

Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Jacek Roslak
aus Stargard (Polen)

Tag des Kolloquiums: 30.05.2005
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek
Korreferent: Prof. Dr. Burkard Wördenweber

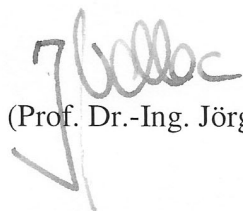
Geleitwort

Die Entwicklung von Kraftfahrzeugscheinwerfern ist durch den Zielkonflikt zwischen einer möglichst hellen Ausleuchtung des Straßenraumes und einer möglichst geringen Blendung des Gegenverkehrs geprägt worden. Da es mit heutigen Scheinwerfern, die immer nur einzelne, diskrete Lichtverteilungen erzeugen können, nicht gelingt, diesen Zielkonflikt aufzulösen, haben sich situationsabhängige Lichtverteilungen herausgebildet: Fernlicht und Begegnungslicht. Durch die in den letzten Jahren neu hinzugekommenen Lichtverteilungen des AFS (Adaptive Frontlight System) wird der Zielkonflikt zwischen Ausleuchtung und Blendung zwar abgeschwächt, aber nicht gelöst.

Herr Roslak beschreibt in seiner Dissertation ein aktives Scheinwerfersystem, mit dem der oben genannte Zielkonflikt endgültig aufgelöst wird. Mit Hilfe eines Scheinwerfers auf Basis von digitalen Mikrospiegeln erzeugt er eine Lichtverteilung, die dem Fernlicht entspricht, jedoch in den Punkten des Verkehrsraums, in dem andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden könnten, durch Abschalten einzelner Elemente des Mikrospiegels so abgedunkelt ist, dass keine Blendung erfolgt. Die dazu notwendige Information über Position, Orientierung und Relativgeschwindigkeit der anderen Verkehrsteilnehmer wird durch Auswertung verschiedener Sensorsignale gewonnen.

Die Arbeit von Herrn Roslak bezieht ihren besonderen Wert daraus, dass er das System einerseits sehr systematisch, unter Anwendung der einschlägigen Methoden des funktionsorientierten Entwurfs mechanischer Systeme, entwickelt, andererseits aber auch einen funktionierenden ersten Technologiedemonstrator aufgebaut und damit sogar Versuche mit Testpersonen durchgeführt hat. Als betreuender Hochschullehrer freue ich mich besonders darüber, dass diese Dissertation die erste ist, die im L-LAB entstanden ist, dem im Public Private Partnership von meiner Universität und der Hella KGaA Hueck & Co. gemeinsam geführten Forschungszentrum für Lichttechnik und Mechatronik. Ich wünsche der Arbeit die hohe Beachtung in der Fachwelt, die ihr als Meilenstein auf dem Weg zu aktiven Scheinwerfersystemen gebührt und hoffe, dass die von Herrn Roslak erzielten Ergebnisse schon bald Eingang in den Stand der Technik finden.

Paderborn, im Juni 2005



(Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek)

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Herzlichen Dank!

Jech Kosch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Wissensstand	3
2.1	Sehen und Wahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr	3
2.2	Gesetzliche Regelungen und Empfehlungen zur Realisierung einer adaptiven Lichtverteilung	5
2.2.1	Wichtige europäische Regelungen für Kraftfahrzeugscheinwerfer.....	5
2.2.2	Adaptive Kfz-Beleuchtung im Rahmen der ECE-Regelungen	6
2.3	Übersicht über den Stand der Technik im Bereich aktiver Scheinwerfer	8
2.4	Konzeptionen für zukünftige Kfz-Scheinwerfer	12
2.5	Vorausschauende Sensorik.....	17
2.5.1	Radar.....	17
2.5.2	Lidar	20
2.5.3	Laserscanner	21
2.5.4	Bildsensoren	23
2.6	Inter-Fahrzeug-Kommunikation.....	24
2.6.1	Funkbasiertes Ad Hoc Netzwerk zur Interfahrzeugkommunikation	25
2.6.2	Optische Interfahrzeugkommunikation	26
3	Defizite heutiger Scheinwerfersysteme und Lösungsmöglichkeiten	29
3.1	Ausgangssituation	29
3.2	Lösungsansatz Aktives Licht.....	30
4	Kollektive Ausleuchtung – Systemanalyse.....	33
4.1	Kollektive Ausleuchtung als Schnittstelle zwischen Scheinwerfer- und Fahrerassistenzsystem	33
4.1.1	Fahrzeugautonomes System	34
4.1.2	Inter-Fahrzeug-Kommunikation	35
4.2	Konzipierung des Scheinwerfersystems.....	37
4.3	Funktionsanalyse	39
4.4	Mathematische Modellierung.....	41
4.5	Anforderungen an die Hardwarekomponenten	45

5	Analyse möglicher Ausleuchtungsstrategien	51
5.1	Rahmenbedingungen für die kollektive Ausleuchtung	51
5.1.1	Geometrie des Verkehrsraums.....	51
5.1.2	Fixationsstellen.....	53
5.1.3	Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Systemkomponenten.....	54
5.1.4	Ausgestaltung der ausgeblendeten Lichtverteilungszone.....	55
5.2	Mögliche Strategien der kollektiven Ausleuchtung	57
5.3	Simulationstool.....	59
5.4	Quantitative Bewertung der Strategien anhand der Simulation	61
6	Aufbau der Versuchsträger	65
6.1	Fahrzeug-Demonstrator im Maßstab 1:8.....	65
6.2	Versuchsfahrzeug (1:1)	67
6.2.1	Sensorik	68
6.2.2	DMD-Scheinwerfer	70
6.2.3	Ansteuerungskomponenten	71
6.3	Ablauf der Signalverarbeitung	71
6.3.1	Messwertnachbearbeitung	72
6.3.2	Ansteuerung des aktiven Scheinwerfers.....	73
7	Experimentelle Ergebnisse	79
7.1	Bestimmung der Blendbeleuchtungsstärke am Auge des entgegenkommenden Fahrers	79
7.2	Bewertung des Systems durch Versuchspersonen	86
7.3	Diskussion der Ergebnisse.....	91
8	Zusammenfassung und Ausblick	93
9	Literaturverzeichnis	95

1 Einleitung

Das stetig steigende Verkehrsaufkommen verlangt vom Autofahrer neben der Konzentration auf das Führen des eigenen Fahrzeugs, ein immer stärker werdendes Reagieren auf den Verkehrsablauf und die Aktionen der anderen Verkehrsteilnehmer. Durch diese Tatsache und häufig auftretende schlechte Sichtverhältnisse verstärkt, weist das Autofahren ein hohes Unfallrisiko im Vergleich zu anderen Transportmitteln auf.

Insbesondere bei Nacht und in Dämmerung ergibt sich durch schlechte Sichtverhältnisse ein Informationsmangel für den Fahrer. Diese Aussage bestätigen auch statistische Angaben. Ca. 50 % der tödlichen Verkehrsunfälle ereignen sich bei Nachtfahrten, obwohl in dieser Zeit nur 25 % der durchschnittlichen Kilometerleistung zurückgelegt werden (Langwieder u. Bäumler 1997).

Die Sichtverhältnisse werden in einem hohen Grade durch Blendung beeinträchtigt. Das Problem der Blendung betrifft nicht nur den Begegnungsverkehr, bei dem die Blendung durch die entgegenkommenden Fahrzeuge verursacht wird, sondern auch den Kolonnenverkehr, d.h. in die gleiche Richtung fahrende Fahrzeuge, bei denen das in den Spiegeln reflektierte Licht der nachfolgenden Fahrzeuge die Sicht beeinträchtigt.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Sicherheitssysteme (wie ASP, ESP, Airbag, etc.) entwickelt, um die Sicherheit auf den Straßen zu erhöhen. Der nächste Schritt besteht in der Nutzung von Informationen über die Dynamik des eigenen Fahrzeugs und die Straßen- und Verkehrssituation im Fahrzeugvorfeld. Erste Assistenzsysteme wie z.B. Spurwechselassistent oder Night Vision sollen den Fahrer in Gefahrensituationen warnen. Es werden darüber hinaus sogar Systeme diskutiert, die die Verkehrssituation interpretieren und in kritischen Fällen die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen. In der Zukunft wird sich das Automobil zu einem in das Verkehrsgeschehen eingebundenen Mobilitätssystem entwickeln, das mit anderen Fahrzeugen sowie der Straßeninfrastruktur kommuniziert, um einen kollektiven Nutzen an Sicherheit und Komfort zu bieten. Dabei wird auch die Kraftfahrzeug-Lichttechnik eine erhebliche Weiterentwicklung erfahren.

Für die Sicherheit bei Nachtfahrten stellt eine einzige statische Lichtverteilung, die als Kompromisslösung für alle Fahrbahn-, Witterungsbedingungen und Fahrgeschwindigkeiten dienen muss, nicht die nach dem Stand der Technik optimale mögliche Lösung dar (Huhn 1999). Wesentliche Mängel der heutigen Fahrbahnausleuchtung waren der Ausgangspunkt zur Entwicklung adaptiver Scheinwerfersysteme (Adaptive Frontlighting Systems) mit weiterentwickelter Funktionalität. Auch hier bietet sich der Einsatz technischer Neuentwicklungen im Bereich der Sensorik und der Fahrerassistenz an. So wird sich durch die Verwendung von mechatronischen Scheinwerfersystemen beispielsweise der Zielkonflikt Sicht/Blendung minimieren lassen (Wallaschek 1998).

Fernziel der Entwicklung ist es, die Lichtverteilung im Verkehrsraum so zu gestalten, dass alle Verkehrsteilnehmer in ihrer Wahrnehmung bestmöglich unterstützt werden. Die heute im Kfz eingesetzten Scheinwerfersysteme müssen dazu von ihren heute diskret definierten Lichtverteilungen zu variablen, assistierenden Lichtverteilungen weiterentwickelt werden. Ausgehend vom aktuellen Entwicklungsstand, der rein „passiv“ das Ein- und Ausschalten, sowie das Umschalten zulässt, müssen Scheinwerfersysteme künftig „aktiv“ erkennen, welche Umgebungssituation vorliegt und darauf situationsabhängig reagieren (Kauschke u. a. 2004).

Ausgehend von der dargestellten Situation wird in dieser Arbeit untersucht, wie aktive lichttechnische Systeme im Kfz aufgebaut werden können, um eine kollektive Ausleuchtung des Verkehrsraums zu erreichen. Dazu werden im Anschluss an dieses einleitende Kapitel die für diese Arbeit wesentlichen Grundlagen der vorausschauenden Sensorik und der Inter-Fahrzeug-Kommunikation geschildert. Die Darstellung des Standes der Technik aktiver Kfz-Scheinwerfersysteme, die eine Patentanalyse und Konzeptionen für die Realisierung zukünftiger Scheinwerfer umfasst, endet mit der Schilderung von Defiziten heutiger Scheinwerfersysteme und daraus resultierender Lösungsmöglichkeiten. Das darauf folgende Kapitel beschreibt die Systemanalyse für die kollektive Ausleuchtung von der Konzeptionsphase bis hin zur Erstellung konkreter Anforderungen an die Hardwarekomponenten. Nach der Analyse möglicher Ausleuchtungsstrategien werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Versuchsträger dargestellt. Schließlich werden die Ergebnisse der Bewertung des aktiven Scheinwerfersystems mit Hilfe von lichttechnischen Messmethoden und durch Versuchspersonen zusammengestellt.

2 Wissensstand

2.1 Sehen und Wahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr

Die visuelle Wahrnehmung ist ein komplexer Prozess, dessen Ergebnis als Sehleistung charakterisiert wird. Die Sehleistung wird als die Fähigkeit des Sehorgans zur Erfassung und Wahrnehmung der Helligkeits-, Farb-, und Formstrukturen der Außenwelt bezeichnet (Völker 2000). Die Unterfunktionen des Sehorgans sind stets gleichzeitig wirksam und stehen in gegenseitiger innerer Abhängigkeit. Der zeitliche Ablauf dieses Prozesses spielt eine wesentliche Rolle (Jeske u. Ebert 1987). Dabei ist der Wahrnehmungsprozess darauf ausgerichtet, möglichst viele Informationen zu gewinnen.

Die Sehleistung hängt in hohem Grad von den Wahrnehmungsverhältnissen im Gesichtsfeld ab. Bei Tageslicht (photopisches Sehen) kommt es in der Regel zum Überangebot an Informationen. Hingegen ist der Fahrer bei Nacht (mesopisches Sehen) einem Defizit an Informationen ausgesetzt. Die schlechten Ausleuchtungsverhältnisse bei Dunkelheit verursachen eine deutliche Verminderung von Kontrasten. Damit wird die Sehleistung im nächtlichen Straßenverkehr primär nicht, wie bei Tageslicht, durch die Sehschärfe d.h. die Auflösung kontrastreicher Details, sondern über die Unterschiedsempfindlichkeit bestimmt. Unter dem Begriff Unterschiedsempfindlichkeit versteht man die Fähigkeit des Auges zur Wahrnehmung von gerade noch erkennbaren Leuchtdichteunterschieden.

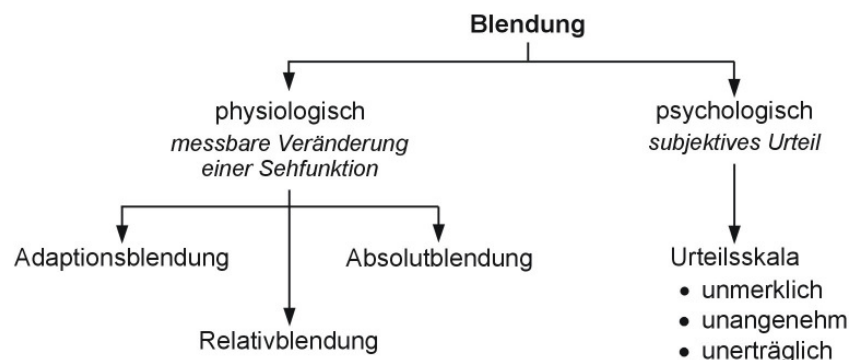


Abbildung 2.1: Unterteilung der Blendung (Völker 1999)

Das Sehen im Dunkeln ist durch extreme Wahrnehmungsverhältnisse gekennzeichnet. Sehr kleine Leuchtdichten können nicht wahrgenommen werden. Andererseits können sehr hohe Leuchtdichten zur Blendung führen und dadurch die Wahrnehmungsfähigkeit einschränken (Eckert 1993).

Dieses Phänomen ist von besonders großer Bedeutung, da die Verkehrssicherheit durch die gegenseitige Blendung der Straßenteilnehmer beeinträchtigt wird. Je nach Grad der Blendung

können Unbehagen, Unsicherheit und Ermüdung (psychologische Blendung), aber auch eine merkbare Herabsetzung der Sehleistung (physiologische Blendung) auftreten (Eckert 1993). In der Praxis treten beide Blendungsarten auf. In Anlehnung an Völker (1999) ist die Blendung in Abbildung 2.1 nach ihrer Wirkung unterteilt dargestellt.

Eine typische Blendungssituation tritt bei der Begegnung zweier Fahrzeuge auf. Die im Gesichtsfeld durch Scheinwerfer hervorgerufenen Leuchtdichteunterschiede sind dann so groß, dass der Adaptationsmechanismus des Auges überfordert wird (Kleinkes 2003). Die dadurch verursachte Einschränkung der Sehleistung ist auch nach Verschwinden der Blendbeleuchtung vorhanden und klingt exponentiell ab. Die Readaptationszeit kann etwa 1 bis 3 s betragen (Ewerhart 2002).

Tabelle 2.1: Rangordnung der Probleme bei Nachtfahrten (Ellinghaus u. Steinbrecher 1991)

Rang	Problem	Nennungshäufigkeit
1	Mit der Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge fertig werden	58 %
2	Das rechtzeitige Erkennen von Fußgängern	43 %
3	Das rechtzeitige Erkennen von Hindernissen auf der Fahrbahn	33 %
4	Das rechtzeitige Erkennen von Radfahrern	24 %
5	Die Wegweisung richtig zu erkennen	24 %
6	Das rechtzeitige Erkennen von Straßenglätte	23 %
7	Die Geschwindigkeit von Fahrzeugen richtig einzuschätzen	22 %
8	Die Entfernung von Fahrzeugen richtig einzuschätzen	19 %
9	Die eigene Müdigkeit	16 %
10	Im Falle einer Panne oder eines Unfalls schnelle Hilfe zu finden	14 %
11	Die Müdigkeit der anderen Verkehrsteilnehmer	5 %
12	Die Müdigkeit der Mitfahrer	2 %

Die Verkehrsuntersuchungen zu Schwierigkeiten und Problemen beim Fahren im nächtlichen Straßenverkehr zeigen, dass „für die Mehrzahl der Fahrer das nächtliche Fahren in der Regel eine Ausnahmesituation darstellt, in der sie sich oft an der Grenze ihres biologischen physischen Leistungsvermögens befinden“ (Hürlimann 1995). In Tabelle 2.1 wurden Probleme und Schwierigkeiten der Fahrer bei Nacht zusammengestellt. Diese Analyse bestätigt, dass die Blendung als zentrales Problem nächtlichen Fahrens erlebt wird. Die zweite Problemgruppe bildet das rechtzeitige Erkennen von anderen Verkehrsteilnehmer und Hindernissen auf der

Fahrbahn. Probleme der Entfernungs- und Geschwindigkeitseinschätzung wurden als weniger bedeutsam genannt (Ellinghaus u. Steinbrecher 1991).

2.2 Gesetzliche Regelungen und Empfehlungen zur Realisierung einer adaptiven Lichtverteilung

2.2.1 Wichtige europäische Regelungen für Kraftfahrzeugscheinwerfer

Im Rahmen der gegenwärtig in Europa geltenden ECE-Regelungen (Economic Commission Europe) sind drei Frontbeleuchtungsfunktionen: Abblend-, Fern-, und Nebellicht gesetzlich zugelassen. Diese Regelungen werden durch die Bestimmung photometrischer Werte für verschiedene Punkte im Lichtbild auf einem in 25 m Entfernung vor dem Scheinwerfer aufgestellten Schirm bestimmt (s. Abbildung 2.2). Die Scheinwerferanbauhöhe beträgt $h_s = 75$ cm, die Augenhöhe $h_A = 1,25$ m und die Straßenbreite $b_s = 6$ m. Die Linie hh bildet den Horizont, vv die Senkrechte durch die Scheinwerfermitte.

Gemäß der ECE-Regelungen wird das Abblendlicht durch eine scharfe Hell-Dunkel-Grenze (HDG) gekennzeichnet. Auf der Gegenverkehrsseite verläuft die HDG horizontal unter einem Neigungswinkel von 1 %. In Fahrtrichtung darf die HDG entlang der Linie HV-H3 unter 15° kontinuierlich ansteigen oder alternativ zunächst unter 45° entlang der Linie HV-H1 ansteigend und danach weiter entlang H1-H4 waagerecht verlaufen. Zusätzlich müssen die Bedingungen für die Beleuchtungsstärkewerte in den einzelnen Messpunkten erfüllt werden. So darf beispielsweise der sogenannte Augenpunkt des Gegenverkehrs B50L einen Wert von 0,5 lx nicht überschreiten oder der Punkt 50R muss einen Mindestwert von 12 lx aufweisen.

Der Verlauf der HDG stellt einen Kompromiss zwischen hoher Leuchtweite und niedriger Blendung dar. Der Lichtkegel des Abblendlichtes ist horizontal und vertikal unterschiedlich breit. Die Streubreite der Lichtverteilung beträgt horizontal $\pm 35^\circ$ und vertikal variiert sie im Bereich von -15° bis $+5^\circ$.

Die Lichtverteilung des Fernlichts wird stark gebündelt und mit vertikalen Streubreiten von $\pm 10^\circ$ in den Straßenraum abgestrahlt, um eine große Reichweite zu erreichen. Da der Lichtkegel des Fernlichts nicht vorgeneigt wird, darf es nur in Situationen ohne Gegenverkehr genutzt werden.

Das Nebellicht soll insbesondere die Seitenbereiche und das direkte Vorfeld beleuchten. Daher zeichnet sich diese Lichtverteilung durch eine große horizontale Streubreite ($> \pm 35^\circ$) und eine Vorneigung von 2 % aus.

2.2.2 Adaptive Kfz-Beleuchtung im Rahmen der ECE-Regelungen

Die von derzeitigen Scheinwerfersystemen realisierten grundsätzlichen Frontbeleuchtungsfunktionen können in spezifischen Anwendungssituationen nahezu optimale Ergebnisse liefern. Ihre Funktionalität in darüber hinaus gehenden Bereichen ist aber als suboptimal anzusehen. Aus diesem Grunde wurde das internationale EUREKA-Forschungsprojekt 1403 „Advanced Frontlighting Systems“ ins Leben gerufen. Im Rahmen des Projektes befasst sich eine Expertengruppe mit der konstruktiven Entwicklung und der Formulierung technischer Regeln für AFS. Diese Gruppe wird von Vertretern aus den Bereichen Automobilhersteller, Zulieferer sowie von Forschungsinstituten und Prüfstellen gebildet. Zunächst wurde eine Marketingstudie durchgeführt, um Fahrerwünsche und -beschwerden zu untersuchen. Aufgrund der Untersuchungen wurden neue Lichtfunktionen für Stadt, Autobahn, Landstraße und Kurvenfahrt sowie Schlechtwetter definiert (s. Abbildung 2.3). Es werden auch weitere Funktionen wie das Überkopf-Sehzeichenlicht zur Beleuchtung von Verkehrszeichen, speziell auf der Autobahn, oder Tagfahrlicht diskutiert. Das Ziel ist dabei, eine optimale Lichtverteilung für die Fahrbahnausleuchtung je nach Straßen- und Umweltsituation bereitzustellen.

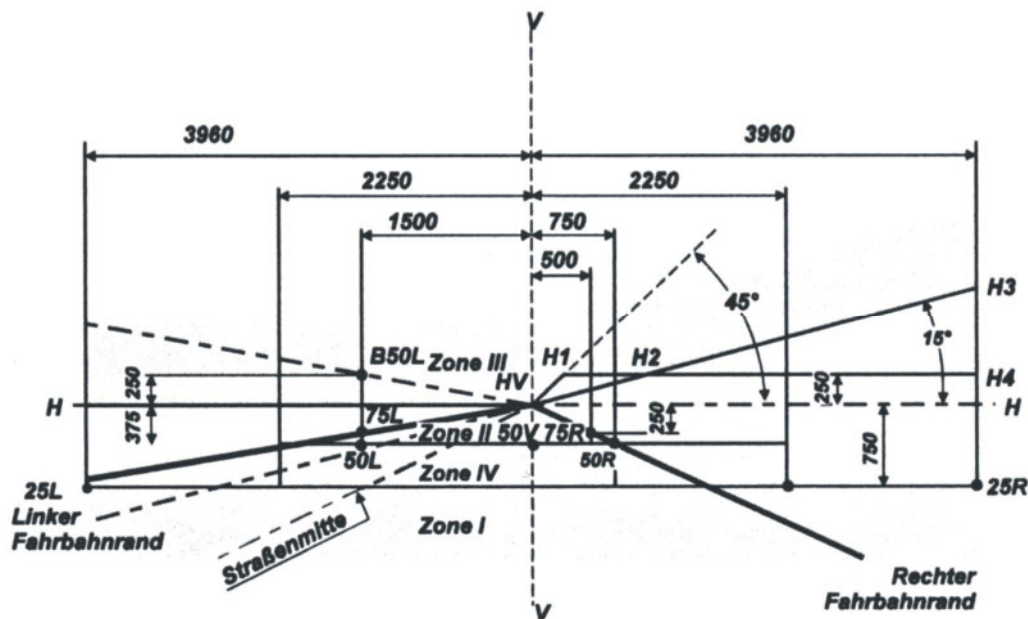


Abbildung 2.2: Messschirm aus ECE-Regelung (Huhn 1999)

Für die Stadtlichtverteilung stehen eine breite Ausleuchtung der Fahrbahn und eine gleichmäßige Vorfeldausleuchtung im Mittelpunkt der Betrachtung. Wichtige Aspekte sind hier auch die Beleuchtung von Verkehrszeichen und die sichere Erkennbarkeit des Kfz-Signalbildes.

Das Autobahnlicht soll die angehobene symmetrische Hell-Dunkel-Grenze aufweisen, um eine größere Reichweite zu erzielen ohne dabei den Gegenverkehr zu blenden (Hella Review

2000). Aufgabe dieser Lichtverteilung ist auch eine Verringerung der Rückspiegelblendung gegenüber dem heute verwendeten Abblendlicht.

Bei Nachtfahrten auf Landstraßen ist das Informationsdefizit gegenüber dem Tageslicht am größten. Die Lichtverteilung für Landstraßen soll neben der Erkennung des Fahrbahnverlaufs auch die Erkennung von Hindernissen in einem sicheren Abstand sowie eine ausreichende Ausleuchtung von Verkehrszeichen gewährleisten. Aufgrund der geringen Breite europäischer Landstraßen stellt hier die Blendung ein wesentliches Problem dar. Es wird empfohlen, den Wert von 1 lx am Auge des entgegenkommenden Fahrers und von 2 lx im Bereich der Innenspiegel und rechts vorausfahrender Fahrzeuge nicht zu überschreiten (Damasky 1995).

Das Landstraßenlicht soll daher insbesondere den Kompromiss zwischen möglichst guter Ausleuchtung des Verkehrsraums und minimaler Blendung des Gegenverkehrs darstellen.

Beim dynamischen Kurvenlicht folgt der Lichtkegel dem Straßenverlauf, so dass auch Kurven gut ausgeleuchtet werden. Die statische Variante dieser Funktion schaltet einen zusätzlichen Lichtanteil zur besseren Ausleuchtung der einmündenden Straße beim Abbiegen zu.

Bei der Auslegung eines Schlechtwetterscheinwerfers sollen Nebel, Regen, Schneefall oder nur die nasse Straße in Betracht gezogen werden. Für diese Situationen soll daher eine universelle Lichtverteilung erzeugt werden.

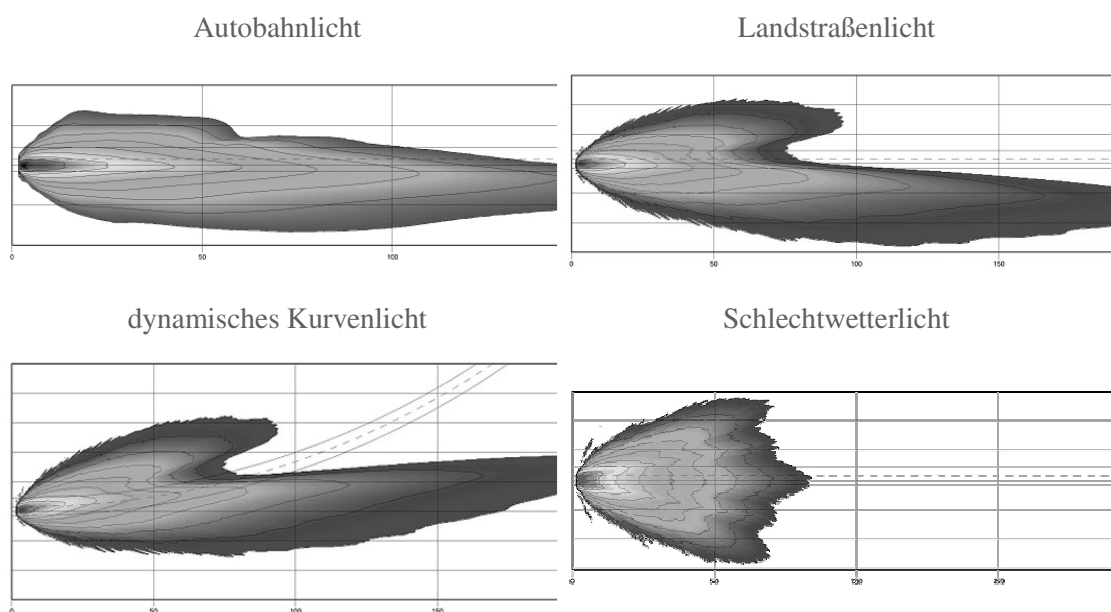


Abbildung 2.3: AFS-Lichtfunktionen (Hella Review 2000)

Abgesehen von neuen AFS-Funktionen ist es jedoch innerhalb von gültigen ECE-Regelungen möglich, eine situationsabhängige Frontbeleuchtung zu realisieren und dadurch eine Erhöhung der Ausleuchtungsqualität zu erreichen. Huhn weist beispielsweise darauf hin, dass auf der Autobahn eine größere geometrische Reichweite durch eine von der Fahrgeschwindigkeit

abhängige, dynamische Leuchtweiterregelung erzielt werden kann (Huhn 1999). In Tabelle 2.2 wurden Ergebnisse einer Studie von Schmidt-Clausen und Finsterer (1989) zusammengefasst. In dieser Studie wurde die Abhängigkeit des Anstiegs der geometrischen Reichweite und der daraus resultierenden Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung von der Scheinwerferneigung von -1% auf $0,5\%$ untersucht. Es wird darin empfohlen, die Scheinwerferneigung erst ab einer gewissen Geschwindigkeit anzuheben und die Anhebung möglichst kontinuierlich erfolgen zu lassen. Eine sprunghafte Änderung der Reichweite kann eine Irritation des Fahrers verursachen.

Tabelle 2.2: Theoretische geometrische Reichweite am linken Fahrbahnrand und durchschnittliche Erkennbarkeitsentfernung von Objekten, abhängig von der Scheinwerferneigung (Schmidt-Clausen u. Finsterer 1989)

Scheinwerferneigung N/%	$-0,5\%$	-1%	$-1,5\%$
Geometrische Reichweite d/m bei einer Scheinwerferanbauhöhe von $h=65\text{ cm}$	130	65	43
Erkennbarkeitsentfernung d/m Fahrbahnrand links bei einer Scheinwerferanbauhöhe von $h=54\text{ cm}$	59	51,4	44,2
Erkennbarkeitsentfernung d/m Fahrbahnrand rechts bei einer Scheinwerferanbauhöhe von $h=54\text{ cm}$	75,4	72,6	70,8

Ein Beispiel eines situativ-adaptiven Frontbeleuchtungssystems wurde von Damasky (1995) dargestellt. Mit diesem zukünftigen Scheinwerfer würde der komplette Straßenraum ausgeleuchtet. Der Verkehrsraum vor dem Fahrzeug würde mit Hilfe eines Umfeldsensors erfasst. Nach der Analyse der Situation würden die Bereiche, in denen das Licht zur Blendung führen könnte, nicht ausgeleuchtet. Somit könnte die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer vermieden werden. Das System könnte auch Hindernisse oder Fußgänger detektieren und in ihre Richtung ein separates Lichtbündel richten.

2.3 Übersicht über den Stand der Technik im Bereich aktiver Scheinwerfer

Die ersten Konzepte der Realisierung aktiver Ausleuchtungssysteme erschienen schon in den achtziger Jahren. Da die Realisierung solcher Systeme nur auf Basis sehr fortgeschrittener Sensor- und Scheinwerfertechnologie möglich ist, wurden die ersten Forschungsprojekte erst Ende der 90er Jahre initiiert. Allerdings gibt es bis heute noch keine konkreten Umsetzungen. Daher ist die Analyse des Stands der Technik ausschließlich auf die Patentenrecherche beschränkt.

Eine der ersten Patentschriften, die sich mit einer adaptiven Lichtverteilung unter Benutzung von Sensorik und Informationsverarbeitung beschäftigt, ist das Patent DE3601388A1 von 1986. In dieser Erfindung wurden Verfahren zur Optimierung der Lichtverteilung entsprechend vorliegender Einflussfaktoren beschrieben. Dabei soll mit mindestens einem Sensor,

der vorzugsweise eine Diodenmatrix ist, die Verkehrssituation registriert werden. Aus dieser wird dann mittels Mikroprozessor eine der Situation entsprechende Lichtverteilung generiert. Parameter für die Steuerung sind nach dieser Erfindung u.a. die Fahrbahnführung, die Fahrbahnbeschaffenheit, die Witterung und die Verkehrsdichte.

Weitergehende Schriften finden sich erst ein Jahrzehnt später. So beschreibt das Patent DE19713884A1 aus dem Jahr 1997 ein Verfahren zur Steuerung der Leuchtweite und Leuchtrichtung. Hier hat der Erfinder eine Bildkamera zur vorausschauenden Bestimmung des Fahrbahnverlaufes eingesetzt. Dabei ist auch angedacht, die Regelung der Lichtverteilung in Abhängigkeit von anderen Fahrzeugen vorzunehmen und eventuelle Steigungen bzw. Gefälle der Fahrbahn zu berücksichtigen. Dabei könnte der Fahrbahnverlauf entweder durch Auswertung der Fahrbahnmarkierungen, oder durch die Registrierung von nicht zur Fahrbahn gehörenden Objekten, wie z.B. Leitpfosten und Bäumen, ermittelt werden. Nach der Patentschrift lässt sich über eine Regulierung der Leuchtweite und -richtung unter Berücksichtigung einer Objekterkennung die Ausleuchtung der Verkehrssituation optimieren und die Blendung entgegenkommender und vorausfahrender Fahrer durch die Regelung vermeiden.

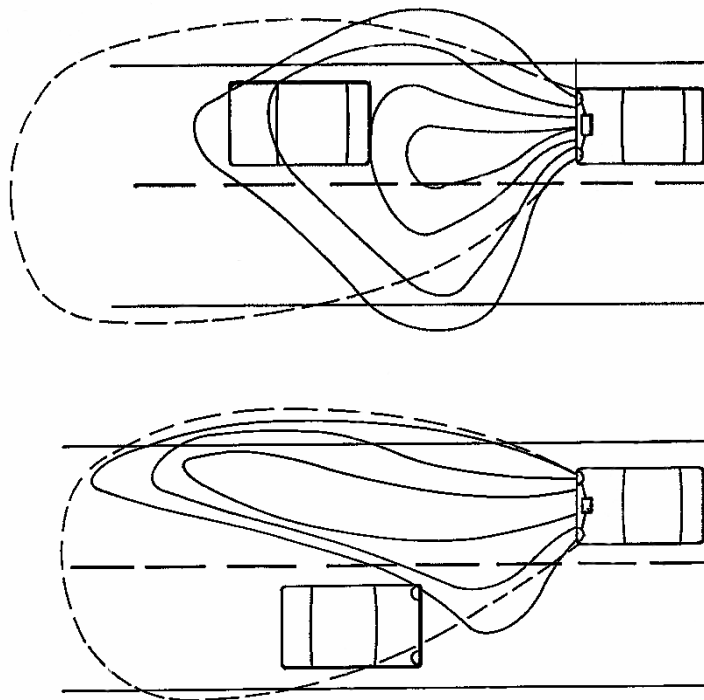


Abbildung 2.4: Blendungsvermeidung durch die Absenkung der HDG auf der eigenen Fahrbahn (oben) und auf der Gegenfahrbahn (unten) (DE 19716784 A1)

Die Vermeidung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer ist in der Erfindung DE19716784A1 ebenfalls von Bedeutung. Gegenstand dieser Patentschrift ist die Erkennung anderer Fahrzeuge, z.B. durch Radar, und eine Veränderung der Scheinwerferlichtbündel, um eine Blendung der anderen Fahrzeuge zu vermeiden. Dabei soll bei einem vorausfahrenden

Fahrzeug die Hell-Dunkel-Grenze auf der eigenen Fahrbahn abgesenkt werden, um den vorausfahrenden Fahrer nicht zu blenden. Bei einem entgegenkommenden Fahrzeug soll die HDG auf der Gegenfahrbahn entsprechend gesenkt werden (s. Abbildung 2.4). Die Übergänge sollen dabei fließend erfolgen, um eine Irritation des Fahrers zu vermeiden, mit anderen Worten soll das Absenken bzw. Erhöhen der HDG kontinuierlich und nicht sprunghaft erfolgen. Ebenfalls ist vorgesehen, dass die Beleuchtungseinheit automatisch Rechts- oder Linksverkehr erkennt, was beispielsweise durch eine Häufigkeitsverteilung der Position entgegenkommender Fahrzeuge erreicht werden kann. Unterschiedlichen Straßentypen soll aufgrund der Fahrzeuggeschwindigkeit Rechnung getragen werden. Dabei soll bei niedrigen Geschwindigkeiten eine stärkere horizontale Streuung des Lichtes erzeugt werden. Je schneller das Fahrzeug wird, desto schmaler soll auch die jeweilige Ausleuchtung werden. Weitergehend kann die Lichtverteilung entsprechend dem Straßenverlauf angepasst werden.

In der Patentschrift DE19737653A1 wird hauptsächlich ein Mikrospiegelsystem beschrieben. Interessant sind die hierbei genannten Einsatzgebiete dieses Spiegels. So soll eine ausreichende Beleuchtung von Verkehrszeichen gewährleistet werden, ohne den Gegenverkehr zu blenden. Ebenfalls wird auch hier eine Anwendung für Berg- und Talfahrt sowie Kurvenlicht angegeben. Bei der Konzeption mit Hilfe dieser Erfindung soll der Gegenverkehr nicht aus der Lichtverteilung ausgeschnitten werden, sondern die Beleuchtungsstärke soll gerade so niedrig sein, dass sie den gesetzlichen Vorschriften entspricht. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass diese vorgegebenen maximalen Lichtwerte eine Blendung nicht zwangsläufig unter allen Umständen vermeiden.

In dem Patent DE 197 56 574 A1 ist eine Beleuchtungseinheit für ein Fahrzeug dargestellt. Diese Einheit besitzt eine Umgebungsdetektionsvorrichtung zum Feststellen von Informationen über die Form der Straße, die Position des Fahrzeugs und die Überprüfung, ob ein entgegenkommendes oder vorausfahrendes Fahrzeug erfasst wird.

Eine elektronische Steuereinheit steuert die Beleuchtungseinrichtung. Die elektronische Steuereinheit wird mit Signalen von einem Lenkwinkelsensor, einem Fahrzeuggeschwindigkeitssensor, einem Bremsaktivierungssignal und mit Detektionssignalen von einem optischen Sensor und einem Fahrzeugabstandsradarsensor mit Daten versorgt.

Der optische Sensor umfasst einen Blendsensor (einen CCD- oder CMOS-Bildsensor), einen Beleuchtungsstärkesensor und einen Bildaufnahmesensor. Der optische Sensor wird verwendet, um das Vorhandensein des Scheinwerfers eines entgegenkommenden Fahrzeugs oder des Rücklichts eines vorausfahrenden Fahrzeugs festzustellen. Dieser Sensor dient auch zur Bestimmung der Umgebungsbeleuchtungsstärke des Fahrzeugs.

Das Fahrzeugabstandsradar wird verwendet, um den Abstand zwischen dem sensorbestückten und dem vorausfahrenden Fahrzeug zu bestimmen.

Als mögliche Lösung für die komplexen Algorithmen für die Lichtsteuerung gibt die DE19815414A1 Fuzzylogik und verlaufsabhängige Berechnungen an. Dabei soll die Verkehrs-

situation annähernd aus Schätzwerten bestimmt werden, die auf Informationen aus der Umfeldsensorik basieren. Wichtig ist außerdem, dass der Übergang von heller zu dunkler Beleuchtung schnell erfolgen soll, um ein Blenden anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Ein Wechsel zur weiten Ausleuchtung soll aber langsam erfolgen, damit Irritationen des Fahrers vermieden werden.

Ein System für die Erzeugung der variablen Lichtverteilung ist im Patent US006049171A dargestellt. Das System, dessen Grundaufbau in Abbildung 2.5 gezeigt ist, basiert auf der Detektion der Scheinwerfer von entgegenkommenden Fahrzeugen und den Rückleuchten von vorausfahrenden Fahrzeugen.

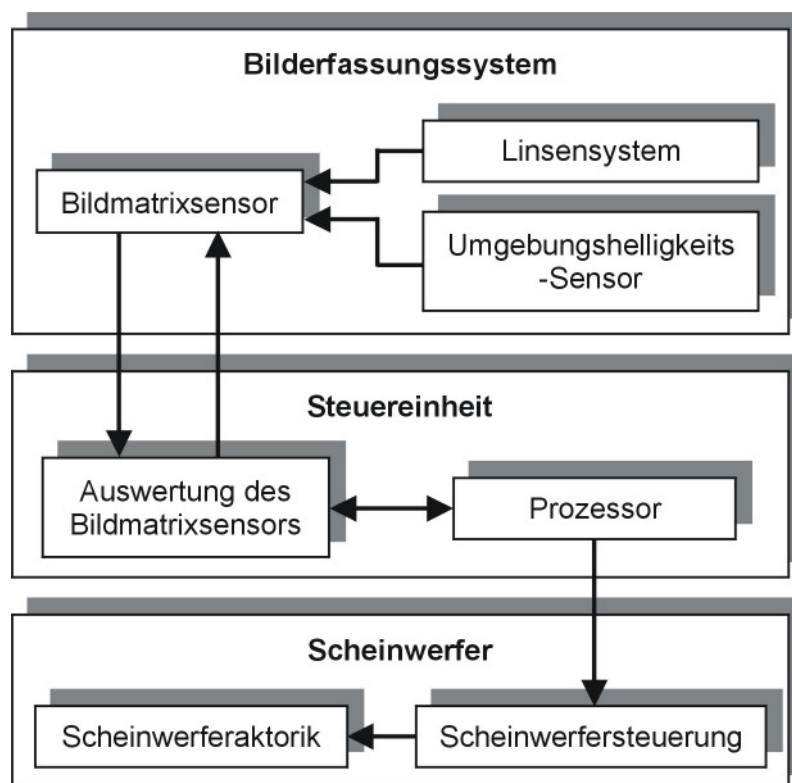


Abbildung 2.5: Grundaufbau des Scheinwerfersystems

Die Scheinwerfereinrichtung weist ein Bilderfassungssystem, eine Steuereinheit und ein stufenlos einstellbares Scheinwerfersystem auf. Das optische System besteht aus einem Paar von Linsen, einem Linsenshalter und einem Bildmatrixsensor. Die Linsen sind vertikal so zueinander angeordnet, dass sie im allgemeinen die gleichen Sichtfelder abbilden.

Eine Linse wird mit einem roten Filterfarbstoff ausgebildet, um Licht mit Wellenlängen größer als 600nm durchzulassen und damit nur rote Lichtstrahlen z.B. von Rückleuchten auf eine Hälfte des Bildmatrixsensor zu fokussieren. Die von nichtroten Lichtquellen durchgelassene Lichtmenge wird stark reduziert, während Lichtstrahlen von Rückleuchten voll

durchgelassen werden. Damit wird die relative Helligkeit der Lichtstrahlen von Rückleuchten auf dem Bildmatrixsensor stark erhöht.

Die zweite Linse wird mit einem cyanblauen Filterfarbstoff ausgebildet, um Licht mit Wellenlängen kleiner als 600 nm durchzulassen und damit Lichtstrahlen vom blauen Ende des sichtbaren Spektrums auf die andere Hälfte des Bildmatrixsensors zu fokussieren. So wird das meiste Licht von Quellen wie z.B. Scheinwerfern durchgelassen, während der Lichtanteil von dem roten Ende des Spektrums blockiert wird.

Als Bildmatrixsensor wird eine CMOS-Kamera eingesetzt. Um die räumliche Trennung der von den Linsen durchgelassenen Lichtstrahlen zu gewährleisten, wird der Linsenhalter mit Ausschnitten vorgesehen und aus einem Licht absorbierenden Material gebildet und bedeckt.

Die Scheinwerfersteuerung verarbeitet Signale aus der Steuereinheit und in Abhängigkeit vom Aufbau des Scheinwerfersystems verändert sie die Intensität des ausgestrahlten Lichts oder die Richtung des ausgesandten Lichtbündels.

Wenn mit der Sensorik des Bilderfassungssystems ein vorausfahrendes Fahrzeug detektiert wird, wird die Intensität des ausgestrahlten Lichts reduziert. Wird ein entgegenkommendes Fahrzeug erkannt, verändert das Scheinwerfersystem sowohl die Intensität des Lichts als auch die Richtung des vom Scheinwerfer ausgesandten Lichtbündels.

2.4 Konzeptionen für zukünftige Kfz-Scheinwerfer

Für den Wahrnehmungsprozess visueller Informationen aus der unmittelbaren Fahrzeugumgebung im Straßenverkehr bei Nacht ist das Scheinwerfersystem von zentraler Bedeutung. Die Scheinwerfer haben die Aufgabe das Fahrzeugvorfeld auszuleuchten, damit der Lenker die Verkehrssituation erfassen und Hindernisse erkennen kann.

Bei den heute verwendeten Scheinwerfern unterscheidet man im wesentlichen zwei Grundbauformen: Reflexions- und Projektionssysteme.

Bei einem klassischen Reflexionssystem handelt es sich um einen paraboloidförmigen Reflektor, der die von der Lichtquelle erzeugten Lichtstrahlen sammelt und in die gewünschte Richtung lenkt. Das Fernlicht wird über die Positionierung der Glühlampenwendel im Brennpunkt des Parabolreflektors realisiert. In diesem Fall werden die Lichtstrahlen parallel zur Symmetrieachse reflektiert (s. Abbildung 2.6).

Beim Abblendlicht liegt die Lampenwendel vor dem Reflektorbrennpunkt, so dass die Strahlen nach der Reflexion mit einer Neigung zur Reflektorachse austreten. Diese Defokussierung führt dazu, dass der Lichtanteil der oberen Reflektorhälfte nach unten gerichtet und damit auf die Fahrbahn gestrahlt wird. Um eine Blendung zu vermeiden, wird unterhalb der Abblendlichtwendel eine Abdeckkappe positioniert. Auf diese Weise werden die Strahlen aus dem unteren Reflektorteil abgedeckt, weil sie zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen würden.

Die Entwicklung computerunterstützter Simulationstechniken ermöglichte auch die Berechnung sogenannter Frei-Form-Reflektorflächen. Ein Vorteil der FF-Technik liegt in der Möglichkeit der Verwendung einer optikfreien Streuscheibe, so dass ein variables Erscheinungsbild erzeugt werden kann. Dadurch lässt sich auch die untere Reflektorhälfte fürs Abblendlicht nutzen. Die direkte Abstrahlung von Licht aus der Lampe und somit die Blendung des Gegenverkehrs wird über den Einsatz einer Strahlenblende vor der Lichtquelle verhindert.

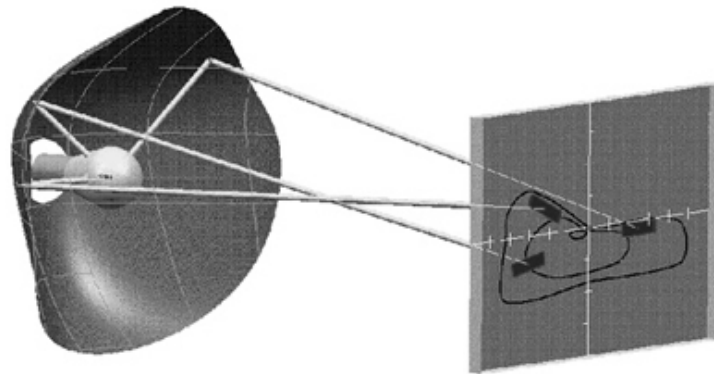


Abbildung 2.6: Funktionsweise eines Reflektionssystems (Hella Review 2000)

Die Projektionstechnik wurde Mitte der achtziger Jahre als neue Scheinwerferbauart etabliert. Mit einem deutlich geringeren Öffnungsquerschnitt ermöglichen Projektionsscheinwerfer die Erzeugung von Lichtverteilungen, wie sie bisher nur mit großflächigen Reflexionsscheinwerfern möglich waren. Abbildung 2.7 zeigt den Aufbau eines Projektionsmoduls mit einem elliptischen Reflektor und einer in seinem Brennpunkt platzierten Lichtquelle. Das Licht wird gesammelt und in dem zweiten Brennpunkt des Reflektors gebündelt, der mit dem einer Sammellinse zusammenfällt. Zwischen Lampe und Linse befindet sich eine Blende, deren Abbildung für die exakte Hell-Dunkel-Grenze sorgt. Um beim Projektionsscheinwerfer eine Lichtverteilung mit betonter Seitenausleuchtung und ein deutliches Maximum in der Mitte zu erreichen, wird auch hier die FF-Technik für die Berechnung der Reflektorflächen eingesetzt. Durch den Einsatz dieser Technik können zusätzlich die Lichtverluste an der Blende verringert werden.

Neben der Reflektortechnologie haben vor allem neue Leuchtmittel einen wesentlichen Beitrag bei der Entwicklung der Scheinwerfersysteme geleistet. Ein Durchbruch beim technologischen Wandel der Lichtquellen wurde 1908 mit dem Einsatz von elektrischen Glühfadenlampen erzielt. Sechzehn Jahre später wurden die ersten Zweifadenlampen fürs Automobil eingesetzt. Dadurch war es möglich, die Erzeugung vom Abblend- und Fernlicht mit einem Reflektor zu realisieren. Der nächste Schritt bei der Verbesserung der Lichtstärke bildete die Verwendung von Halogenlampen. Der komplizierte Halogenkreisprozess war aber erst Anfang der 60er Jahre realisierbar. Seit 1991 sind Gasentladungslampen (GDL = gas discharge lamp) zum Einsatz in Scheinwerfern in Deutschland zugelassen. Die Xenon-

Lampen erzeugen gegenüber Halogen-Lampen einen ca. 2,5-fach höheren Lichtstrom bei nur etwa 70 % der elektrischen Leistung. Das Zünden und Stabilisieren des Lichtbogens bei dieser Lampenart erfordert allerdings einen hohen elektronischen Aufwand (Hege 1997).

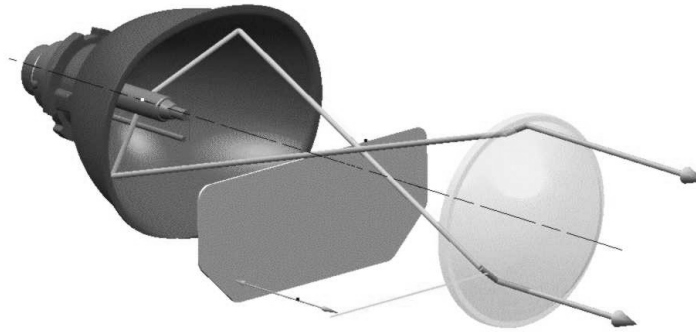


Abbildung 2.7: Funktionsweise eines Projektionssystems (Hella Review 2000)

Im Unterschied zu konventionellen Systemen sollen zukünftige Scheinwerfer nicht nur eine statische Lichtverteilung erzeugen, sondern diese variabel an die Verkehrssituation anpassen. Für die Realisierung zukünftiger Scheinwerferfunktionen scheinen zwei gegensätzliche Methoden vielversprechend zu sein: die subtraktive und die additive Erzeugung der Lichtverteilung (Kauschke u. a. 2003).

Die subtraktiven Scheinwerfersysteme arbeiten mit Blenden, die statisch oder beweglich montiert werden können. Das Beispiel eines derartigen Systems stellt ein Spiegelarray-Scheinwerfer dar. Das Kernelement des Scheinwerfers, das das erzeugte Lichtbild formt, ist ein DMD-Chip. Das Digital MicroMirror Device besteht aus einer Matrix mikroskopisch kleiner Spiegel, deren Anzahl über die Auflösung des Systems entscheidet. In der DMD-Technologie werden Auflösungen von bis zu 1280×1024 Pixeln erreicht, was einer Anzahl von 1,3 Millionen Elementen entspricht. Als Element ist hier eine Speicherzelle und ein auf der Speicherzelle beweglich angebrachter Mikrospiegel gemeint. Der Bewegungsbereich (Kippwinkel) der Mikrospiegel liegt bei $\pm 10^\circ$, wobei nur die Endpositionen stabil und ansteuerbar sind. Dies bedeutet, dass die Spiegel sich nicht kontinuierlich bewegen, sondern nur von einer in die andere Endposition kippen lassen. Diese zwei diskreten Positionen werden „0“ und „1“ genannt. Die Bewegung der Spiegel erfolgt über die Speicherzellen. Unter jedem Spiegel befinden sich an den gegenüberliegenden Ecken zwei Elektroden der Speicherzelle, an die ein elektrisches Potenzial gelegt wird. Über dieses Potenzial entsteht eine Anziehungskraft zwischen Spiegel und Elektrode, welche wiederum zu einer Bewegung des Spiegels führt. Um die Robustheit der Spiegelbewegung zu erhöhen und ihre Rückstellung sicher zu stellen, wird die Spiegelaufhängung unter eine elektrische Vorspannung gesetzt. Ein Zyklus, vom Schreiben eines Bits bis zum Erreichen der Endposition des Spiegels, dauert ca. $15 \mu\text{s}$.

In Abbildung 2.8 wird die Funktionsweise eines DMD-Scheinwerfers veranschaulicht. Das durch die Lichtquelle erzeugte Licht wird vom Reflektor gesammelt und in der Richtung der Sammellinse gelenkt. Die Linse richtet das Lichtbündel auf die Spiegel des DMD-Chips. Mikrospiegel, die in der Position „0“ eingestellt sind, lenken den auf sie fallenden Lichtanteil zum Absorber, so dass die ihnen entsprechenden Bereiche auf der Projektionsfläche nicht ausgeleuchtet werden. Die in der Endposition „1“ stehenden Spiegel richten die ihnen zugeordneten Lichtstrahlen auf den Projektionsbereich. Durch die Ansteuerung jedes Spiegels des DMD-Chips kann also die gewünschte Lichtverteilung „pixelweise“ geformt werden. Dadurch, dass die Spiegel nur zwei definierte Positionen einnehmen können, lässt sich das Licht nicht lenken, sondern nur ausblenden. Diese Tatsache hat einen negativen Einfluss auf die Effizienz des Systems und erschwert die Erzeugung von Helligkeitsabstufungen.

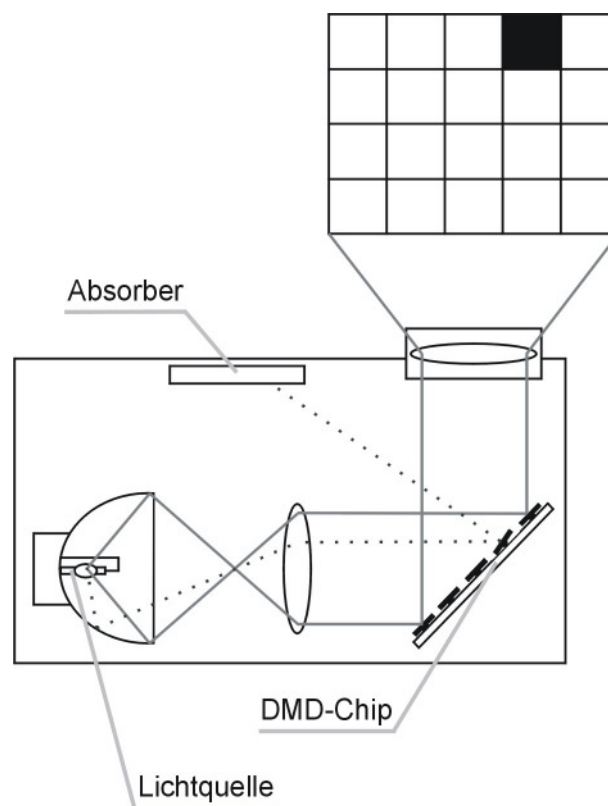


Abbildung 2.8: Funktionsweise des DMD-Scheinwerfers

Eine Alternative für das oben beschriebene subtraktive System stellt die additive Erzeugung der Lichtverteilung dar. Hier werden die einzelnen Segmente des Lichtbildes über separate Scheinwerfermodule generiert. Durch die individuelle Ansteuerung jedes Moduls wird die Erzeugung einer variablen Lichtverteilung ermöglicht.

Für die Realisierung einer solchen Scheinwerferart bietet sich der Einsatz von Leuchtdioden an. Durch den konstanten Anstieg der Leistungsfähigkeit von LEDs in den letzten Jahren

erscheint ihr Einsatz für die Fahrzeugbeleuchtung immer vielversprechender. Insbesondere aus der raschen Entwicklung der InGaN-Leuchtdioden und vor allem der weißen LEDs ergeben sich neue Möglichkeiten diese Lichtquellenart im Bereich der Scheinwerfer einzusetzen. Dies ist jedoch erst dann möglich, wenn die Lichtströme und Wirkungsgrade sowie die Leuchtdichten von LEDs mit denen von konventionellen Lichtquellen vergleichbar werden. Die größte Herausforderung stellt die Erzeugung von ausreichenden Leuchtdichten und der erforderlichen Gradienten/Intensitäten in der Lichtverteilung dar.

Um diese Anforderungen erfüllen zu können, kann ein Array aus einer Vielzahl von einzelnen adressierbaren LED-Chips oder Segmenten des Arrays zusammengestellt werden (s. Abbildung 2.9). Die Verringerung der Modulanzahl lässt sich über eine höhere Packungsdichte erreichen. Die einzelnen Module werden durch eine vorgeschaltete Leistungselektronik angesteuert. Damit ist die Möglichkeit gegeben, variable Lichtverteilungen auf der Fahrbahn zu erzeugen (Schiermeister u. a. 2003).

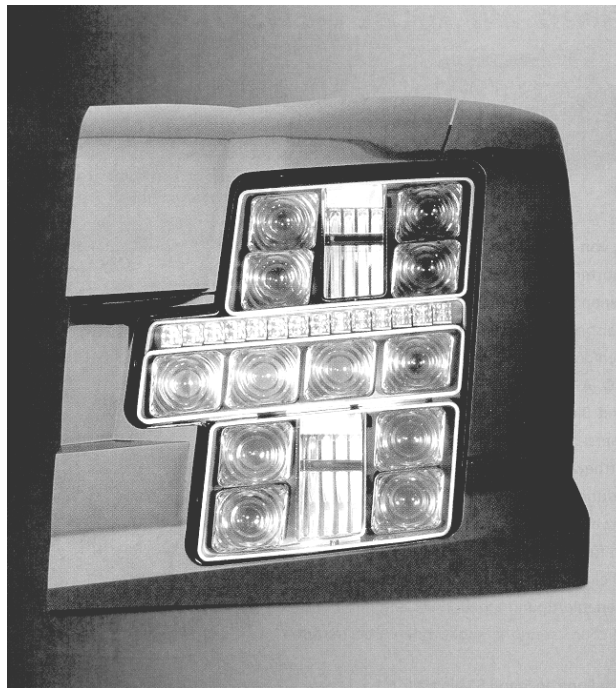


Abbildung 2.9: Prototyp eines Voll-LED-Scheinwerfers (Schiermeister u. a. 2003)

2.5 Vorausschauende Sensorik

Sensoren, die gleichzeitig Abstände, Relativgeschwindigkeiten und die Gestalt von bewegten und stationären Objekten in der Umgebung eines Messfahrzeugs messen, können die gewonnenen Werte durch Beobachtung über die Zeit klassifizieren und eine Interpretation des Szenarios rings um das Fahrzeug ermöglichen. Diese werden als vorausschauende Sensoren bezeichnet.

Die Entwicklung neuer Sensorsysteme im Automobilbereich wie Radar, Laser Scanner oder Video Sensoren wurde innerhalb der letzten Jahre sehr stark forciert, da sie als Kernstück künftiger Fahrerassistenzsysteme von hoher technischer Bedeutung sind. Die heute verfügbaren Sensorprinzipien sind in Abbildung 2.10 zusammengestellt. Jeder dieser Sensoren liefert spezifische Informationen über die Fahrzeugumgebung, so dass die Auswahl des geeigneten Systems für eine bestimmte Applikation individuell erfolgen muss.

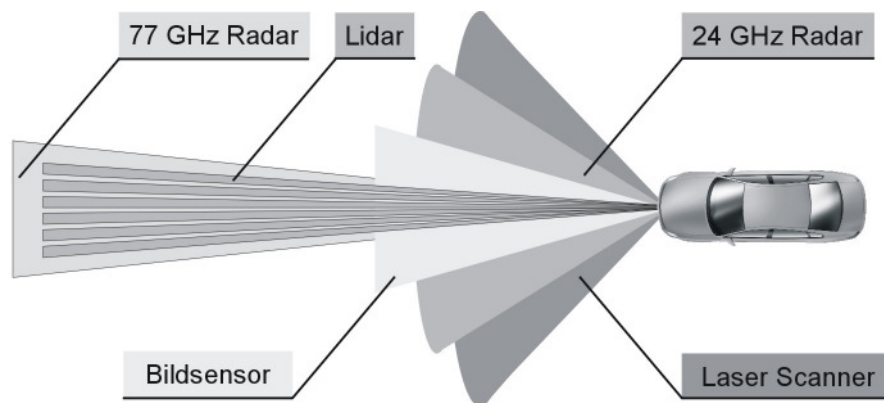


Abbildung 2.10: Vorausschauende Sensoren – Übersicht

Die Qualität der Sensordaten kann durch die Angabe von entsprechenden Detektionskenngrößen wie Auflösung, Messbereich oder Eindeutigkeitsbereich abgeschätzt werden. Neben der Objekterkennung kommt der nachgeordneten Signalverarbeitung eine erhebliche Bedeutung zu.

2.5.1 Radar

Unterschiedliche Radarsysteme (**R**adiation **D**etecting and **R**anging) werden heutzutage für verschiedene Automobilapplikationen entwickelt. Das Ziel ist es, das Fahren komfortabler und sicherer zu machen. Die Radarsensorik weist im Gegensatz zu anderen Sensorprinzipien besonders gute Allwettereigenschaften auf. Andere Sensorarten wie z.B. optische Sensoren können zuverlässige Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessungen in Mehrzielsituationen nicht bei jedem Wetter bieten. Ein Radarsensor kann von Materialien mit kleiner Dielektrizität

verdeckt werden ohne dass seine Funktion darunter leidet, so dass er z.B. in der Stoßstange unsichtbar montiert werden kann. Die Radartechnologie erfüllt auch alle Automobilspezifikationen. Die notwendigen Leistungen liegen in der Regel bei wenigen Milliwatt, typisch $< 10 \text{ mW}$. Eine gesundheitliche Gefährdung für den Menschen besteht auch beim gleichzeitigen Betrieb vieler Radarsysteme nicht (Mende 2000).

Die Einordnung der Radarsysteme erfolgt meistens nach zwei Kriterien: in Nah- und Fernbereichserfassung oder nach Frequenzbereichen. Der erste Bereich umfasst ein sogenanntes ISM-Band (Industrial, Scientific and Medical Frequency Band) bei 24-24,25 GHz und der zweite einen für automobile Anwendungen vorgesehenen Frequenzbereich von 76-77 GHz.

Die 77 GHz Technologie wurde entwickelt, um den Entfernungsbereich bis zu 200 m bei einem Öffnungswinkel bis zu $\pm 6^\circ$ im Azimut abzudecken. Die erste Anwendung des Fernbereichsradars war die sich an die Verkehrssituation anpassende Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC (Adaptive Cruise Control). Wegen einiger Einschränkungen bei der Erkennung feststehender Objekte und wegen der nicht vollständigen Abdeckung der Spurbreite im unmittelbaren Fahrzeugvorfeld eignet sich das System überwiegend für den Einsatz auf der Autobahn.

24 GHz Radarsysteme zeichnen sich durch einen weiten Öffnungswinkel im Azimut aus. Aufgrund der großen notwendigen Antennenapertur, die für die Erzeugung der Wellenlänge von 12 mm erforderlich ist, werden diese Sensoren hauptsächlich im Nahbereich bis zu 40 m eingesetzt. Als Messsignale werden hier ultrakurze Pulse verwendet, die eine große Auflösung (ca. 5 cm) auch für sehr kleine Entfernungen ermöglichen.

Ein Radarsystem interpretiert die detektierten Objekte als einzelne Messpunkte. Daher kann die Objektklassifizierung nur aufgrund der Informationen über die Objektentfernung und Objektgeschwindigkeit erfolgen. Auf diese Weise lassen sich einige Objekttypen unterscheiden.

Die für den Einsatz im Automobil entwickelten verschiedenen Radarmessverfahren basieren auf zwei bekannten Prinzipien: die Puls-Modulation, bei der Pulse in der Größenordnung von 10 bis 30 ns gebildet werden, und die Frequenz-Modulation, die beim Aussenden die Frequenz der Wellen zeitlich ändert.

Beim Pulsradarsystem wird die Betriebsart ständig umgeschaltet, so dass Sende- und Empfangsprozess zeitlich nacheinander erfolgen. Für eine kurze Pulsdauer wird ein Signal abgestrahlt. Direkt nach Ablauf des Sendepulses wird der Empfangsmodus aktiviert und die pulsförmigen Echos ausgewertet. Die Entfernung R zum detektierten Objekt wird über die Messung der Laufzeit T_R zwischen Senden und Empfangen des vom Radar ausgestrahlten Signals ermittelt:

$$R = \frac{c \cdot T_R}{2}$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. In Abbildung 2.11 wird das Messprinzip des Pulsradars dargestellt. Das Echo 1 stammt von einem nahen Objekt, Echo 2 von einem entfernten.

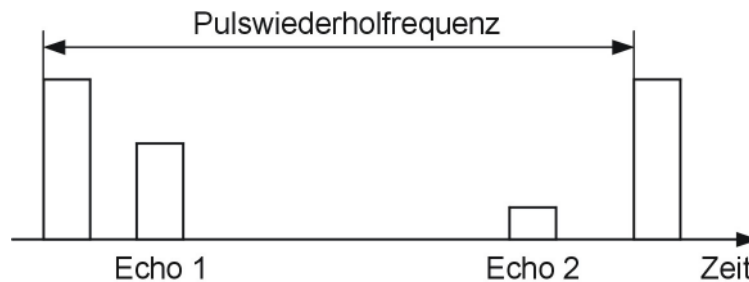


Abbildung 2.11: Prinzip eines Pulsradars

Zur Ermittlung der Relativgeschwindigkeiten v_{rel} der sich entfernenden bzw. nähernden Objekte wird der Dopplereffekt verwendet.

$$f_d = \frac{2v_{\text{rel}}}{\lambda}$$

Dabei bezeichnet f_d die Dopplerfrequenz und λ die Wellenlänge der ausgesendeten Strahlung.

Bei dem zweiten Prinzip – FMCW-Radar (Frequency Modulated Continuous Wave) wird das Messsignal kontinuierlich gesendet und gleichzeitig empfangen. Hier erfolgt eine Entfernungsmessung von Objekten nicht durch direkte Laufzeitmessung, wie es beim Pulsradar der Fall ist, sondern durch Frequenzveränderung während des Aussendens. Bei dem FMCW-Radar wird die Frequenz des Sendesignals rampenförmig moduliert. Während der Dauer einer solchen Rampe T_{Rampe} wird die Frequenz im Bereich von f_{min} bis zu f_{max} linear verstellt. Das reflektierte Empfangssignal trifft zu einem Zeitpunkt beim Empfänger ein, an dem die Frequenz um die Differenz f_R verstellt wurde. Dies ist durch die Verzögerung der Signallaufzeit verursacht. Das Sende- und Empfangssignal werden miteinander verglichen und die Differenzfrequenz f_R ausgewertet. Diese Frequenzdifferenz ist direkt ein Maß für die Objektentfernung R :

$$f_R = \frac{T_R}{T_B} \cdot (f_{\text{max}} - f_{\text{min}}) = \frac{2R}{c} \cdot \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{T_B} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{c}{2} \cdot \frac{1}{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}} \cdot f_R T_B$$

Die Bewegung des detektierten Objektes verursacht zusätzlich eine Dopplerverschiebung f_d der reflektierten Signale. Durch die Frequenzmodulation überlagern sich Entfernung- und Geschwindigkeitsinformationen.

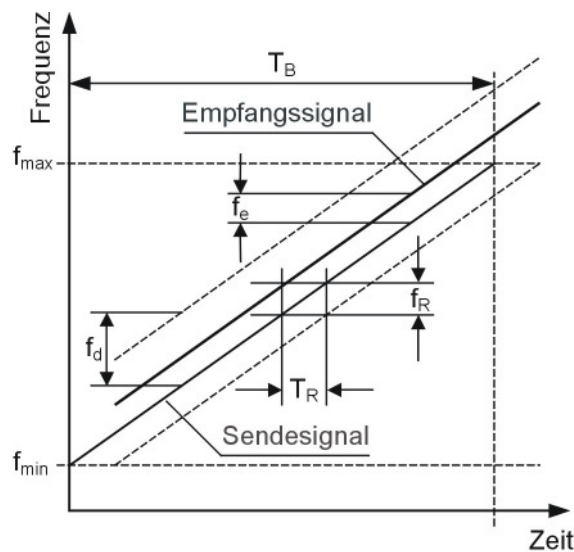


Abbildung 2.12: Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung mit FMCW-Radar

Die resultierende Empfangsfrequenz f_e wird sowohl in der aufsteigenden als auch in der abfallenden Rampe um einen bestimmten Betrag verändert. Bei der in Abbildung 2.12 dargestellten positiven Rampensteigung beträgt die Empfangsfrequenz:

$$f_e = f_d - f_R = \frac{2v_{rel}}{\lambda} - \frac{T_R \cdot (f_{max} - f_{min})}{T_B}$$

2.5.2 Lidar

Eine alternative Lösung für den Radarsensor ist ein LIDAR (**L**ight **D**etection and **R**anging), der im Infrarotbereich bei etwa $\lambda=905\text{ nm}$ arbeitet. Dieser Sensor beruht auf der Messung der Laufzeit eines Lasersignals. Basierend auf der Kenntnis der Lichtausbreitungsgeschwindigkeit ist es möglich, die Objektentfernung durch die Messung der Laufzeit zu ermitteln.

Der Lidar besteht aus einem Sender, der das Lasersignal ausstrahlt und einem Empfänger, der das rückgestreute Signal erfasst (s. Abbildung 2.13). Aus dem empfangenen Laserimpuls wird in einem Mikroprozessor ein auswertbares Signal erzeugt und schließlich verarbeitet. Der Sender strahlt ultrakurze Laserimpulse im Bereich von Nanosekunden aus. Diese Impulse werden von festen Objekten wie Fahrzeugen aber auch von Partikeln wie Staub oder Wassertropfen zurückgestreut. Auf Basis der verstrichenen Zeit und dem Ablauf der reflektierten Impulse wird die Aussage über das detektierte Objekt getroffen (Schubert u. a. 2003).

Pro Sekunde werden mehrere Tausend Lichtimpulse ausgesendet und im Empfänger mit einer großen Abtastrate digitalisiert. Dadurch lässt sich eine Distanzauflösung von weniger als 1 m erreichen. Das schnelle Wiederholen der Messung ermöglicht auch die Bestimmung der Geschwindigkeiten der Objekte. Die Reichweite des Sensors beträgt bis zu 150 m. Bei diesen

großen Entfernungen sind die von den Objekten reflektierten Strahlungsleistungen überaus gering. Mit konventionellen Fotodioden ist es nicht möglich, so kleine Leistungen auszuwerten. Deshalb werden hier sog. APD (Avalanche Photo Dioden) eingesetzt, bei denen der Fotostrom in der Diode vielfach verstärkt wird (Boehlau 2003).

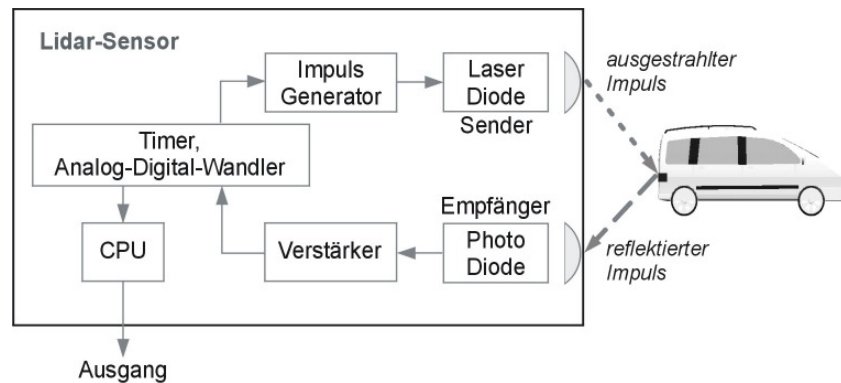


Abbildung 2.13: Funktionaler Aufbau des Lidar-Sensors (nach Weilkes 2000)

Um eine große Auflösung des Systems zu gewährleisten, wird ein mehrkanaliges System realisiert. Dafür wird ein APD Array in einem monolithischen Bauteil zusammengefasst. Das rückgestreute Lasersignal wird von einer gemeinsamen Linse gesammelt und von einzelnen Dioden empfangen. Die Laserdioden werden ebenfalls in einem Bauteil zusammengefasst und die ausgesendeten Laserstrahlen von einer gemeinsamen Linse entsprechend gerichtet.

2.5.3 Laserscanner

Der Laserscanner basiert auf der Laufzeitmessung eines Infrarotsignals. Der von einem Sender emittierte Laserpuls wird von einem rotierenden Prisma umgelenkt, so dass ein zweidimensionales Abbild der Fahrzeugumgebung bis zu 180° entworfen werden kann (s. Abbildung 2.14). Der Empfänger nimmt den vom Objekt reflektierten Signalpuls auf und berechnet die Objektentfernung aus der Zeit zwischen der Signalsendung und dem Signalempfang. Die Winkelauflösung ist von der Abtastfrequenz abhängig.

Bei einer Scannfrequenz von 10Hz wird eine Winkelauflösung von 0,25° erreicht, wodurch sich eine sehr präzise Verfolgung von erkannten Objekten realisieren lässt (Fürstenberg u. Willhoeft 2001). Durch die Verwendung eines Signalprozessors, auf dem die Algorithmen für die Objekterkennung und Objektverfolgung ablaufen, wird auch die Ermittlung der relativen Geschwindigkeiten von Objekten ermöglicht.

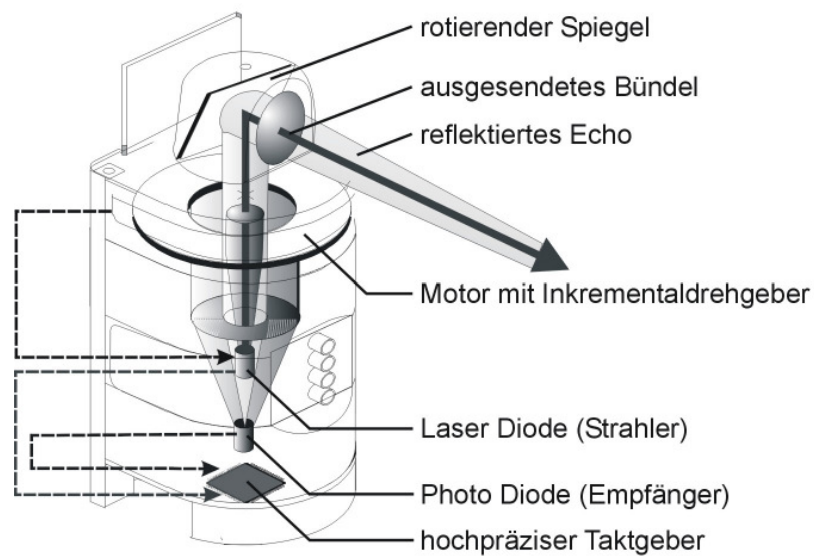


Abbildung 2.14: Aufbau des Laserscanners (Höver u. Seubert 2003)

Die hohe Auflösung und die Genauigkeit des Laserscanners erlauben die Bestimmung der Konturen von erkannten Objekten (s. Abbildung 2.15), wodurch der Objekttyp wie Fahrzeug, Fußgänger oder Lastwagen unterschieden werden kann.

Die Tatsache, dass der Laserscanner ein optischer Sensor ist, macht ihn witterungsabhängig und es ist ein entsprechender Einbauort im Fahrzeug erforderlich.

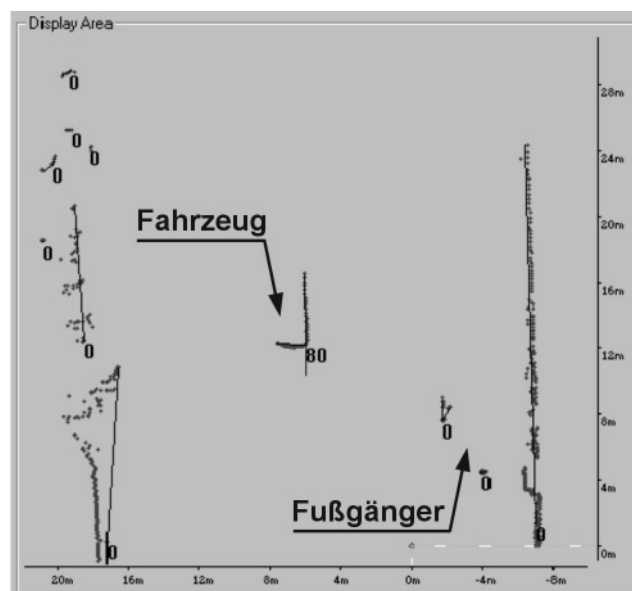


Abbildung 2.15: Ausgangsdaten des Laserscanners (Fürstenberg u. Willhoeft 2001)

2.5.4 Bildsensoren

Videosensoren werden im Automobil für die Beobachtung von stationären und bewegten Objekten in Fahrzeuginnenraum und –umgebung eingesetzt.

Diese Sensoren zeichnen sich durch sehr große Auflösung, sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung aus. Die Videotechnologie ermöglicht die Gewinnung vielfältiger Informationen über die detektierten Objekte, wie Gestalt, Geschwindigkeit und genaue Raumposition.

Ein Videosensorsystem besteht aus einer Mehrfachkamera und einem eingebetteten Signalprozessor (DSP). Das von der Kamera ermittelte Bild wird über einen Datenbus an den DSP weitergeleitet. Die Kameras müssen eine große Auflösung und eine hohe Hell-/Dunkeldynamik aufweisen, um bei verschiedenen Beleuchtungsbedingungen robust funktionieren zu können. Die in dem Signalprozessor realisierten Bildverarbeitungsalgorithmen müssen das echtzeitfähige Funktionieren des Systems gewährleisten.

Bildsensoren sind ein spezieller Fall von „Multisensorstrukturen“ aus lichtempfindlichen Elementen, die in Matrixform angeordnet sind und ihr Licht aus einer Abbildungsoptik erhalten. Bei den heute verfügbaren CCD-Kameras (Charge-Coupled Device) wird das durch die transparente Elektrode einfallende Licht proportional zur Intensität und Belichtungszeit Ladungsträger erzeugt und in einer Speichereinheit gesammelt. Die Ladungen werden weiter in ein Ausgangsregister transportiert und ausgelesen. Der Einsatz von CCD-Sensoren im Automobil ist allerdings wegen ihrer begrenzten Dynamik, ihrer Auslesezeit und ihres Temperaturbereichs sehr beschränkt. Eine größere Fahrzeugtauglichkeit scheinen dagegen neuere auf CMOS-Technologie (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) basierende Sensoren anzubieten. Diese Sensoren weisen eine hohe Dynamik der Bildchips auf und liefern eine konstante Kontrastaufklärung im gesamten Helligkeitsbereich (Bosch 2001).

Eine viel versprechende Methode für die Objekterkennung, die auf der Videotechnologie basiert, ist das sog. Stereosehen. Dieses Verfahren macht die Erkennung und die Bestimmung der räumlichen Position von Objekten möglich. Die Objektposition wird durch die Triangulation der angepassten Bildsequenzen in der linken und rechten Kamera ermittelt. Um die Objekterkennung robuster zu machen und die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen, kann die Anpassung der Kameradaten von anderen Sensortypen unterstützt werden (Gavrila u. a. 2001).

Das Kamerasystem kann ein sehr breites Informationsspektrum bereitstellen, das für andere Sensoren stark eingeschränkt ist. Zwei wesentliche Aspekte müssen aber verbessert werden. Erstens muss die Kameradynamik erhöht werden, so dass die Kamera durch Scheinwerfer anderer Fahrzeuge nicht geblendet wird. Zum zweiten muss die für die Bildverarbeitung erforderliche Rechnerleistung vergrößert werden. Abbildung 2.16 zeigt einen Vergleich der Eigenschaften von Bildsensorik und Radar nach Mühlenberg und Seubert (2002).

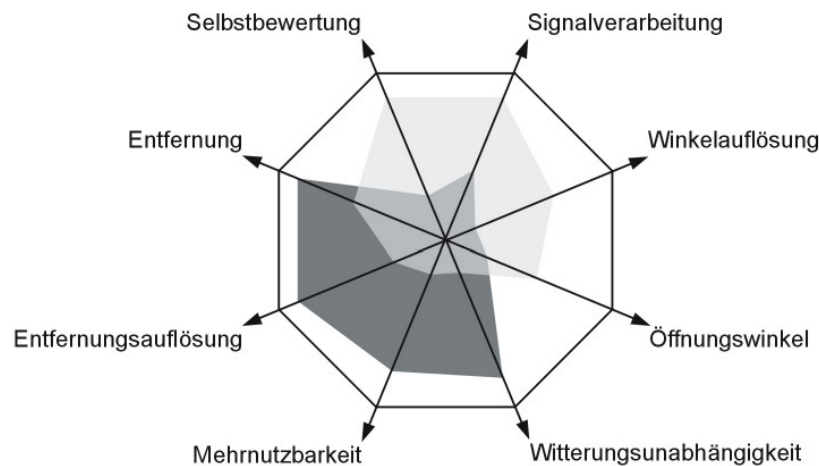


Abbildung 2.16: Komplementäre Sensoreigenschaften von Radar (dunkel) und Bildsensorik (hell) (Mühlenberg u. Seubert 2002)

2.6 Inter-Fahrzeug-Kommunikation

Innerhalb der letzten Jahre sind viele Projekte in Europa initiiert worden, die sich mit Interfahrzeugkommunikation befassen. Das Ziel ist es, die Sicherheit und den Komfort beim Fahren zu erhöhen (s. Abbildung 2.17). Ein solches Projekt ist das Projekt “Fleetnet – Internet on the Road”, in dem ein positionsbasiertes drahtloses Netzwerk zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation entwickelt werden soll.

In einem anderen europäischen Projekt, CarTALK, ist es das Hauptziel, kooperative Fahrerassistenzsysteme zu entwerfen, zu testen und zu evaluieren, um die Automobil- und Sozialbedürfnisse zu erfüllen. Der Hauptfokus dieses Projektes ist die Erhöhung der Fahrerkapazität, so dass das sichere und komfortable Fahrzeuglenken gewährleistet werden kann. Die Interfahrzeugkommunikation ist eine Schlüsseltechnologie für die Entwicklung dieser Systeme (Morsink u. a. 2002). Die große Anzahl von Automobilherstellern und -zulieferanten, die an diesen Projekten beteiligt sind, zeigt einerseits das zunehmende Interesse in diesem Bereich, andererseits ist sie aber ein Zeichen für die Notwendigkeit verwendbare Radiohardware zu standardisieren und entsprechende Kommunikationsprotokolle zu entwickeln. Ein entscheidender Aspekt ist die Definition der erforderlichen Randbedingungen. Diese sollen die Implementierung des Kommunikationssystems ins Fahrzeug unabhängig von Marke und Hersteller ermöglichen (Franz u. a. 2001).



Abbildung 2.17: Informationsübermittlung über eine lokale Gefahrenstelle an nachfolgende Fahrzeuge mit Hilfe vom Ad Hoc Kommunikationsnetz (Göschel 2004)

2.6.1 Funkbasiertes Ad Hoc Netzwerk zur Interfahrzeugkommunikation

Sehr dynamische Verkehrsszenarien führen zu ständigen Topologieänderungen bzw. zu großer Netzwerkdynamik. Zum Informationsaustausch unter diesen schwierigen Bedingungen lassen sich mobile Netzwerke einsetzen. Diese erfordern keine feste Infrastruktur und können in sehr kurzen Zeitperioden selbständig aufgebaut werden. Diese sog. Ad Hoc Netzwerke bestehen aus autonomen Knoten, die zusammenwirken, um Datenpakete untereinander auszutauschen. Meistens arbeiten diese Knoten als Empfänger und Vermittlungsknoten gleichzeitig und können sich dabei zwanglos bewegen.

Aufgrund der Mobilität der Verkehrsszenarios erfordern die Ad Hoc Netzwerke entsprechende Kommunikationsprotokolle, die das Funktionieren unter diesen dynamischen Bedingungen möglich machen. Diese umfassen die Protokolle für den Kanalzugriff, die Fehlerkorrektur und das positionsbasierte Routing sowie die dynamische Kanalzuweisung.

Die Funkkommunikationsprotokolle werden in der geeigneten Funkhardware implementiert. Die Radiosysteme müssen beim Fahren mit großen Geschwindigkeiten robust funktionieren. Die Fahrzeuggeschwindigkeit kann 200km/h überschreiten. Die daraus resultierende große Netzwerkdynamik macht es schwierig, eine Synchronisation zu erreichen. Das System muss ebenfalls die Doppler Frequenzverschiebung bewältigen, die durch die Knotenbewegung entsteht. Wegen der großen relativen Geschwindigkeiten kann der Radiokontakt zwischen zwei Fahrzeugen sehr kurzzeitig sein. Ein sehr wichtiges Kriterium ist dabei die Zugänglichkeit zu einem lizenzfreien Frequenzband (Hartenstein u. a. 2001).

Da die mobilen Ad Hoc Netzwerke ihre Topologien häufig ändern, ist das Routing in solchen Netzwerksystemen eine herausfordernde Aufgabe. Die Routingprotokolle für die Ad Hoc Netzwerke sollen einen großen Grad an Adaptionfähigkeit gegenüber der Netzwerkdynamik aufweisen. Andererseits müssen die Routingalgorithmen das Skalierbarkeitsproblem bewältigen. Diese zwei Aspekte bilden die Schlüsselherausforderungen für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation.

Da heute mit Hilfe von GPS (Global Positioning System) die geografische Position von Knoten mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann, kann das Routing auf der Knotenposition basieren (Franz u. a. 2001a). Im Gegensatz zu der topologiebasierten Lösung, bei der nur die Informationen über die in dem Netz bereits existierenden Links zur Übermittlung von Datenpaketen verwendet werden, wird der Knoten bei dem positionsbasierten Routing neben seinem Identifikator, zusätzlich über seine aktuelle Position adressiert. Die Entscheidung hinsichtlich der Weiterleitung wird aufgrund der im Datenpaket enthaltenen Informationen über den Zielknoten und die Position des nächsten Nachbarknotens getroffen. Daher wird hier das Festsetzen und das Unterhalten von Routen nicht benötigt. Der nächste Vorteil des positionsbasierten Routings ist die Unterstützung der Lieferung von Datenpaketen in eine gewünschte geografische Region (Mauve u. a. 2001). Auf diese Weise wird es möglich sein, Botschaften an benachbarte Fahrzeuge nur in der gewünschten Richtung zu übertragen z.B. nur an die Fahrzeuge im Vorfeld des eigenen Fahrzeugs.

2.6.2 Optische Interfahrzeugkommunikation

Eine alternative Lösung zu funkbasierten Systemen stellen optische Systeme dar, in denen zur Übermittlung von Informationen optische Komponente wie LED (Light Emitting Diodes) oder IRED (Infra Red Emitting Diodes) Module eingesetzt werden. Im Gegensatz zu Funksignalen kann ein optisches Signal feste Gegenstände nicht durchdringen. Daher ist es nur möglich, Datenpakete zwischen direkt benachbarten Fahrzeugen zu übertragen (s. Abbildung 2.18). Andererseits macht die direkte Kommunikation den Datentransfer robuster gegen Interferenzen und Störungen. Ein weiterer Vorteil optischer Systeme ist die Möglichkeit der Verwendung von Komponenten, die bereits existieren, wie LED Signalleuchten oder das Night Vision System. Die Reichweite des Infrarotsignals muss allerdings in Hinsicht auf die

Augensicherheit auf max. 150m begrenzt werden. Die Empfängerfunktion kann in die schon vorhandenen oder zukünftigen optischen Sensoren implementiert werden (Abel u. a. 2002).

Wegen möglicher Witterungs- und Entfernungsänderungen während der Datenübertragung wird die Signalstärke erheblichen Schwankungen unterliegen. Aus diesem Grunde ist es notwendig, eine geeignete Datenmodulation einzusetzen.

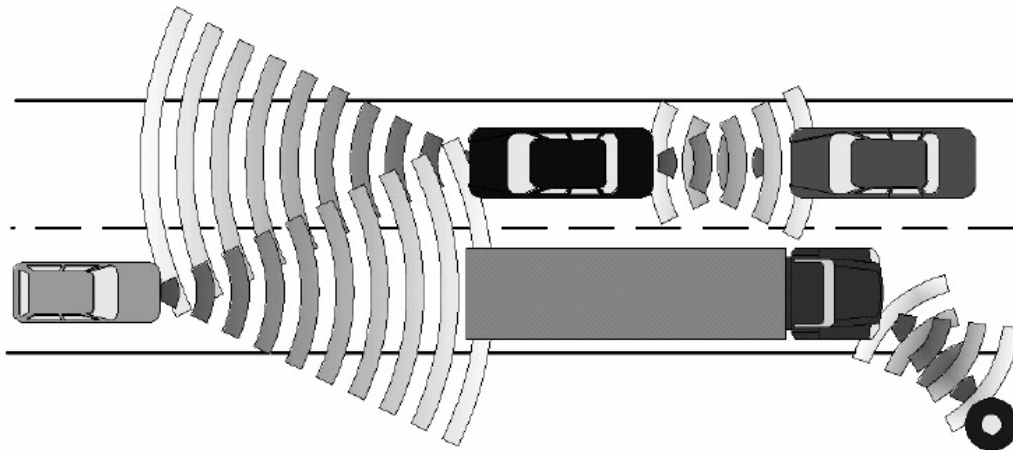


Abbildung 2.18: Prinzip der optischen Interfahrzeugkommunikation (Abel u. a. 2002)

Die in diesem Kapitel vorgestellten Sensorsysteme und Kommunikationsprinzipien zeigen eine Vielfalt von Möglichkeiten, wie die aktuelle Verkehrssituation erfasst werden kann. Der Entwicklungsfortschritt auf diesem Gebiet ist hoch. Trotzdem gibt es bis heute keine einzelne Sensortechnologie, die allein eine robuste und vollständige Erkennung der Fahrzeugumgebung gewährleisten kann. Jede dieser Technologien zeichnet sich durch unterschiedliche Eigenschaften aus. Die Auswahl eines geeigneten Detektionssystems ist daher durch Anforderungen der konkreten Applikation determiniert.

3 Defizite heutiger Scheinwerfersysteme und Lösungsmöglichkeiten

3.1 Ausgangssituation

Kraftfahrzeug-Scheinwerfer sollen die Wahrnehmung des Fahrers in der Dämmerung, bei Nacht und bei schlechten Witterungsverhältnissen verbessern. Dabei darf die Kfz-Beleuchtung keine Nebenwirkungen wie z.B. Blendung anderer Verkehrsteilnehmer verursachen.

Heutige Scheinwerfersysteme bieten drei Lichtverteilungen, die vom Fahrer manuell umgeschaltet werden: Abblend-, Fernlicht und optional Nebellicht. Seit 2003 werden zwei zusätzliche Lichtfunktionen: dynamisches und statisches Kurvenlicht in den Markt eingeführt. Diese adaptiven Funktionen sollen die Wahrnehmung des Fahrers bei Kurvenfahrten unterstützen und zur besseren Ausleuchtung einmündender Straßen dienen.

Auf den europäischen Straßen wird in den meisten Fällen nur das suboptimale/sichtkritische Abblendlicht verwendet. Die geometrische Reichweite des Scheinwerferlichtes im Abblendlichtmodus auf der Gegenfahrbahn beträgt ca. 60 m – auf der eigenen Fahrbahn liegt sie je nach Scheinwerfer zwischen 80 und 120 m. Diese stark begrenzte Reichweite stellt insbesondere bei großen Fahrzeuggeschwindigkeiten einen kritischen Faktor dar.

Die Anzahl der Nachtfahrten mit Fernlicht, das sehr gute Sichtbedingungen gewährleistet, ist sehr gering. Eine wesentliche Ursache für diese eingeschränkte Fernlichtnutzung liegt im hohen Verkehrsaufkommen der letzten Jahre begründet. In Deutschland erfolgen nur 5 % aller Nachtfahrten mit Fernlicht (Hella Review 2000).

Auch in den USA sind Fahrer aus mehreren Gründen zurückhaltend bei der Verwendung des Fernlichts. Eine Untersuchung des U.S. Department of Transportation zeigt, dass Fernlichtscheinwerfer weniger als 25 % der Zeit aktiviert sind, in der ihre Verwendung gerechtfertigt ist (Gentex 2004). Für diese rare Fernlichtnutzung wurden die folgenden Gründe genannt:

- Die Fahrer vergessen das Umschalten.
- Aus Bequemlichkeit erfolgt kein Umschalten.
- Die Fahrer befürchten, dass sie vergessen, das Fernlicht abzuschalten, wenn Verkehr naht, und möglicherweise andere Fahrer blenden.
- Es wird befürchtet, dass man das Fernlicht nicht schnell genug abschaltet.

In einem nächsten Schritt auf dem Weg zur Verbesserung der Kfz-Beleuchtung werden drei neue adaptive AFS-Lichtfunktionen auftreten: Stadtlicht, Autobahnlicht oder Schlechtwetterlicht. Entsprechende Systeme werden voraussichtlich 2006 auf dem Markt eingeführt. Mit

ihnen wird eine automatische Anpassung der Lichtverteilung an den Straßenverlauf, die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Witterungsbedingungen realisiert.

In Hinsicht auf die Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung ist das AFS-Autobahnlicht interessant. Bei dieser Lichtfunktion wird die Hell-Dunkel-Grenze um $0,27^\circ$ oberhalb der HDG des Abblendlichts angehoben. Dies resultiert in einer bedeutsamen Steigerung der geometrischen Reichweite. Für viele Fahrer stellt diese Anhebung der HDG allerdings nur einen kleinen, häufig kaum wahrnehmbaren Unterschied im Vergleich zum Abblendlicht dar.

3.2 Lösungsansatz Aktives Licht

Aufbauend auf adaptiven Scheinwerfern sollen aktive Lichtsysteme die Lichtverteilung an die aktuelle Verkehrssituation anpassen, so dass die Verkehrsszene vor dem eigenen Fahrzeug möglichst vollständig ausgeleuchtet wird. Bei der Erzeugung dieser interaktiven Ausleuchtung wird das Vorhandensein anderer umliegender Straßenteilnehmer in Betracht gezogen. Dadurch werden die Sichtverhältnisse des Fahrers verbessert und gleichzeitig die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer minimiert.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein aktives Lichtsystem entwickelt werden, das durch eine Interaktion zwischen einzelnen Verkehrsteilnehmern zur Maximierung des Vorwärtsehvermögens des Fahrers und dadurch zur globalen Verkehrssicherheit bei Nacht beiträgt.

Im Hintergrund der kollektiven Ausleuchtung steht die Grundidee, nach der das von einem Fahrzeug abgestrahlte Licht nur die Bereiche des Verkehrsraums erreicht, in denen es keine Blendung verursacht. So lässt sich eine Fernlichtausleuchtung auch in nächtlichen Situationen verwenden, in denen andere Verkehrsteilnehmer vorhanden sind.

Kollektive Ausleuchtung optimiert die Verwendung des Fahrzeugscheinwerfers, um für jedes Fahrszenario die maximal zulässige Menge von „blendungsfreiem“ Licht zu liefern. Diese innovative Lichtfunktion kann daher einen Durchbruch für die Sicherheit im nächtlichen Verkehrsraum darstellen, da sie den Einsatz des Fernlichts erheblich erhöht.

Bei der Erarbeitung dieses neuen lichttechnischen Systems steht die Auseinandersetzung mit folgenden Fragenstellungen im Mittelpunkt:

- Welche Anforderungen werden an ein solches aktives lichttechnisches System gestellt?
- Wie sollte das System aufgebaut sein?
- Welche Schlüsselkomponenten muss es enthalten?
- Wie kann die jeweilige Verkehrssituation zuverlässig erkannt werden und welche Algorithmen sind denkbar, um daraus die jeweils zulässige Abstrahlung zu errechnen?

Eine Hauptaufgabe dieser Forschungsarbeit ist die Klärung und Präzisierung einzelner Aufgaben sowie ihre Dokumentation in einer Anforderungsliste. Im weiteren Prozess werden,

ausgehend vom Aufstellen abstrakter und lösungsneutraler Funktionen und ihrer Gestaltung in Funktionsstrukturen, geeignete Lösungsprinzipien identifiziert. Die ausgewählten Lösungsszenarien werden vergleichend bewertet, um einen Realisierungsweg festzulegen.

Für das bevorzugte Realisierungsszenario wird im nächsten Kapitel der Arbeit eine detaillierte Anforderungsliste an die hier zu verwendenden Hardwarekomponenten erstellt. So werden die für das lichttechnische System geeigneten Komponenten identifiziert, wobei es sich hier sowohl um bereits existierende Systemkomponenten als auch um neue Module, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden, handelt.

Im experimentellen Teil werden unterschiedliche Aufbauvarianten des Scheinwerfersystems als maßstäbliche Demonstratoren aufgebaut. Diese Realisierungsvarianten werden unter dynamischen Laborbedingungen getestet. Das Ziel ist dabei, eine für diese Applikation geeignete Umweltsensor- und Scheinwerfertechnologie zu identifizieren.

Nach der Auswahl der entsprechenden Komponenten wird ein Prototyp im Maßstab 1:1 aufgebaut, der später in ein Versuchsfahrzeug implementiert wird. Der Aufbau eines fahrbereiten Systems ermöglicht die Bewertung unter realen Verkehrsbedingungen.

In Hinsicht auf die Komplexität des Systems und seinen innovativen Charakter wird neben einer quantitativen Systemsuntersuchung mit Hilfe von technischen Methoden auch eine qualitative Bewertung durch Versuchspersonen vorgenommen (Roslak u. Wallaschek 2004). Anhand dieser Ergebnisse wird eine Bewertung der Akzeptanz und eine Abschätzung des potentiellen Nutzens des Systems erfolgen.

4 Kollektive Ausleuchtung – Systemanalyse

4.1 Kollektive Ausleuchtung als Schnittstelle zwischen Scheinwerfer- und Fahrerassistenzsystem

Bei der Konzipierung eines Systems zur Fahrerunterstützung ist es sinnvoll, zunächst die Analyse der Fahraufgabe und ihre Gliederung in einzelne Teilaufgaben vorzunehmen. Nach Donges (1982) wird die Fahraufgabe mit Hilfe eines Drei-Ebenen-Modells eingeteilt (s. Abbildung 4.1). Es werden die drei Stufen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung unterschieden. Auf der Navigationsebene bestimmt der Fahrer seine Fahrtroute, der er während der Fahrt folgt. Diese Aufgabe beschränkt sich nur auf die Wahrnehmung der nötigen Informationen zur Verfolgung der Route. Auf der Ebene der Bahnführung wird die festgelegte Fahrtroute umgesetzt. Die Fahrweise wird dem wahrgenommenen Straßenverlauf und dem ambienten Verkehr angepasst. Die hier realisierten Teilaufgaben umfassen das Folgen des Straßenverlaufs, das Ausweichen bei Hindernissen und den Fahrspurwechsel beim Überholen, sowie die Wahl der Geschwindigkeit. Bei der Stabilisierung werden die Zielgrößen des Fahrerwunsches in Bezug auf Quer- und Längsführung in Fahrzeugbewegung umgesetzt. Auf dieser Ebene findet die Festlegung von fahrzeugbezogenen Stellgrößen wie Lenkbewegung, Gaspedal, Bremse sowie Gangstellung statt (Wallentowitz u. a. 2001).

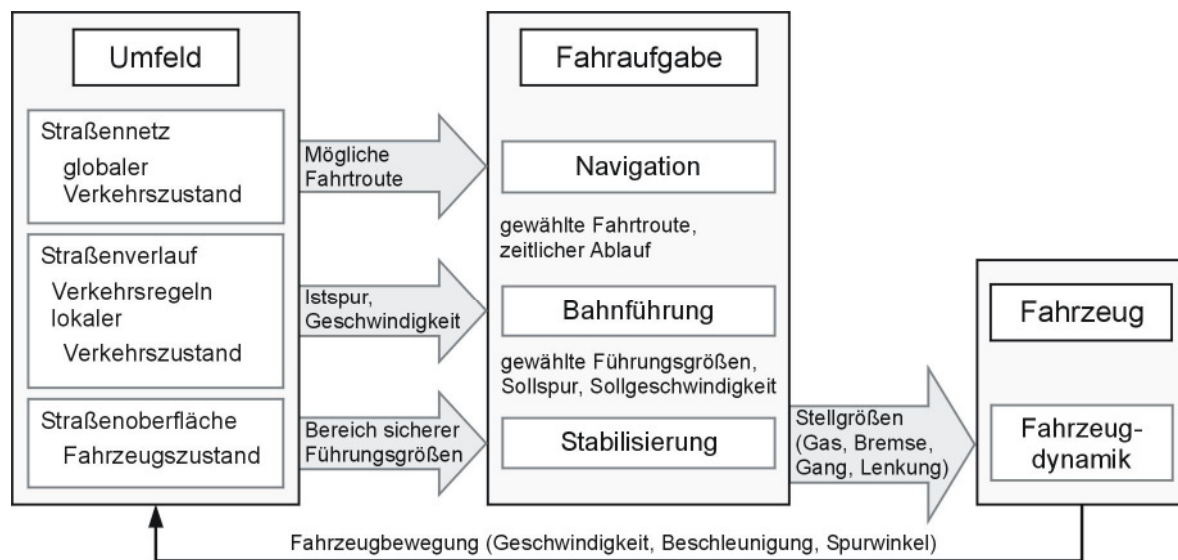


Abbildung 4.1: Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung (nach Donges 1982)

Das Ziel eines Fahrerassistenzsystems besteht darin, den Fahrer nach seiner Intention in den einzelnen Teilaufgaben der Fahrzeugführung zu unterstützen, ohne ihn in seiner Entscheidungsfreiheit einzuschränken oder ihn zusätzlich zu belasten (Weilkes 2000). Daher sollen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zunächst die Ebenen der Fahraufgaben

festgelegt werden, auf denen der Fahrer unterstützt wird. Anschließend wird der Umfang der Unterstützung definiert (Ehmanns u. a. 2000). Die Systeme müssen neben den erforderlichen technischen Aspekten auch auf die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug, den Einfluss auf die umgebende Verkehrssituation sowie auf gesetzliche Aspekte hin entwickelt werden.

Eine Gliederung der Fahrerassistenzsysteme kann beispielsweise hinsichtlich der Art und des Grades der Assistenz erfolgen. Die erste Gruppe bilden dann **Servosysteme**, die die Betätigung der Stellelemente erleichtern. Die der nächsten Gruppe zugeordneten **informierenden Systeme** liefern dem Fahrer Informationen über die Fahrsituation und den Fahrzeugzustand, die häufig für ihn nicht direkt erfassbar sind. Dabei können die Systeme über eine warnende Funktion erweitert werden. Eine weitere Assistenzstufe stellen die **automatisch intervenierenden Systeme**, die z.B. in Notsituationen eingreifen. Diese stabilisieren das Fahrzeug in kritischen Situationen. Die letzte Gruppe bilden die **automatisch agierenden Systeme**. Hier wird die Aufgabe der Fahrzeugführung vollständig oder teilweise von dem Assistenzsystem übernommen.

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Scheinwerfersystem kann am ehesten den informierenden Systemen zugeordnet werden. Streng genommen stellt es keine Informationen bereit, sondern erleichtert dem Fahrer die visuelle Wahrnehmung, so dass er Informationen besser aufnehmen kann.

4.1.1 Fahrzeugautonomes System

Die Verwendung von vorausschauender Sensorik für die Erkennung der Fahrzeugumgebung determiniert prinzipiell den Aufbau des gesamten Systems. Diese Strategie ermöglicht eine lokal autonome Betrachtung des Verkehrsgeschehens individuell von jedem Verkehrsteilnehmer. Ein fahrzeugautonomes System, dessen allgemeine Struktur in Abbildung 4.2 dargestellt wird, besteht aus einer intelligenten Steuereinheit und ihren Schnittstellen zu Fahrer, Umgebung und Fahrzeug (Nwagboso 1997). Die Erkennung der umgebenden Objekte und des Straßenverlaufs führen über die Entscheidungsebene des Systems zu einer entsprechenden Modifikation der vom Scheinwerfer erzeugten Lichtverteilungscharakteristik.

Die Verfügbarkeit leistungsfähiger und fahrzeugtauglicher Mikrorechner ermöglicht es, den Informationsfluss innerhalb des Fahrzeugsystems echtzeitfähig und fehlerfrei zu gestalten. Aufgrund der ermittelten Messgrößen kann so eine genügend schnelle Generierung von Stellgrößen erfolgen.

Die Leistungsfähigkeit der Mikroelektronik lässt sich jedoch nur in Verbindung mit entsprechenden Unweltsensoren wirkungsvoll nutzen. Das zielgemäße Funktionieren des Systems erfordert eine genaue Erfassung des Verkehrsumfeldes, was anhand heutiger Sensorik nur bedingt erreicht werden kann.

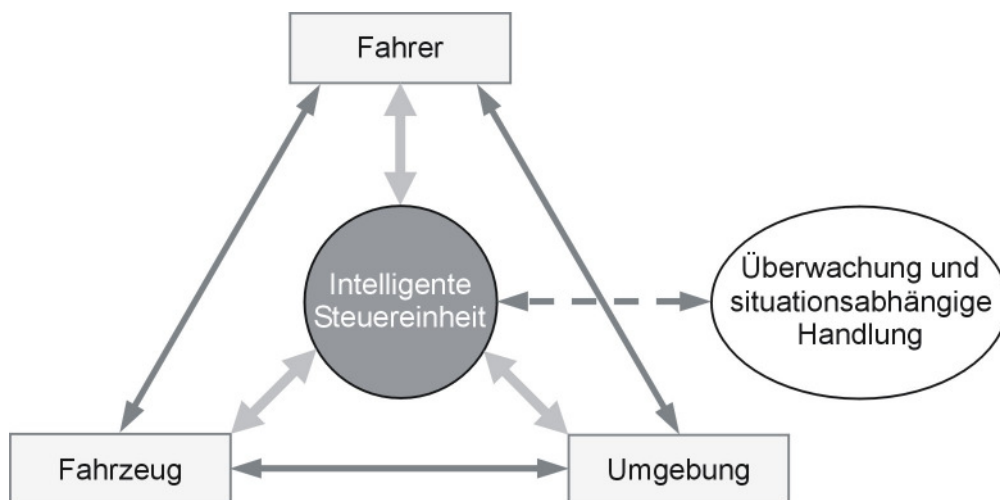


Abbildung 4.2: Struktur eines intelligenten autonomen Fahrzeugsystems
(nach Nwagboso 1997)

Für eine hohe Zuverlässigkeit innerhalb des Systems wird eine Bordüberwachung zur Erkennung von kritischen Situationen notwendig, so dass auftretende Störungen und Ausfälle bewältigt werden können. Deshalb soll bei der Systementwicklung auch der Zustands-erkennung von elektronischen Komponenten sowie der Fehleranalyse eine Bedeutung beigemessen werden.

4.1.2 Inter-Fahrzeug-Kommunikation

Ein im Vergleich zu dem im Kapitel 4.1.1 dargestellten autonomen System komplett anderes Lösungsprinzip bietet die Verwendung einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Hier wird jedes Fahrzeug als Teilnehmer eines globalen Netzsystems betrachtet. Das Kommunikationsnetzwerk bildet eine Basis für die Erkennung von Verkehrssituationen, da hier mit geringer Zeitverzögerung Informationen über den umgehenden Verkehr ausgetauscht werden können. Daher wird die Rolle des einzelnen Fahrzeugs auf die Interpretation der Verkehrsszene beschränkt, die mittels der übersendeten Informationen abgebildet werden kann (s. Abbildung 4.3).

Hierbei senden alle Fahrzeuge ihre Positionen und Geschwindigkeiten an die Fahrzeuge in der nahen Umgebung und diese können dann mit Hilfe von Navigationsdaten aus einer digitalen Karte eine umfangreiche Abbildung der Verkehrssituation erstellen. Neben den fahrzeugeigenen Daten wie Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie Trajektorie können auch Informationen über die Umwelt, wie Witterungsbedingungen, Fahrbahntyp, usw. übertragen werden. Da jedes Fahrzeug die Verkehrsszene aus einem anderen Sichtwinkel beobachtet, muss es die ermittelten Daten filtern, um im weiteren Verarbeitungsprozess nur die relevanten Informationen zu verarbeiten.

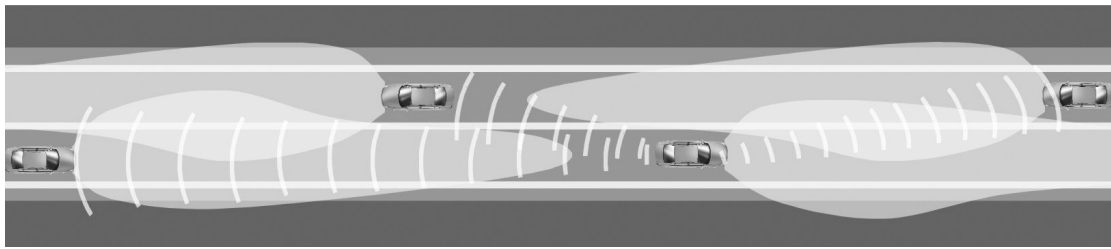


Abbildung 4.3: Informationsaustausch mittels Inter-Fahrzeug-Kommunikation

Je nach realisierter Applikation verarbeitet ein Fahrerassistenzsystem Informationen aus verschiedenen Entfernungsbereichen, wie in Abbildung 4.4 dargestellt. Ein Objekt, das durch eine Verdeckung nicht durch die Sensorik erfassbar ist, kann durch die Kommunikation erkannt werden. Zusätzlich können die Zustandsinformationen mehrerer Fahrzeuge ausgetauscht werden und dadurch eine zuverlässige Abbildung des Verkehrsgeschehens erstellen (Detlefsen 2002).

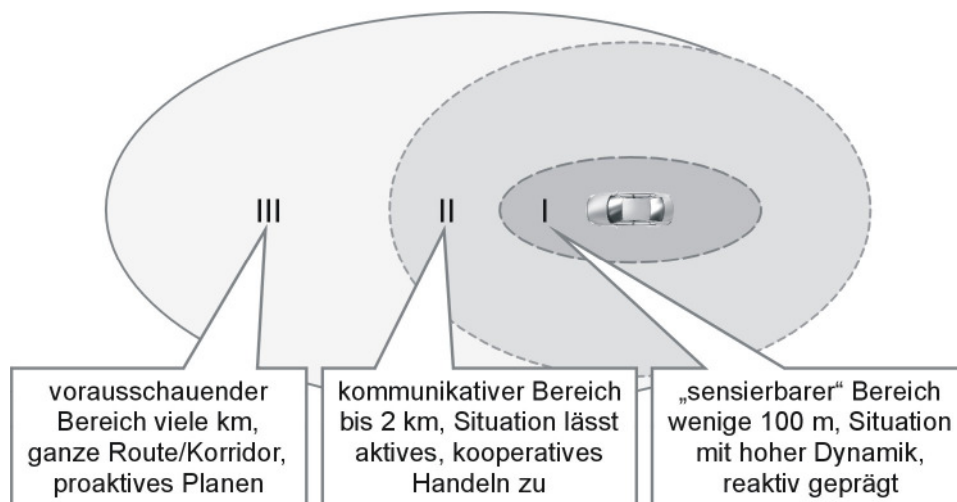


Abbildung 4.4: Erfassungsbereiche der Fahrerassistenzsysteme (Detlefsen 2002)

Bei der Konzipierung eines kommunikationsbasierenden Systems ist die Entwicklung einer geeigneten Kommunikationssoftware und einer standardisierten Kommunikationsschnittstelle für den Datenaustausch zwischen den einzelnen Fahrzeugen im Echtzeitmodus eine wichtige Aufgabe.

4.2 Konzipierung des Scheinwerfersystems

Die Grundidee des hier betrachteten Scheinwerfersystems basiert auf der Voraussetzung, dass die Beleuchtungsstärke am Auge des Fahrers die Blendschwelle nicht überschreiten darf. Gleichzeitig sollen bestmögliche Seh- und Wahrnehmungsbedingungen erzeugt werden. Daher muss ein Kompromiss zwischen der Blendung einerseits und guten Sichtbedingungen andererseits gefunden werden. Diese Aufgabe lässt sich über ein geeignetes Optimierungsverfahren eines dynamischen Ausleuchtungsprozesses lösen. Dabei hängt ihr Erfüllungsgrad in hohem Grade von den verwendeten Hardwarekomponenten ab.

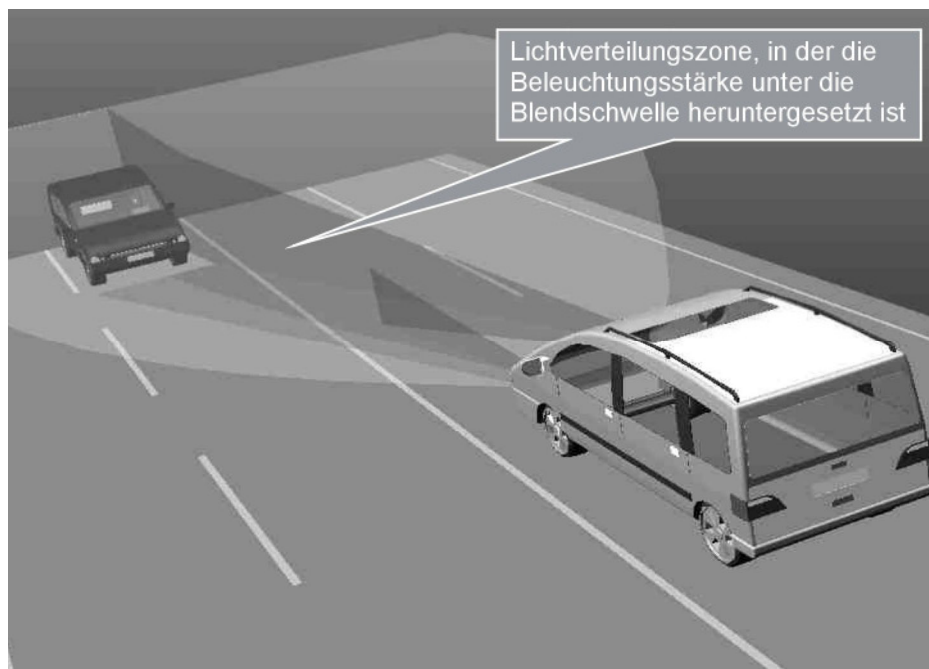


Abbildung 4.5: Ein Fahrzeug (dunkel) in der Zone mit reduzierter Beleuchtungsstärke der Lichtverteilung des entgegenkommenden Fahrzeugs (hell)

In einer Minimallösung kann die Aufgabe über ein automatisches Umschalten zwischen Fern- und Abblendlichtmodus realisiert werden. Ein solches System bestimmt die Entfernung vor dem Fahrzeug, bei der die Blendbeleuchtungsstärke gerade die Blendschwelle überschreitet. Oberhalb der Schwelle ist die Blendung nicht mehr akzeptabel und kann das Fernlicht nicht verwendet werden. Mit Hilfe dieser Größe wird der Zeitpunkt des Umschaltens zwischen Fernlicht und Abblendlicht berechnet. Für eine Begegnungssituation bedeutet dies, dass das Fernlicht solange eingeschaltet bleibt, bis der Fahrer des entgegenkommenden Fahrzeugs geblendet wird. Danach wird nur das Abblendlicht genutzt.

Der Erfüllungsgrad der verbesserten Ausleuchtung und damit gesteigerter Erkennbarkeitsentfernung kann jedoch deutlich gesteigert werden, wenn die Beleuchtungsstärke nur in einer Lichtverteilungszone, in der sich gerade ein Fahrer bzw. ein Fahrzeug befindet, entsprechend

reduziert wird. Bei dieser Lösung wird daher nicht die gesamte Lichtverteilung auf Abblendlicht umgeschaltet, sondern nur das in Richtung der Augenpunkte der anderen Verkehrsteilnehmer abgestrahlte Licht reduziert (s. Abbildung 4.5).

Die hier betrachteten lichttechnischen Scheinwerfersysteme stellen ein Paradebeispiel für ein selbstoptimierendes mechatronisches System dar. Deshalb ist es naheliegend, bei ihrer Konzeption und ihrem Entwurf die Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme anzuwenden, wie sie z.B. in (VDI 2206) beschrieben ist. Ein wichtiger Schritt beim Systementwurf stellt die Ausarbeitung der Funktionsstruktur dar. Diese beruht auf einer Darstellung der Energie- und Informationsströme des Systems.

Abbildung 4.6 zeigt eine schematische Darstellung dieser Energie- und Informationsströme innerhalb der Grundstruktur des mechatronischen Systemes. Die Sensoren und Aktoren bilden die Schnittstelle zwischen dem Prozess (Energiefluss) und der abstrakten Informationsebene (Informationsfluss) (Wallaschek 1995).

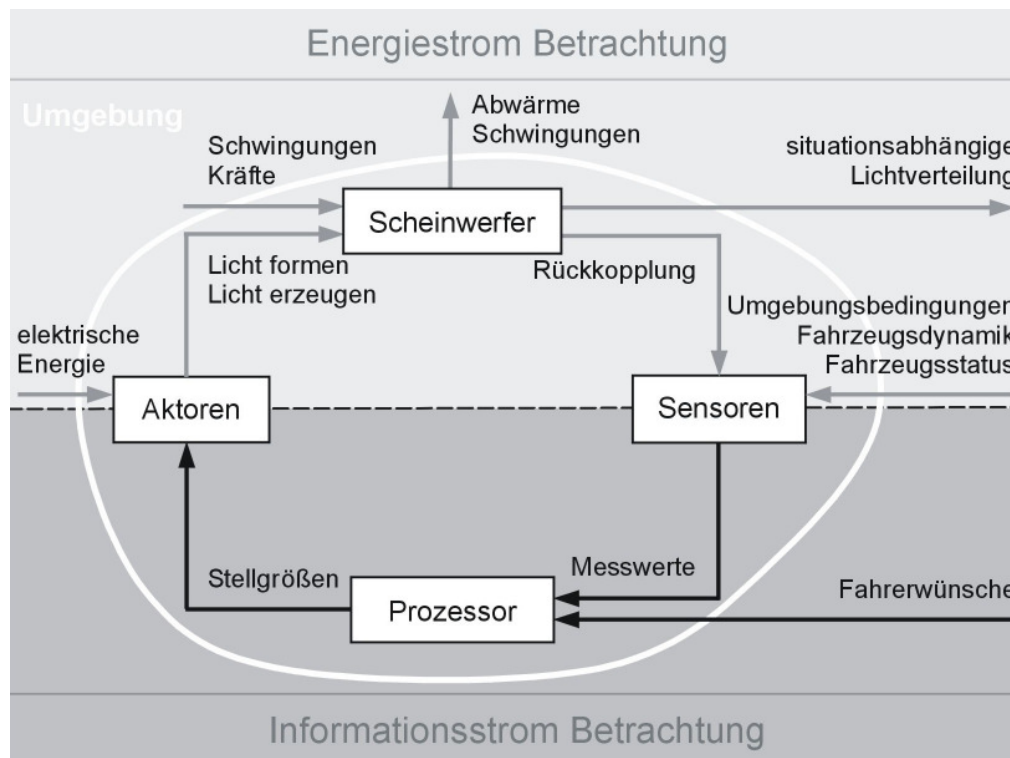


Abbildung 4.6: Grundaufbau eines mechatronischen Scheinwerfers

4.3 Funktionsanalyse

Im Sinne der Konstruktionsmethodik für technische Systeme (Pahl u. Beitz 1997) wird eine Funktionsanalyse des Systems der kollektiven Ausleuchtung der Fahrbahn vorgenommen, bei der die Gesamtfunktion in Teilfunktionen zerlegt wird, mit dem Ziel, eine modulare Struktur des Gesamtsystems abzuleiten. Die Verknüpfung der Teilfunktionen zur Gesamtfunktion unterliegt dabei einer gewissen Zwangsläufigkeit, weil bestimmte Teilfunktionen erst erfüllt sein müssen, bevor andere sinnvoll eingesetzt werden können. Abbildung 4.7 zeigt die Funktionsstruktur des Systems in einer grob vereinfachten Form, bei der nur die wichtigsten Teilfunktionen dargestellt sind. Das System ist im wesentlichen von dem Informationsfluss geprägt. Um die erste Funktion „Verkehrssituation erkennen“ erfüllen zu können, ist es erforderlich, Informationen über Position, Orientierung und Dynamik der am Verkehrsgeschehen beteiligten Fahrzeuge zu ermitteln. Auch der Fahrzeug-Status sowie die Umgebung des Fahrzeugs müssen erfasst werden. Im zweiten Schritt „Lichtverteilung an die Verkehrssituation anpassen“ werden die ermittelten Informationen interpretiert und es werden die entsprechenden Soll-Lichtverteilungen definiert. Als erste Unterfunktion der Funktion „Lichtbild erzeugen“ wandelt ein Leuchtmittel die elektrische Hilfsenergie in Licht, das gesammelt und geformt werden muss, um das Fahrzeugvorfeld gezielt auszuleuchten.

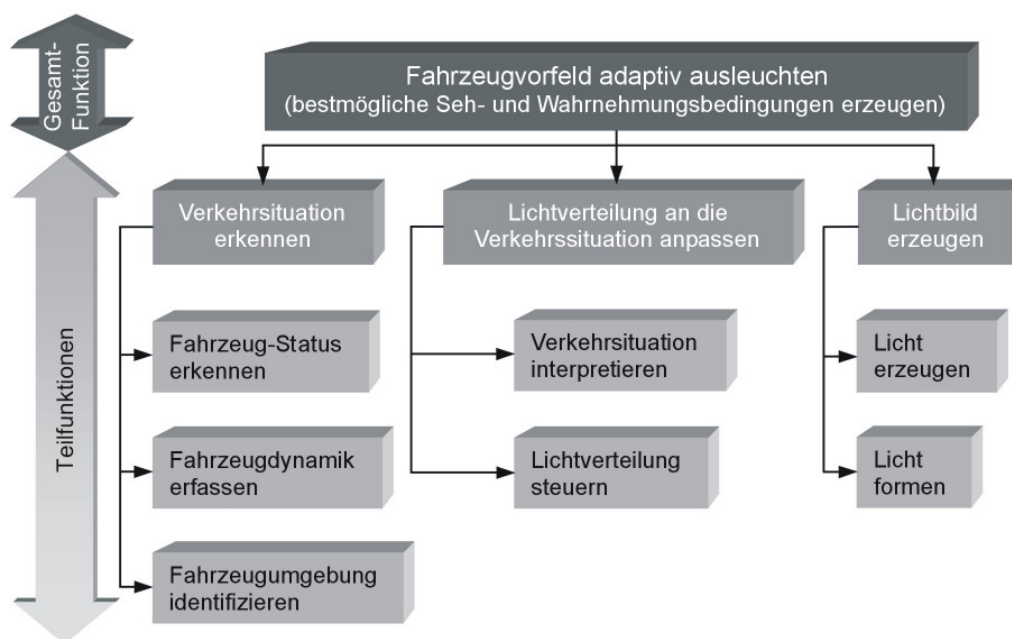


Abbildung 4.7: Allgemeine Funktionsstruktur

Die Teilfunktionen können auf verschiedene Weise realisiert werden, so kann z.B. die Straßensituation mit der Umfeldsensorik erfasst werden. Es ist aber auch möglich, Informationen über die Straßensituation mit Hilfe eines Kommunikationsnetzwerkes auf das Fahrzeug

zu übertragen. Je nachdem, welche Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen ausgewählt werden, können die Teilfunktionen weiter zerlegt werden, bis schließlich die Elementarfunktionen vorliegen. Hier wird genauer sichtbar, für welche Teilfunktionen Lösungselemente gefunden werden müssen, und in welcher Relation hinsichtlich Energie- und Informationsfluss die Funktionen zueinander stehen.

Eine Erweiterung der allgemeinen Funktionsstruktur für ein System, in dem die Verkehrssituation mit Hilfe von vorausschauender Sensorik erkannt wird, stellt Abbildung 4.8 dar. Theoretisch lassen sich Funktionen so aufgliedern, dass die unterste Ebene der Funktionsstruktur nur aus Funktionen besteht, die sich praktisch nicht weiter unterteilen lassen. Wegen der hohen Komplexität des Systems werden hier die Funktionen nur in drei Ebenen aufgliedert.

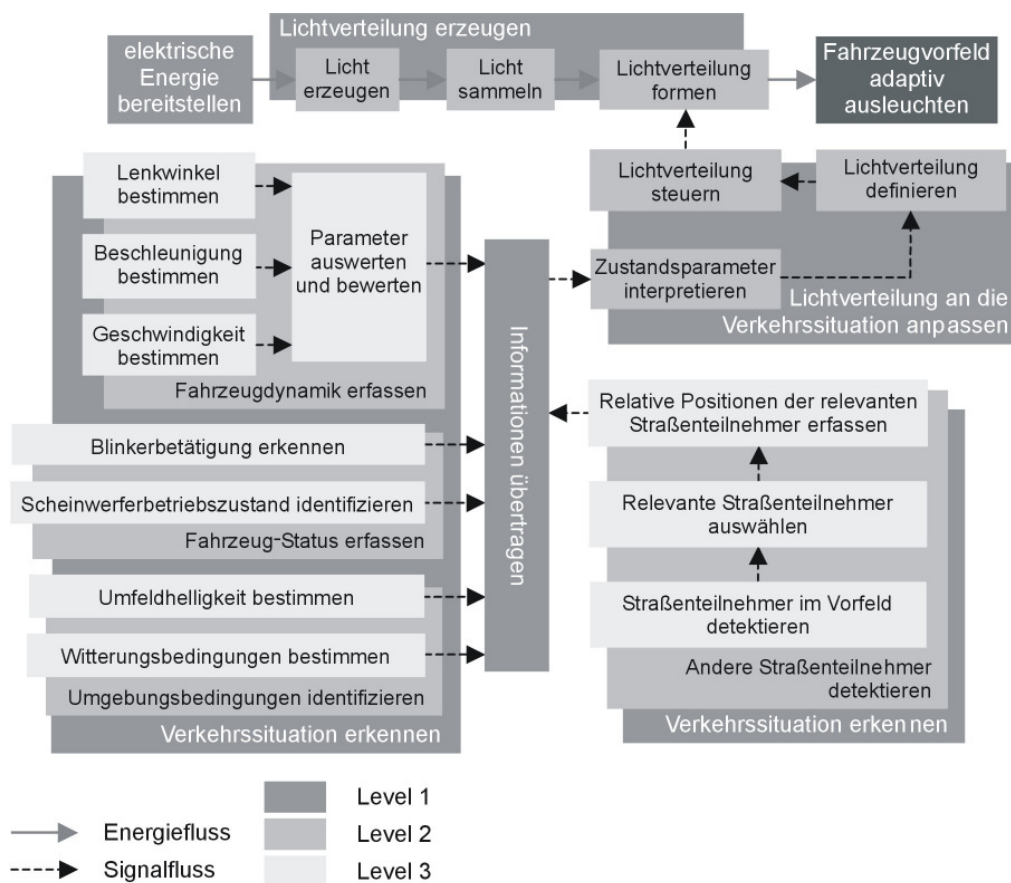


Abbildung 4.8: Erweiterte Funktionsstruktur

4.4 Mathematische Modellierung

In dieser Betrachtung wird die Strategie verfolgt, die direkte Blendung verursachenden Lichtanteile lokal auszublenden (Roslak u. Wallaschek 2003). Im allgemeinen wird als Anforderung festgehalten:

Es ist sicherzustellen, dass die Blendbeleuchtungsstärke an den Augen aller Verkehrsteilnehmer die Blendschwelle nicht überschreitet.

Die entsprechend zulässige Blendbeleuchtungsstärke für Halogen- und Gasentladungslampen wird quantitativ aus den Ergebnissen von (Kojima 2002) übernommen. Demnach beträgt der Grenzwert der Blendbeleuchtungsstärke am Auge 1,12 lx für Gasentladungslampen und 1,7 lx für Halogenlampen.

Auf Basis dieser Werte kann für eine gegebene Lichtquelle die für eine bestimmte Entfernung gerade noch akzeptable Lichtstärke berechnet werden. Dafür lässt sich das fotometrische Entfernungsgesetz verwendet. Mit Hilfe von ihm kann die Relation zwischen der Lichtstärke des Scheinwerfers I_α und der Beleuchtungsstärke der ausgeleuchteten Fläche E ermittelt werden:

$$I_\alpha = \frac{E \cdot r^2}{\Omega_0 \cos \alpha}$$

Hierbei ist r die Entfernung zwischen der Lichtquelle und der ausgeleuchteten Fläche und α der Winkel zwischen dieser Fläche und der Richtung der Lichtausbreitung. Ω_0 ist die Bezeichnung für den Einheitsraumwinkel.

Im Begegnungsverkehr ist die Blendung bei einer Entfernung von 30 bis 100 m am stärksten. Unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit der Windschutzscheibe und der Reflexion der Außenspiegel können akzeptable Blendbeleuchtungsstärken für jede Entfernung berechnet werden (s. Abbildung 4.9).

Beschränkt man sich zunächst auf den einfachsten Fall, in dem sich zwei Fahrzeuge begegnen, und beschreibt die vom Scheinwerfer erzeugte, d.h. in den Raum abgestrahlte Lichtverteilung in einem fahrzeugfesten Bezugssystem mit Hilfe der Raumwinkel Ω_L und Ω_R durch die skalare Funktion $LV(\Omega_L, \Omega_R)$, so kann die entsprechende Randbedingung für die Lichtverteilung als

$$LV(\Omega_L, \Omega_R) < f(\text{Blendschwelle})$$

formuliert werden. Dabei stellt $f(\text{Blendschwelle})$ eine Funktion dar, mit der die Rückrechnung der Blendbeleuchtungsstärke in den relevanten Augenpunkten auf den Ort des Scheinwerfers erfolgt.

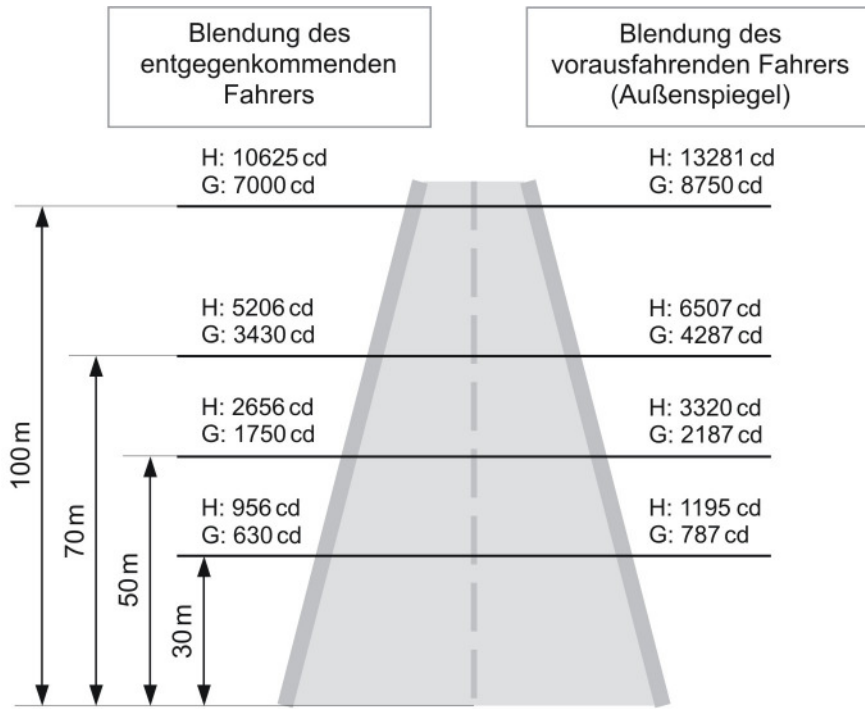


Abbildung 4.9: Akzeptable Lichtstärke in Abhängigkeit der Entfernung für Halogenlampen (H) und Gasentladungslampen (G) (nach Kojima 2002)

In Abbildung 4.10 werden zwei Fahrzeuge schematisch dargestellt. Das m-Fahrzeug befindet sich im sogenannten Schattenbereich der Scheinwerfer des n-Fahrzeugs. Die Schattenbereiche werden durch Kegelformen veranschaulicht. Die dargestellte Verkehrssituation wird in Bezug zum Koordinatensystem des n-Fahrzeugs behandelt. Zur Beschreibung der Position des m-Fahrzeugs im n-Koordinatensystem werden zwei Variablen x_n und y_n verwendet. Die Schattenkegel der beiden Scheinwerfer werden folgendermaßen definiert:

$$\vec{\Omega}_L = \vec{r}_n + x_{LM} \vec{e}_1 + d(x_L) \vec{f}_2 \quad \vec{\Omega}_R = \vec{q}_n + x_{RM} \vec{g}_1 + d(x_R) \vec{h}_2$$

Dabei sind \vec{r}_n und \vec{q}_n Vektoren, welche die Positionen des linken und rechten Scheinwerfers im n-Koordinatensystem bestimmen:

$$\vec{r}_n = r_y \vec{n}_1 + r_x \vec{n}_2 + r_z \vec{n}_3 \quad \vec{q}_n = q_y \vec{n}_1 + q_x \vec{n}_2 + q_z \vec{n}_3$$

Die Größen x_{LM} und x_{RM} sind die entsprechenden Abstände des linken und rechten Scheinwerfers von dem entgegenkommenden Fahrzeug:

$$x_{LM} = \sqrt{y_n + (x_n - r_x)^2} \quad x_{RM} = \sqrt{y_n + (x_n + q_x)^2}$$

Im Modell wird angenommen, dass die y- und z-Anteile der Vektoren \vec{r}_n und \vec{q}_n gleich Null sind. Daher befinden sich die beiden Scheinwerfer in den Abständen r_x und q_x vom Anfang des n-Koordinatensystems.

Die Transformation der Koordinationssysteme vom n -Koordinatensystem zu den Scheinwerferkoordinationssystemen wird folgendermaßen definiert:

$$\begin{bmatrix} \vec{e}_1 \\ \vec{e}_2 \\ \vec{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{n}_1 \\ \vec{n}_2 \\ \vec{n}_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \vec{g}_1 \\ \vec{g}_2 \\ \vec{g}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho & \sin \rho & 0 \\ -\sin \rho & \cos \rho & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{n}_1 \\ \vec{n}_2 \\ \vec{n}_3 \end{bmatrix}$$

Die Winkel γ und ρ sind dabei:

$$\gamma = \arctan \frac{x_n - r_x}{y_n} \quad \rho = \arctan \frac{x_n + q_x}{y_n}$$

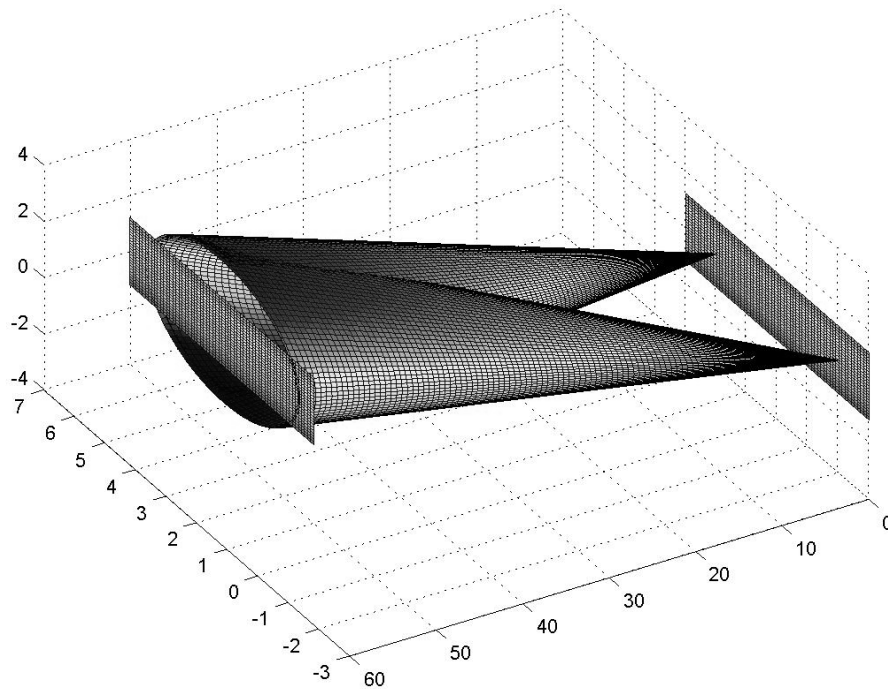


Abbildung 4.11: Grafische Darstellung der modellierten Schattenbereiche

Die Transformation der Koordinationssysteme E und G zu den Koordinationssystemen F und H werden folgendermaßen definiert:

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_1 \\ \vec{f}_2 \\ \vec{f}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{e}_1 \\ \vec{e}_2 \\ \vec{e}_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \vec{h}_1 \\ \vec{h}_2 \\ \vec{h}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{g}_1 \\ \vec{g}_2 \\ \vec{g}_3 \end{bmatrix}$$

Die Koordinationssysteme F und H sowie die Winkel β und φ dienen zur Beschreibung der Kegelflächen. Die Durchmesser $d(x_{LM})$ und $d(x_{RM})$ der beiden Schattenkegel sollen im Berührungspunkt M gleich groß und immer konstant sein:

$$d(x_{LM}) = a_L \cdot x_{LM} = \text{const} \quad d(x_{RM}) = a_R \cdot x_{RM} = \text{const}$$

Die Variablen a_L und a_R beeinflussen die Durchmessergrößen der beiden Schattenkegel. So werden im Punkt M für jeden Abstand zwischen den Scheinwerfern und dem entgegenkommenden Fahrzeug immer die gleichen Werte $d(x_{LM})$ und $d(x_{RM})$ erreicht.

$$a_L = \frac{d(x_{LM})}{x_{LM}} \quad a_R = \frac{d(x_{RM})}{x_{RM}}$$

$$d(x_L) = \frac{d(x_{LM})}{x_{LM}} \cdot x_L \quad d(x_R) = \frac{d(x_{RM})}{x_{RM}} \cdot x_R$$

Dabei sind x_L und x_R Variablen, die zwischen 0 und x_{LM} bzw. x_{RM} variieren. Die grafische Darstellung der modellierten Schattenbereiche wird in Abbildung 4.11 veranschaulicht.

4.5 Anforderungen an die Hardwarekomponenten

Ein Scheinwerfersystem muss eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen. Ein fehlerbehaftetes Funktionieren des Systems kann zu unerträglicher Blendung anderer Verkehrsteilnehmer und demzufolge zu kritischen Verkehrssituationen führen. Aus diesem Grund müssen die Funktionen des Systems als sicherheitskritisch eingestuft werden.

Bei der Beschreibung der Anforderungen, die an ein Scheinwerfersystem zur Erfüllung von Aktiven Licht Funktionen zu stellen sind, müssen zwei wesentliche Aspekte unterschieden werden. Zum einem muss das System alle Anforderungen erfüllen, die an konventionelle Scheinwerfersysteme gestellt werden. Hierzu gehören allgemeine und technische Vorschriften für Kraftfahrzeugscheinwerfer sowie die vom Kraftfahrzeughersteller vorgegebenen Ansprüche. Die zweite Anforderungsgruppe ergibt sich aus neuen Komponenten und der erweiterten Funktionalität des Systems.

Ein Scheinwerfersystem in Kraftfahrzeugen soll eine große Widerstandsfähigkeit gegen Stöße und Vibrationen aufweisen, so dass mechanische Belastungen weder zu Dejustierungen noch zur Zerstörung der mechanischen Komponenten führen. Eine zweite Beanspruchungsgruppe durch die Umgebung stellen Temperatureinflüsse dar. In Hinsicht auf die große Temperaturdifferenz zwischen Scheinwerferumgebung im Winter und der Wärmestrahlung des Motors müssen die Scheinwerfer in einem breiten Temperaturbereich einsetzbar sein.

Ein Überblick über die wesentlichen Anforderungen an aktive Lichtsysteme wird in Tabelle 4.1 gegeben. Die meisten neuen geforderten Eigenschaften für diese adaptiven Scheinwerfersysteme ergeben sich aus ihrer dynamischen Funktionsweise. In Hinsicht auf die Forderung

einer sehr hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität der Lichtverteilung ist es hier notwendig, die gewünschte Beleuchtungsstärke zwischen null und einem festzulegenden Maximalwert an jedem Punkt des erzeugten Lichtbildes innerhalb eines kurzen Zeitintervalls generieren zu können. Dabei sollen die maximalen Beleuchtungsstärken Werte von 25 bis 100 lx erreichen (Huhn 1999). Um die Größe der Beleuchtungsstärke in einem so breiten Spektrum an jedem Punkt der Lichtverteilung flexibel variieren zu können, muss der Scheinwerfer einen Lichtstrom von über 1000 lm bereitstellen.

Tabelle 4.1: Anforderungen an aktive Lichtsysteme

Anforderungen an aktive Scheinwerfer	
Lichtverteilung für ECE- und SAE-Normen	ist zu erfüllen
weitere Lichtstärkeverteilungen	entsprechend der jeweiligen Funktion und entsprechender Gütemaße
Lichtstrom	> 1000 lm
Beleuchtungsstärke	100 lx
Abstrahlwinkel	$\pm 50^\circ$ H, $+5^\circ/-15^\circ$ V
Schaltgeschwindigkeit der gewünschten Lichtverteilungszonen	< 50 ms
Robustheit, Lebensdauer, Temperatur- und Betriebsspannungsbereich	übliche Kfz-Spezifikationen
Auflösung	entsprechend der jeweiligen Funktion

Eine dynamische Generierung variabler Lichtverteilungen erfordert eine sehr genaue Kenntnis der Situation im Fahrzeugvorfeld. Diese muss vollständig erkannt werden, um im nächsten Schritt korrekt interpretiert werden zu können. Daraus ergibt sich ein sehr großer Einfluss auf die Auswahl der Systemkomponenten, mit denen die in Abbildung 4.12 aufgezählten Eingangsgrößen ermittelt werden sollen.

Einen hochgradigen Einfluss auf das zuverlässige Funktionieren des Ausleuchtungssystems haben die mit Hilfe von vorausschauenden Sensoren ermittelten Messgrößen. Die vorausschauenden Sensoren können jedoch nicht immer exakte Messwerte über die Positionen und Geschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer liefern, da sie durch systematische und zufällige Fehler verfälscht werden können. Um die Beeinflussung dieser Fehler auf die Leistungsfähigkeit des Systems zu verringern, werden die Position und Geschwindigkeit eines Objektes aus den Ausgangsgrößen der Sensoren mit Hilfe von Methoden der Parameterschätzung ermittelt. Zusätzlich wird die Aufgabe der Sensoren oft dadurch erschwert, dass die gesuchten Nutzsignale durch Störanteile überlagert werden. Bei der Umgebungserfassung mittels Sensoren existiert eine Vielzahl von Störungen wie Falschalarme, Mehrfachreflexion

und Clutter. Um die beschriebenen Störkomponenten unterdrücken zu können, kommen Verfahren und Methoden zum Einsatz, die im (Mende 2000) beschrieben werden.

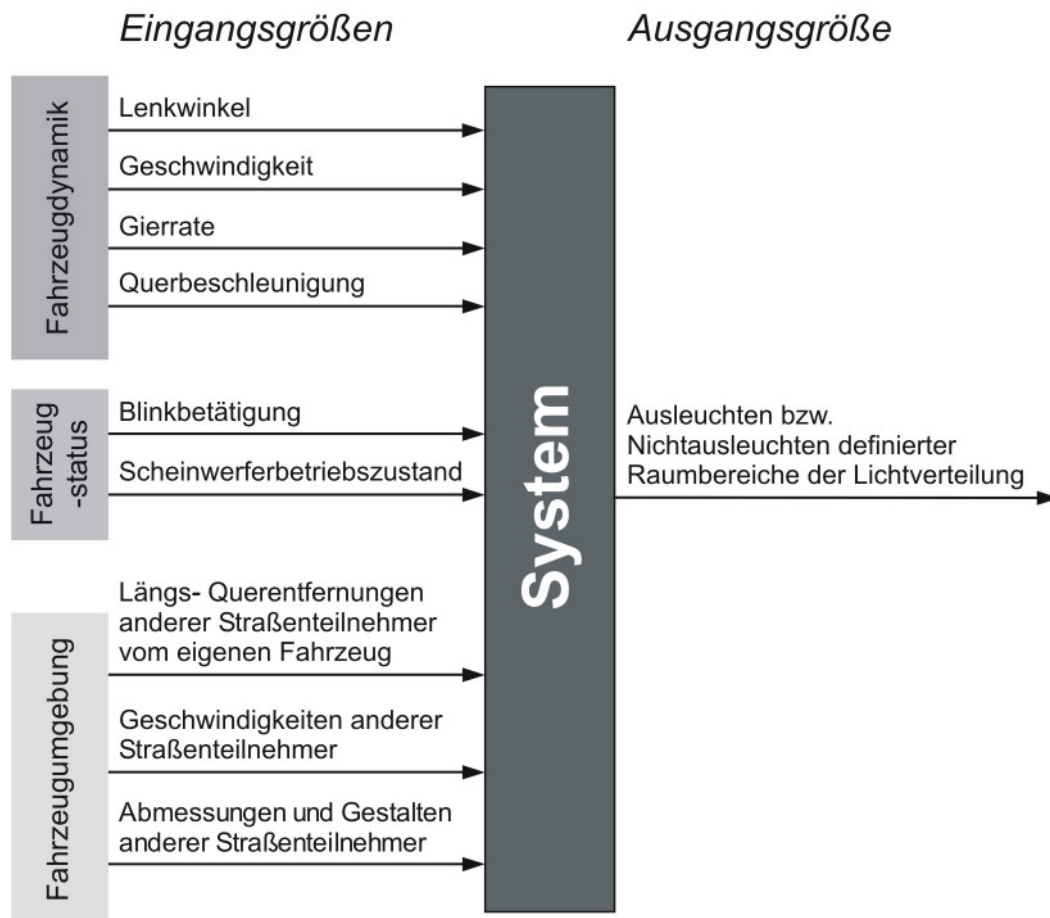


Abbildung 4.12: Prinzipieller Aufbau des Systems zur kollektiven Ausleuchtung

In Tabelle 4.2 sind allgemeine Anforderungen an verschiedenen Sensorprinzipien und ihr Erfüllungsgrad zusammengefasst. Die in dieser Tabelle aufgelisteten Sensoren repräsentieren alle für die Verwendung im Automobil potenziell geeigneten Messprinzipien, die zur Erfassung der Fahrzeugumgebung verwendet werden können.

Es werden die für das System wesentlichen Sensoreigenschaften miteinander verglichen. Ein sehr wichtiges Kriterium bei der Auswahl des geeigneten Messprinzips ist die Möglichkeit, alle relevanten Objekte zu verfolgen, die sich innerhalb der Lichtverteilung befinden. Das Kriterium steht mit vielen einzelnen Eigenschaften wie Mehrzielfähigkeit oder Detektionsrobustheit im Zusammenhang. Der nächste wesentliche Aspekt, der in Betracht gezogen werden soll, ist die Auflösung in der Querrichtung. Diese Eigenschaft macht die Bestimmung der Konturen erkannter Objekte möglich.

Wie die Analyse der Sensortechnologien aus der Tabelle 4.2 zeigt, gibt es noch kein Sensor-konzept, das eine jederzeit korrekte Erfassung der relevanten Objekte gewährleisten kann. Die

größte Herausforderung ist hier die Abdeckung des ganzen erforderlichen Messbereichs vor dem Fahrzeug mit Hilfe von nur einer Sensorvorrichtung.

Tabelle 4.2: Eigenschaften vorausschauender Sensoren

benötigte Messeigenschaften	Sensorprinzipien	77 GHz Radar	Lidar	24 GHz Radar	Video Sensor	Laser Scanner
große Reichweite		●	●		●	
großer horizontaler Öffnungswinkel (Abdeckung der ganzen Fahrbahnbreite)				●	○	●
Ermittlung der Objektgeschwindigkeit im Messbereich: -180...+360 km/h		●	●	●		●
große Entfernungsauflösung, -genauigkeit		●	●	●		●
große Geschwindigkeitsauflösung, -genauigkeit		●	●	●		●
großer vertikaler Öffnungswinkel				●	●	
Leistungsfähigkeit (Objektgestalt, -abmessung)					●	●
kurze Messzykluszeit (Erkennungszeit neuer Objekte)		○	○	●		●
Mehrzielfähigkeit		●	●	●	●	●
Erfassung bei gekrümmter Fahrbahn (Kurvenfahrt)		○	○	●	●	●
Witterungsunabhängigkeit		●	○	●		○
Detektionsrobustheit beim Erkennen verschiedener Verkehrsteilnehmerarten		○	○	○	●	●

● Forderung wird von dem jeweiligen Sensorprinzip gut erfüllt; ○ Forderung wird von dem jeweiligen Sensorprinzip bedingt erfüllt

Im Allgemeinen lassen sich die heute verfügbaren Sensorsysteme in zwei Gruppen aufteilen. Die erste Gruppe bilden Systeme, die zur Fernbereicherfassung verwendet werden. Diese Sensoren können nur einen kleinen Öffnungswinkel abdecken. Diese Eigenschaft macht die Erkennung der Verkehrssituation in direktem Vorfeld des Sensorfahrzeugs kaum möglich. Die zweite Gruppe dagegen beinhaltet Sensoren, die durch einen großen Öffnungswinkel ausgezeichnet sind aber nur für die Erfassung im Nahbereich einsetzbar sind. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Sensoren aus diesen beiden Gruppen zu einem Gesamtkonzept zu integrieren, um den gesamten relevanten Messbereich abzudecken. Allgemein wird dieses Vorgehen, unabhängig von der Art und Anzahl der verwendeten Sensoren, als „Sensorfusion“ bezeichnet (Becker 2002). Ein häufig favorisierter Ansatz ist die Verbindung von Bildverarbeitung mit Radar- oder Lidartechnik.

Auch die Ermittlung des aktuellen Fahrbahnradius durch die fahrzeugbezogenen Sensoren kann fehlerbehaftet sein. Tabelle 4.3 stellt verschiedene Sensorarten im Bezug auf ihre

Robustheit und Genauigkeit einander gegenüber. Da keine der aufgelisteten Sensorarten alle Straßensituationen erfassen kann, werden sie in der Regel in Kombination verwendet. In Hinsicht auf die besten Eigenschaften wird meistens der Gierratensensor eingesetzt, wobei er durch die anderen Verfahren gestützt wird.

*Tabelle 4.3: Vergleich verschiedener Sensorarten zur Ermittlung von Kurvenradien
(Uhler 1998)*

<div>Sensorart</div> <div>Eigenschaft</div>	Gierraten- sensor	Differenzgeschwindig- keit der nicht angetriebenen Räder	Querbeschleu- nigungssensor	Lenkwinkel- sensor
Robustheit gegen Seitenwind	+	+	+	–
Robustheit gegen Straßenneigung	+	+	– –	– –
Robustheit gegen Reifenumfangstoleranzen	+	–	+	○
Genauigkeit bei niedrigen Geschwindigkeiten	○	–	– –	++
Genauigkeit bei hohen Geschwindigkeiten	○	–	++	–

5 Analyse möglicher Ausleuchtungsstrategien

Das in dem vorherigen Kapitel vorgestellte Konzept einer „blendungsfreien“ Verkehrsausleuchtung ist so in eine realisierbare Form zu überführen, dass es technischen, psychologischen sowie gesetzlichen Kriterien genügt. Dazu werden in diesem Kapitel Strategien zur Gestaltung der dynamischen Lichtverteilung erarbeitet.

Im Mittelpunkt steht dabei eine quantitative Bewertung. Zunächst sollen generelle Rahmenbedingungen herausgestellt werden, anhand derer relevante Bewertungskriterien zur Beurteilung von Ausleuchtungsszenarien systematisch zusammengestellt werden. Schließlich werden verschiedene Strategien in diesem Rahmen formuliert und verstehend bewertet.

Die Bewertung erfolgt mit Hilfe einer Simulation, welche die Strategien in unterschiedlichen Verkehrssituationen abbildet. Der Einsatz der Simulation bietet die Möglichkeit, erste Aussagen über das dynamische Verhalten der jeweiligen Ausleuchtungsszenarien zu geben.

5.1 Rahmenbedingungen für die kollektive Ausleuchtung

5.1.1 Geometrie des Verkehrsraums

Bei der Gestaltung einer adaptiven Lichtverteilung soll auf die vorhandenen Abmessungen im Verkehrsraum Rücksicht genommen werden. Dabei sind vor allem die Maße der Straßen und Fahrzeuge von wesentlicher Bedeutung. Abbildung 5.1 gibt einen Überblick über Position und Größe von typischen Verkehrsobjekten auf einer europäischen Landstraße.

Tabelle 5.1 listet die gesetzlich festgelegten Abmessungen der Fahrbahn für einzelne Straßentypen auf.

Ein seitliches Verkehrszeichen hat eine maximale Höhe von 1260 mm, wobei die Unterkante des Schildes sich in einer Höhe von 2 m befinden soll (s. StVO §§39ff.). Dadurch ergibt sich eine maximale Höhe von ca. 3,3 m für ein Schild. Überkopfbeschilderung ist üblicherweise in einer Höhe von ca. 8 m angebracht. Dabei liegt die Entfernung, in welcher Schilder auf Autobahnen und Landstraßen gelesen werden je nach den Straßentyp meistens im Bereich von 50 bis 120 m.

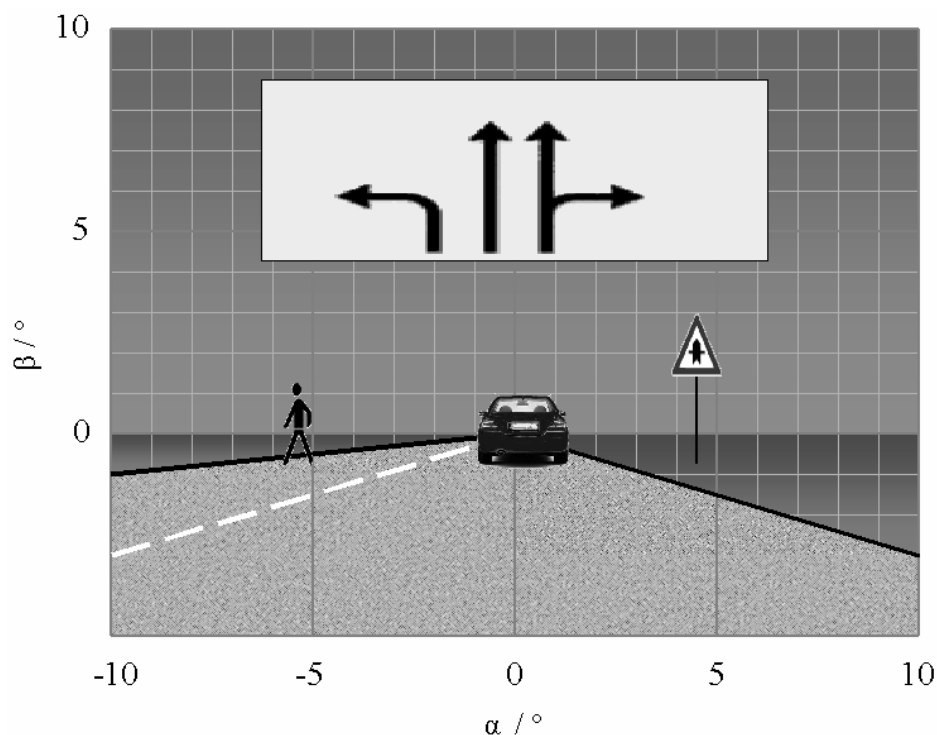


Abbildung 5.1: Idealisierte Geometrie einer Landstraße bei einer Entfernung von 50m, gesehen aus einer typischen Scheinwerfereinbauhöhe von 0,65 m (Damasky 1995)

Zudem sollen typische bzw. zulässige Werte für die Fahrzeuggrößen in Betracht gezogen werden. Dabei darf ein Fahrzeug grundsätzlich eine Breite von bis zu 2,55m und eine maximale Höhe von 4m haben (s. StVO §39). Die Studie von Durth und Levin (1991) belegt, dass das Auge des PKW Fahrers sich in einer mittleren Höhe von 111cm befindet. Ein Außenspiegel ist in einer Höhe von mindestens 0,98m (Kojima 2002) und die Scheinwerfer sind üblicherweise in 0,65 m Höhe angebracht.

Tabelle 5.1: Abmessungen der Fahrbahntrasse (Westermann 2002), (Conf. Helvetica 1975)

Abmessung [m] \ Straßentyp	Landstraße	Schnellstraße	Autobahn
Spurbreite	3,75	3,75	3,75
Breite Seitenstreifen	0,5	2,5	2,5
Breite Mittelstreifen	---	4	4
Schildabstand zum Seitenstreifen	1,5	1,5	1,5
Augenhöhe der Fußgänger und Radfahrer	1,5	---	---
min. Kurvenradius	800 (80 km/h), 1300 (100 km/h)	2800 (120 km/h)	3900 (140 km/h)

5.1.2 Fixationsstellen

Fixationsstellen geben das Blickverhalten eines Fahrers wieder. Um eine adaptive Ausleuchtung zu realisieren, sind übliche Fixationsstellen der Autobahn- und Landstraßenfahrt zu berücksichtigen. Hinweise zu den Blickzuwendungen in unterschiedlichen Straßensituationen lassen sich in der Studie von Cohen (1987) finden.

Bei der Autobahnfahrt am Tag wird das Blickverhalten durch eine Häufung von Fixationen auf nicht verkehrsrelevante Objekte charakterisiert, der Blick richtet sich sogar häufig gegen den Himmel, so dass verkehrsbezogene Objekte nur in zeitlichen Abständen betrachtet werden. Dies lässt sich mit den geringeren Anforderungen bei der Autobahnfahrt begründen, da diese hauptsächlich durch eine gleichmäßige Fahrweise mit einhergehender Überwachung des Vorfeldes geprägt ist.

Bei Landstraßenfahrten ergibt sich häufig eine komplexere Fahrbahnführung, da hier mehr Kurven, Straßenrandobjekte und Schilder vorliegen.

In Abbildung 5.2 sind die Häufigkeiten der Blickzuwendungen in der vertikalen Ebene bei der Autobahnfahrt dargestellt, die nach der Fixationsdauer gewichtet sind. Nach dieser Darstellung deckt ein Winkel von 0° bis zu ca. 4° oberhalb der Augenhöhe eine Häufigkeit von bis zu 67 % (freie Fahrt) bzw. 98 % (Folgen anderer Verkehrsteilnehmer) der Blickzuwendungen bei der Autobahnfahrt ab.

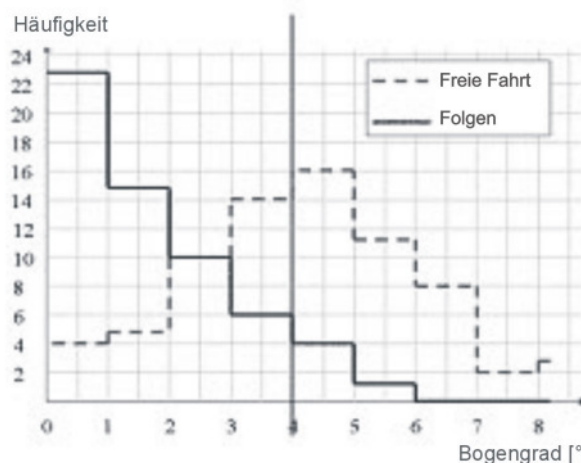


Abbildung 5.2 Häufigkeitsverteilung der Blickzuwendungen im vertikalen Bereich oberhalb der Augenhöhe während freier Fahrt und beim Folgen anderer Verkehrsteilnehmer (nach Cohen 1987)

Sowohl für die Autobahn- als auch für die Landstraßenfahrt hat sich ergeben, dass sich die Fixationspunkte in einem horizontalen Bereich von $\pm 10^\circ$ befinden. In Tabelle 5.2 sind die entsprechenden Verteilungen der Blickzuwendung für die Landstraße dargestellt, bei der Autobahnfahrt verschieben sich die Punkte weiter in die Ferne, wobei auch die Sichtbreite

schmäler wird. Wie aus der Tabelle ersichtlich, befindet sich eine Fixationshäufung auf der rechten Straßenseite bei einem mittleren Abstand von ca. 140 m (Cohen 1987).

Tabelle 5.2: Verteilung der Fixationsstellen im horizontalen Bereich während freier Fahrt auf der Landstraße (Cohen 1987)

Laterale Verteilung		Longitudinale Verteilung	
Blickwinkel	Häufigkeit	Entfernung	Häufigkeit
-10° bis -5°	5,7 %	30 bis 76 m	7,7 %
-5° bis 0°	27,0 %	76 bis 152 m	49,5 %
0° bis $+5^\circ$	67,3 %	> 152 m	31,4 %

Offensichtlich ist es sinnvoll, mindestens eine Entfernung von 150 m auszuleuchten; der minimale Öffnungswinkel sollte bei $\pm 10^\circ$ liegen. Bei schneller Fahrt auf geraden Strecken, wie beispielsweise der Autobahnfahrt, ist zu berücksichtigen, dass die Blickzuwendung häufig oberhalb der Horizontalen liegt. Dadurch erscheint eine Ausleuchtung der Peripherie, wie z.B. von Bäumen, aber auch von Überkopfbeschilderungen, sehr wünschenswert.

Die gegebenen Werte werden durch die Studie von Damasky (1995), welche die Positionen von Verkehrszeichen an Landstraßen in einem horizontalen Bereich von 0° bis $+10^\circ$ sowie in einem vertikalen Bereich von $+1^\circ$ bis $+4^\circ$ aufzeigt, bestätigt.

Die erzeugte Lichtverteilung soll daher einen Kompromiss zwischen der ausreichenden Reichweite zur Ausleuchtung aller relevanten Objekte und der Vermeidung der Blendung anderer Fahrer bilden.

5.1.3 Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Systemkomponenten

Eine wichtige Randbedingung für die zu erstellenden Ausleuchtungsstrategien ist die Leistungsfähigkeiten der eingesetzten Sensoren. Im Mittelpunkt stehen hier die vorausschauenden Sensoren, durch die das vordere Umfeld des Fahrzeugs erfasst werden soll.

Von wesentlicher Bedeutung für die Realisierbarkeit des aktiven Lichtsystems ist der während eines Messzyklus zurückgelegte Weg eines von dem Sensor detektierten Objektes. In Tabelle 5.3 sind für unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten die zurückgelegten Distanzänderungen zu anderen Objekten innerhalb eines Messzyklus des Lidar-Sensors aufgetragen. Hieran ist zu erkennen, dass der Zeitraum der Erkennung eines neuen Objektes durchaus kritisch zu sehen ist. Mehrere Messzyklen müssen im Sensorpostprocessing ausgeführt werden, um sicherzustellen, dass ein neu erkanntes Ziel ein reales Objekt repräsentiert.

Tabelle 5.3: Messzyklusbezogene Parameter des Lidar-Sensors

Δv [km/h]	Distanzänderung innerhalb eines Messzyklus [m/ms]	Erkennung eines neuen Objektes (300 ms) [m]	Verfolgung eines Objektes (50 ms) [m]
160	0,0444	13,32	2,22
200	0,0556	16,68	2,78
240	0,0667	20,01	3,33

Weitere limitierende Faktoren, die als Randbedingungen zu betrachten sind, bilden die technischen Parameter des Scheinwerfers. Für die Erzeugung einer hier erforderlichen modularen Lichtverteilung wird der im Kapitel 2.4 dargestellte DMD-Scheinwerfer eingesetzt. Eine zentrale Bedeutung hat dabei die Auflösung des von diesem Scheinwerfer pixelweise erzeugten Lichtkegels.

Tabelle 5.4 stellt die Auflösung und die Geometrie der Pixel-Lichtverteilung als Funktion der Entfernung für zwei in Erwägung gezogene Öffnungswinkel von $\pm 10^\circ$ und $\pm 30^\circ$ dar.

Tabelle 5.4: Auflösung und Geometrie der Pixel-Lichtverteilung

Entfernung	Öffnungswinkel	Lichtkegelbreite	Pixelbreite	Pixelanzahl pro Fahrzeug (2,55 m)
25 m	$\pm 10^\circ$	8,82 m	0,01 m	255
25 m	$\pm 30^\circ$	28,87 m	0,03 m	85
200 m	$\pm 10^\circ$	70,50 m	0,07 m	37
200 m	$\pm 30^\circ$	230,90 m	0,23 m	12

5.1.4 Ausgestaltung der ausgeblendeten Lichtverteilungszone

Das Projizieren einer sich dynamisch ändernden Hell-Dunkel-Grenze auf die Fahrbahn im direkten Fahrzeugvorfeld kann eine negative Wirkung auf den Fahrer ausüben. Je nach Schärfe der dadurch entstehenden Gradienten kann eine derartige Ausleuchtung zur Irritation des Fahrers führen. Andererseits ist denkbar, das aktive System mit einem konventionellen Scheinwerfer, der für die Erzeugung einer Grundlichtverteilung sorgt, zu kombinieren. Dadurch wird eine große Zuverlässigkeit des gesamten Scheinwerfersystems gewährleistet. Diese kann in Form des üblichen Abblendlichts oder einer AFS-Lichtfunktion gestaltet werden. So kann der Fahrer im Falle einer Störung oder eines Ausfalles des „aktiven“ Systemanteils seine Fahrt mit der Grundlichtverteilung weiter fortsetzen.

Im Hinblick auf diese Sicherheitsaspekte und auf das Streben nach der Erzeugung einer möglichst stationären Ausleuchtung ist es sinnvoll, den dynamisch veränderbaren Lichtverteilungsbereich nur als eine Ausweitung oberhalb der Grundlichtverteilung zu realisieren. Auf

diese Weise lässt sich das Licht über die horizontale Linie projizieren, um dadurch Bereiche, die mit den heutigen Systemen nur im Fernlichtmodus abzudecken sind, auszuleuchten.

Weiterhin muss die Breite der Ausblendungszone festgelegt werden. Dabei ist zu erwähnen, dass die Breite eines Fahrzeugs nicht zwangsläufig durch die meisten Sensorarten festgestellt werden kann. Deshalb wird hier die Breite von 2,55 m pro erkannten Fahrzeug als Minimum angenommen.

Tabelle 5.5: Minimale Ausblendungen einschließlich der Toleranzen für die Landstraße.

Gezeigt ist die Ausblendung für ein Fahrzeug bei nächster (hellgrau) und weitester (dunkelgrau) Entfernung (K_R – Kurvenradius, Δv – Geschwindigkeitsdifferenz)

Gegenverkehr, Landstraße, $K_R = 0$ m, $\Delta v = 200$ km/h	
Mitverkehr, Landstraße, $K_R = 0$ m, $\Delta v = 100$ km/h	
Gegenverkehr, Landstraße, $K_R = 1300$ m, $\Delta v = 200$ km/h	
Mitverkehr, Landstraße, $K_R = 1300$ m, $\Delta v = 100$ km/h	

Für die Entwicklung der Ausleuchtungsstrategien ist es zweckmäßig, bei der Bestimmung von Ausblendungsbreiten auch Sensorgenauigkeit, -auflösung und Messzykluszeit in die Betrachtung mit einzubeziehen.

Nachfolgend werden in Tabelle 5.5 die minimalen Ausblendungen für den Mit- und Gegenverkehr auf einer Landstraße bei der Geradeaus- und Kurvenfahrt aufgezeigt. Diese „minimale Ausblendungsbreite“ beinhaltet die Winkelgenauigkeit und den Messzyklus des Sensors. Als Winkelgenauigkeit wird 1° angenommen, da diese von den meisten Sensoren erreicht werden kann.

Die minimale Entfernung beträgt hierbei für den Mitverkehr 33 m, was dem empfohlenen Fahrzeugabstand von 1,2 s bei 100 km/h entspricht; gesetzlich ist jedoch auch ein Abstand von 0,9 s zwischen zwei Fahrzeugen noch zulässig (Weilkes 2000). Beim Gegenverkehr ist die Entfernung ausschlaggebend, bei der sich dieser soeben noch im Lichtkegel befindet. Als maximale Entfernung wird ein Wert von 180 m angenommen. Dieser Wert entspricht der Reichweite des Lidar-Sensors unter Berücksichtigung der erforderlichen Zeit für die Detektion eines neuen Objekts.

5.2 Mögliche Strategien der kollektiven Ausleuchtung

Neben der bereits erläuterten Ausleuchtungsstrategie, bei der jedes sich innerhalb des Lichtkegels befindliche Fahrzeug separat ausgeblendet wird, sind auch andere Szenarien denkbar. Voraussetzung ist dabei, dass die Realisierung der jeweiligen Strategie technisch umsetzbar ist und sie den verkehrsbezogenen Wahrnehmungsanforderungen genügt.

In diesem Kapitel werden vier unterschiedliche Realisierungskonzepte dargestellt, wobei jedes Konzept einen unterschiedlichen Tauglichkeitsgrad je nach Verkehrssituation aufweist.

Wie schon im vorherigen Kapitel angedeutet, soll nur der Fernlichtbereich von $-0,57^\circ$ bis $+4^\circ$ oberhalb der h-h Linie aktiv gesteuert werden.

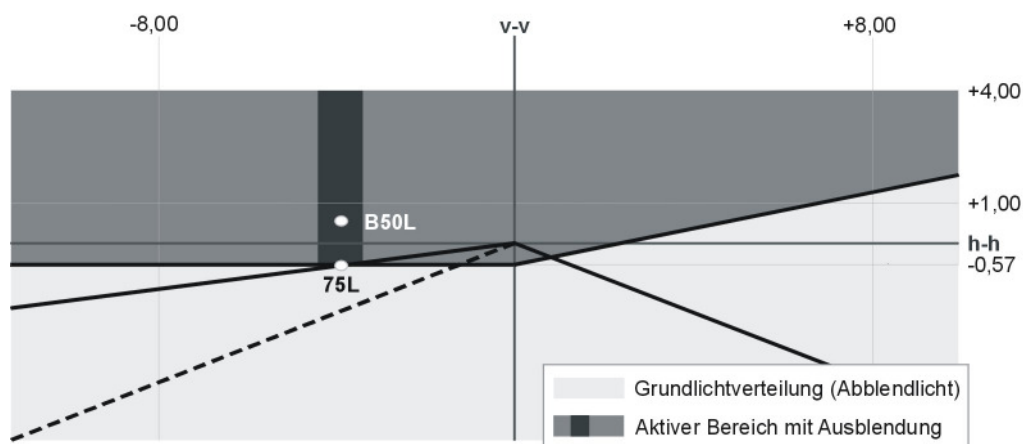


Abbildung 5.3: Prinzipdarstellung der einzelnen Lichtbereiche für die kollektive Ausleuchtung in einem Messschirm nach ECE Nr. 8. Nur im oberen Bereich wird die Lichtverteilung aktiv verändert, wie durch die beispielhafte Ausblendung (schwarz) gezeigt wird. Die Basislichtverteilung erfolgt durch das Abblendlicht.

Das unmittelbare Fahrzeugvorfeld wird durch eine Basislichtverteilung, die dem heutigen Abblendlicht entspricht, permanent ausgeleuchtet. Auf diese Weise wird das komplette Abschatten auch eines nicht selbst leuchtenden Objektes verhindert. Nur der obere Bereich lässt sich aktiv verändern, wie durch die beispielhafte Ausblendung (schwarz) gezeigt wird. Abbildung 5.3 stellt diesen Sachverhalt graphisch dar.

Neben der Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer sind die Effizienz und die zeitliche Konstanz der Lichtverteilung von Bedeutung. Effizienz soll hierbei beschreiben, wie viel des vom Scheinwerfer erzeugten Lichts zur Ausleuchtung tatsächlich genutzt wird. Die zeitliche Konstanz drückt aus, wie stark sich die Lichtverteilung im zeitlichen Verlauf ändert.

Unter Berücksichtigung der genannten Kriterien ergeben sich vier prinzipielle Strategien, die im folgenden erläutert werden sollen.

Automatisches Fernlicht

Das automatische Fernlicht stellt eine relativ einfache Strategie dar, welche ähnlich dem heutigen Fernlicht arbeitet. Es soll hierbei lediglich festgestellt werden, ob sich zumindest ein Fahrzeug im Vorfeld befindet, um dann den gesamten aktiven Bereich auszublenden.

Dabei ergibt sich jedoch der Nachteil, dass auch bei sehr geringem Verkehrsaufkommen der aktive Bereich vollständig ungenutzt bleibt. Zusätzlich kann das Aus- bzw. Einblenden des gesamten aktiven Bereiches Adaptationsprozesse hervorrufen. Andererseits stellt diese Strategie keine Anforderungen an die Aktorik. Ihre Realisierung beschränkt sich nur auf das Zuschalten eines unveränderten statischen Lichtanteiles oberhalb der Basislichtverteilung.

Spurweise Ausblendung

Bei dieser Form der Ausblendung wird pro Fahrspur ein Ausblendungsbereich erzeugt, sofern sich auf dieser Spur ein detektiertes Objekt befindet. Diese Schatten sollen dabei so klein wie möglich sein. Vorteile sind bei dieser Strategie insbesondere auf mehrspurigen Straßen bei großen Verkehrsdichten zu erwarten.

Die Implementierung dieser Strategie erfordert allerdings eine Klassifizierung erkannter Objekte durch ihre Zuordnung zu der jeweiligen Fahrbahnspur.

Mittelausblendung

Bei der Mittelausblendung wird stets auf der gesamten Fahrbahnbreite von einer Entfernung, die der Sensorreichweite entspricht, die Lichtstärke reduziert. Dies ist auch dann der Fall, wenn sich überhaupt kein Objekt im Vorfeld befindet. Dadurch wird sichergestellt, dass die Fahrer nicht geblendet werden, die sich außerhalb der Sensorreichweite befinden. Diese Blendungsgefahr besteht insbesondere bei der Verwendung von lichtstarken Scheinwerfern. Sobald Fahrzeuge erkannt werden, wird über alle Objekte ein einziger Schatten gelegt, der ebenfalls so klein wie möglich ist. Dabei ist die Mittelausblendung in den zu generierenden Schatten mit einzubeziehen.

Diese Strategie macht nur dann Sinn, wenn der Mittelschatten ähnlich einem Kurvenlicht dem Fahrbahnverlauf folgt. Auch hier liegt also die Aufgabe vor, die Fahrbahnkrümmung möglichst genau zu erkennen. Als weiteres Problem ist sicherlich der ständige Schatten zu bezeichnen, der auch dann vorliegt, wenn kein Objekt erkannt wurde. Solange sich dieser jedoch immer über der Fahrbahn befindet, soll er durch den Fahrer nicht bemerkt werden.

Individuelle Ausblendung

Die individuelle Ausblendung erzeugt für jedes erkannte Objekt vor dem Fahrzeug einen separaten Schatten. Gerade bei niedrigen Verkehrsdichten liegt hier ein gravierender Vorteil, da nur ein Minimalbereich ausgeblendet wird. Gleiche Verkehrssituationen vorausgesetzt, ist diese Strategie somit die effizienteste.

Jedoch wird hierdurch der Lichtkegel stark zerstückelt, woraus schmale Lichtbänder resultieren. Eine Vorteilhaftigkeit dieser Lichtbänder ist fragwürdig und diese können sogar irritierend wirken. Deshalb scheint die Anwendung dieses Szenarios nur bei begrenzter Anzahl von Objekten im Fahrzeugvorfeld sinnvoll zu sein.

Bei der individuellen Ausblendung besteht keine Notwendigkeit einer genauen Zuordnung von Objekten zu Fahrbahnspuren. Alle erkannten Fahrzeuge auf der Fahrbahn werden hier als relevant klassifiziert.

5.3 Simulationstool

Um erste Aussagen hinsichtlich der Vor- und Nachteile der im vorherigen Kapitel genannten Strategien machen zu können, wurde ein Simulationstool entwickelt. Dieses zeigt die vier denkbaren Strategien in einem sich dynamisch ändernden Verkehrsgeschehen. Gerade diese sich ändernde Verkehrssituation macht eine Bewertung der Strategien nach statischen Gesichtspunkten, wie sie evtl. in Graphiken denkbar wären, unmöglich. Eine solche Simulation stellt hingegen eine Möglichkeit dar, einen ersten Überblick über das Systemverhalten in einer dynamischen Umgebung zu gewinnen.

Es handelt sich um eine Simulation, die unterschiedliche Straßentypen, wie beispielsweise Landstraßen und Autobahnen, sowie verschiedene Verkehrsdichten abbildet. Dabei sollen andere Fahrzeuge in diesem virtuellen Verkehrsgeschehen zufällig erscheinen. Ein wichtiges Kriterium ist dabei, dass der Geschwindigkeitsbereich von Objekten in der Simulation der Realität entspricht, so dass eine Einschätzung über die tatsächlich vorliegende Situation im Rahmen der zu betrachtenden Strategie durchführbar ist. Zudem soll es möglich sein, durch ein integrierbares Statistikprogramm quantitative Aussagen über die Strategien geben zu können.

Durch die Notwendigkeit einer echtzeitfähigen Programmausführung erschien eine Programmierung unter C++ als angebracht. Um ein robustes Funktionieren des Systems zu gewährleisten, musste dafür gesorgt werden, dass zum einen ein eindeutiges Zeitereignis und zum anderen die Simulation der Lidar-Daten während einer Zeiteinheit sichergestellt werden. Dazu wurde das Programm so geschrieben, dass einzelne Programmteile wie ein Zeitgeber oder das Erscheinen von neuen Fahrzeugen quasi-parallel ablaufen.

Durch den Zeitgeber und die Fahrzeugberechnung wird der Lidar-Sensor simuliert, der ca. 50 ms braucht (Merker 2004), um neue Messdaten weiterzugeben. Die Berechnung

bestimmt hierbei die Positionen der Fahrzeuge im neuen Zyklus. Dadurch liegen nun dem Programmteil „Berechnung der Ausblendungen“ alle Daten in einem 50ms Intervall vor, wobei sich dieses Intervall über die GUI (Graphical User Interface) individuell einstellen lässt. Nachdem die Berechnung, die u.a. die Strategien enthält, abgeschlossen ist, wird als letzter Punkt in einem Zyklus die Situation auf dem Monitor dargestellt.

Wichtige Unterfunktion des Programms ist die Implementierung anderer Verkehrsteilnehmer. Dabei ist von Bedeutung, dass die Fahrzeuge nicht im selben Intervall mit denselben Geschwindigkeiten erzeugt werden, sondern eine gewisse Zufälligkeit vorhanden ist.

Im Programm wird jede Strategie durch eine eigene Unterfunktion implementiert. Aufgabe dieser Unterfunktion ist es, die benötigte Ausblendung für die Fahrzeuge zu bestimmen.

Die implementierten Strategien berücksichtigen nicht nur alle erkannten Fahrzeuge, sondern auch die Sensorgenauigkeit, die Messzykluszeit sowie den Straßentyp. Ebenfalls wird die Auflösung des DMD-Scheinwerfers betrachtet.

Die graphische Oberfläche des Simulationstools dient zur Interaktion des Benutzers mit dem Programm. Dieses Programmmodul bietet einerseits die Möglichkeit, sämtliche relevanten Parameter zu konfigurieren und die Simulation zu steuern. Andererseits wird das simulierte Verkehrsszenario abgebildet, wie es in Abbildung 5.4 verdeutlicht wird. Dabei gibt es drei Beobachtungsfenster, die in ihrer vertikalen Reihenfolge genannt werden:

- Reale Fahrzeugsituation aus der Fahrersicht
- Ausblendung im aktiven Bereich der Lichtverteilung oberhalb der h-h Linie
- Verkehrssituation aus der Vogelperspektive im Bereich von -10 bis +200m relativ zur eigenen Fahrzeugposition

In dem Programm ist ein Statistikmodul integriert worden, welches eine quantitative Bewertung der Strategien ermöglicht. Am Ende der statistischen Messung werden die Daten in eine Textdatei geschrieben, um weiter verarbeitet werden zu können. Die Ergebnisse dieser statistischen Verfahren werden im nächsten Unterkapitel diskutiert.

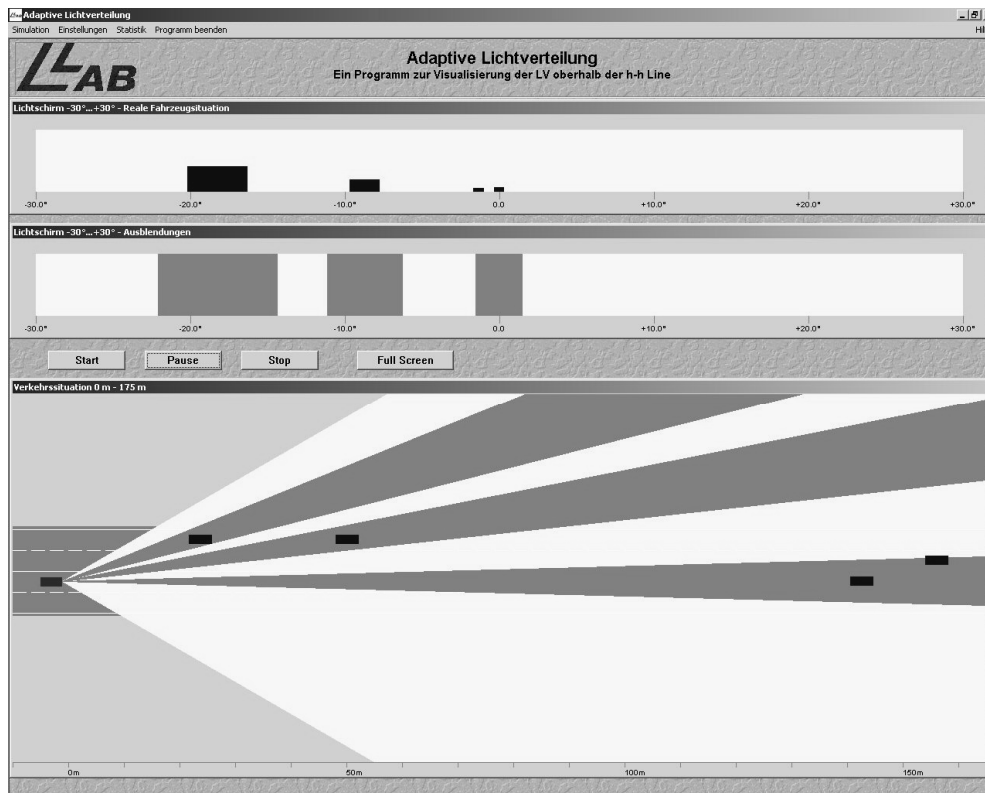


Abbildung 5.4 Graphische Benutzeroberfläche der Simulation. Gezeigt ist die individuelle Ausleuchtung auf einer vierspurigen Landstraße. Das am weitesten entfernte Objekt wurde noch nicht durch die Sensorik erfasst, so dass für dieses keine Ausblendung vorliegt.

5.4 Quantitative Bewertung der Strategien anhand der Simulation

Eine quantitative Bewertung der identifizierten Strategien erfolgte mit Hilfe statistischer Methoden, die in der Simulation implementiert wurden. Dabei wurden drei Kennziffern eingeführt:

- Effizienz (Eff)
- Zeitliche Konstanz (ZK)
- Änderungsrate (R)

Die Effizienz beschreibt, wie groß der Anteil des vom Scheinwerfer erzeugten Lichts ist, der auf die Fahrbahn projiziert wird. Diese Kennziffer wurde als Verhältnis zwischen der Anzahl der das Licht abgegebenen Mikrospiegel und der Anzahl aller in einem DMD-Scheinwerfer vorhandenen Mikrospiegel bestimmt.

Die zeitliche Konstanz informiert, wie viele Pixel sich zwischen zwei statistischen Messungen verändert haben. Ein Wert von eins weist dabei auf eine hohe Konstanz, d.h. es hat sich kein

Pixel verändert. Die Veränderung eines Pixels erfolgt über das Kippen eines Spiegelements von einer in die andere Endposition.

Durch die Änderungsrate wird angegeben, wie viele Pixel sich in einem bestimmten Zeitablauf verändert haben. Anders als die anderen beiden Kennziffern ist dieser Wert nicht auf eins normiert.

Für jede Strategie wurden statistische Messungen für mehrere Verkehrssituationen durchgeführt. Die Situationen unterscheiden sich dabei durch die Verkehrsdichte sowie den Straßentyp. Um möglichst aussagekräftige Werte zu erhalten, wurden pro Situation mehrere Messungen durchgeführt, so dass schließlich pro Situation und Strategie 3600 Messpunkte vorlagen. Bei den auf eins normierten Kennziffern Effizienz und zeitliche Konstanz wurde das arithmetische Mittel gebildet, bei der Änderungsrate wurde der Maximalwert gewählt. Dadurch ist es möglich, den „Worst-Case“ abzubilden.

Diese Parameter werden mit Hilfe von Schaubildern visualisiert. Dabei wird auf der x-Achse die Effizienz und auf der y-Achse die zeitliche Konstanz aufgetragen. Abbildung 5.5 zeigt ein Diagramm für niedrige Verkehrsdichten auf einer zweispurigen Landstraße.

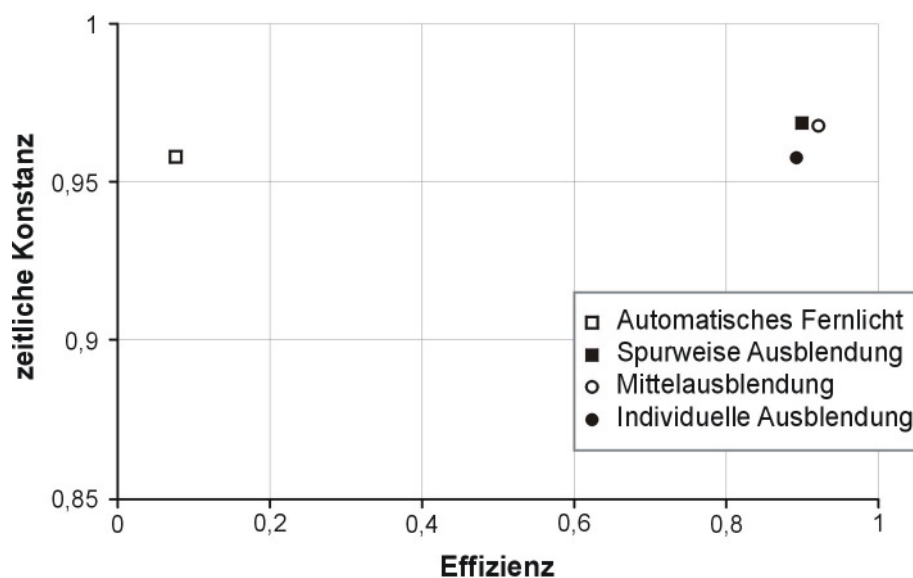


Abbildung 5.5 Bewertung der Strategien für eine zweispurige Landstraße mit niedriger Verkehrsdichte

In der gewählten Skalierung liegen mit Ausnahme der Strategie „Automatisches Fernlicht“ alle Strategien relativ nah zusammen. Diese Strategie erreichte für die Kennzahl Effizienz nur einen Wert von 0,08, was als eindeutiges Ausschlusskriterium zu werten ist. Die zur Abbildung 5.5 zugehörigen Werte werden in Tabelle 5.6 dargelegt. Dabei wird ersichtlich, dass große Unterschiede nur bei der Änderungsrate vorhanden sind.

Tabelle 5.6: Reaktion der Strategien auf die Verkehrssituation für eine zweispurige Landstraße mit niedriger Verkehrsdichte

Strategie Parameter	Automatisches Fernlicht	Spurweise Ausblendung	Mittel- ausblendung	Individuelle Ausblendung
\overline{Eff}	0,08	0,91	0,89	0,92
\overline{ZK}	0,96	0,97	0,96	0,97
$\max(R)$	980	293	497	344

Bei der Auswertung ergab sich, dass die Verkehrsdichte für die Reihenfolge der Strategien unerheblich ist. Auch verändern sich diese nicht durch die Anzahl der Spuren. Lediglich bei Autobahnen verschob sich die Strategie „Spurweise Ausblendung“ auf einen der letzten Ränge.

Grundsätzlich scheint nach dieser Bewertung die individuelle Ausleuchtung die am besten geeignete Strategie zu sein. Sie ermöglicht zudem am genauesten den Gedanken einer kollektiven Ausleuchtung umzusetzen. Die hohe Effizienz von ca. 92 % gestattet daneben eine wirksame Ausleuchtung der Verkehrssituation. Wie bei jeder Strategie ist eine rechtzeitige Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer zudem sichergestellt.

Zusammenfassend ist dieses Tool geeignet, eine Vorstellung über das dynamische Verhalten der kollektiven Ausleuchtung durch die Visualisierung zu erhalten und erste Abschätzungen zu machen. Jedoch ist es notwendig, einige Schwächen der Simulation herauszustellen. Größter Nachteil ist die getroffene Idealisierung des Verkehrsgeschehens. Der Verkehr wird in der Weise idealisiert, dass die implementierten Fahrzeuge keine Spurwechsel vornehmen und stets in der Mitte ihrer Spur fahren. Zudem fährt das eigene Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit. Eine Idealisierung der Fahrbahn liegt insofern vor, als dass es weder Krümmungen noch Steigungen gibt. Demzufolge treten auch keine Neigungen des Fahrzeugs auf. Die dargelegten Schwächen dieses Tools beschränken seine Verwendbarkeit für eine realitätsübertragbare Bewertung eines Scheinwerfersystems.

6 Aufbau der Versuchsträger

Um die Realisierbarkeit des Konzeptes der kollektiven Ausleuchtung nachzuweisen, wurde im Rahmen dieser Arbeit zunächst ein Fahrzeug-Demonstrator im Maßstab 1:8 aufgebaut. Mit Hilfe dieses Demonstrators und eines anderen gleichdimensionierten passiven Fahrzeugs konnte der Ausblendungsprozess in einer Begegnungssituation zweier Fahrzeuge unter dynamischen Bedingungen im Labor erprobt werden.

Um allerdings eine genaue Aussage über das Verhalten des aktiven Lichtsystems im realen Verkehrsgeschehen machen zu können, wurde in der zweiten Phase des Projektes ein Versuchsfahrzeug entsprechend ausgerüstet. Hier wurde als Testplattform ein Fahrzeug vom Typ Volvo V70 ausgewählt. Das verwendete Fahrzeug war bereits mit einem Front Rack zur Anbringung eines Scheinwerferprototyps und Sensoren zur Realisierung eines dynamischen Kurvenlichts ausgestattet. Auf diese Weise beschränkte sich die zusätzliche Fahrzeugausrüstung auf den vorausschauenden Sensor und einen adaptiven Scheinwerfer.

6.1 Fahrzeug-Demonstrator im Maßstab 1:8

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die in dem Demonstrator integrierten Komponenten des Scheinwerfersystems. Wichtigste Bestandteile sind ein Radarsystem, das die Position und Relativgeschwindigkeit des erkannten Objektes ausgibt, und ein adaptiver Scheinwerfer zur Erzeugung einer variablen Lichtverteilung. Als weitere Komponente wird ein Laptop zur Auswertung von Messdaten und zur Ansteuerung des Scheinwerfers eingesetzt. Zur Gewährleistung eines robusten Datenaustauschs zwischen den einzelnen Systemknoten wird ein CAN-Bus eingesetzt. Das CAN-Bus Toolset der Firma ExpertControl, das eine Schnittstelle zwischen dem CAN-Bus und der Matlab/Simulink Umgebung bildet, wird genutzt. Dieses Toolset ermöglicht ein direktes Auslesen von CAN-Botschaften.

Die Ermittlung der Eigengeschwindigkeit und des Kurvenradius erfolgt mit Hilfe eines Geschwindigkeitssensors und eines Lenkwinkelsensors. Aufgrund von sehr kleinen Geschwindigkeiten ist eine genaue Abschätzung des aktuellen Fahrbahnradius allein durch den Lenkwinkel möglich. Die analogen Messwerte aus den beiden Sensoren des Demonstrators werden in dem 16-bit Mikrokontroller C164CI, der unter anderem über einen 10-bit A/D-Wandler verfügt, digitalisiert. Dieser Mikrokontroller übernimmt auch die Aufgabe der Umwandlung der ausgewerteten Messdaten in CAN-Botschaften.

Der eingesetzte Radar ist ein bei der Firma smart microwave sensors aus Braunschweig entwickeltes Prototypsystem, das für Automobilapplikationen vorgesehen ist. Der Sensor arbeitet im 24GHz-ISM Band. Die Fähigkeit des Radars, durch die Auswertung der Signallaufzeit und der Dopplerverschiebung sowohl Entfernung als auch Relativgeschwindigkeit zu messen, bietet die Möglichkeit sehr kleine Messwerte zu erfassen. Die Ermittlung der Entfernung ist schon ab 1,5m möglich. Die Geschwindigkeit kann im Bereich -93 bis

+155 km/h gemessen werden. Um eine robuste Detektion auch von kleinen Objekten sicherzustellen, wird für diese Applikation zusätzlich die Empfindlichkeit des Sensors erhöht. Zur Signalverarbeitung und Umwandlung der Sensordaten in CAN-Botschaften verfügt der Radar über ein integriertes DSP-Modul.

Aufgrund kleiner Entfernungen zwischen den sich begegnenden Demonstratoren wurde statt eines realen Scheinwerfers ein kommerzieller Videoprojektor eingesetzt. Der 220 W starke Beamer der Firma NEC erzeugt einen Lichtstrom von 850 lm, der ausreicht, um die erforderlichen Beleuchtungsstärken in dem Erfassungsbereich des Radars zu erzielen.

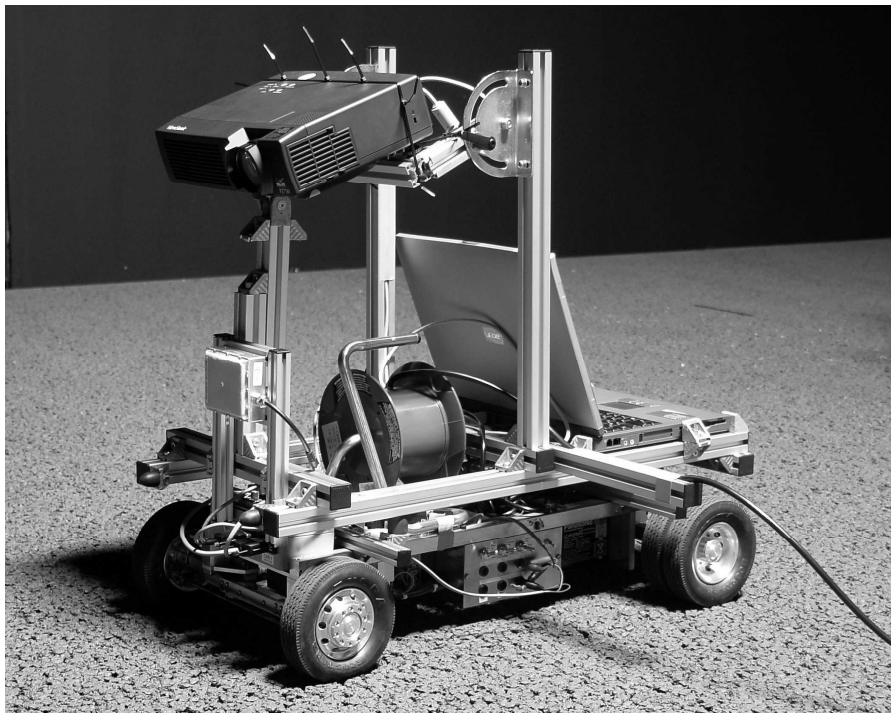


Abbildung 6.1: Aufbau des Fahrzeug-Demonstrators (1:8)

Die durchgeführten Testversuche mit den Demonstratoren bilden nur auf eine sehr eingeschränkte Weise eine Begegnungssituation zweier realer Fahrzeuge ab (s. Abbildung 6.2). Aufgrund sehr kleiner Geschwindigkeiten und der Einschränkungen der Realitätsnähe bei der Wahrnehmung ist es kaum möglich, einen vollen Überblick über das Verhalten eines solchen Scheinwerfersystems unter realen Verkehrsbedingungen zu gewinnen. Daher konnte eine objektive Bewertung des Systems weder unter technischen noch unter physiologischen und psychologischen Gesichtspunkten vorgenommen werden.

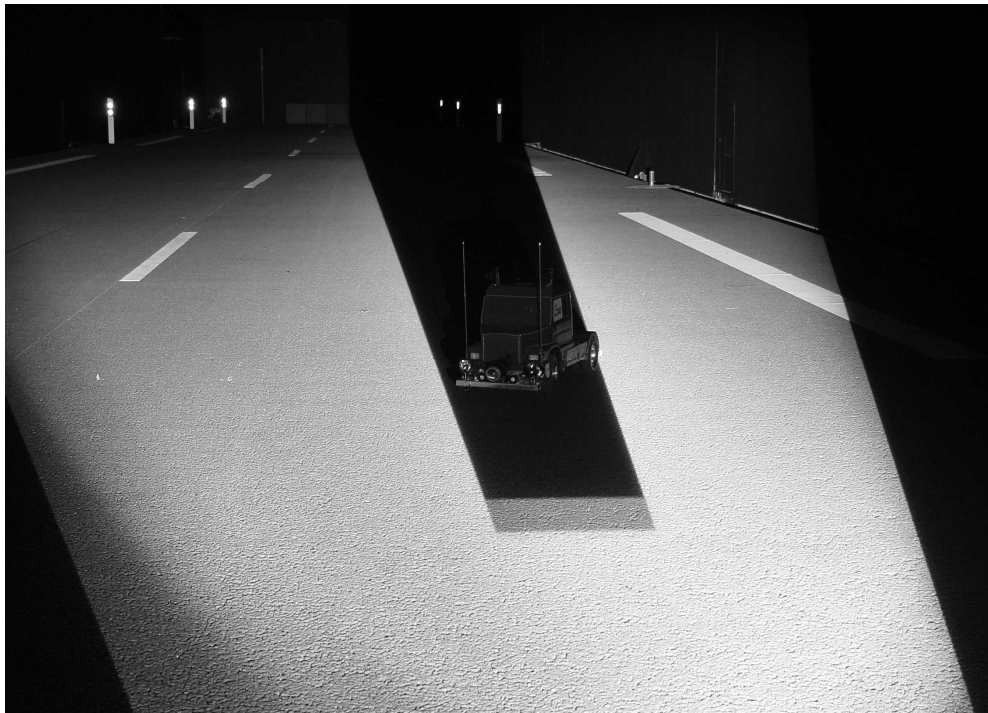


Abbildung 6.2: Ausblenden eines entgegenkommenden Modelfahrzeugs durch den „lichtaktiven“ Fahrzeug-Demonstrator

6.2 Versuchsfahrzeug (1:1)

Der Aufbau des im Versuchsfahrzeug implementierten Scheinwerfersystems entspricht dem vorstehend dargestellten Demonstrator mit einer Anpassung von Systemeigenschaften an die realen Verkehrsbedingungen. Die wesentlichen Komponenten sind:

- Vorausschauender Sensor zur Erfassung der Position und Differenzgeschwindigkeit der Fahrzeuge im Vorfeld
- Fahrzeugsensorik zur Ermittlung der eigenen Geschwindigkeit und des aktuellen Radius der Fahrbahn
- Adaptiver Scheinwerfer zur Erzeugung von variablen Lichtverteilungen
- CAN-Bus zum Informationsaustausch
- Steuerrechner

Eine vom Fahrzeugbordnetz unabhängige Stromversorgung wurde eingerichtet, um eine leistungsstarke und störungsfreie Energiequelle für die Komponenten des Scheinwerfersystems bereitzustellen. Diese zusätzliche Versorgung besteht aus einem Fahrzeugakkumulator, einem 12 V/~230 V Spannungswandler und Schutzelementen. Auf diese Weise können auch

über Netzspannung betriebene Komponenten eingesetzt werden. Abbildung 6.3 gibt einen Überblick über die angewendeten Komponenten.

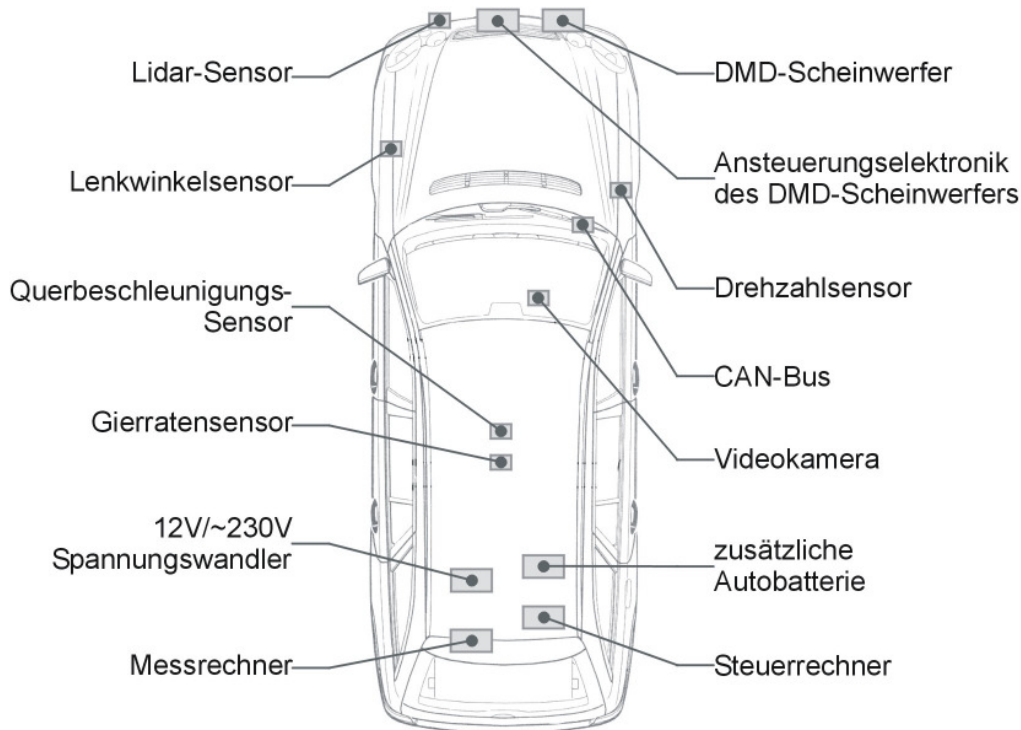


Abbildung 6.3: Komponenten des Versuchsfahrzeugs

6.2.1 Sensorik

Wie im Kapitel 4.5 gezeigt wurde, stellt die wichtigste Einschränkung heutiger vorausschauender Sensoren der zu geringe Erfassungsbereich dar. Ein in dieser Applikation eingesetzter Sensor muss sich mit einer Reichweite von deutlich über 100m und einem größeren Öffnungswinkel als dem der Lichtverteilung auszeichnen.

Aufgrund eines Bewertungsverfahrens der zur Zeit verfügbaren Sensorsysteme wurde ein Lidar-Sensor der Firma Hella KGaA zur Detektion des Fahrzeugvorfelds ausgewählt. Abbildung 6.4 stellt die Ausführung des Lidar-Sensor dar. Dieser Sensor, dessen Technische Daten in Tabelle 6.1 zusammengefasst wurden, ist ein Prototyp und wird ab dem Jahr 2005 als Abstandssensor des ACC (Adaptive Cruise Control) in Serie gehen. Der Lidar-Sensor erfüllt zum großen Teil die gestellten Anforderungen. Die Reichweite des Sensors beträgt bis zu 200m. Der Lidar-Sensor arbeitet mit einer Abstandsauflösung von 0,1m und einer Geschwindigkeitsauflösung von 0,1 km/h.



Abbildung 6.4: Ausführung des Lidar-Sensors (Merker 2004)

Um den geringen horizontalen Öffnungswinkel zu vergrößern, wurde die Anzahl der Sensorkanäle erhöht. Für die Abdeckung des direkten Fahrzeugvorfelds kann der Lidar alternativ durch einen Nahbereichsensor gestützt werden, um den horizontalen Öffnungswinkel in diesem Bereich zu vergrößern. Diese Sensorerweiterung würde allerdings zu einer aufwendigen Nachbearbeitung der Messwerte führen.

Der direkt im Sensor integrierte Signalprozessor übernimmt die Aufgabe, die Hochfrequenzsignale zu verarbeiten. Mit Hilfe eines Fahrspurmodells, das aus Lenkwinkel-, Gierraten- und Raddrehzahl-Informationen gebildet wird, erfolgt eine Kurvenprädiktion.

Tabelle 6.1: Technische Daten des verwendeten Lidar-Sensors (Merker 2004)

Kenngröße	
Entfernungsmessbereich:	<200 m
Auflösung:	0,1 m
Geschwindigkeitsmessbereich:	-180...+180 km/h
Auflösung	0,1 km/h
Horizontaler Öffnungswinkel	$\pm 8^\circ$
Auflösung	1°
Messzykluszeit	50 ms
Erkennungszeit neuer Objekte	300 ms

6.2.2 DMD-Scheinwerfer

Die Erzeugung einer variablen Lichtverteilung wird mit einem DMD-Scheinwerfer (Digital MicroMirror Device), dessen Aufbau im Kapitel 2.4 erläutert wurde, realisiert. Dieser Konzeptscheinwerfer wurde im L-LAB, einem gemeinsamen Forschungsinstitut der Universität Paderborn und der Hella KGaA Hueck & Co. aufgebaut, mit dem Ziel, neue Lichtfunktionen zu erproben. Da die Geometrie des Prototyps nicht entsprechend den Ausmaßen eines konventionellen Scheinwerfers entspricht, konnte der Prototyp nicht in die Karosserie des Versuchsfahrzeugs integriert werden. Es ist aber möglich den Scheinwerfer an einem Front Rack zu montieren, um ihn während einer Versuchsfahrt verwenden zu können (s. Abbildung 6.5).



Abbildung 6.5: Versuchsfahrzeug mit dem DMD-Scheinwerfer

Wie die in Tabelle 6.2 zusammengestellten technischen Parameter verdeutlichen, erfüllt der DMD-Scheinwerfer die meisten lichttechnischen Anforderungen. Die in diesem Prototyp eingesetzte 220 W starke UHP-Lampe macht es möglich, sehr große Lichtstärken zu erzielen. Dadurch lässt sich wiederum die Lichtverteilung in dem gewünschten Leuchtdichtebereich variieren.

Ein wesentlicher Mangel des aktuellen Entwicklungsstadiums dieses Scheinwerfers stellt der kleine horizontale Öffnungswinkel des von ihm erzeugten Lichtkegels dar. Dadurch können einige Lichtverteilungen nur auf eine eingeschränkte Weise realisiert werden. Dies macht es auch schwierig, das System mit einem konventionellen Scheinwerfer zu vergleichen.

Die zur Veränderung der Lichtverteilung genutzten beweglichen Optikelemente eines digitalen Mikrospiegelarrays, werden über eine Scheinwerfer-Leistungselektronik angetrieben. Die Ansteuerung der Scheinwerfer erfolgt über ein VGA-Signal.

Tabelle 6.2: Technische Daten des DMD-Scheinwerfers

Kenngröße	
Lichtquelle	>200 W UHP-Lampe
Maximale Beleuchtungsstärke in 25 m	> 100lx
Lichtstrom im Abblendlicht	>1100lm
Lichtstrom im Fernlicht	>1700lm
Kontrast	gut, > 1:100
Scheinwerferwirkungsgrad (Abblendlicht)*	8,2 %
Lichtausbeute	63,64 lm/W
Öffnungswinkel/Streubreite	2 x 14,5°

*Nach der Optik / Integraler Lichtstrom der Lichtquelle

6.2.3 Ansteuerungskomponenten

Die Aufgabe der Signalverarbeitung übernimmt ein 1.1 GHz Pentium III Laptop. Mit diesem Steuerrechner und einem selbstentwickelten Programm erfolgt die Signalverarbeitung beginnend mit der Extrahierung von Sensorinformationen über die Situationsinterpretation bis zur Generierung der VGA-Steuersignale.

Da die Daten aus dem vorausschauenden Sensor als CAN-Botschaften weitergegeben werden, muss eine Schnittstelle zwischen dem Rechner und dem CAN-Interface des Sensors aufgebaut werden. Diese Aufgabe wird mit Hilfe einer PCMCIA/CAN-Einsteckkarte der Firma VECTOR realisiert. Diese Karte zeichnet eine große Robustheit und eine Übertragungsrate bis zu 1 MBd aus.

6.3 Ablauf der Signalverarbeitung

Die Signalverarbeitung in dem betrachteten System kann in zwei wesentliche Blöcke unterteilt werden. In dem ersten Block erfolgt die Messwertnachbearbeitung (Postprocessing) direkt im Sensor-Signalprozessor. Am Ausgang des Signalprozessors wird eine Liste detektierter Objekte mit ihren Zustandsvariablen als CAN-Botschaften generiert.

In dem zweiten Block findet auf Basis der aus der Nachbearbeitung resultierenden Datenbank die Interpretation der aktuellen Verkehrssituation und die Ansteuerung des adaptiven Scheinwerfers in dem eigentlichen Steuerrechner statt.

6.3.1 Messwertnachbearbeitung

Die Schnittstelle zwischen dem vorausschauenden Sensor und dem Postprozessor stellen die durch den Sensor generierten Rohdaten dar. Eine Rohdatenliste wird aus einzelnen Sensorkanälen in jedem Messzyklus getrennt ausgegeben. Basierend auf diesen Datenlisten werden aus den durch den Sensor ermittelten Reflexionszentren zunächst Gruppen gebildet. Die Reflexionen von ein- und demselben Objekt, die aus verschiedenen Sensorkanälen stammen, werden so assoziiert. Dieser Vorgang wird als Clustering bezeichnet. Die Einteilung in einzelne Cluster erfolgt aufgrund der Zustandsvariablen und Verwandtschaft von Messzielen. Jedes so gebildete Cluster entspricht einem realen Objekt. Danach wird durch den Vergleich der Reflexionspegel der Strahlen aus verschiedenen Sensorkanälen eine Winkelschätzung für alle Objekte durchgeführt. Aufgrund der Informationen über den Winkel und die Entfernung zum detektierten Objekt lässt sich wiederum eine unmittelbare Aussage über die Position des Gegenstandes im Bezug auf das Messfahrzeug machen.

Im weiteren Verlauf des Verarbeitungsprozesses findet das sog. Tracking statt, um die erkannten Objekte über eine definierte Zeit zu verfolgen. Dafür werden die Informationen über jedes Objekt für eine gewisse Zeitdauer gespeichert. In allgemeinen versteht man unter Tracking das Schätzen der Bewegungszustände detektierter Objekte (Agha 2001). Diese Zustände werden aus der Entfernungs- und Winkelmessung sowie aus den von diesen Messwerten abgeleiteten weiteren Zustandsvariablen wie Geschwindigkeit und Winkelbeschleunigung gebildet. Da die Messdaten noch einige Fehlwerte enthalten können, werden diese Signale gefiltert. Eine Anwendung der geeigneten Filtermethoden gewährleistet neben der „Glättung“ der Messdaten auch eine Prädiktion des Bewegungszustands für die nachfolgenden Messzyklen. Diese Filter-Algorithmen können dabei eine Vielzahl von Objekten gleichzeitig verfolgen. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die schwach reflektierenden und die sich kurzfristig außerhalb des Erfassungsbereiches befindenden Objekte weiterzuverfolgen und deshalb am Ausgang des Tracking-Blockes nach jedem Messzyklus zu erscheinen.

Um eine zuverlässige Erkennung von neuen Objekten sichern zu können, werden mehrere Messzyklen benötigt, bevor ein neuerkanntes Messziel als ein reales Objekt eingeschätzt wird. Diese Methode eliminiert einerseits die Fehlziele innerhalb neu erkannter Objekte, andererseits aber nimmt die Zeit für ihre Erkennung erheblich zu.

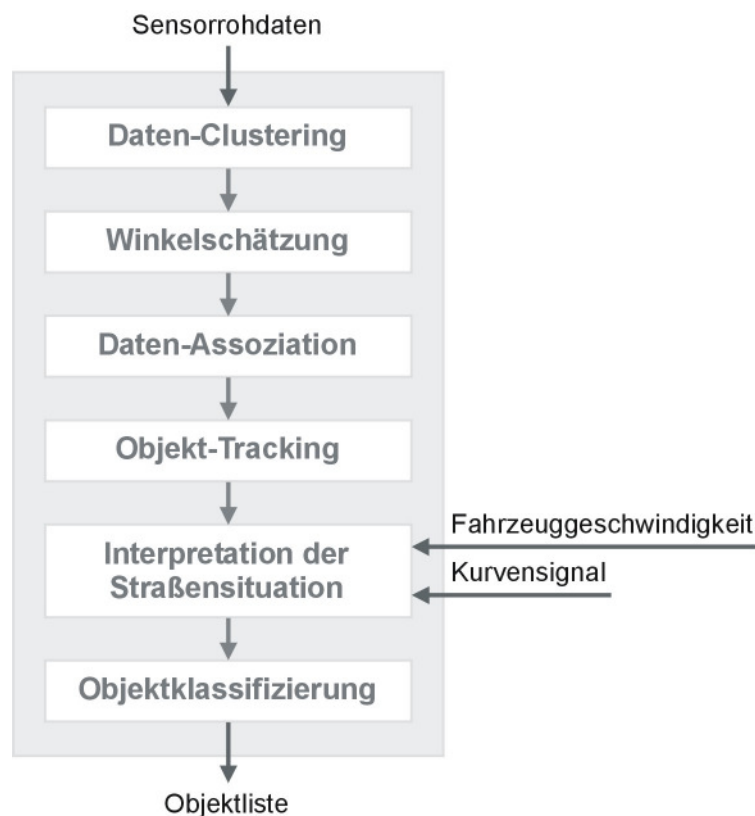


Abbildung 6.6: Struktur der Messwertnachverarbeitung

Im letzten Schritt der Nachbearbeitung erfolgt eine Objektklassifizierung. Hier werden die Objekte in Hinsicht auf ihre Relevanz gefiltert, so dass nur die für diese Applikation signifikanten Objekte ausgegeben werden. Die irrelevanten Gegenstände, wie z.B. die sich außerhalb der Fahrbahn befindenden Fahrzeuge, werden aus der Zielliste entfernt. Der robuste Verlauf des Klassifizierungsprozesses hängt wesentlich von der korrekten Interpretation der aktuellen Straßensituation ab. Die Situationseinschätzung erfolgt über die Ermittlung der Geschwindigkeit des Messfahrzeugs und des Fahrbahnkurvenradius. Hier ist die Auswahl von geeigneten Messmethoden zur Kurvenprädiktion von Bedeutung. Einen Überblick über die Struktur der gesamten Messwertnachverarbeitung gibt Abbildung 6.6.

6.3.2 Ansteuerung des aktiven Scheinwerfers

Die wesentlichen Aufgaben der Signalverarbeitung werden mit Hilfe einer selbstentwickelten Software und eines Steuerrechners realisiert. Damit werden die auf den Sensorsignalen basierenden Stellgrößen ermittelt.

Die Ansteuerungs-Plattform ist als Schichtenarchitektur aufgebaut (s. Abbildung 6.7). Die Basis stellt die Hardware dar, die eine Schnittstelle zu dem CAN-Bus bildet. Zur Realisierung dieser Schicht wird die im Kapitel 6.2.3 beschriebene PCMCIA/CAN-Karte verwendet. Die

Kommunikation der Hardware mit den oberen Schichten erfolgt über den CAN-Treiber. Die Treiber-Bibliothek übersetzt die Treiberfunktionen in den Code des Funktionsprogramms und ermöglicht dadurch den Zugriff auf die Karte bzw. auf den CAN-Bus. Somit können CAN Botschaften gesendet und empfangen werden. Mit Hilfe dieser Bibliothek erfolgt auch die Einstellung der Kartenparameter.

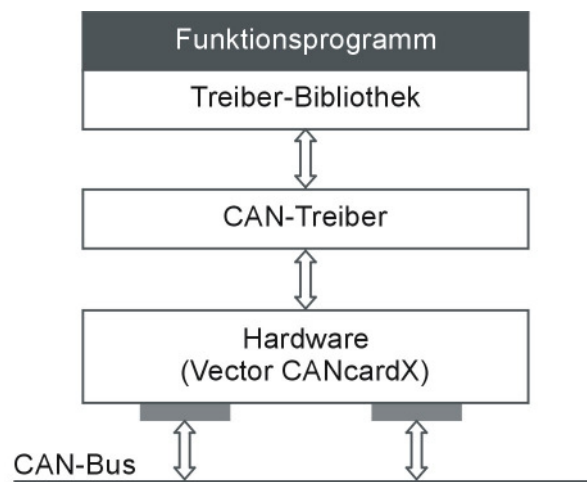


Abbildung 6.7: Architektur der Ansteuerungs-Plattform

Die Ausführung der eigentlichen Systemfunktionen findet in der Ebene Funktionsprogramm statt. In Hinsicht auf die Systemanforderungen wurde das Programm in der Programmiersprache Object Pascal erstellt. Die Software arbeitet nach dem Prinzip der Ereignissteuerung, d.h. jedes Ereignis, wie z.B. eine eingehende CAN Botschaft, ruft die Ausführung einer Programmsequenz ab. Abbildung 6.8 stellt den Ablauf des gesamten Ansteuerungsprogramms dar.

Nach der Aktivierung beginnt die Steuereinheit mit einem Selbsttest seiner Hardware- und Softwaremodule. In dieser Phase werden Einstellungen im System überprüft und seine Parameter initialisiert. Vor Abschluss dieser Stufe erfolgt die Initialisierung und die Ausführung der drei aufeinander folgenden Hauptthreads: Lesen, Bearbeiten und Zeichnen.

Nach dem Initialisierungsprozess werden die Sensorsignale aus dem CAN-Bus gelesen und in einem Speicherpuffer abgelegt. In dem Bearbeitungsmodul werden die Botschaften in ein für die weitere Bearbeitung ausführbares Format konvertiert. Anschließend werden aus diesen CAN-Daten die relevanten Informationen extrahiert.

Bevor die extrahierten Informationen in dem Bearbeitungs-Speicherpuffer abgelegt werden, erfolgt die Kompensation der Ungenauigkeiten des vorausschauenden Sensors. Es handelt sich hier vor allem um ein Verfahren zur Kompensation der Ungenauigkeit der Winkelermittlung durch den Sensor. Eine direkte Verwendung dieser Sensorangaben zur Bestimmung der Position eines Schattenbereiches in der Lichtverteilung würde zu einer sprunghaften Bewegung des Schattens führen und dadurch den Fahrer irritieren. Um diese Bewegung möglichst

„stationär“ und flüssig zu machen, werden diese Zustandsvariablen durch einen passiven Tiefpassfilter und einen aktiven Hochpassfilter der 1. Ordnung gedämpft. Die Verwendung der beiden Filter gewährleistet gute Dämpfungseigenschaften sowohl für kleine Abweichungen als auch für große Positionsänderungen. Abbildung 6.9 zeigt die Sensordaten vor und nach der Filterung.

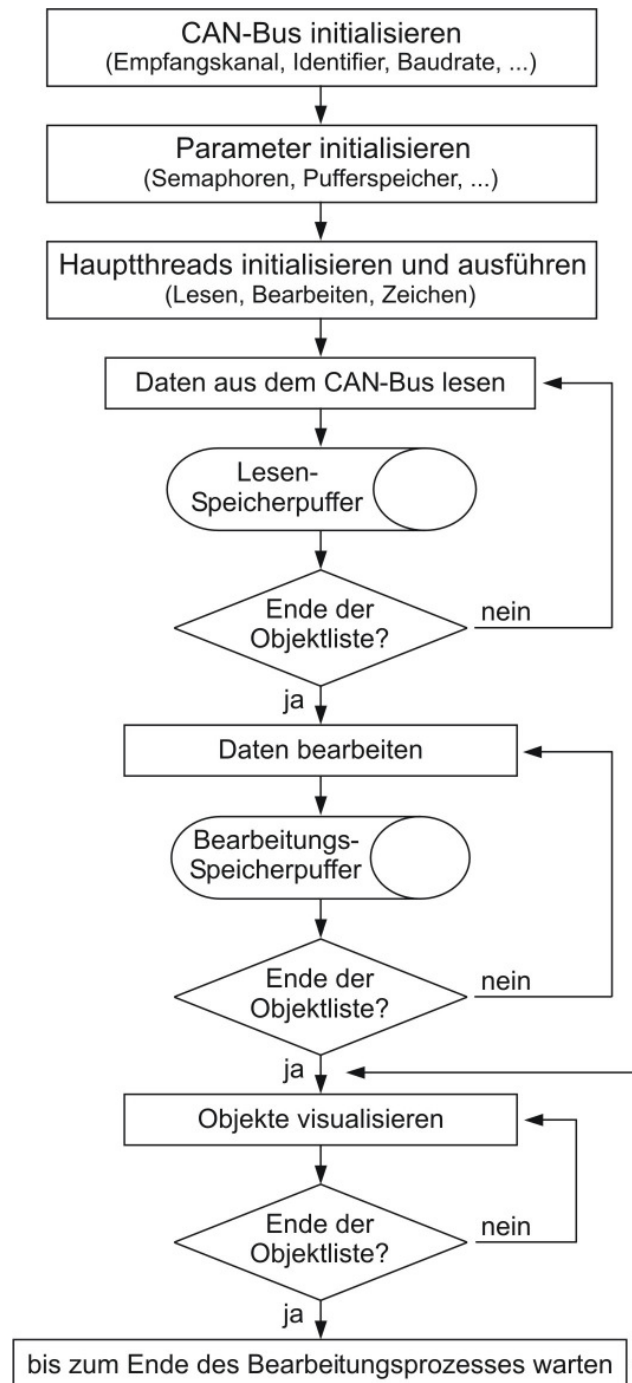


Abbildung 6.8: Struktureller Ablauf des Funktionsprogramms

In der letzten Phase findet für jedes detektierte Fahrzeug die Bestimmung der Schattenzonen und ihrer Lage in der Lichtverteilung statt. Wobei, wie schon im Kapitel 5 angedeutet, diese Schatten nur innerhalb eines schmalen Bereichs oberhalb der horizontalen Linie generiert werden. Die Anpassung dieser nicht ausgeleuchteten Bereiche an die „auszublendenden“ Verkehrsteilnehmer erfolgt über die Änderungen ihrer horizontalen Ausdehnung und Positionen. Um dies realisieren zu können, wird senkrecht zur Fahrbahn eine künstliche Referenzebene in einer definierten Entfernung d_{ref} vor dem Scheinwerfer angenommen. Diese Referenzebene ist so festgelegt, dass ihre Verteilung der Aufteilung des DMD-Chips entspricht. Das heißt, dass die Flächengrößen einzelner Mikrospiegel mit den Bildpixelgrößen auf der Referenzebene maßstäblich übereinstimmen.

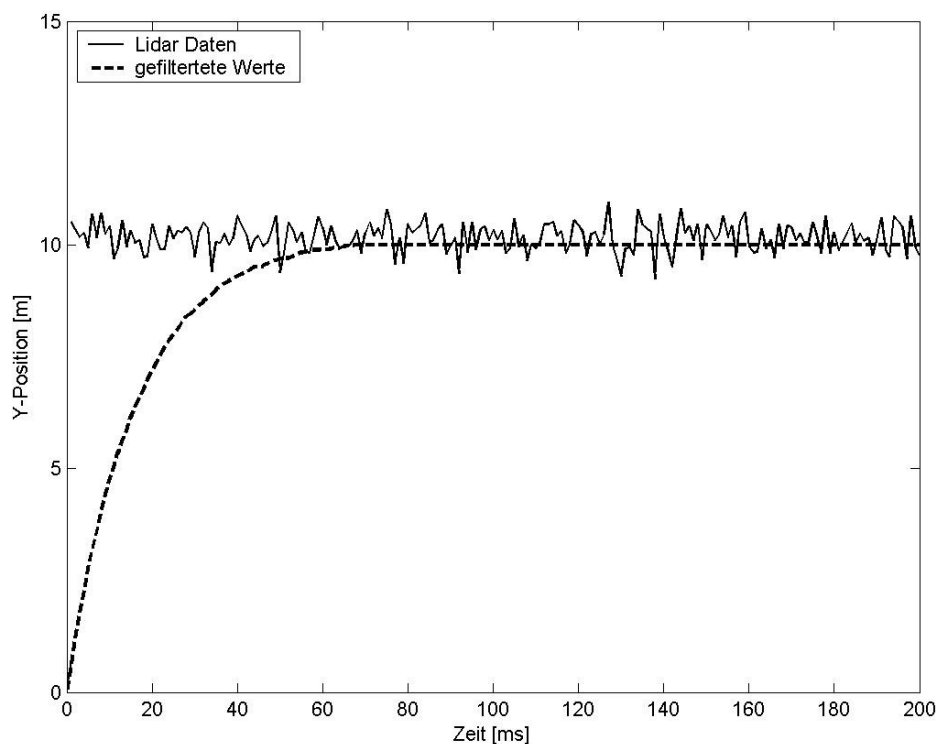


Abbildung 6.9: Sensorangaben über die Y-Position eines detektierten Fahrzeugs vor und nach dem Filterprozess

Eine Verwendung der linearen Abhängigkeit zwischen den Abmessungen der Referenzebene und denen des DMD-Chips ermöglicht eine einfache zweidimensionale Betrachtung der Verkehrssituation für die Ansteuerung des Scheinwerfers. In dieser Betrachtung entspricht die relative Position eines Punktes in Bezug auf die Größe des DMD-Chips der relativen Position eines Bildpixels in Bezug auf die Größe der Referenzebene. Daher ist die Kenntnis der Lage eines Punktes auf der Referenzebene und des Skalenfaktors ausreichend, um die Position eines Schattenbereiches eindeutig zu beschreiben. Diese direkte Abhängigkeit gilt allerdings nur für Punkte, die sich in der Entfernung der Referenzebene von dem Scheinwerfer befinden.

Für alle anderen Punkte wird die Position auf die Referenzebene projiziert und ihre dortige Lage für die Ansteuerung des Scheinwerfers verwendet.

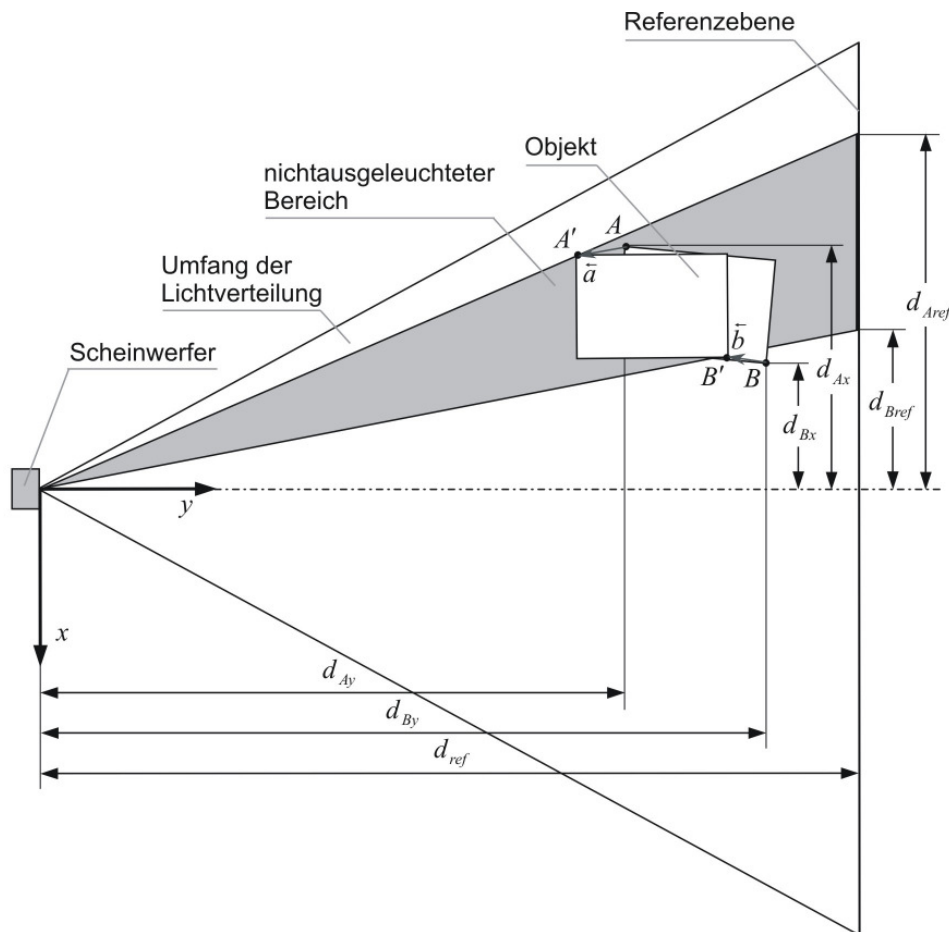


Abbildung 6.10: Schematische Darstellung des nichtausgeleuchteten Raumbereiches innerhalb der Lichtverteilung betrachtet von oben

Das Prinzip der Ansteuerung des Spiegelarray-Scheinwerfers wird in Abbildung 6.10 veranschaulicht. Der Umfang des Schattenbereiches in der Lichtverteilung wird so definiert, dass das gesamte Objekt umfasst wird. Gemäß dem zuvor erläuterten Prinzip werden zwei Randpunkte A und B des Objektes mit Hilfe des Lidar-Sensors ermittelt und auf die Referenzebene projiziert. Um die innerhalb eines Messzyklus zurückgelegten Wege dieser Punkte zu berücksichtigen, werden zwei Vektoren \vec{a} und \vec{b} eingeführt. Diese Vektoren werden über die Objektgeschwindigkeit und den Sensormesszyklus bestimmt. Die vorhergesagten Positionen werden als A' und B' bezeichnet.

Die Größen $d_{A'ref}$ und $d_{B'ref}$ beschreiben die Positionen der Punkte A' und B' auf der Referenzebene und können als Ansteuerungsvariablen direkt verwendet werden.

7 Experimentelle Ergebnisse

Das in dem Versuchsfahrzeug implementierte aktive lichttechnische System, dessen Aufbau in Kapitel 6 dargestellt ist, wurde unter realen Verkehrsbedingungen erprobt. Das Ziel der Untersuchung war, die Eigenschaften dieses Scheinwerfersystems unter technischen und psychologischen Gesichtspunkten zu bewerten.

Eine wesentliche Beurteilungsaufgabe betraf die Einschätzung des potenziellen Nutzens des Systems im nächtlichen Straßenverkehr. Im Mittelpunkt standen hier Fragestellungen bezüglich möglicher Einflüsse der dynamischen Veränderung der Lichtverteilung auf die Erkennbarkeitsbedingungen und den Wahrnehmungsprozess des Systemnutzers.

Die Einschätzung des Einflusses der aktiven Lichtverteilung auf Erkennbarkeitsverhältnisse anderer Verkehrsteilnehmer bildete die zweite Bewertungsaufgabe. Ein wesentlicher Punkt war hier die Bestimmung der möglichen Blendung entgegenkommender Fahrer, die durch das aktive Lichtsystem vermindert werden soll.

Der messtechnische Anteil der Systembewertung basierte vor allem auf der Bestimmung der Blendbeleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden und vorausfahrenden Fahrers. Da sich nicht alle bereits erwähnten Fragestellungen mit Hilfe technischer Messmethoden beantworten lassen, wurden Antworten auf diese Fragen in fahrpraktischen Versuchen ermittelt. Dazu haben fachfremde Versuchspersonen die Gelegenheit erhalten, das Versuchsfahrzeug mit dem aktiven Scheinwerfersystem zu fahren.

7.1 Bestimmung der Blendbeleuchtungsstärke am Auge des entgegenkommenden Fahrers

Die Einschätzung potenzieller Blendung, die durch das aktive Scheinwerfersystem entstehen kann, hat eine zentrale Bedeutung bei der Bewertung des lichttechnischen Systems. Durch die Bestimmung der Beleuchtungsstärke am Auge eines Fahrers konnten mehrere Fragen beantwortet werden. Beispielfhaft seien genannt:

- Wie groß ist die durch das aktive Lichtsystem verursachte Blendung eines entgegenkommenden Fahrers, im Vergleich mit der Blendung durch Abblend- und Fernlicht?
- Wie groß ist die Blendung durch Innen- und Außenspiegel in einem vorausfahrenden Fahrzeug?
- Wie groß ist die Reichweite des Lidar-Sensors und ab welcher Entfernung kann ein entgegenkommendes Fahrzeug in der aktiven Lichtverteilung abgeschattet werden?
- Ist das System schnell genug, um bei großen Geschwindigkeitsdifferenzen die aktuelle Position eines entgegenkommenden Fahrzeugs präzise erkennen und ausblenden zu können?

Zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke aus der Fahrerperspektive wurde ein spezielles Messverfahren angewendet. Eine schematische Darstellung des Ablaufs der Messung wird in Abbildung 7.1 gezeigt. Die Ermittlung der Beleuchtungsstärke erfolgt mit Hilfe des digitalen Beleuchtungsstärkemessgerätes B 510 der Firma LMT Lichtmesstechnik GmbH, dessen Photometerkopf auf der Höhe der Fahreraugen positioniert und mittig zur eigenen Fahrbahnspur gerichtet wurde. Die Messrate betrug 5 Messungen/s mit einer Integrationskonstante von 20 ms. Über ein RS 232 Interface wurden die Messwerte direkt an einen Messrechner übertragen.

Der durch das Messfahrzeug zurückgelegte Weg wurde mit einem Schlepprad der Firma Peiseler GmbH ermittelt. Auf den Normanschluss des Messrades wurde ein Impulsgeber aufgeschraubt. Mit Hilfe dieses elektronischen Gebers wurde die Drehbewegung des Rades in Rechtecksignale umgewandelt. Das Auslesen von Wegmesswerten über den Messrechner erfolgte ebenfalls über eine RS-232 Schnittstelle. Die durch die beiden Geräte ermittelten Messwerte wurden mittels eines selbstentwickelten Programms ausgelesen und als eine Zweispaltenmatrix im ASCII-Format abgespeichert.

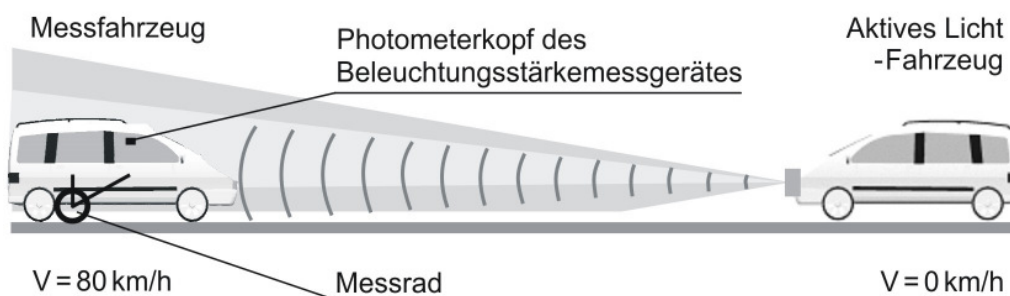


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung des Versuchs zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers

Für die Durchführung der Untersuchung wurde ein 400 m langer Abschnitt einer zweispurigen, ebenerdigen und bewaldeten Strecke bei Schlangen, Ostwestfalen-Lippe ausgewählt. Der Ablauf der Messung war so gestaltet, dass das Fahrzeug mit dem aktiven Lichtsystem auf der Messstrecke stillstand. In der Entfernung von 400 m vor diesem Fahrzeug wurde der Startpunkt des entgegenkommenden Messfahrzeugs definiert, das nach der Beschleunigungsphase mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 80 km/h in die Richtung des stillstehenden Aktiven Licht-Fahrzeugs fuhr. Auf diese Weise konnte die aktuelle Entfernung zwischen den beiden Fahrzeugen durch die Messung des zurückgelegten Weges des Messfahrzeugs bestimmt werden.

Die Ermittlung der Blendbeleuchtungsstärke aus der Fahrerperspektive des Messfahrzeugs wurde für drei unterschiedliche Lichtverteilungen des aktiven Scheinwerfers durchgeführt. Neben dem aktiven Modus, mit eingeschaltetem System, wurde die Beleuchtungsstärke auch für das aus dem gleichen Scheinwerfer erzeugte Abblend- und Fernlicht gemessen. Die

Blendungsgrößen, die der Ausleuchtung mit den beiden herkömmlichen Lichtverteilungen entsprachen, bilden dabei eine Referenz. Abbildung 7.2 zeigt die in der Messung ermittelten Beleuchtungsstärkewerte für alle drei Lichtverteilungen. Der Verlauf der Beleuchtungsstärkekurve zeigt, dass die vom Aktiven Licht erzeugte Beleuchtungsstärke im Messpunkt im gesamten Erfassungsbereich des Lidar-Sensors den gesetzlich zugelassenen Grenzwert von 0,5lx nicht überschreitet.

Wie zu erwarten ist, werden bei der Verwendung des Fernlichts wesentlich größere Beleuchtungsstärken gemessen. Die gesetzliche Blendungsschwelle wird bereits in der Entfernung von ca. 270m vor dem Fernlichtsscheinwerfer überschritten. Die Beleuchtungsstärkekurve steigt steil bis zu einem Maximalwert von ca. 20lx bei der Entfernung von 30m vor der Blendquelle an.

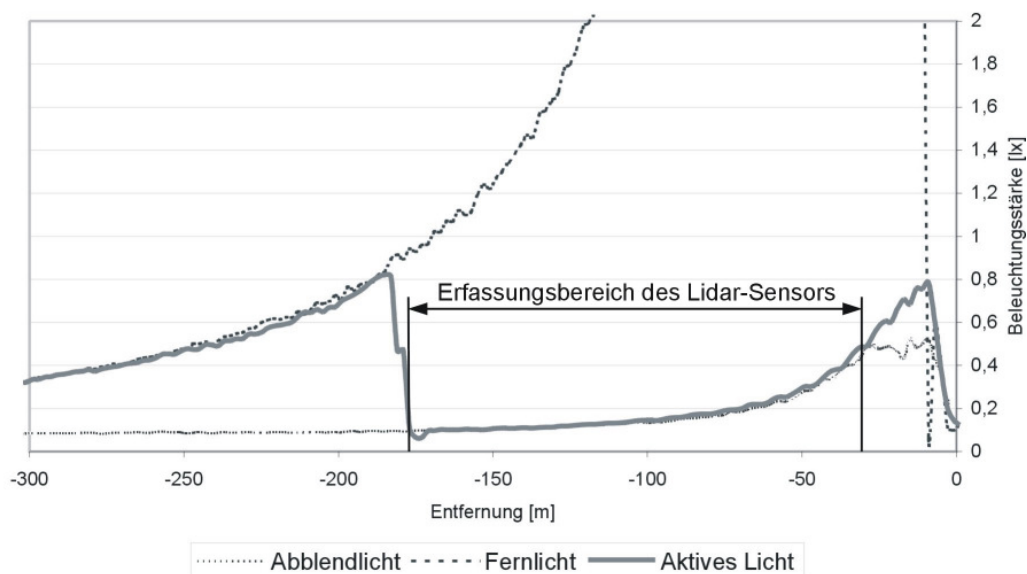


Abbildung 7.2: Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers für das Abblend-, Fern- und Aktive Licht

Bei der Betrachtung der aktiven Lichtverteilung sind zwei Phasen zu unterscheiden. In der ersten Phase, wenn das entgegenkommende Fahrzeug sich außerhalb der Lidar-Reichweite befindet, entspricht die Blendung der, die durch das Fernlicht verursacht wird. Nach der Fahrzeugdetektion durch den vorausschauenden Sensor wird das detektierte Auto in einen Schatten gesetzt. Wie aus dem Kurvenverlauf für das Aktive Licht zu erkennen ist, beginnt die zweite Phase ab einer Entfernung von ca. 180m. Nach einer sprunghaften Senkung folgt die Beleuchtungsstärkekurve dem Abblendlichtwert im weiteren Messverlauf. Damit ist nachgewiesen, dass das aktive System tatsächlich in der Lage ist, Blendung zu verringern. Erst bei der Entfernung von ca. 10 bis 30m, wenn das entgegenkommende Auto sich außerhalb des Öffnungswinkels des Sensors befindet, beobachtet man einen Anstieg der Beleuch-

tungsstärke auf 0,8 lx. Dieser Anstieg resultiert aus dem Unterschied zwischen dem Messbereich des Sensors und dem Öffnungswinkel des Scheinwerfers.

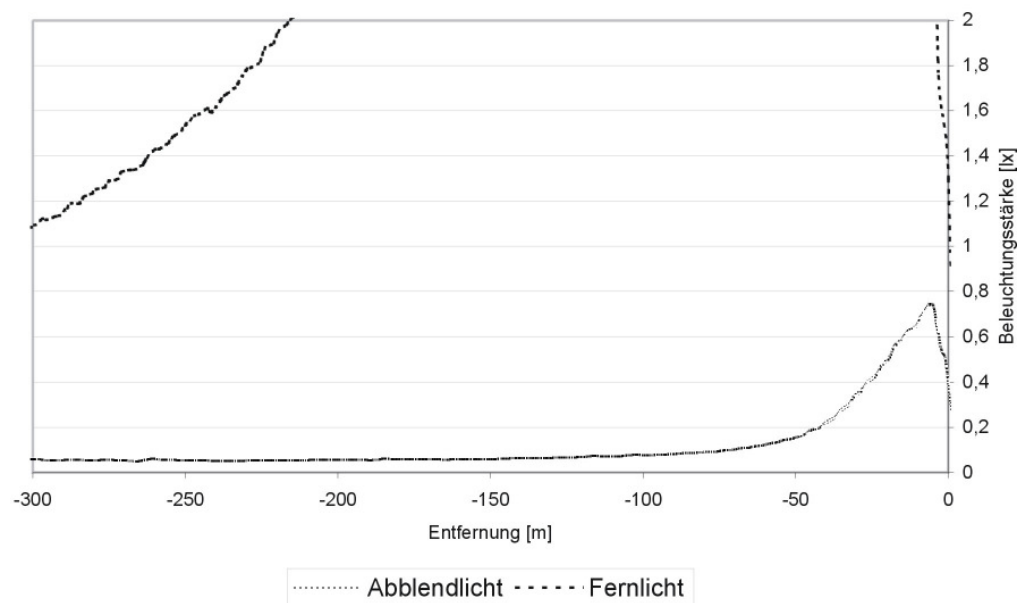


Abbildung 7.3: Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers für das Abblend- und Fernlicht der Halogenscheinwerfer eines Audi A4

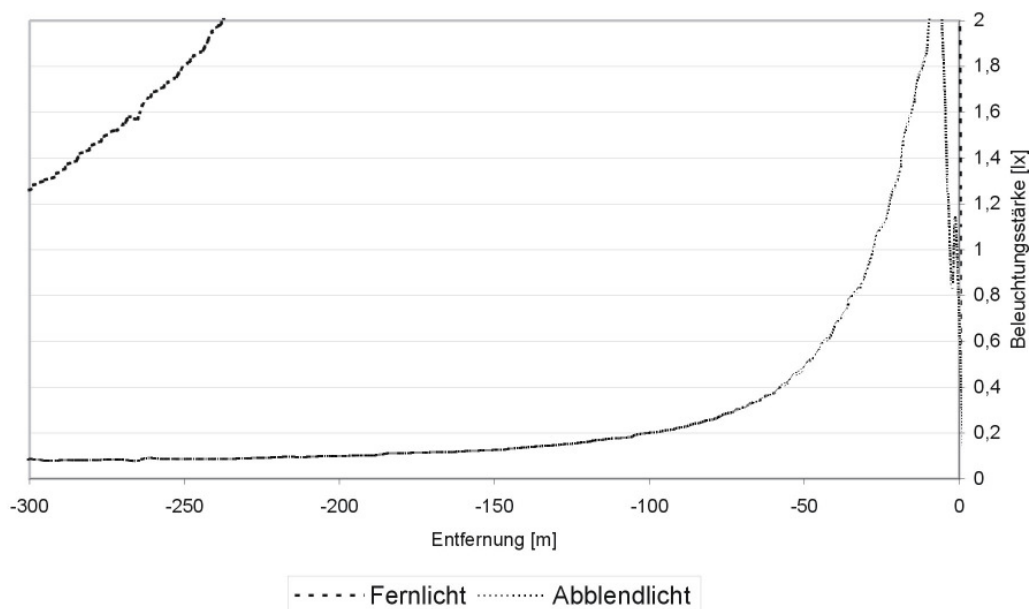


Abbildung 7.4: Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers für das Abblend- und Fernlicht der Bi-Xenonsscheinwerfer eines Mercedes M-Klasse

Im Hinblick auf die Tatsache, dass die analysierten Lichtverteilungen durch einen einzelnen Scheinwerferprototyp erzeugt wurden, bietet sich für eine Vergleichsanalyse die analoge Bewertung konventioneller Scheinwerfer an.

Abbildungen 7.3 und 7.4 stellen die Messergebnisse für das Abblend- und Fernlicht für einen Audi Typ A4 mit Halogenscheinwerfer und einen Mercedes der M-Klasse mit Bi-Xenonscheinwerfer dar. Die ermittelten Werte zeigen, dass im Fernlichtmodus schon bei großen Entfernungen blendungskritische Beleuchtungsstärken für beide Scheinwerfersysteme erreicht werden.

Für die Einschätzung der Blendung über die Rückspiegel in einem vorausfahrenden Fahrzeug wurde das Messverfahren entsprechend modifiziert. In diesem Fall entfernte sich das Messfahrzeug von dem stillstehenden Aktiven Licht-Fahrzeug, so dass die Bestimmung der Beleuchtungsstärke für die Entfernung von 0 bis 300 m erfolgte.

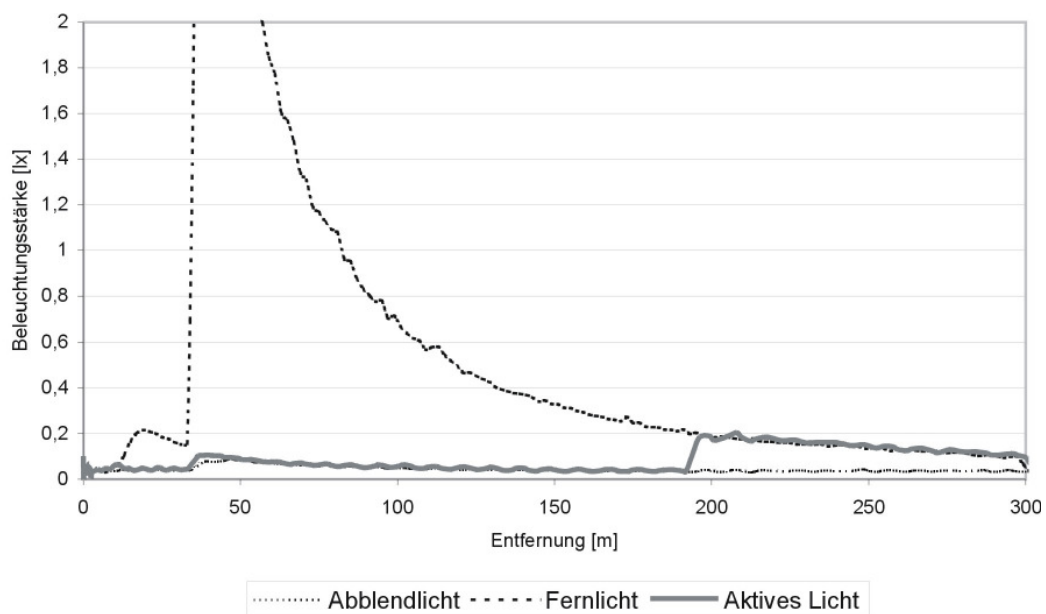


Abbildung 7.5: Beleuchtungsstärke am Auge eines vorausfahrenden Fahrers bei der Blendung über den linken Außenspiegel durch das Abblend-, Fern- und das Aktive Licht

Bei der Ermittlung der Blendung über den links angeordneten Außenspiegel wurde der Photometerkopf des Messgerätes so ausgerichtet, dass möglichst große Werte der Beleuchtungsstärke innerhalb der ganzen Messfahrt erreicht werden konnten. Für die Untersuchung wurde ein Fahrzeug mit konventionellen Außenspiegeln mit einem Reflektionsgrad von $\rho=50\%$ verwendet. Aus den in Abbildung 7.5 dargestellten Messergebnissen ist zu entnehmen, dass die Werte für das Abblendlicht und das Aktive Licht im ganzen Entfernungsbereich unter $0,2\text{ lx}$ liegen. Die beiden Lichtverteilungen verursachen also keine kritischen Blendeinflüsse über die Fahrzeugaußenspiegel. Allerdings werden bei der Verwendung des Fernlichts schon ab einer Entfernung von 130 m blendungskritische Werte erreicht.

Abbildung 7.6 stellt die Blendbeleuchtungsstärke über den Innenspiegel eines vorausfahrenden Fahrzeugs in Abhängigkeit von der Entfernung der beiden Fahrzeuge dar. Der Reflektionsgrad des Innenspiegels beträgt $\rho=90\%$. Aus dem Verlauf der Beleuchtungsstärkekurve für das Aktive Licht ist zu erkennen, dass außerhalb des Erfassungsbereichs des Lidar-Sensors die Messwerte geringfügig die gesetzlichen Größen überschreiten. Der kritische Bereich beginnt also ab einer Entfernung von ca. 190m, wenn das vorausfahrende Fahrzeug nicht mehr erfasst werden kann. Ab ca. 250m befindet sich die Beleuchtungsstärkekurve wieder im akzeptablen Bereich.

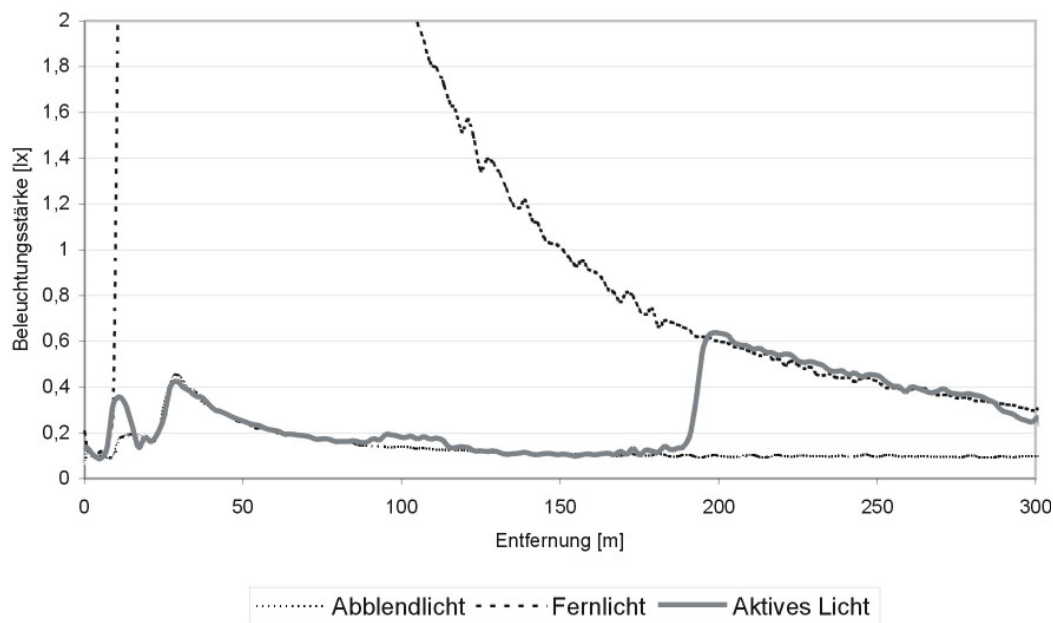


Abbildung 7.6: Beleuchtungsstärke am Auge eines vorausfahrenden Fahrers bei der Blendung über den Innenspiegel durch das Abblend-, Fern- und das Aktive Licht

Die ermittelten Beleuchtungsstärkewerte werden über Leuchtdichtebilder des Fahrzeugvorfelds bestätigt. Abbildungen 7.7 und 7.8 zeigen die Verteilung der Leuchtdichte für das Abblendlicht und das Aktive Licht bei gleicher Straßensituation.

Aus der Leuchtdichteaufnahme der aktiven Lichtverteilung ist ein symmetrisch ausgeleuchteter Bereich oberhalb der horizontalen Linie erkennbar. Leuchtdichtewerte, die den in den beiden Bildern markierenden Schnitte entsprechen, sind in Abbildung 7.9 dargestellt. Die Messkurven zeigen, dass der Leuchtdichteunterschied zwischen dem ausgeleuchteten Bereich und der verdunkelten Zone der aktiven Lichtverteilung der Leuchtdichteänderungen bei der Hell-Dunkel-Grenze des Abblendlichts entspricht.

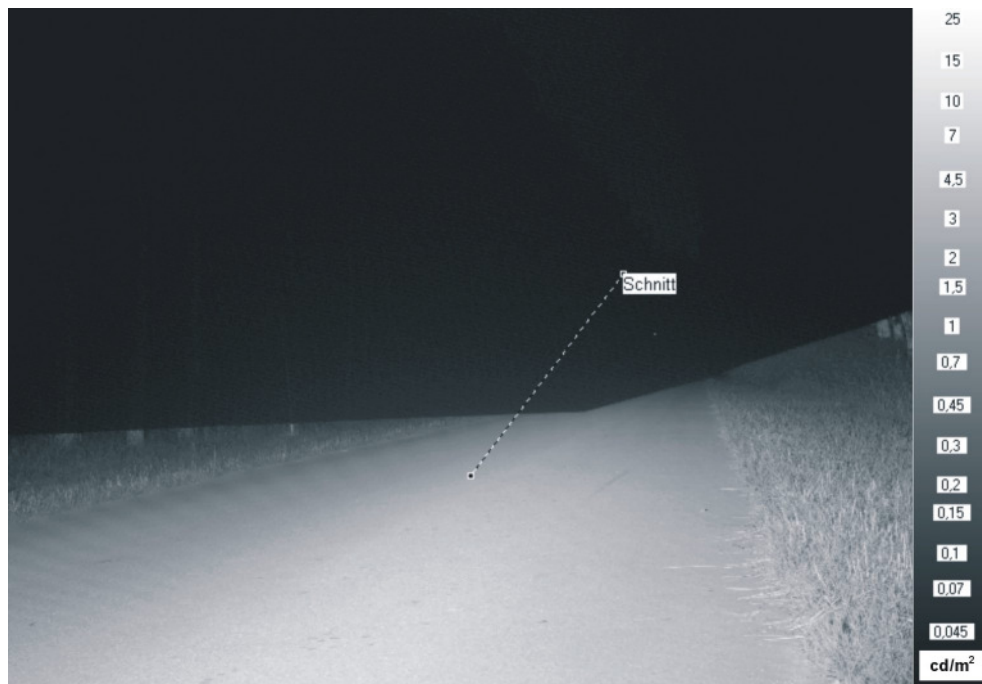


Abbildung 7.7: Leuchtdichtebild des mit dem Abblendlicht ausgeleuchteten Fahrzeugvorfelds



Abbildung 7.8: Leuchtdichtebild des mit dem Aktiven Licht ausgeleuchteten Fahrzeugvorfelds

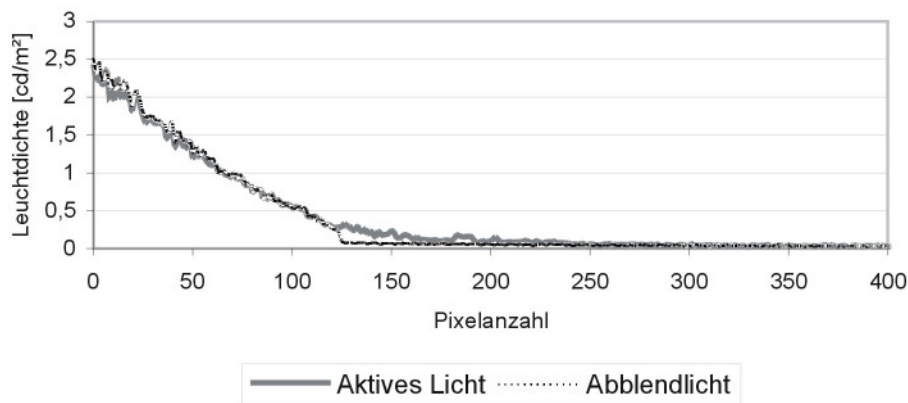


Abbildung 7.9: Leuchtdichtewerte in den gewählten Schnitten in der Abblendlicht- und aktiven Lichtverteilung

7.2 Bewertung des Systems durch Versuchspersonen

Eine wesentliche Bewertung stellt die subjektive Beurteilung des aktiven Lichtsystems durch fachfremde Testpersonen dar. Insgesamt 21 Probanden hatten die Gelegenheit, ein entsprechend ausgerüstetes Versuchsfahrzeug zu fahren. Die Versuchspersonen waren zwischen 24 und 64 Jahre alt und so gewählt, dass alle Altersgruppen möglichst gleichmäßig vertreten waren.

Nachtfahrten wurden mit dem Abblendlicht, Fernlicht und dem Aktiven Licht unter gleichen Verkehrsbedingungen durchgeführt. Die Fahrer wurden mit einer Begegnungssituation zweier Fahrzeuge konfrontiert. Nach jeder Fahrt wurde ein Fragebogen von den Versuchspersonen ausgefüllt. Der Fragebogen enthielt strukturierte Fragen, die über neunstufige Rating-Skalen (1 – nicht wahrnehmbar, 9 – unerträglich) erfasst wurden.

Die erste Fragengruppe wurde den Fahrern eines Fahrzeugs, das dem mit Aktivem Licht ausgestatteten Fahrzeug entgegenkam, gestellt. Nach jeder Fahrt wurden die Eindrücke bezüglich der Blendung durch das Lichtbündel des aktiven Scheinwerfers aus der Position des „geblendeten“ Fahrzeugs bewertet. In der ersten Erhebungsstaffel wurde nach jeder Fahrt mit Abblendlicht, Fernlicht und dem Aktiven Licht gefragt:

Bitte geben Sie auf einer neunstufigen Skala an, wie Sie die Blendung empfunden haben?

Die Bewertung der aktiven Lichtverteilung erfolgte separat für zwei bereits definierte Phasen. Die Einschätzung der Blendung in der ersten Phase, vor der Detektierung des entgegenkommenden Fahrzeugs, wurde mit der Bewertung der Blendwirkung durch Fernlicht in Abbildung 7.10 zusammengestellt. Während der Fahrt mit Fernlicht haben 18 Fahrer des entgegenkommenden Fahrzeugs (85,7 %) das Blendungsniveau als sehr störend bis unerträglich eingestuft. Die Blendung durch das Aktive Licht in der ersten Phase wurde von 13 Testpersonen (61,9 %)

auch als unakzeptabel eingeschätzt. Im Mittel wurde die Blendung durch das Fernlicht mit 7,5 und das Aktive Licht (Phase I) mit 6,6 bewertet (s. Abbildung 7.12).

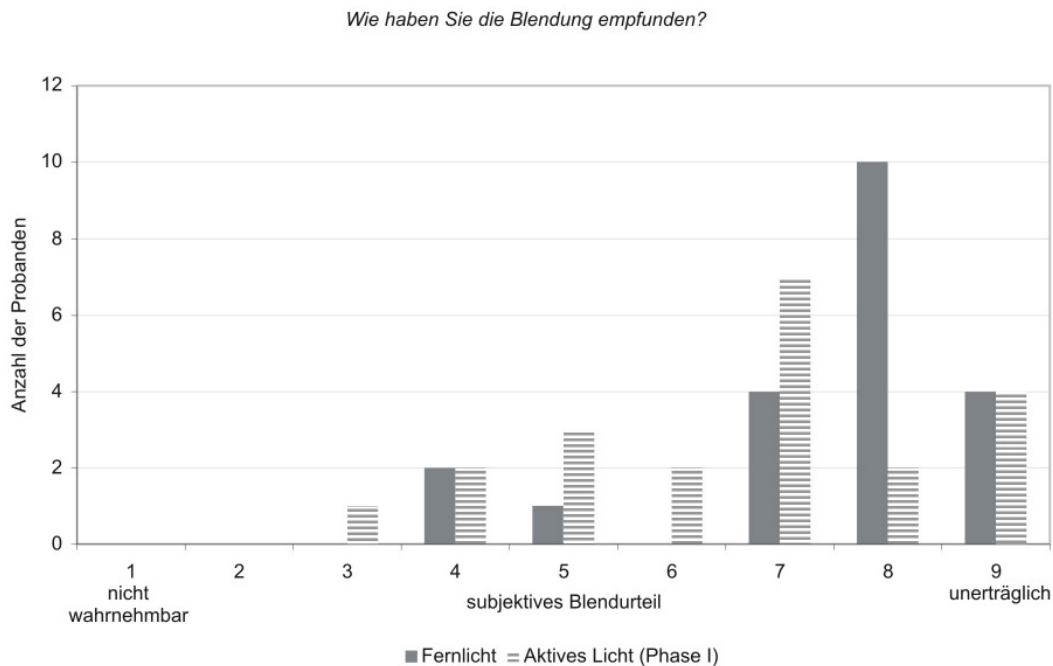


Abbildung 7.10: Einschätzung der Blendung durch das Fernlicht und das Aktive Licht (Phase I) von Probanden aus der Position eines entgegenkommenden Fahrzeugs

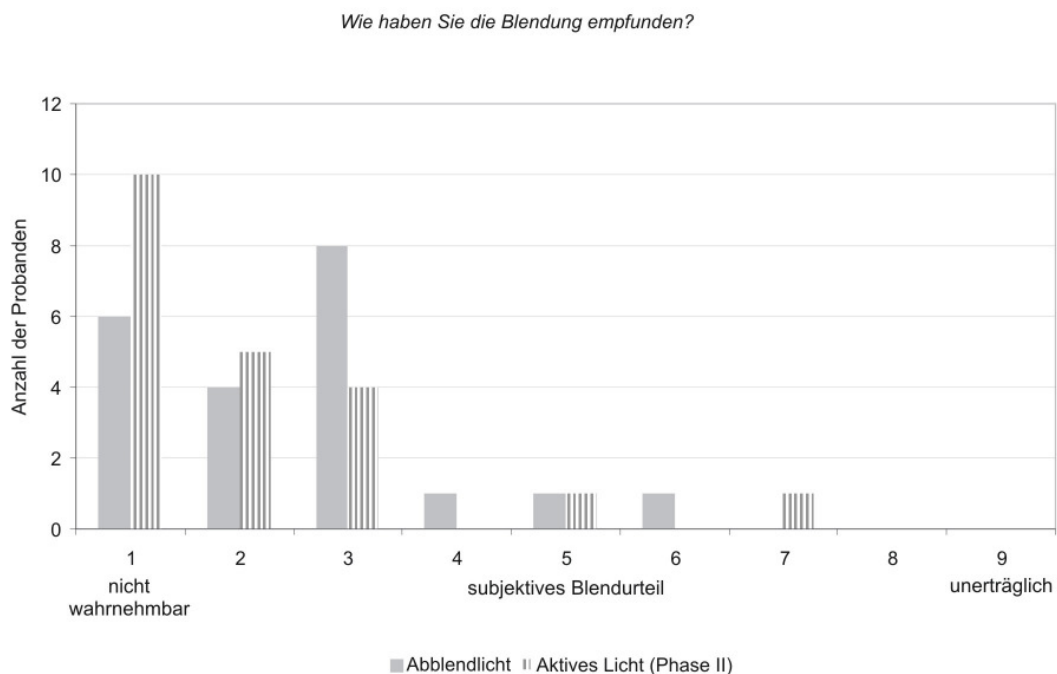


Abbildung 7.11: Einschätzung der Blendung durch das Abblendlicht und das Aktive Licht (Phase II) von Probanden aus der Position eines entgegenkommenden Fahrzeugs

Die Blendung nach der Fahrzeugerkennung und Abschattung durch das aktive lichttechnische System wurde mit dem subjektiven Blendurteil bei Abblendlicht verglichen (s. Abbildung 7.11). 18 Versuchspersonen (85,7 %) haben das Blenden durch ein entgegenkommendes Fahrzeug mit Abblendlicht als kaum wahrnehmbar eingeschätzt. Die Blendwirkung des Aktiven Lichts in der zweiten Phase wurde von 19 Probanden (90,5 %) als völlig akzeptabel eingestuft. Insgesamt wurde die Blendung durch das Abblendlicht mit einer Mittelnote von 2,5 und das Aktive Licht (Phase II) mit einer Mittelnote von 2,1 bewertet.

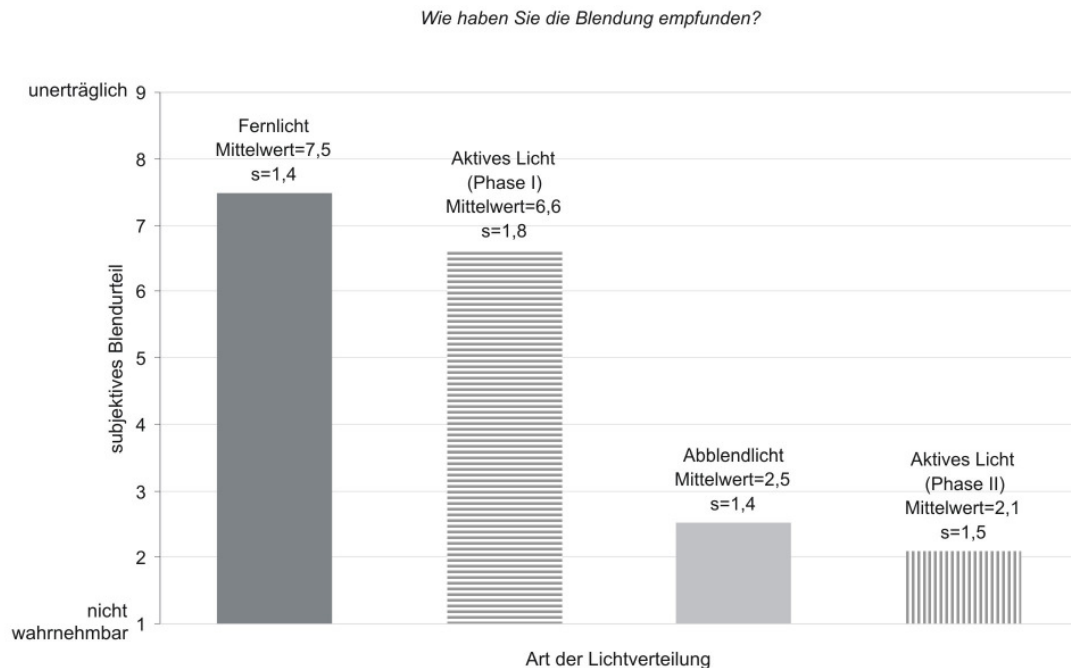


Abbildung 7.12: Einschätzung der Blendung – Darstellung der Mittelwerte für das Abblendlicht, Fernlicht und das Aktive Licht (Phase I und II)

Die zweite Frage aus der ersten Fragengruppe, die dem Fahrer des „geblendeten“ Fahrzeugs gestellt wurde, betraf die Blendungsakzeptanz. Hier sollte die Blendung durch die aktive Lichtverteilung insgesamt (Phase I und Phase II) beurteilt werden. Um eine Vergleichsanalyse durchführen zu können, wurden auch das Abblend- und Fernlicht in diesem Zusammenhang bewertet. Für alle drei Lichtverteilungen wurden die Probanden befragt:

Für wie akzeptabel halten Sie es, wenn nachts alle Fahrzeuge mit dieser Intensität blenden würden?

Die Ergebnisse wurden in Form von Mittelwerten in Abbildung 7.13 zusammengestellt. Der Wert von 3,3 für das Aktive Licht zeigt, dass die gesamte Blendwirkung dieser Lichtverteilung sich in einem akzeptablen Bereich befindet. Die Blendung durch die aktive Lichtverteilung wurde eindeutig näher dem Abblendlicht mit dem Mittelwert von 2,2 als dem Fernlicht mit dem Mittelwert von 8,2 eingeschätzt. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass der Eindruck aus dem Nahbereich eine entscheidende Bedeutung für die Bewertung der Blendung darstellt.

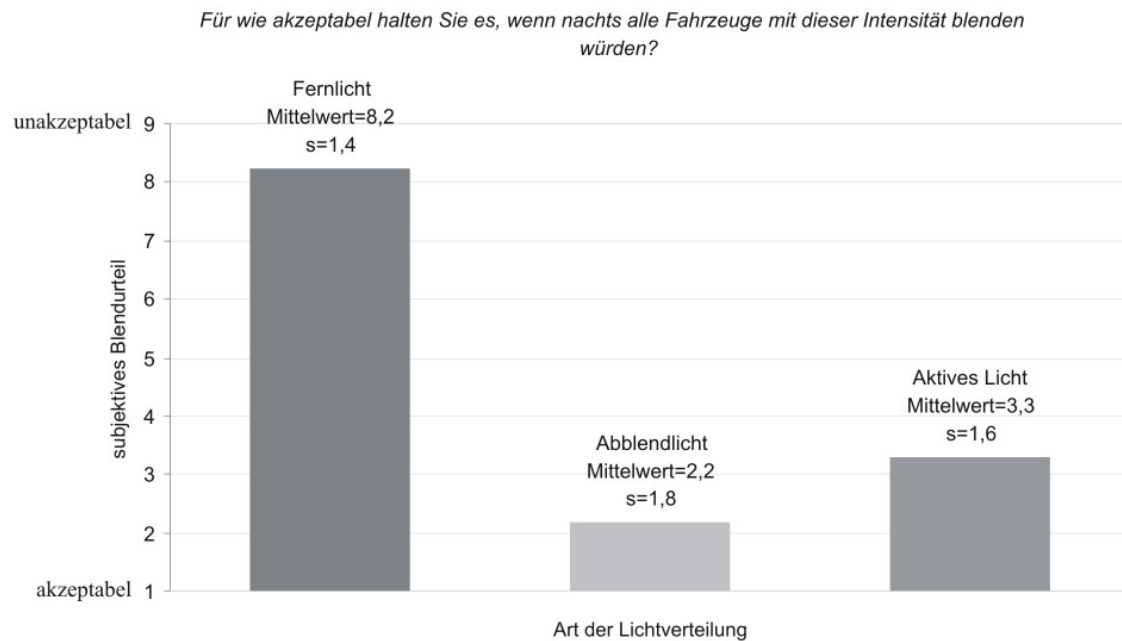


Abbildung 7.13: Bewertung der Blendungsakzeptanz

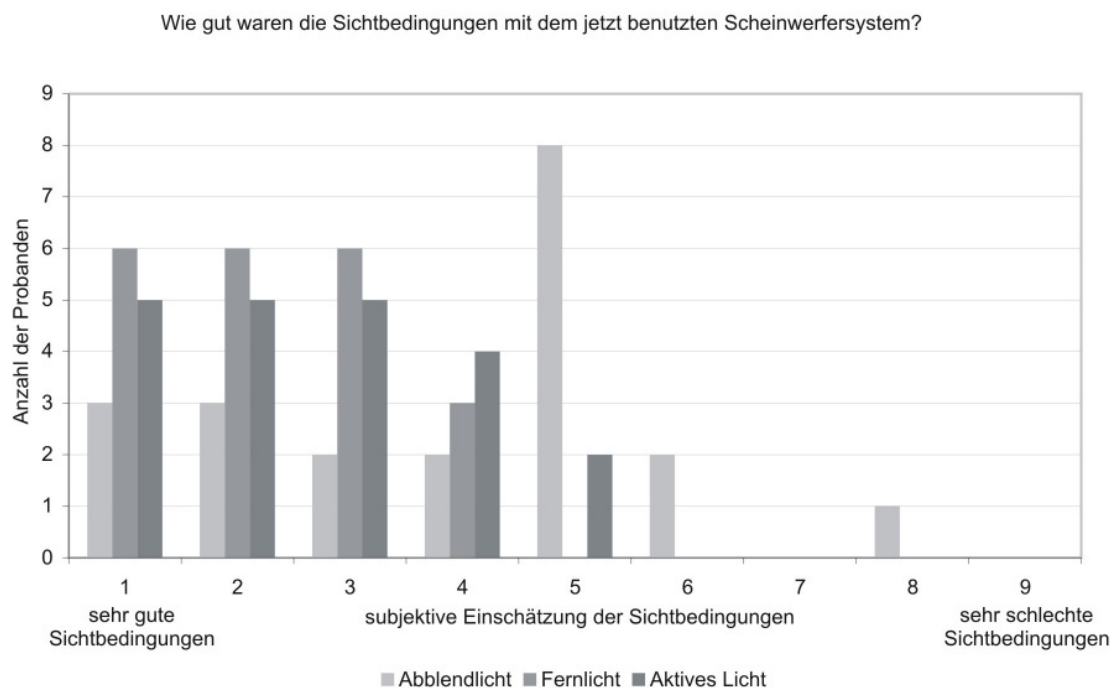


Abbildung 7.14: Bewertung der Sichtbedingungen

Fragen aus der zweiten Erhebungsstaffel wurden den Fahrern des Fahrzeugs mit dem aktiven Lichtsystem gestellt. Auch hier wurde der Fahrer mit den drei Lichtfunktionen konfrontiert. Das Ziel dieser Untersuchungsphase war die Einschätzung des potenziellen Gewinns aus der

Verwendung der aktiven Lichtfunktion. Eine wesentliche Frage in diesem Zusammenhang lautete:

Wie gut waren die Sichtbedingungen mit dem jetzt benutzten Scheinwerfersystem?

Besonders interessant ist die Gegenüberstellung der subjektiven Beurteilung der Sichtbedingungen bei Fernlicht und bei der aktiven Lichtverteilung, die das Fahrzeugvorfeld nur bis 4° oberhalb der Horizontlinie ausleuchtete. Wie in Abbildung 7.14 dargestellt, wurden die beiden Lichtverteilungen von Probanden, trotz der Unterschiede im vertikalen Öffnungswinkel, sehr ähnlich bewertet. Insgesamt wurden die Erkennbarkeitsbedingungen beim Fernlicht mit einer Durchschnittsnote von 2,3 und beim Aktiven Licht mit einer Durchschnittsnote von 2,6 beurteilt. Das Abblendlicht wurde in diesem Kontext mit 4,0 eingeschätzt. Wie bereits im Kapitel 6 dargelegt, wurden die bewerteten Lichtfunktionen von einem einzelnen Scheinwerfer erzeugt. Dadurch konnte das Fahrzeugvorfeld nur mit einem schmalen Lichtkegel ausgeleuchtet werden. Diese Tatsache könnte einen Einfluss auf die Ergebnisse der Untersuchung haben.

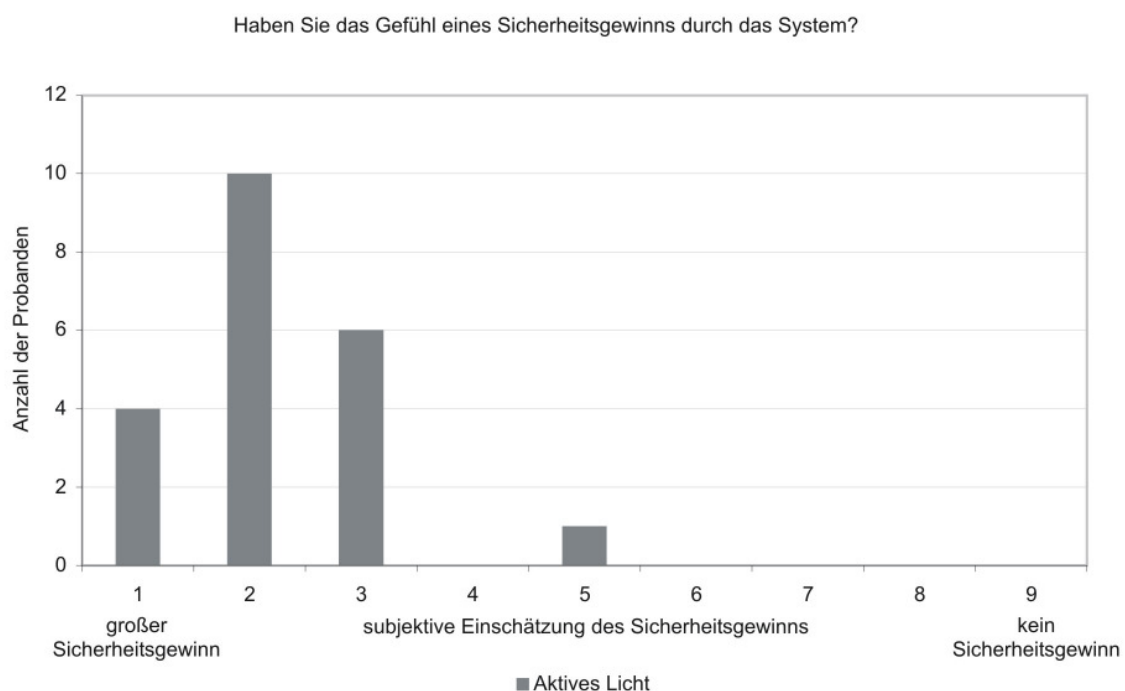


Abbildung 7.15: Bewertung des Sicherheitsgewinns durch das aktive Lichtsystem

Nach der Fahrt mit dem Aktiven Licht wurde jedem Fahrer die Frage gestellt:

Haben Sie das Gefühl eines Sicherheitsgewinns durch das System?

Mit dieser Fragestellung sollte das Sicherheitsgefühl bei der Fahrt mit der neuen Lichtfunktion im Vergleich zur Fahrt mit dem herkömmlichen Abblendlicht eingeschätzt werden. Die um 4° über die Horizontlinie ausgerichtete Hell-Dunkel-Grenze der aktiven Lichtverteilung resultiert in einem Einstieg der Erkennbarkeitsentfernung. Die Ergebnisse der Bewertung

wurden in Abbildung 7.15 zusammengestellt. Trotz des schmalen horizontalen Öffnungswinkels wurde der Sicherheitsgewinn mit der neuen Lichtfunktion als groß bewertet. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten für Abblend- und Aktives Licht weist darauf hin, dass die Reichweite der Lichtverteilung einen wesentlichen Einfluss auf das Sicherheitsgefühl der Versuchspersonen darstellt.

Ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung der aktiven Lichtverteilung ist die Untersuchung der Wirkung der Abschattung anderer Fahrzeuge auf die Wahrnehmung des Nutzers des aktiven Lichtsystems. Wie in Abbildung 7.16 gezeigt, wurden die in der Lichtverteilung entstehenden Schatten von Testpersonen als nicht störend klassifiziert. Diese Aussage lässt sich mit einem großen Unterschied zwischen der Leuchtdichte der Scheinwerferflächen eines entgegenkommenden Fahrzeugs und dem es umfassenden Schatten klären. Durch diese großen Leuchtdichtedifferenzen waren die Schattenbereiche von dem Fahrer kaum wahrnehmbar.



Abbildung 7.16: Bewertung der Auswirkung der Abschattung anderer Fahrzeuge

7.3 Diskussion der Ergebnisse

Die durchgeführten Versuche bestätigen ebenso wie die Resultate der Probandenerhebung ein robustes und echtzeitfähiges Arbeiten des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Scheinwerfersystems unter realen Verkehrsbedingungen. Das System arbeitet mit einer hohen Zuverlässigkeit auch in sehr komplexen Verkehrssituationen wie z.B. bei einem großen Verkehrsaufkommen. Das zuverlässige Systemverhalten bei extrem hohen Differenzgeschwindigkeiten bis zu 240km/h zwischen dem eigenen und einem anderen Fahrzeug wurden während

mehrerer Testfahrten auf Schnellstraßen und Autobahnen nachgewiesen. Die Korrektheit des Klassifizierungsablaufs wurde unter anderem während Fahrten durch Straßenbaustellen erprobt. Aus der großen Zahl von erkannten Zielen wie z.B. Verkehrsschilder, -zeichen oder Pfosten wurden fehlerfrei alle relevante Objekte ausgefiltert und im weiteren Signalverarbeitungsprozess verfolgt.

Die vom Aktiven Licht verursachte Blendung der entgegenkommenden Fahrer kann als kaum wahrnehmbar eingeschätzt werden. Diese geringe Blendung gilt ebenfalls für Fahrzeuge im Kolonnenverkehr, in denen reflektiertes Licht nachfolgender Fahrzeuge im Außen- und Innenspiegel störend wirken kann. Zu diesen Aussagen führten die Ergebnisse der Beleuchtungsstärkemessungen, die in zahlreichen Verkehrssituationen durchgeführt wurden. Dieses Resultat wurde in weiteren Versuchen von Probanden eindeutig bestätigt. Damit wurde nachgewiesen, dass das System in der Lage ist, die entgegenkommenden und vorausfahrenden Fahrzeuge zu erfassen und auszublenden. Zudem wird dadurch gezeigt, dass die Idee des „blendungsfreien“ Fernlichts im realen Verkehrsraum tatsächlich einsetzbar und vielversprechend ist.

Ein wichtiger Untersuchungsaspekt war die Einschätzung der Auswirkung des dynamischen Verhaltens und der lokalen Inhomogenität der aktiven Lichtverteilung auf den Systemnutzer aber auch auf andere Verkehrsteilnehmer. Diese Effekte könnten beispielsweise zur Irritation oder Ermüdung des Fahrers führen. In diesem Zusammenhang wurden den Erhebungsteilnehmern mehrere Fragen gestellt. Der ein entgegenkommendes oder vorausfahrendes Fahrzeug umfassende Schatten wurde von den meisten Systemnutzern nicht wahrgenommen. Daher wurde auch seine Bewegung in der Lichtverteilung als nicht störend eingestuft.

Die Anhebung der Hell-Dunkel-Grenze um 4° oberhalb des Abblendlichts führt zu einer erheblichen Steigerung der Erkennbarkeitsentfernung und dadurch der Sicherheit. Diese Aussage bestätigen die lichttechnischen Messungen wie z.B. Leuchtdichtebilder des Fahrzeugvorfelds. Eine positive Bewertung wurde hier auch von Versuchspersonen gegeben, die das Gefühl eines großen Sicherheitsgewinns durch die Nutzung der fernlichtähnlichen Lichtverteilung betont haben. Eine genaue Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung wurde im Rahmen der Arbeit nicht vorgenommen, da im derzeitigen Entwicklungsstand nur ein erster Prototyp eines aktiven Scheinwerfers eingesetzt werden konnte.

Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Beurteilungsergebnisse ist die Tatsache, dass sich die gesamte Lichtverteilung während der Fahrt nicht ändert. Diese Empfindung lässt sich durch ein einfaches Umschalten zwischen dem Fern- und Abblendlicht nicht erreichen, da es in diesem Fall zu erheblichen Änderungen der Sichtverhältnisse käme.

Einen kritischen Punkt bei der Realisierung dieser aktiven Lichtfunktionen stellt die noch nicht ausreichende Reichweite der heute verfügbaren Umfeldsensoren dar. Fortschritte in diesem Bereich werden deshalb auch das Potential aktiver Lichtsysteme deutlich erhöhen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zahl der nächtlichen Verkehrsunfälle ist sehr hoch. In den meisten Fällen spielt dabei das späte Erkennen von Objekten im Verkehrsraum eine Rolle. Aufgabe der Kfz-Lichttechnik ist es, den Fahrer bei seiner visuellen Wahrnehmung zu unterstützen. Die Kfz-Scheinwerfer stellen einen Kompromiss dar zwischen

- einer möglichst guten Ausleuchtung des Verkehrsraums und
- einer möglichst geringen Blendung anderer Verkehrsteilnehmer.

Vor diesem Hintergrund hat sich die vorliegende Arbeit mit der systematischen Auflösung dieses Design-Konflikts mit Hilfe der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme beschäftigt. Durch den gezielten Einsatz einer frei programmierbaren Lichtverteilung sollen die hier entwickelten aktiven Scheinwerfer den Fahrer in seiner Wahrnehmung unterstützen und die Blendung für weitere Verkehrsteilnehmer deutlich reduzieren. Damit kann die Verkehrssicherheit auf den Straßen durch bessere Wahrnehmungsbedingungen und weniger Ermüdung bei Nachtfahrten erheblich gesteigert werden.

Im Rahmen dieser Bestandsaufnahme wurde zunächst, ausgehend von der Darstellung der Defizite heutiger Scheinwerfersysteme, das Entwicklungspotential der Scheinwerfertechnologie von dem Gesichtspunkt der Anpassung der Lichtverteilung aufgezeigt. Es wurde ein detaillierter Einblick in die gesetzlichen Regelungen im Bereich der Kfz-Lichttechnik und die gegenwärtige Scheinwerfertechnologie gegeben. Mögliche Umsetzungskonzepte für die zukünftigen Lichtfunktionen wurden in einer Vielzahl von Patenten dargestellt. Die wesentlichen Technologien zum Informationsgewinn und -austausch, die eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung aktiver lichttechnischer Systeme spielen, wurden gezeigt.

Gemäß des methodischen Entwurfs mechatronischer Systeme wurden zwei extreme Realisierungsszenarien anhand der Funktionsanalyse abgeleitet. Die auf der vorausschauenden Sensorik basierenden autonomen Systeme und die an Kommunikationsnetzwerken beteiligten Systeme wurden aus der Analyse identifiziert. Eine detaillierte Untersuchung des ersten Lösungsprinzips wurde vorgenommen. Für das bevorzugte Realisierungsszenario wurde eine ausführliche Anforderungsliste für die verwendeten Hardwarekomponenten erstellt.

Fahrerassistenzsysteme, zu denen ebenfalls die kollektive Ausleuchtung gezählt werden kann, müssen neben den erforderlichen technischen Aspekten auch die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug, die umgebende Verkehrssituation sowie gesetzliche Aspekte berücksichtigen. Aus der physiologischen Sicht und der Geometrie des Verkehrsraums wurden die wesentlichen Randbedingungen für die Gestaltung der aktiven Lichtverteilung definiert. Aufbauend auf den so definierten Einflussfaktoren wurden die möglichen Ausleuchtungsstrategien abgeleitet.

Im experimentellen Teil der Arbeit wurde das bevorzugte lichttechnische Konzept nach der Auswahl der geeigneten Komponenten zu einem funktionierenden Prototyp entwickelt. Das Prototyp-Scheinwerfersystem wurde in einem Versuchsfahrzeug implementiert, mit dem Ziel, die Fähigkeiten der neuen Lichtfunktion unter realen Verkehrsbedingungen zu erproben. In Versuchsreihen wurde nachgewiesen, dass die damit erzielte kollektive Ausleuchtung des Verkehrsraums tatsächlich den Widerspruch zwischen guten Sichtbedingungen und geringer Blendung auflöst.

Zum ersten Mal ist damit der Design-Konflikt zwischen hoher Beleuchtungsstärke und geringer Blendung aufgehoben. Daraus resultiert eine Steigerung der Verkehrssicherheit.

Aktive Scheinwerfer werden wahrscheinlich zuerst als Option in Oberklasse-Fahrzeugen eingeführt werden, welche in erster Linie mit der fahrzeugeigenen Sensorik ausgestattet werden. Durch Preisreduktionen im Gesamtsystem wird diese neue Scheinwerfertechnologie nach und nach in weitere Fahrzeugklassen mit höheren Stückzahlen eindringen, wodurch eine größere Marktdurchdringung und ein höherer volkswirtschaftlicher Nutzen erzielt wird.

Die Anwendung des blendfreien Fernlichts sollte zunächst auf Autobahnen und Schnellstraßen erfolgen, da dort mit höheren Geschwindigkeiten gefahren wird und dadurch höhere Erkennbarkeitsentfernungen den größten Nutzen bieten. Zudem sind auf diesen Straßentypen die Anforderungen an die fahrzeugeigene Sensorik und Auswertung, wie in dem realisierten Prototypen gezeigt, leichter beherrschbar. Steigt die Leistungsfähigkeit der Sensorik und der Auswertung, so kann das blendfreie Fernlicht auf weitere Straßentypen und Anwendungsfälle übertragen werden. Die sichere Detektion von Fußgängern und Radfahrern ist für den Einsatz des blendfreien Fernlichts auf Landstraßen von großer Bedeutung.

Mit aktiven Scheinwerfern und mit deren Sensorik und Ansteuerung stehen eine Vielzahl neuer Lichtfunktionen zur Verfügung, die das Fahren bei Nacht sicherer und komfortabler machen. Sie stellen daher einen großen Beitrag zur Verkehrssicherheit der Zukunft dar.

9 Literaturverzeichnis

- (Abel u. a. 2002) Abel, B.; Müller, B.; Meier, J.; Iske, B.: *Optical Inter Car Communication via Lighting Devices*. VDI-Report No. 1728, Telematics for Vehicles, Ottobrunn, Germany, Nov. 2002
- (Agha 2001) Agha, A.: *Entwicklung von Postprocessing-Algorithmen für automotive Radarsysteme*. Dissertation, <http://www.smartmicro.de>, 2001
- (Becker 2002) Becker, J.-C.: *Fusion der Daten der objekterkennenden Sensoren eines autonomen Straßenfahrzeuges*. VDI-Berichte, Reihe 8, Nr. 948, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002
- (Boehlau 2003) Boehlau, Ch.: *Einsatz optischer Sensoren zur Umfelderkennung*. VDI Berichte Nr. 1731, 2003, S. 15-24
- (Bosch 2001) Robert Bosch GmbH: *Sensoren im Kraftfahrzeug*. Stuttgart, 2001, S. 130-132
- (Cohen 1987) Cohen, A. S.: *Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern*. Bericht zum Forschungsprojekt 8306/3, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1987
- (Conf. Helvetica 1975) Confoederatio Helvetica, Die Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaft: *Europäisches Abkommen vom 15. November 1975 über die Hauptstrassen des internationalen Verkehrs (AGR) (mit Anlagen)*. unter: www.admin.ch/ch/d/sr/c0_725_11.html
- (Damasky 1995) Damasky, J.: *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-Scheinwerfer*. Dissertation, TH Darmstadt, 1995
- (Detlefsen 2002) Detlefsen, W.: *Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, Anwendungen und Übertragungstechnik*. ITG-Fachtagung „Technologie und Anwendungen für die mobile Informationsgesellschaft“, Dresden 2002
- (Donges 1982) Donges, E.: *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. Automobil Industrie, Heft 2, 1982
- (Durth u. Levin 1991) Durth, W.; Levin, Ch.: *Langfristige Entwicklung der Augen- und Fahrzeughöhen*. Straße + Autobahn 12/91

- (Eckert 1993) Eckert, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Berlin, München: Verlag Technik, 1993
- (Ehmanns u. a. 2000) Ehmanns, D.; Wallentowitz, H.; Gelau, Ch.; Nicklisch, F.: *Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung*. Aachener Kolloquium- und Motorentchnik 2000
- (Ellinghaus u. Steinbrecher 1991) Ellinghaus, D.; Steinbrecher, J.: *Fahren bei Nacht*. UNI-ROYAL-Verkehrsuntersuchungen Nr. 16, Köln/Aachen, 1991
- (Ewerhart 2002) Ewerhart, F.: *Entwicklung und vergleichende Bewertung einer videobasierten Kurvenlichtsteuerung für adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer*. Dissertation, Fachgebiet Lichttechnik – TU Ilmenau, Nr. 1, Ilmenau, 2002
- (Franz u. a. 2001) Franz, W.; Eberhardt, R.; Luckenbach, T.: *FleetNet – Internet on the Road*. Conference Proceedings ITS 2001, Sydney, Australia, Oct. 2001
- (Franz u. a. 2001a) Franz, W.; Hartenstein, H.; Bochow, B.: *Internet on the Road via Inter-Vehicle Communications*. Workshop der Informatik 2001: Mobile Communications over Wireless LAN: Research and Applications, Gemeinsame Jahrestagung der GI und OCG, Wien, 26.-29. September 2001
- (Fürstenberg u. Willhoeft 2001) Fürstenberg, K.; Willhoeft, V.: *New Laserscanner for driver assistance*. 8th EAEC European Automotive Congress, Bratislava, Slovakia, June 2001
- (Gavrila u. a. 2001) Gavrila, D. M.; Kunert, M.; Lages, U.: *A multi-sensor approach for the protection of vulnerable traffic participants - the PROTECTOR project*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary, May 21-23, 2001
- (Gentex 2004) Gentex: <http://www.gentex.com>, 2004
- (Göschel 2004) Göschel, B.: *Die Telematik als Chance für die zukünftige Mobilität*. 100 Jahre aktiv für die Mobilität, Fahrzeugtechnik im VDI, ATZ, März 2004

- (Gramberg-Danielsen u. a. 1984) Gramberg-Danielsen, B.; Hartmann, E.; Giehring, H.: *Der Dunkelheitsunfall*. Ferdinand Euke Verlag, Stuttgart, 1984
- (Hartenstein u. a. 2001) Hartenstein, H.; Bochow, B.; Ebner, A.; Lott, M.; Radimirsch, M.; Vollmer, D.: *Position-Aware Ad Hoc Wireless Networks for Inter-Vehicle Communications: the Fleetnet Project*. MobiHoc 2001, Long Beach, California, 2001
- (Hege 1997) Hege, G.: *Litronic - der elektronische Scheinwerfer*. VDI-Bericht 1152 Elektronik im Kraftfahrzeug. Tagung in Baden-Baden, 1997
- (Hella Review 2000) Hella KG Hueck & Co. (Hrsg.): *Hella Lichttechnik Research & Development Review 2000*
- (Höver u. Seubert 2003) Höver, N.; Seubert, T.: *Heutige Fahrerassistenz-Systeme und ihr Potenzial für die Zukunft*. ATZ 10/2003
- (Huhn 1999) Huhn, W.: *Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen*. Dissertation, TH Darmstadt, 1999
- (Hürlimann 1995) Hürlimann, F. W.: *Erleben und Risiko des Fahrens bei Nacht*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 1, Köln, 1995
- (Jeske u. Ebert 1987) Jeske, E.; Ebert, R.: *Grundriss der Verkehrsmedizin*. Berlin: Verlag Volk und Gesundheit, 1987
- (Kauschke u. a. 2003) Kauschke, R.; Eichhorn, K.; Wallaschek, J.: *Innovative Optical Concepts for Future Car Headlights*. PAL 2003, Volume 10, TU Darmstadt, 2003
- (Kauschke u. a. 2004) Kauschke, R.; Eichhorn, K.; Wallaschek, J.: *Adaptive Scheinwerfer – ein Technologie-überblick*. LICHT 2004, Dortmund, 2004
- (Kleinkes 2003) Kleinkes, M.: *Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen*. Dissertation, Berichte aus der Physik, Shaker Verlag, Aachen, 2003
- (Kojima 2002) Kojima, S.: *A Recommendation for the U.S. Lower-Beam Pattern for Visual/Optically Aimable Headlamp*. In: SAE Technical Paper Series No. 2002-01-0260

- (Langwieder u. Bäumler 1997) Langwieder, K.; Bäumler, H.: *Charakteristik von Nachtunfällen*. Progress In Automobil Lighting, 1997
- (Mauve u. a. 2001) Mauve, M.; Widmer, J.; Hartenstein, H.: *A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks*. IEEE Networks 2001, San Antonio, Texas, Nov. 2001
- (Mende 2000) Mende, R.: *Radarsysteme zur automatischen Abstandsregelung in Automobilen*. Dissertation, <http://www.smartmicro.de>, 2000
- (Merker 2004) Merker, A.: *Infrared Sensor for Lidar Based ACC System*. Technical Information, Hella KG Hueck & Co., 2004
- (Morsink u. a. 2002) Morsink, P. L. J.; Cseh, C.; Miglietta, M.: *Preliminary Design of an Application for Communication Based Longitudinal Control in the CarTalk2000 Project*. IT Solutions for Safety and Security in Intelligent Transport (e-Safety), Lyon, 16.-18.09.2002
- (Mühlenberg u. Seubert 2002) Mühlenberg, M.; Seubert, T.: *Fahrerassistenzsysteme basierend auf Bildsensorik*. ATZ 7-8/2002
- (Nwagboso 1997) Nwagboso, Ch.: *Advanced vehicle und infrastructure systems*. Vehicle Systems Research Centre, Bolton Institute, Bolton, UK, 1997
- (Pahl u. Beitz 1997) Pahl, G.; Beitz, W.: *Konstruktionslehre Methoden und Anwendung*. Berlin Heidelberg: Springer, 1997
- (Schiermeister u. a. 2003) Schiermeister, N.; Schwenkschuster, L.; Decker, D.; Eichhorn, K.: *LEDs – Leuchtdioden-Systeme im Scheinwerfer*. In: ATZ 9/2003, S.782-791
- (Schmidt-Clausen u. Finsterer 1989) Schmidt-Clausen, H.-J.; Finsterer, H.: *Der Einfluss der Scheinwerferanbauhöhe und –einstellung auf die Erkennbarkeit von Objekten*. In: Projekt Nr. 1.8604 des FG Lichttechnik der TH Darmstadt, Darmstadt, 1989
- (Schubert u. a. 2003) Schubert, J.; Apitz, J.; Grüner, R.: *Optische Sensoren zur Steuerung intelligenter Heckleuchten*. VDI Berichte Nr. 1731, 2003
- (Uhler 1998) Uhler, W.: *Fahrzeuglängsregelung in ACC-Systemen*. Seminar Fahrerassistenzsysteme, Haus der Technik, Essen, 1998

- (VDI 2206) Richtlinie VDI 2206 [Entwurf], *Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme*. 2002
- (Völker 1999) Völker, S.: *The effect of discomfort glare on the development of headlamps*. PAL – Progress in Automobile Lighting, Darmstadt, 1999
- (Völker 2000) Völker, S.: *Ermittlung von Beleuchtungsniveaus für Industriearbeitsplätze*. Dissertation, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fb 881, Dortmund/Berlin, 2000
- (Wallaschek 1995) Wallaschek, J.: *Modellierung und Simulation als Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeiten mechatronischer Produkte*. In: *Simulation in der Praxis – neue Produkte effizienter gestalten*. VDI-Berichte, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- (Wallaschek 1998) Wallaschek, J.: *Innovation - Weiß Ihr Scheinwerfer, wo Sie hinfahren?* In: Hella Lichttechnik Research & Development Review 1998
- (Wallentowitz u. a. 2001) Wallentowitz, H.; Ehmanns, D; Neunzig, D.; Weilkes, M.: *Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F 35, 2001
- (Weilkes 2000) Weilkes, M.: *Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation*. Dissertation, Schriftenreihe Automobiltechnik, Aachen, 2000
- (Westermann 2002) Westermann, H.: *Eureka Projekt 1403, AFS. History and scientific back-up*. Delft, 2002

Veröffentlichungen, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit entstanden sind

- (Roslak u. Wallaschek 2003) Roslak, J.; Wallaschek, J.: *Aktive Kfz-Lichtverteilungen zur kollektiven Ausleuchtung des Verkehrsraumes*. In: 1. Paderborner Workshop Intelligente Mechatronische Systeme, 20. und 21. März 2003, Heinz Nixdorf Institut Bd. 122, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2003
- (Roslak 2003a) Roslak, J.: *A Comparative Study of Mobile Ad Hoc Networks and Autonomous Systems for Collective Illumination of the Traffic Space*. In: 7th World Multiconference on Systemics and Infomatics, Orlando, Florida, 27.-30. July 2003
- (Roslak 2003b) Roslak, J.: *Lighting Systems for the Adaptive Illumination of the Traffic Space*. 5th International Symposium on Progress in Automobile Lighting, Darmstadt, 23.-24. September 2003
- (Roslak u. Wallaschek 2004) Roslak, J.; Wallaschek, J.: *Active Lighting Systems for Improved Road Safety*. In: Intelligent Vehicles Symposium, 14.-17. June 2004, Parma, Italien, 2004