender Regelalgorithmus implementiert werden, der das ständige nervöse Verlagern der HDG verhindert [54].

*Kuhl* geht in seinen Ausführungen spezifisch auf Straßenkuppen und Straßenwannen ein. Er verdeutlicht den Zugewinn der ALWR hinsichtlich der Blendungsvermeidung gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern auf Kuppen und der Steigerung der Erkennbarkeitsentfernung in Wannen durch die Anpassung der HDG-Ausrichtung an den vertikalen Straßenverlauf [72].

## 2.2.2 Dynamisches Kurvenlicht

Den Untersuchungen von *Diem* [31] ist zu entnehmen, dass die Fixationsentfernung in Kurven bei Nacht im Vergleich zu geraden Strecken deutlich erniedrigt ist. Geringere Erkennbarkeitsentfernungen sind die Folge. Zusätzlich reichen die peripher aufgenommenen Informationen bei Rechtskurven mit einem Radius von 110 m nicht aus, um eine optimale Spurführung zu gewährleisten [31]. Abhilfe schafft das dynamische Kurvenlicht durch eine Verlagerung der HDG in horizontaler Richtung. Nach *Reif* [96] ist bei Kurvenradien unter 1.000 m eine erhöhte geometrische Reichweite im Vergleich zu einer statischen Abblendlichtverteilung erreichbar, bei Radien um 200 m ist mit einer Steigerung der Reichweite um bis zu 60 % zu rechnen. Ergänzend zu Abschnitt 2.2.1 ist eine korrekte Anpassung der Scheinwerferausrichtung an den horizontalen Straßenverlauf ebenfalls empfehlenswert.

Die Bestimmung der Schwenkwinkel erfolgt auf der Basis der Lenkwinkel-, Gierraten- und Geschwindigkeitsinformation im Scheinwerfersteuergerät und wird wie bei der ALWR durch eine interne Stellmotorik umgesetzt. In Abbildung 2.5 wird das dynamische Kurvenlicht dargestellt. Aus Gründen der Vollständigkeit wird ebenso das statische Kurvenlicht präsentiert. Diese Art des Kurvenlichts kann als Kreuzungslicht angesehen werden, das im Kreuzungsbereich die Seitenbereiche aufhellt.

Die Scheinwerfer werden asynchron angesteuert, was auf Untersuchungen nach *von Hoffmann* [124] zurückgeht. Beim Durchfahren einer Kurve wird der kurven-innere Scheinwerfer mit einem größeren horizontalen Winkel geschwenkt als der kurven-äußere Scheinwerfer. Die Verfahrensstrategie sieht eine horizontale Verlagerung der HDG zwischen  $\pm 7^\circ$  bzw.  $\pm 15^\circ$  vor [59].

Aktuelle Erhebungen hinsichtlich der Ausstattungsvarianten bei Neuwagen in Deutschland zeigen für das dynamische Kurvenlicht, das seit 2002 eingesetzt werden darf [59], eine Ausstattungsquote von 15 % [66]. Damit liegt das Lichtsystem im

---

<sup>4</sup>Die Dauer des Blendimpulses liegt bei 1 s.

Bereich etablierter Ausstattungen, wie Schiebedach (21 %) und elektrischer Sitzverstellung (25 %). Xenon-Scheinwerfer liegen im Neuwagensektor bei einer Quote von 30 % [66]. Allerdings reicht deren Einführung in die Anfänge der 90er-Jahre zurück. In Anbetracht der kurzen Verfügbarkeit des dynamischen Kurvenlichts kann von einer zunehmenden Kundenakzeptanz der Lichtfunktion ausgegangen werden.

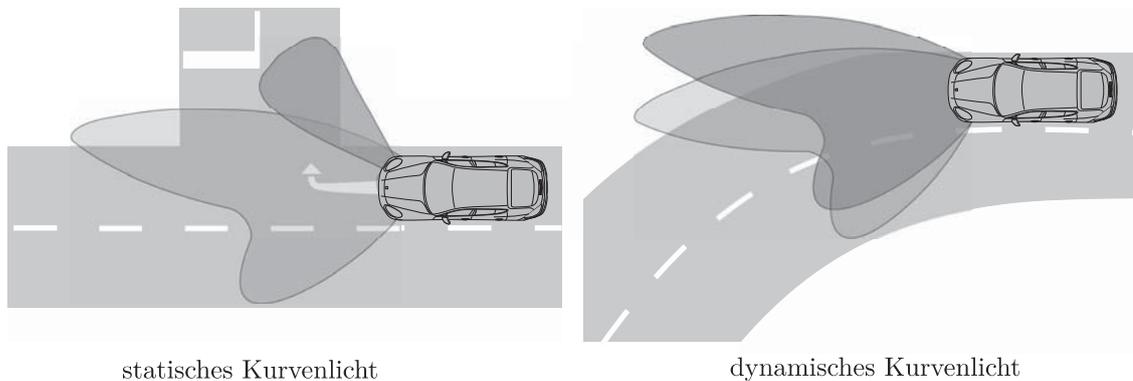


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des statischen und des dynamischen Kurvenlichts auf der Fahrbahn, vergleiche [49]

### 2.2.3 Adaptives Frontbeleuchtungssystem

Das AFS stellt dem Fahrer neben den Grundlichtverteilungen weitere Lichtverteilungen zur Verfügung, die auf Basis der Geschwindigkeit und der Wetterbedingungen ausgewählt werden. In Abbildung 2.6 wird ein Überblick über die einzelnen Lichtfunktionen gegeben.

Das Abblendlicht wird im Kontext der vordefinierten Lichtverteilungen als Landstraßenlicht bezeichnet. Der Fokus liegt bei dieser Lichtfunktion darin, den rechten Straßenrand weiter auszuleuchten und den Gegenverkehr dabei nicht zu blenden [96]. Das Abblendlicht (Abblendlichtklasse C) wird aktiv, wenn die nachfolgenden Lichtfunktionen inaktiv sind [131].

Beim Stadtlicht (Abblendlichtklasse V) wird die charakteristische Asymmetrie des Abblendlichts durch eine symmetrische HDG ersetzt. Zielführend ist im Stadtverkehr eine breite Ausleuchtung. Die geometrische Reichweite wird zugunsten der Blendungsvermeidung gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern reduziert, da für die notwendige Erkennbarkeitsentfernung die Straßenbeleuchtung ausreichend ist. Der Einsatz des Stadtlichts erfolgt im niedrigen Geschwindigkeitsbereich unter 50 km/h innerorts [128], [131].

Das Autobahnlicht (Abblendlichtklasse E) wird im höheren Geschwindigkeitsbereich über 110 km/h außerorts oder bei baulich getrennten Fahrspuren aktiv [131] und sieht eine Anhebung der HDG um bis zu  $0,29^\circ$  sowie eine Erhöhung der Beleuch-



tungsstärke im Hotspot um 20 lx vor<sup>5</sup> [59]. Die gesteigerte Erkennbarkeitsentfernung wird durch den zunehmenden Bremsweg bei erhöhten Geschwindigkeiten notwendig.

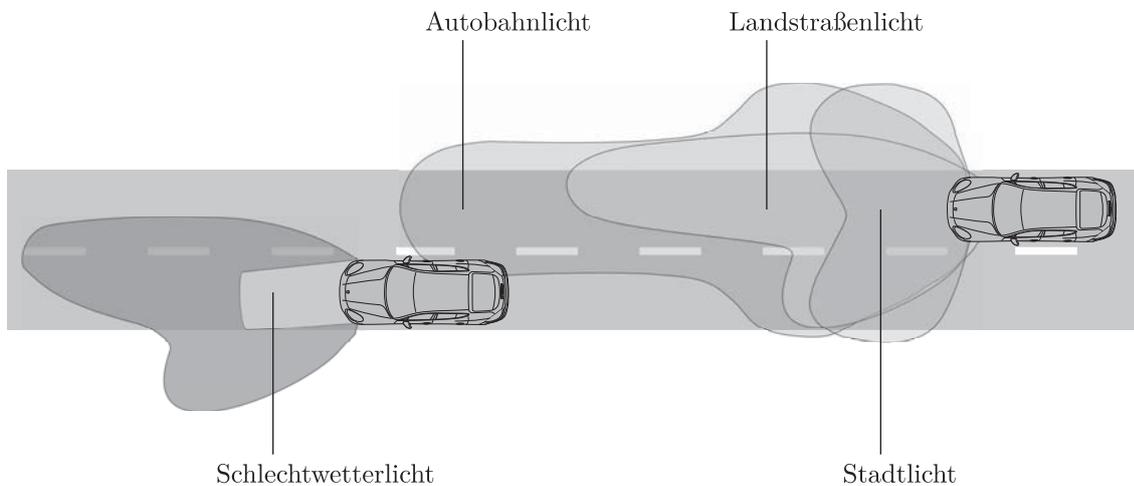


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der AFS-Lichtverteilungen auf der Fahrbahn

Bei schlechtem Wetter wird das Schlechtwetterlicht (Abblendlichtklasse W) genutzt, wobei durch eine breite Lichtverteilung das periphere Sehen, das der Orientierung dient [96], unterstützt wird. Ebenso sorgt eine Verringerung der Beleuchtungsstärke im Vorfeld dafür, dass die Eigenblendung reduziert wird [99]. Die Aktivierung dieser Lichtverteilung wird über den Regenlichtsensor und den dauerhaften Betrieb der Scheibenwischer initiiert [131].

Das Fernlicht ist manuell jederzeit auswählbar oder kann automatisch durch den Fernlichtassistenten, Abschnitt 2.3.2, zugeschaltet werden. Die genannten Funktionen sind in der Lichtschalterstellung Auto verfügbar und können vom Fahrer zu jeder Zeit abgeschaltet werden.

Die Umsetzung der variablen Lichtverteilungen kann gemäß der in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen optischen Systeme erfolgen. Der Einsatz multifunktionaler Projektionsmodule mit den Lichtquellen Xenon oder LED, bei denen an die Stelle der Blende in der Brennebene zwischen Linse und Reflektor eine drehbare Walze oder ein Kulissensystem rückt, ist verbreitet. Die Walze enthält mehrere Konturen, die in den Strahlengang gedreht werden können. Dadurch ist es möglich, die HDG entsprechend den vorgestellten Lichtverteilungen zu formen. Nach dem gleichen Prinzip funktioniert das genannte Kulissensystem. Bei der Umsetzung des Schlechtwetterlichts wird die Lichtverteilung zusätzlich durch zwei Stellmotoren nach außen und nach unten verlagert [96]. Nach *Huhn* [54] verhindert das Divergieren der Scheinwerfer eine Strahlkreuzung, was bei Nebel hohe Leuchtdichten erzeugen kann und störend wirkt.

<sup>5</sup>Die Anhebung der Lichtverteilung um  $0,29^\circ$  bezieht sich auf die Längsachse des Scheinwerfers. Die Erhöhung der Beleuchtungsstärke bezieht sich auf eine Entfernung von 25 m.



## 2.2.4 Prädiktive Lichtsteuerung

Bei der prädiktiven Lichtsteuerung wird für die Auswahl der Lichtfunktionen zusätzlich die Ortsinformation des Navigationssystems berücksichtigt, wodurch eine vorzeitige Anpassung der Lichtverteilung an die Straßengeometrie und den Straßentyp realisierbar ist.

Nach *Lee et al.* [76] ist eine Auswahl der AFS-Lichtverteilungen, Abschnitt 2.2.3, auf Basis der Geschwindigkeitsinformation nicht ausreichend und eine zusätzliche Steuerung über die Navigationsinformation sinnvoll. Die vordefinierten Geschwindigkeiten auf der Autobahn mit 110 km/h können auf der Landstraße ebenfalls erreicht werden, wobei in dieser Situation das Anheben der HDG zu Blendungen für den Gegenverkehr führen kann, da keine bauliche Trennung vorhanden ist. Darüber hinaus werden durch die prädiktiven Streckendaten die Verkehrsrichtung (Rechts- oder Linksverkehr) und Kreuzungen erkannt [15]. Im Kreuzungsbereich werden breite Lichtverteilungen verwendet, um Radfahrer und Fußgänger frühzeitig zu erkennen.

Das dynamische Kurvenlicht, Abschnitt 2.2.2, hat auf Basis der Lenkwinkel- und Gierratensteuerung den Nachteil, dass eine Verlagerung der Lichtverteilung erst in der Kurve erfolgen kann. Nach *Huhn* [54] muss ein optimales Kurvenlicht bereits in einem Entfernungsbereich von 50 m bis 100 m, abhängig von der Geschwindigkeit, vor der Kurve die Ausleuchtung an den horizontalen Straßenverlauf anpassen. In ersten Seriensystemen wird eine vorzeitige Verlagerung des Lichtschwerpunkts auf Basis der Navigationsdaten bereits umgesetzt [16]. Zukünftige Ansätze sehen eine Adaption der Ausleuchtung auf Basis der Manöver- und Trajektorienschätzung vor [90].

Neben der navigationsdatenbasierten Lichtsteuerung eignet sich auch ein Kamerasystem dafür, den Straßenverlauf und den Straßentyp zu erfassen. *Kuhl* sieht über die Ansätze zur Fahrspurerkennung [72] einen Nutzen zur Bestimmung der Straßentopologie und folglich zur Ausleuchtung von Kuppen und Wannen im Verkehrsraum [72]. *Ewerhart* [36] zeigt die Umsetzung eines prädiktiven Kurvenlichts mittels Kamerainformationen.

## 2.3 Kamerabasierte Lichtfunktionen

Auf Basis der Dynamikparameter, der Navigationsdaten und der Wetterlage ist eine Auswahl definierter Lichtverteilungen möglich. Die Umsetzung einer situativen Ausleuchtung hingegen, die die anderen Verkehrsteilnehmer aktiv berücksichtigt, bedingt ein Kamerasystem, Abschnitt 2.3.1, und eine Erweiterung der optischen Scheinwerferkonzepte, die einen höheren Variationsgrad der Lichtverteilung zulassen. Abhängig von der Güte der Kamerainformationen und dem gewählten Scheinwerfer untergliedern sich die kamerabasierten Lichtfunktionen in die Kategorien Fernlichtassistent, kurz FLA, Abschnitt 2.3.2, gleitende Leuchtweite, kurz GLW, Abschnitt 2.3.3, und blendfreies Fernlicht, Abschnitt 2.3.4.