

1 Einleitung

Durch die Sichteinschränkungen aufgrund von Dunkelheit besteht nachts ein deutlich höheres Unfallrisiko. Trotz des geringeren Verkehrsaufkommens, ereignen sich laut dem Statistischen Bundesamt nachts ein Viertel bis ein Drittel der schweren Unfälle [1]. Vergleichbar dazu ist die Angabe von Eckert, dass 30 % der Unfälle mit Personenschäden nachts passieren [2]. Außerdem ermittelt Nagayama, dass sich die Hälfte der Unfälle bei Nacht vermeiden lässt, wenn Hindernisse 0,5 bis 1 s früher wahrgenommen werden [3]. Diese und weitere Untersuchungen verdeutlichen den Einfluss der Beleuchtung auf die Sicherheit im Straßenverkehr bei Dämmerung, Dunkelheit oder schlechten Sichtbedingungen. Demnach ist die Fahrzeugbeleuchtung eine der Schlüsselkomponenten für die Verbesserung der Verkehrssicherheit bei Nacht, was einen der Hauptgründe für die Forschung und Entwicklung in diesem Gebiet darstellt. Darüber hinaus fühlt sich laut Studien jeder zweite Fahrer nachts aufgrund der Sichtverhältnisse gestresst, was neben dem Sicherheitsempfinden auch Einfluss auf den Komfort bedeutet [4] [5].

Das der Fahrzeugbeleuchtung übergeordnete Themengebiet, der automobilen Lichttechnik hat in den letzten Jahren zahlreiche Innovationen hervorgebracht. Insbesondere die Einführung neuer Lichttechnologien, wie Gasentladungslampen oder Leuchtdioden (LED), haben zu neuen Scheinwerfersystemen geführt. Aber auch die Einführung neuer Sensoren, wie zum Beispiel Kameras oder GPS-Empfänger, haben die Grundlage für neue adaptive Systeme gelegt [6]. Neben einer situationsbasierten Anpassung des Abblendlichts gehören dazu insbesondere die lichtbasierten Assistenzsysteme. Zu dieser Kategorie zählen auch blendfreie Fernlichtassistenzsysteme, die dem Fahrer eine bessere Sicht bei Dunkelheit bieten. Neben der Automatisierung des Fernlichts besitzen diese Systeme unterschiedliche Möglichkeiten das Lichtbild stets so anzupassen, dass ein möglichst großer Teil des Fernlichts aktiv bleiben kann ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden.

Eine weitere Technologie stellt die Car2X-Kommunikation dar. Diese ermöglicht die Kommunikation des Fahrzeugs mit seiner Umgebung auf Basis einer Funkverbindung. Ein Anwendungsbeispiel ist die Kommunikation zwischen Fahrzeugen, um beispielsweise die Positionen von Unfallorten zu übertragen. Die Car2X-Technologie befindet sich aktuell in der Entwicklung und wird in den nächsten Jahren erstmals in Fahrzeugen verbaut werden. Daher werden im Rahmen der Arbeit die Möglichkeiten der Technologie für den Einsatz in der Automobilbeleuchtung untersucht.



1 Einleitung

1.1 Ziel der Arbeit

Der Ansatz der Arbeit besteht in der Verbesserung bestehender Lichtsysteme und der Realisierung von neuen Lichtsystemen auf Basis der neuen Möglichkeiten. Das Hauptziel dahinter ist die Verbesserung der Sicht des Fahrers und somit eine Steigerung des Komforts und der Sicherheit. Neben einer Verbesserung der Ausleuchtung, beinhaltet dies aber auch die Vermeidung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Darüber hinaus sind auch weitere Ziele im Rahmen der Arbeit relevant. Dazu zählen beispielsweise die Reduzierung des Energieverbrauchs oder die Reduzierung von Kosten. Die konkreten Ziele werden dazu im Rahmen einer Potenzialanalyse formuliert und darauf aufbauend die Maßnahmen und Konzepte erarbeitet. Als übergeordnetes Ziel der Arbeit wird eine Einschätzung des Potenzials durch die Car2X-Technologie angestrebt. Neben konkreten Ansätzen und deren detaillierte Untersuchung soll die Arbeit einen Anhaltspunkt zur der Nutzung der Car2X-Technologie für lichtbasierte Assistenzsysteme bieten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit wird der aktuelle Stand der Technik dargestellt und die relevanten Themengebiete beschrieben. In diesem Rahmen erfolgt auch eine grundlegende Potenzialanalyse. Auf dieser Basis werden dann konkrete Ansätze definiert, wozu die Definition der Umfänge und die Erstellung der funktionalen Konzepte gehören. Aus diesem Teil der Arbeit resultieren die synthetische Gleitende Leuchtweitenregulierung (sGLW) und die energieeffizienten Lichtfunktionen (ELF), welche die beiden Hauptfunktionen der Dissertation darstellen. Dabei handelt es sich um neue Funktionen, die auf den Vorteilen der Car2X-Kommunikation beruhen.

Anhand des Konzepts zu den beiden Car2X-basierten Lichtfunktionen erfolgt im nächsten Kapitel die Planung des Versuchsaufbaus. Dieser besteht aus einem Fahrzeug, das mit einem prototypischen Car2X-System, weiteren Komponenten und Messtechnik ausgestattet wird. Die Umsetzung der sGLW und ELF erfolgt ebenfalls anhand des Versuchsaufbaus.

Den letzten Teil bilden die Untersuchungen, welche sich sowohl auf die Technologie selbst, als auch konkret auf die beiden Car2X-basierten Lichtfunktionen beziehen. Zu Beginn werden dazu alle nicht-funktionalen Anforderungen und Erwartungen definiert, welche als Grundlage für die Untersuchungen und Messungen dienen. Diese bestehen neben statischen Messungen aus Versuchsfahrten und einer Probandenstudie. Als Ergebnis liefert die Arbeit Erkenntnisse über die Technologie und deren Besonderheiten in Bezug auf die automobilen Lichttechnik. Dazu zählt beispielsweise die Verbesserung der Detektion anderer Verkehrsteilnehmer gegenüber den ak-



tuellen Sensoren von Lichtsystemen. Ebenso werden aber auch das Potenzial und der Nutzen der beiden Funktionen untersucht. Die Ergebnisse der zugehörigen Untersuchungen liefern beispielsweise eine Aussage über das Verbesserungspotenzial gegenüber heutigen Lichtfunktionen.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Technik. Der Fokus liegt dabei auf der Fahrzeugaußenbeleuchtung und der Car2X-Technologie, welche die Grundlagen der Dissertation bilden. Darüber hinaus wird auf die weitere Sensorik, die Wahrnehmung des Menschen und die gesetzlichen Rahmenbedingungen eingegangen, welche im weiteren Verlauf dieser Dissertation insbesondere für die Auslegung der Lichtfunktionen relevant sind.

2.1 Fahrzeugbeleuchtung

Den wesentlichen Teil der Außenbeleuchtung eines Fahrzeugs bilden Scheinwerfer und Heckleuchten. Darüber hinaus zählen Klein- und Signalleuchten zur Außenbeleuchtung, welche jedoch im Rahmen dieser Dissertation aufgrund der untergeordneten Relevanz nicht betrachtet werden. Ebenso wird auf die Innenbeleuchtung eines Fahrzeugs nicht eingegangen, da diese einem anderen Zweck dient und grundlegend anderen Anforderungen genügen muss. Da auch die Heckleuchten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur am Rande betrachtet werden, werden im Folgenden lediglich die Scheinwerfer genauer beschrieben.

2.1.1 Scheinwerfer

Alle heutigen Fahrzeuge verfügen über Halogen-, Xenon- oder LED-Scheinwerfer. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden ausschließlich LED-Scheinwerfer betrachtet, Teile der Erkenntnisse sind aber auch für die beiden anderen Scheinwerfertypen gültig. Der Hauptgrund für die Fokussierung auf LED-Scheinwerfer ist die hohe Flexibilität hinsichtlich Ansteuerung und Dimmung der Scheinwerfer. Der Aufbau eines solchen Scheinwerfers ist am Beispiel des Audi A8 in Abbildung 1 dargestellt.

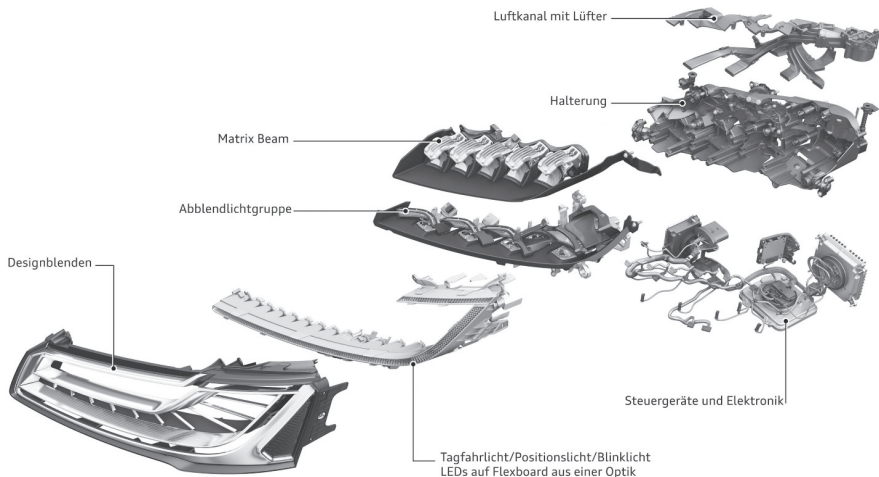


Abbildung 1: Komponenten eines Matrix-LED Scheinwerfers [7]

Das Abblendlicht wird bei diesem Scheinwerfer von mehreren LED-Modulen realisiert. Diese sind an der Halterung mit integrierter Kühlung montiert. Ebenfalls an der Halterung sind die Steuergeräte für die Ansteuerung des Scheinwerfers befestigt. Über dem Abblendlicht befindet sich das Fernlichtmodul mit einzeln ansteuerbaren Segmenten. Diese Segmentierung ist die Basis für die *Matrix LED-Technologie*. Dabei handelt es sich um ein blendfreies Fernlichtassistenzsystem, was in Kapitel 2.1.2 vorgestellt wird. Unterhalb des Abblendlichts befindet sich eine Kombination aus Blink-, Positions- und Tagfahrlicht. Das Modul enthält weiße und gelbe LEDs zur Darstellung der unterschiedlichen Lichtfunktionen. Darüber hinaus verfügt der Scheinwerfer über ein statisches Kurvenlicht zur seitlichen Ausleuchtung. Insgesamt besteht der Scheinwerfer aus über 230 einzelnen Bauteilen [8].

Auf dem Markt existieren, neben den sogenannten Voll-LED-Scheinwerfern, auch Systeme, die verschiedene Lichtquellen miteinander kombinieren. Es besteht beispielsweise die Möglichkeit einzelne Funktionen wie das Blinklicht über Glühlampen zu realisieren oder ein LED-Abblendlicht mit einem Xenon-Fernlicht zu kombinieren [9]. Darüber hinaus sind seit 2014 Laser-Scheinwerfer auf dem Markt erhältlich. Diese basieren ebenfalls auf der LED-Technik, verfügen jedoch zusätzlich über Laser-Dioden, die ein Zusatzfernlicht ermöglichen [10] [11]. Im Rahmen dieser Dissertation werden ausschließlich Voll-LED-Scheinwerfer betrachtet, welche im Folgenden zur Vereinfachung als LED-Scheinwerfer bezeichnet werden.

2.1.2 Fernlichtassistentensysteme

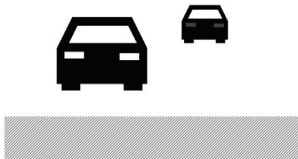
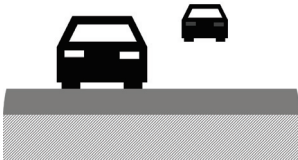
Konventionelle Scheinwerfer schalten das Fernlicht ausschließlich nach Aktion des Fahrers ein oder aus. Dieser Vorgang wird als Auf- beziehungsweise Abblenden bezeichnet. Fernlichtassistentensysteme dienen dazu diese Aufgabe zu automatisieren, wodurch eine Steigerung von Komfort und Sicherheit erreicht wird. Derartige Systeme sind bereits für viele Fahrzeuge verfügbar, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich Funktion und Aufbau. Das derzeit verbreitetste System ist der sogenannte Fernlichtassistent. Sobald ein Fahrzeug erkannt wird, blendet das System automatisch ab. Unmittelbar nachdem kein Verkehrsteilnehmer mehr erkannt wird, blendet das System selbstständig wieder auf. Der Fahrer muss dazu das System lediglich einmal über den Fernlichthebel am Lenkrad aktivieren [12].

Neben einer Erhöhung des Komforts bietet das System auch einen Sicherheitsgewinn, da eine versehentliche Blendung anderer Verkehrsteilnehmer verhindert und die kognitive Belastung des Fahrers reduziert wird. Darüber hinaus wird die Nutzung des Fernlichts durch derartige Assistenzsysteme erhöht. Nach Sprute et al. [12] beträgt die tatsächliche Aktivierungsdauer des Fernlichts durch den Fahrer bei einer Verkehrsdichte von 50 bis 100 Fahrzeugen pro Stunde auf Landstraßen lediglich 29,5 %. In derselben Studie wurde für den Fernlichtassistenten eine Aktivierungsdauer von 60,5 % ermittelt, was in etwa einer Steigerung um Faktor zwei entspricht [12].

Abhängig von der Lichtquelle lassen sich unterschiedliche Fernlichtassistentensysteme realisieren. Diese Systeme passen die Lichtverteilung adaptiv an die jeweilige Verkehrssituation an und werden daher auch als adaptive Fernlichtsysteme bezeichnet.

Eine Übersicht der heutigen adaptiven Fernlichtsysteme ist in Tabelle 1 mit dem Fernlichtassistenten als Vergleich dargestellt. Zur Veranschaulichung sind dort schematisch die Anpassungen des Fernlichts im oberen grauen Bereich dargestellt. Zusätzlich ist darunter schematisch das Abblendlicht abgebildet. Bei den dargestellten Objekten handelt es sich jeweils um ein entgegenkommendes Fahrzeug auf der linken und ein vorausfahrendes Fahrzeug auf der rechten Seite.

Tabelle 1: Übersicht lichtbasierter Assistenzsysteme

System	Mögliche Lichtquellen	Veranschaulichung
Fernlichtassistent	Halogen, Xenon & LED	
Gleitende Leuchtweitenregulierung	Xenon & LED	
Maskiertes Dauerfernlicht	Xenon & LED	
Matrix LED-Technologie	LED	

Gleitende Leuchtweitenregulierung

Entgegen dem Fernlichtassistenten wird bei diesem System nicht das gesamte Fernlicht abgeblendet, sondern die Hell-Dunkel-Grenze¹ kontinuierlich an die jeweilige Fahrsituation angepasst. Bei der Detektion eines anderen Verkehrsteilnehmers, wird die Hell-Dunkel-Grenze vertikal so verschoben, dass die Scheinwerfer den gesamten Bereich bis zum nächsten Verkehrsteilnehmer ausleuchten. Die Verschiebung geschieht im Regelfall mechanisch über eine elliptische Walze im Projektionsmodul [13] [14] [15].

¹ Die obere Kante der Lichtverteilung des Abblendlichts wird als Hell-Dunkel-Grenze bezeichnet

2 Stand der Technik

Maskiertes Dauerfernlicht

Das Konzept des maskierten Dauerfernlichts verwendet eine Blende im Strahlengang, um einen variablen Bereich des Fernlichts abzudecken und somit Verkehrsteilnehmer in diesem Bereich zu maskieren. Durch eine mechanische Verschiebung der Blende kann der abgedunkelte Bereich in seiner Größe und Position an die jeweilige Situation angepasst werden. Sobald die Umfeldsensoren ein oder mehrere Fahrzeuge detektiert, wird die Blende so verschoben, dass aus Sicht der Lichtquelle alle anderen Verkehrsteilnehmer verdeckt sind und somit nicht geblendet werden. Dieses System ermöglicht jedoch lediglich die Ausblendung eines Bereichs [15] [16].

Matrix LED-Technologie

Matrix LED-Technologie (MXB) ist die Bezeichnung für ein Fernlichtassistenzsystem, das seit 2013 erhältlich ist [8]. Das Fernlicht ist bei diesem System in mehrere Segmente unterteilt, die individuell angesteuert werden können. Die Lichtverteilung jedes Segments wird dabei durch eine oder mehrere LEDs erzeugt. Durch Deaktivierung einzelner Segmente entstehen nicht ausgeleuchtete Bereiche in der Lichtverteilung. Diese verhindern eine Blendung sich dort befindender Verkehrsteilnehmer [15]. Die Lichtverteilung des Fernlichts ist bei einzeiligen Systemen lediglich in mehrere Spalten unterteilt. Bei mehrzeiligen Systemen erfolgt zusätzlich eine Unterteilung in mehrere Zeilen, die ebenfalls individuell steuerbar sind. Eine Besonderheit dieses Systems ist, dass es vollkommen ohne Mechanik auskommt und ausschließlich die individuelle Ansteuerung der LEDs verwendet, um andere Verkehrsteilnehmer auszublenden [15].

Die Lichtverteilung der Matrix LED-Scheinwerfer mit einem ausgeblendeten Bereich ist in Abbildung 2 dargestellt. Bei diesem Scheinwerfer besteht das Fernlicht aus 25 Segmenten pro Seite. Insgesamt können so 50 Segmente individuell angesteuert werden [17].



Abbildung 2: Lichtverteilung eines Matrix LED-Scheinwerfers mit Abblendlicht und einer Lücke im Fernlicht

Weitere Konzepte

Neben den vorgestellten Konzepten existieren noch weitere Systeme. Beispielsweise kann der Scheinwerfer, wie beschrieben, um ein Zusatzfernlicht auf Basis einer Laserlichtquelle erweitert werden. Dabei wird der von einer Laserdiode erzeugte Laserlichtstrahl über einen Konverter in normales Licht umgewandelt. Durch den Konverter wird der gebündelte Strahl leicht aufgeweitet und erzeugt so zusätzlich zum Fernlicht einen Spot, der die Reichweite des Fernlichts deutlich erhöht. Dieser wird dann zusammen mit dem herkömmlichen Fernlicht durch einen Fernlichtassistenten geschaltet [10].

Darüber hinaus existieren sogenannte Pixellichtsysteme [18] [19] [20] [21]. Der Ansatz besteht darin, eine Art Videoprojektor in den Scheinwerfer zu integrieren und so die Möglichkeit einer pixelgenauen Ansteuerung des Lichtbilds zu ermöglichen. Dazu existieren verschiedene Konzepte, wie beispielsweise ein Digital Micromirror Device (DMD) oder das sogenannte Laserscanning². Diese Systeme befinden sich derzeit in der Entwicklung und sind nicht auf dem Markt erhältlich.

² Das Laserscanning bezeichnet ein System, bei dem die Lichtverteilung über einen Laserstrahl erzeugt wird, der mittels Spiegel über den auszuleuchtenden Bereich geschwenkt wird. Der Ansatz ist mit dem Funktionsprinzip von Röhrenmonitoren vergleichbar.

2.2 Car2X-Technologie

Car2X bezeichnet die Kommunikation des Fahrzeugs mit seiner Umgebung. Weitere gebräuchliche Bezeichnungen für diese Technologie sind unter anderem Vehicle-2-X oder Car-to-X. Das „X“ steht dabei immer für die möglichen Kommunikationspartner. Diese lassen sich in die Kategorien Car2Car und Car2Infrastructure aufteilen [22]. Car2Car vereint die Kommunikation zwischen Fahrzeugen, während Car2Infrastructure die Kommunikation mit der Verkehrsinfrastruktur, wie beispielsweise Lichtsignalanlagen, beschreibt [23] [24].

Die Car2X-Kommunikation erfolgt primär über ein sogenanntes Automotive-WLAN. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung der IEEE-Norm 802.11 [25] für drahtlose Funknetzwerke [26]. In Europa existiert dazu ebenfalls ein eigener Frequenzbereich, der im nachfolgenden Kapitel beschrieben ist [23] [24]. Weitere Technologien wie Mobilfunk, Visible Light Communication (VLC) oder Radio Frequency Identification (RFID) werden ebenfalls häufig mit der Car2X-Technologie in Verbindung gebracht. Diese zählen im Sinne dieser Arbeit jedoch nicht zur Car2X-Technologie und werden daher nur beiläufig betrachtet.

Das Ziel der Car2X-Technologie ist der Austausch von verkehrsrelevanten Informationen, um die Verkehrssicherheit zu steigern und neue Funktionen zu ermöglichen [23]. Die Technologie kann aus Sicht des Fahrzeugs als ein neuer Sensor aufgefasst werden, wie beispielsweise eine Fahrzeugkamera oder ein Radarsensor. Dazu werden über Funk neben grundlegenden Informationen zum Fahrzeug, die unter anderem eine Positionierung ermöglichen, auch konkrete Ereignisse wie Staus oder Unfallstellen ausgetauscht [23] [24]. Außerdem stellt die Verkehrsinfrastruktur zusätzliche Informationen bereit, die sich zum Beispiel auf die Phasen der Lichtsignalanlagen beziehen. Um diese vielfältigen Anforderungen zu erfüllen, existieren bindende Standards, welche im folgenden Kapitel beschrieben sind.

2.2.1 Standards

Um die Kommunikation einheitlich und herstellerübergreifend zu ermöglichen, existieren Standards, die sowohl die Signale als auch das Systemverhalten vorgeben [24] [27]. Diese Standards sind jedoch nicht weltweit einheitlich, sondern gelten jeweils für eine bestimmte Region. Als Basis für den japanischen Standard dienen beispielsweise das vorhandene elektronische Mautsystem *ETC* und des Vehicle Information and Communication System *VICS*. Die europäischen und US-Standards hingegen basieren beide auf der zuvor angesprochenen Norm IEEE 802.11p. Durch die Verwendung der gleichen Basis ist, trotz einiger Unterschiede, die Hardware-