Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Rainer Kauschke
aus Heidenheim / Brenz

Tag des Kolloquiums: 08.09.2006
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Gall

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 2

1.1 Kundenwünsche an die Lichtfunktionen 2
1.2 Aktive Scheinwerfersysteme 3
1.3 Überblick 4

2 Stand der Technik 5

2.1 EU-Rahmenvorgaben 5
2.2 Adaptive Systeme in der Kraftfahrzeuglichttechnik 5
2.3 AFS – Adaptive Frontlighting System – Gesetzgebung 7
2.4 Klassifizierung von aktiven Scheinwerfern 7
2.5 Lichttechnische Scheinwerferfunktionen 8
2.6 Historie der Scheinwerferentwicklung 13
2.7 Lichtquellen 14
2.8 Scheinwerfertechnologien 17
2.8.1 Reflexionstechnik 19
2.8.2 Projektionstechnik 21
2.8.3 Leuchtweitenregelung 23
2.9 Dimensionierung von konventionellen Scheinwerfern 23
2.10 Dimensionierung von nichttraditionellen Optiken für Scheinwerfer 24
2.10.1 TIR Linse 24
2.10.2 Compound Parabolic Concentrator (CPC) 25
2.11 Literatur- und Patentanalyse 25
2.11.1 Variable Scheinwerfersysteme 25
2.11.2 Kurvenlicht-Scheinwerfer 26
2.11.3 Head-up Displays 27

3 Aufgabenstellung und Lösungssystematik 28

3.1 Defizite heutiger Lichtverteilungen und Scheinwerfer 28
3.2 Zielstellung an aktive Scheinwerfer 28
3.3 Zukünftige Scheinwerferlichtfunktionen 30
3.3.1 Straßensituationsabhängiges Licht AFS+ [HF] 30
3.3.2 Verkehrssituationsabhängiges Licht COL [HF] 31
3.3.3 Markierendes Licht MKL [HF] 31

3.3.4 Fahrerspezifisches Licht DSL [NF] ... 32
3.3.5 Displaylicht DSY [NF] ... 32
3.3.6 Kommunikationsfunktion COM [NF] ... 32
3.4 Lichttechnische Anforderungen an Scheinwerferlichtverteilungen ... 34
3.5 Anforderungsanalyse des Scheinwerferumfeldes / der Sensorik ... 38
3.5.1 Vertikale Scheinwerfereinstellung ... 41
3.5.2 Horizontale Scheinwerfereinstellung ... 42
3.6 Anforderungsanalyse des mechatronischen Scheinwerfersystems ... 43
3.7 Funktionsanalyse des aktiven Scheinwerfers ... 45
3.8 Funktionsstruktur ... 47

4 Generierung von Scheinwerferkonzepten ... 50

4.1 Lösungsgenerierung – Methodik ... 50
4.2 Konzeptideenbeschreibung ... 51
4.3 Bewertung der Scheinwerferkonzepte ... 65
4.4 Morphologie der Lösungselemente ... 71
4.5 Kombination der Lösungselemente ... 75
4.6 Konzentration auf 4 Hauptkonzepte (K2-K5) und 1 Nebenkonzept (K7) ... 77
4.6.1 Digitale Projektion K2 ... 77
4.6.2 Analoge Projektion K3 ... 78
4.6.3 Scannender Scheinwerfer K4 ... 79
4.6.4 LCoS-Scheinwerfer K5 ... 79
4.6.5 Flexprisma K7 ... 81
4.7 Etendué – Helmholtz-Lagrange'sche Invariante ... 82

5 Synthese ... 83

5.1 Projektoren ... 83
5.2 LCoS-Scheinwerfer ... 83
5.2.1 Funktionssynthese ... 83
5.2.2 Modularisierung ... 90
5.2.3 Dimensionierung ... 91
5.2.4 Konstruktiver Aufbau ... 92
5.2.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit LCoS-Scheinwerfer ... 95
5.3 DMD-Scheinwerfer ... 97
5.3.1 Funktionssynthese ... 97

5.3.2 Modularisierung 99
5.3.3 Dimensionierung 109
5.3.4 Konstruktiver Aufbau des DMD-Scheinwerfers 120
5.3.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit des DMD-Scheinwerfers 123
5.4 AMD-Scheinwerfer 125
5.4.1 Funktionssynthese 125
5.4.2 Modularisierung 130
5.4.3 Dimensionierung 133
5.4.4 Konstruktiver Aufbau 139
5.4.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit AMD 144
5.5 Scannender Scheinwerfer 148
5.5.1 Funktionssynthese 148
5.5.2 Modularisierung 149
5.5.3 Dimensionierung 154
5.5.4 Konstruktiver Aufbau 164
5.5.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit scannender Scheinwerfer 168
5.6 Flexprisma 170
5.6.1 Funktionssynthese 170
5.6.2 Modularisierung 177
5.6.3 Dimensionierung 179
5.6.4 Konstruktiver Aufbau 185
5.6.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit Flexprisma 186
5.7 Funktionsanalyse der Hauptkonzepte 189
5.8 Grob-Risikoanalyse der Hauptkonzepte 194
5.9 Bewertung der Hauptkonzepte 195

6 Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Prototypen 199

6.1 Einbindung des Scheinwerfers in das Kfz-Umfeld 199
6.1.1 Lichtfunktionen und deren Sensorik 199
6.1.2 Sensorik - CAN-Bus-Ansteuerung und dessen Auswertung 203
6.2 Aufbau eines statischen Lichtverteilungsdemonstrators 203
6.3 Umsetzung der Konzepte ins dynamische Fahrzeugumfeld 204
6.4 Gesetze 208
6.5 Lichttechnische Analyse der aufgebauten Konzepte 209
6.5.1 Effizienzbetrachtung 209

6.5.2 Lichtverteilungen 217
6.6 Lichtfunktionsanalyse 225
6.7 Vergleich mit Konkurrenztechnologien – Head-up-Display 228
6.8 Temperaturuntersuchungen der Konzepte 229
6.9 Vibrationsanalyse des DMD-Scheinwerferkonzepts 231
6.10 Aufbau und Fertigung der innovativen Optikkonzepte 234
6.11 Gesamtbewertung der aktiven Scheinwerferkonzepte 234
6.12 Bewertung der aktiven Scheinwerfer im Vergleich zu AFS-Scheinwerfern 236

7 Zusammenfassung und Ausblick 239

8 Literaturverzeichnis 242

8.1 Konstruktionsmethodik 242
8.2 Scheinwerfer 243
8.3 Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen 253
8.4 Sensorumgebung und Displays 255
8.5 Sonstige Angaben 256
8.6 Optik und Lichttechnik 256
8.7 Promotionsbegleitende Diplom- und Studienarbeiten 258
8.8 Eigene Veröffentlichungen und Schutzrechtsanmeldungen 259
8.9 Fremde Schutzrechtsveröffentlichungen 260
8.10 Glossar 265

9 Anhang 270

9.1 Bewertung der Hauptkonzepte im Detail 270
9.2 Offene technologische und physiologische Fragen 272

1 Einleitung

Scheinwerfer haben einen maßgeblichen Einfluss auf das Erscheinungsbild von Kraftfahrzeugen. Sie werden je nach Hersteller für ein unterschiedliches Tag- und Nachtdesign eingesetzt. Neben den Designanforderungen trägt der Scheinwerfer maßgeblich zur Verkehrssicherheit von Fahrzeugen bei Nacht, bei Dämmerungssituationen und im Falle des Tagfahrlichtes auch während Tagfahrten bei. Die Verkehrssicherheit wird durch die zwei Hauptlichtanforderungen an Scheinwerfer bestimmt, die sich mit einer optimalen Ausleuchtungsfunktion des Verkehrsraumes bei minimaler Blendung anderer Verkehrsteilnehmer und mit einer Signalfunktion zum besseren Erkennen des eigenen Fahrzeugs gegenseitig ergänzen. Die Lichtanforderungen „sehen“ und „gesehen werden“ werden heutzutage mit einer begrenzten Zahl von Lichtfunktionen nur suboptimal erfüllt.

Ermüdung und schlechte Sichtverhältnisse im nächtlichen Verkehr sind die Hauptursachen für ein deutlich erhöhtes Unfallrisiko. 50 % der tödlichen Verkehrsunfälle ereignen sich in der Dämmerung oder bei Nacht, obwohl in dieser Zeit nur 25 % der durchschnittlichen Kilometerleistung zurückgelegt werden [Literaturverzeichnis 8.2, PAL 1997, LANGWIEDER].

1.1 Kundenwünsche an die Lichtfunktionen

Die Lichtfunktionen der Scheinwerfer dienen nicht nur zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, sondern sie erhöhen auch den Fahrkomfort. In den heutigen Fahrzeugen werden immer mehr Fahrerassistenzsysteme (ABS, ESP etc.) eingesetzt, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen, wobei Unfälle vermieden oder wenigstens die Unfallfolgen deutlich reduziert werden sollen.

Die Bevölkerungsstruktur ist in Deutschland und in Europa im Wandel. Der Prozentsatz an Fahrzeugbesitzern im fortgeschrittenen Alter steigt anteilig in der Bevölkerung. Diese Fahrzeugführer haben, physiologisch bedingt, eine verminderte Wahrnehmung, und diese Fahrer legen zunehmend Wert auf weitere Komfortfunktionen im Fahrzeug.

Beiden Bedürfnissen einer erhöhten Verkehrssicherheit und einem erhöhten Fahrkomfort durch eine bessere Ausleuchtung und damit Wahrnehmung des Verkehrsumfeldes kann durch aktive Scheinwerfersysteme besser entsprochen werden als mit „konventioneller“ Scheinwerferlichttechnik. Deren Freiheitsgrade und Variationsmöglichkeiten für eine adaptive Lichtverteilung sind, technologisch bedingt, begrenzt.

Heutige Scheinwerfersysteme bieten maximal bis zu sechs Lichtverteilungen, die vom Fahrer manuell gewählt, umgeschaltet bzw. automatisch per Sensorik aktiviert werden: Abblend- und Fernlicht sowie optional Nebellicht, seit 2003 statisches und dynamisches Kurvenlicht sowie Tagfahrlicht. In einem nächsten Schritt können adaptive Scheinwerfer (AFS-Scheinwerfer) Stadtlicht, Autobahnlicht und Schlechtwetterlicht erzeugen. Entsprechende Systeme werden voraussichtlich 2006 in den Markt eingeführt werden. Mit ihnen wird eine automatische Anpassung der Lichtverteilung an den Straßenverlauf, die Fahrzeuggeschwindigkeit und die

Witterungsbedingungen realisiert. Fernziel der Entwicklung ist es, die Lichtverteilung im Verkehrsraum so zu gestalten, dass alle Verkehrsteilnehmer in ihrer Wahrnehmung optimal unterstützt werden. Die heute im Kraftfahrzeug eingesetzten Scheinwerfersysteme müssen dazu von ihren heute diskret definierten Lichtverteilungen zu variablen, assistierenden Lichtverteilungen weiterentwickelt werden.

1.2 Aktive Scheinwerfersysteme

Ausgehend von den Designerfordernissen, den Unfallzahlen und den Kundenwünschen stellt sich die Frage, wie die bisherige Scheinwerfer-Lichttechnik zur Steigerung von Sicherheit und Komfort weiterentwickelt werden kann.

Basierend auf dem aktuellen Entwicklungsstand, der rein „passiven“, konventionellen Scheinwerferlichttechnik, die das Ein- und Ausschalten sowie das Umschalten zwischen verschiedenen Lichtfunktionen und das Schwenken der Gesamtlichtverteilung zulässt, müssen Scheinwerfersysteme künftig „aktiv“ mittels Sensorik erkennen, welche Straßen- und Verkehrssituation vorliegt, um darauf situationsabhängig „aktiv“ mit ihren „adaptiven“ Lichtverteilungen den Straßensituationen angepasst reagieren zu können. Darüber hinaus bieten zukünftige, „aktive“ Scheinwerfersysteme die Möglichkeit den Fahrer „assistierend“ mit aktiven Lichtfunktionen in seiner Wahrnehmung zu unterstützen, wobei zusätzlich auf andere Verkehrsteilnehmer reagiert wird.

Ziel dieser Arbeit ist es, ausgehend von den bisherigen Scheinwerfertechnologien, neue aktive Scheinwerfer-Prototypen zu entwickeln und aufzubauen, welche die Funktion haben, aktiv zukünftige Lichtverteilungen zu erzeugen. Diese Prototypen können dann, je nach technologischem Reifegrad und Technologiebasis als statische und/oder dynamische Aufbauten zum Rapid Prototyping von Lichtfunktionen verwendet werden. Neben der Definition von möglichen Lichtfunktionen, –ausprägungen und –parametern bestehender und zukünftiger Scheinwerferprojekte lassen sich diese aktiven Lichtsysteme mit nur einer Hardware zur rein softwaretechnisch programmierten und angesteuerten Validierung bestehender und zukünftiger Lichtfunktionen unter statischen und/oder dynamischen Bedingungen einsetzen. Die neuen Freiheitsgrade in der Lichtverteilungs-Erzeugung übersteigen dabei bei weitem die der „konventionellen“ Scheinwerferlichttechnik und die von Versuchsträgern mit „konventioneller“ Lichttechnik [8.3, DAHLEM, 2001]. Weitere Prototypen des Pixellight [8.2, ENDERS, 2001] und [8.2, BOERSCH, 1999] sind nach derzeitigem Kenntnisstand weniger leistungsfähig, weisen weniger Lichtfunktionen auf und werden vorteilhafterweise weiterentwickelt. Als Lichtquellen für diese aktiven Scheinwerfersysteme werden Gasentladungslampen eingesetzt.

Neben dem Einsatz der aktiven Scheinwerfersysteme als Entwicklungswerkzeug können die aufgebauten Scheinwerferprototypen als Basis für zukünftige Scheinwerfer-Generationen dienen, die einen sehr hohen Freiheitsgrad in der Erzeugung und Formung von Lichtverteilungen aufweisen. Aktive Scheinwerfersysteme könnten der Beginn einer „Revolution“ in der

Scheinwerferlichttechnik sein, an deren Ende die Lichtverteilungen der aktiven Scheinwerfersysteme an den OEM und an den Endkunden nur noch per Software angepasst werden.

1.3 Überblick

In Kapitel 2 werden der Stand der Technik bezüglich Adaptivität der Scheinwerferlichtfunktionen, Lichtquellen, Scheinwerferkonzepte und Technologien in der Literatur sowie die Patentlage aufgezeigt.

Die Aufgabenstellung, die Anforderungen an die Lichttechnik, an den aktiven Scheinwerfer und an dessen Umfeld sowie die Funktionsanalyse und die Funktionsstruktur werden in Kapitel 3 beschrieben.

Anschließend folgt in Kapitel 4 die Generierung von Scheinwerferkonzepten, deren Bewertung und die Auswahl auf vier Hauptkonzepte und ein Nebenkonzept, die im weiteren Verlauf der Arbeit genauer beschrieben werden sollen.

Kapitel 5 gibt einen detaillierten Einblick in die 4 Hauptkonzepte, LCoS, DMD, AMD und scannender Scheinwerfer jeweils mit ihrer Funktionssynthese, ihrer Modularisierung, ihrer Dimensionierung, ihrem konstruktiven Aufbau und ihrer lichttechnischen Bewertung. Ein Nebenkonzept, das Flexprisma, wird ebenfalls in diesem Kapitel erläutert.

In Kapitel 6 wird die Leistungsfähigkeit der Prototypen untersucht, wobei auf eine lichttechnische Validierung, auf Wirkungsgradbetrachtungen sowie auf thermische und Vibrationsuntersuchungen kurz eingegangen werden soll. Hierbei wird ein Benchmark zwischen den Scheinwerferprototypen untereinander und ein Vergleich mit dem Stand der Technik durchgeführt.

Eine Zusammenfassung und ein Ausblick in Kapitel 7 runden die Arbeit ab.

2 Stand der Technik

2.1 EU-Rahmenvorgaben

Auf europäischen Straßen ereignen sich nach Angaben der EU-Kommission jährlich 1,3 Mio. Unfälle. Dabei sterben jedes Jahr ca. 40.000 Menschen und 1,7 Mio. Menschen erleiden Verletzungen. Der volkswirtschaftliche Schaden dieser Unfälle wird von der EU auf 160 Mrd.€ geschätzt. Das entspricht 2% des europäischen Bruttoinlandsprodukts. Aktive Kfz-Sicherheitssysteme bieten einer EU-Untersuchung zufolge das größte Potenzial, die Sicherheit im Straßenverkehr wesentlich zu verbessern. Neben ABS, ESP und Bremsassistent können zukünftige aktive lichttechnische Systeme auch zur Reduzierung des Schadenaufkommens beitragen.

Zu diesem Zweck wurde anlässlich des 6. Rahmenprogramms der EU eine Arbeitsgruppe „eSafety“, enhanced safety, ins Leben gerufen, die mit ihren Empfehlungen die Anzahl der Verkehrstoten im Straßenraum bis 2010 halbieren soll. Adaptive Scheinwerfer können bei diesem Vorhaben sicherlich ihren Beitrag zur Unfallvermeidung oder Reduzierung der Unfallschwere durch eine bessere Wahrnehmung durch den Fahrer leisten.

2.2 Adaptive Systeme in der Kraftfahrzeuglichttechnik

Das Verkehrsaufkommen im Straßenverkehr steigt zunehmend an, da immer mehr Fahrzeuge zugelassen werden. Das hat zur Folge, dass die Lichtfunktion Fernlicht nach [8.2, HAMM, 2000] nur noch in ca. 5% der Fahrsituationen zum Einsatz kommt. Demzufolge wird das Abblendlicht in 95% der Nachtfahrten eingesetzt. Die limitierte Erkennbarkeitsentfernung der Abblendlichtverteilung stellt aber einen schlechten Kompromiss zwischen Erkennbarkeitsentfernung des Fahrers und Begrenzung der Blendung für den Gegenverkehr dar.

Im Vergleich zum Fernlicht werden die Sichtbedingungen für den Fahrer durch die häufige Abblendlichtnutzung eingeschränkt. Blendungs- und Adaptationsvorgänge beim Passieren von anderen Verkehrsteilnehmern sorgen für eine erhöhte Ermüdung der Verkehrsteilnehmer. Zukünftige aktive Scheinwerfer können einen Beitrag dazu leisten, diese Anpassungsvorgänge des menschlichen Auges auf ein Minimum zu beschränken. Der Übergang vom relativ niedrigen Leuchtdichteniveau der eigenen Fahrzeugbeleuchtung zum erhöhten Leuchtdichteniveau beim Passieren entgegenkommender Fahrzeuge und insbesondere der Readaptionsvorgang auf das Ausgangsleuchtdichteniveau kann durch die aktiven Scheinwerfer über einen ausgedehnteren Zeitraum ermüdungsfreier für die menschliche Wahrnehmung gestaltet werden. Bei der stationären Tunnelbeleuchtung wird der Adaptationsvorgang des Fahrers heute schon mit einer adaptiven Ausleuchtung der Tunnelein- und –ausfahrten abgemildert. In beiden Fällen wird das sogenannte „Fahren in ein schwarzes bzw. weißes Loch“ vermieden. Im Unterschied zur Tagsituation bei Tunneldurchfahrten, bei der von einem hohen Leucht-

dichteniveau gestartet wird, das im Tunnel deutlich absinkt und am Ende der Tunneldurchfahrt wieder ansteigt, findet bei Nachtfahrten im Begegnungsverkehr der umgekehrte Fall statt. Dabei steigt das Leuchtdichteniveau durch die entgegenkommenden Scheinwerfer erst an, bevor nach der Begegnungssituation das Leuchtdichteniveau wieder abrupt absinkt.

Die Erleichterung von Adaptationsvorgängen wirkt dem Trend der nachlassenden Leistungsfähigkeit der Augen entgegen, bei der sich ältere Mitbürger mit der Wahrnehmung im Straßenverkehr schwerer tun. Als Alterungserscheinungen im Auge sind dabei die Trübung der Augenlinse, eine erhöhte Blendempfindlichkeit des menschlichen Auges, eine geringere Adaptations- und Akkommodierungsfähigkeit zu nennen. Diesen Alterungsvorgängen des menschlichen Auges kann durch eine gezielte, angepasste Ausleuchtung mit im Lichtstrom adaptiven Scheinwerfern entgegengewirkt werden.

Auch in anderen Bereichen der Beleuchtungstechnik von Fahrzeugen werden zunehmend adaptive Systeme eingesetzt, um den menschlichen Anforderungen besser zu entsprechen. Im Innenraum des Fahrzeugs wird die Fahrzeuginnenbeleuchtung dem Beleuchtungsniveau des Fahrzeugumfeldes angepasst werden, damit für den Fahrer nicht nur die Piktogramme sondern auch die Kontur der Schalter und Betätigungselemente und das Innenraumdesign des Fahrzeugs bei Nacht sichtbar werden [8.2, GRIMM, 2002]. Zur Erzeugung einer Wohlfühlatmosphäre wird neben der Anpassung der Beleuchtungsstärke bzw. Leuchtdichte auch die Lichtfarbe im Kfz-Innenraum eingesetzt [8.2, PIETZONKA, 2004]. Bei Displays erfolgt ebenfalls eine Anpassung der Leuchtdichte an die Umgebungsbedingungen [8.2, WEIS, 2002].

Im Bereich der Heckleuchten werden adaptive Systeme eingesetzt, um der Lichtstreuung an verschmutzten Heckleuchten entgegenzuwirken oder die Signalbeleuchtung den Sichtbedingungen bei widrigen Witterungsbedingungen, wie Nebel oder starkem Regen anzupassen. [8.2, PAL 2001, ARMBRUSTER]. Beim adaptiven Bremslicht (Brake-Force-Display) kann mittels Leuchtdichteerhöhung, Flächenvergrößerung oder Pulsieren [8.2, LÖBIG, 2004] der nachfolgende Verkehr das Maß der Verzögerung des Fahrzeuges bis hin zur Vollbremsung (automatisches Aktivieren des Warnblinklichts bei Citroën) mehr oder weniger intuitiv ablesen und er kann dadurch schneller darauf reagieren.

Die Umsetzung von adaptiven Lichtverteilungen in der Frontbeleuchtung ist bei Scheinwerfern bisher nur minimal erfolgt. Hierzu werden die Scheinwerferlichtverteilungen entsprechend dem Kurvenradius des Straßenverlaufs dynamisch geschwenkt. Die Lichtfunktionen der AFS-Scheinwerfer mit Autobahnlicht, Stadtlicht und Schlechtwetterlicht bezwecken die Lichtverteilung des Abblendlichts besser der Verkehrssituation anzupassen, wodurch eine größere Erkennbarkeitsentfernung und/oder eine breitere Ausleuchtung erzielt werden. Die Adaptivität der AFS-Scheinwerfer reicht allerdings noch nicht aus. Die im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen aktiven Scheinwerfer bieten demgegenüber neben der neuen Adaptivität an den Fahrer und der weiteren Verbesserung der Lichtfunktion an die Verkehrssituation auch noch die Möglichkeit der gezielten Darstellung von Informationen innerhalb der Lichtverteilungen.

Da der Mensch mit seinen Sehgewohnheiten und Bedürfnissen sehr individuell ist, kann ein aktives Scheinwerfersystem dessen Anforderungen besser gerecht werden als Scheinwerfer, deren Lichtverteilungen für alle Fahrer gleich sind. Dadurch wird der Fahrkomfort für den Fahrer erhöht.

2.3 AFS – Adaptive Frontlighting System – Gesetzgebung

Im Rahmen des EU-Programms zur Steigerung der Europäischen Wettbewerbsfähigkeit durch marktnahe, industrielle Forschung und Entwicklung EUREKA 1403, Advanced Front Lighting System for Cars, wurden die Anforderungen für die AFS-Lichtverteilungen definiert. Extensive Tests wurden dabei mit den Lichtfunktionen durchgeführt, bevor Vorschläge zur internationalen Gesetzgebung vorbereitet und eingereicht werden konnten [8.2, EUREKA 1403]. Im Rahmen der Gesetzgebung wurde eine „Fast Track"-Lösung für das statische und dynamische Kurvenlicht definiert, die deren Zulassung bereits 2003 ermöglichte. Die weiteren Lichtfunktionen, wie Autobahnlicht, Stadtlicht und Schlechtwetterlicht, werden 2006 gesetzlich zulässig sein. Ziel des EUREKA Projekts sind erhöhte Verkehrssicherheit, verbesserter Fahrer-Sehkomfort und reduzierter Kraftstoffverbrauch. Die Lichtverteilungen sollen in Abhängigkeit von den folgenden Bedingungen umgeschaltet werden:

1. äußere Lichtverhältnisse: Tag, Dämmerung, öffentliche Beleuchtung und Nacht
2. Verkehrsumgebung: Autobahnen mit getrennten Fahrspuren, gewundene Landstraßen, Stadtstraßen
3. Wetterbedingungen: Trockenheit, Nässe, Regen, Schnee, Nebel
4. Fahrzeugeigenschaften: Nickwinkeländerungen verursacht durch Beladung, dynamische Nickwinkeländerungen beim Fahren, Umfang der Steuerung, Geschwindigkeit des Fahrzeugs, Bodenfreiheit des Fahrzeugs und Anbauhöhe der Scheinwerfer

12 Partner waren am EUREKA Projekt beteiligt. Das EUREKA Projekt 1403 ist zum 01.07.2004 abgeschlossen worden.[8.2, GRE 48, 2002]

2.4 Klassifizierung von aktiven Scheinwerfern

Nachdem die adaptiven Scheinwerfersysteme mit ihren vordefinierten Lichtverteilungen beschrieben wurden, soll hier eine Einordnung der aktiven Scheinwerfer in die zukünftigen Scheinwerferlichtsysteme vorgenommen werden.

Abbildung 2.1: Untergruppen der Aktiven Scheinwerfer

Klassische Scheinwerfer sind ein- bzw. zweifunktional und bieten dem Fahrer die Abblend- und/oder die Fernlichtfunktion. Zur Vollständigkeit seien die weiteren einfunktionalen Scheinwerfer für die Nebellichtfunktion und die Tagfahrlichtleuchte hier auch erwähnt. Bei AFS-Scheinwerfern wurden neue Lichtfunktionen hinzugefügt. Diese weisen seit 2003 das statische Kurvenlicht und das dynamische Kurvenlicht auf. Ab 2006 sind die Lichtfunktionen Autobahnlicht, Landstraßenlicht, Stadtlicht und Schlechtwetterlicht zulässig. Diese beschriebenen Lichtfunktionen weisen die Gemeinsamkeit auf, dass deren Lichtverteilungen quasi-statisch sind und nach vordefinierten Kriterien dem Fahrer zur Verfügung gestellt werden.

Aktive Scheinwerfer, Abbildung 2.1, mit Ihrer Unterfunktionsgruppe der assistierenden Scheinwerfer gehen über diese quasi-statischen Lichtverteilungen hinaus, indem sie die Lichtverteilungen und damit den Energiestrom der Lichtverteilung dynamisch anpassen und ihn mit einem Informationsstrom modulieren. Dabei wird der Fahrer im Rahmen der assistierenden Scheinwerfer mit gezielt im Positiv- oder Negativkontrast dargestellten oder blinkend hervorgehobene Informationen unterstützt. Dadurch kann nicht nur die Umweltwahrnehmung verbessert werden (Umweltinformationsfluss), sondern es wird auch ein visueller Informationsfluss über die Scheinwerferlichtverteilung zwischen dem Fahrzeug und dem Fahrer möglich, wobei das Fahrzeug seine Informationen (Navigationshinweise, technische Störungen, Pausenhinweise bei Übermüdung, Lane-Departure-Hinweise etc.) dem Fahrer direkt in die Lichtverteilung einblenden kann.

2.5 Lichttechnische Scheinwerferfunktionen

Heutige Scheinwerfer bieten dem Kunden nur die Wahl zwischen zwei bzw. drei Lichtverteilungen: Abblendlicht und Fernlicht sowie optional Nebellicht. Das in den Ursprüngen der Definition der Lichtverteilungen festgelegte Abblendlicht (passing beam) ist für den Fall einer Begegnung mit anderen Fahrzeugen ausgelegt, während das in den Anfängen der Lichtverteilungen als Standardfall vorgesehene Fernlicht (driving beam) durch das steigende Verkehrsaufkommen immer mehr in den Hintergrund der Anwendung für den Nutzer gerückt ist. Das Abblendlicht stellt allerdings nur einen Kompromiss zwischen einer guten geometrischen Leuchtweite und der damit verbundenen guten Erkennbarkeitsentfernung auf der eigenen Fahrbahn und einer erträglichen Blendung für den Gegenverkehr dar. Daher besteht im Rahmen der AFS-Gesetzgebung, Projekt EUREKA [8.2, EUREKA 1403], der Wunsch, die Lichtverteilungen den Erfordernissen der Verkehrssituation genauer anzupassen. Dadurch kann für die jeweilige Verkehrssituation der optimale Kompromiss zwischen erhöhter

Reichweite der Scheinwerfer gegenüber der Abblendlichtverteilung und weiterhin erträglicher Blendung gefunden werden.

Das dynamische und das statische Kurvenlicht, dessen Einführung in den Markt 2003 stattfand, sind erste Schritte für eine Anpassung der Lichtverteilung an die jeweilige Verkehrssituation. Das dynamische Kurvenlicht, bei dem die Scheinwerfer in der ersten Ausführungsform in Abhängigkeit vom Lenkwinkel, der Geschwindigkeit und der Gierrate analog um bis zu +/-15° horizontal als Ganzes geschwenkt werden, erlaubt die Lichtverteilung dem Kurvenverlauf nachzuführen. Im Rahmen dieser ersten Lichtfunktion adaptiver Scheinwerfer sind zahlreiche Arbeiten entstanden [8.2, HOFFMANN, 2003; 8.2, EWERHARDT, 2001-1; 8.2, HOGREFE, 2000; 8.2, SAE 2004, YAKAMOTO; 8.2, KALZE, 2001]. Größere Schwenkwinkel sind auf Grund des beschränkten Bauraums innerhalb der Scheinwerfer und wachsender interner Totalreflexionen an der oft stark geneigten und gepfeilten Abdeckscheibe des Scheinwerfers kaum möglich.

Das statische Kurvenlicht ist für Kreuzungen, Abbiegungen und Kurven mit einem kleinen Kurvenradius vorgesehen. Es wird meist als Zusatzscheinwerfer im Scheinwerfergehäuse integriert und wird aktiviert bei Blinkerbetätigung oder großen Lenkwinkeln. Durch das Aufdimmen des statischen Kurvenlichts kann der Fahrer Fußgänger, Radfahrer und den Fahrbahnverlauf deutlich früher erkennen, als es mit der bisherigen Streubreite der Lichtverteilung von statischen, in Fahrzeuglängsachse ausgerichteten Lichtverteilungen möglich ist. Eine Übersicht über die Möglichkeiten der dynamischen und statischen Kurvenlichtfunktion wird in [8.2, SAE 2004,YAKAMOTO] gegeben.

Die AFS-Lichtfunktionalitäten, die ab 2006 zulässig sind, stellen einen weiteren Schritt in Richtung situationsabhängiger Lichtverteilung dar. Beim Autobahnlicht (motorway light) wird die Reichweite der Scheinwerfer durch ein zentrales Anheben der Hell-Dunkel-Grenze im Vergleich zum Abblendlicht gesteigert, wodurch es bei den dort gefahrenen höheren Geschwindigkeiten eher möglich ist Hindernissen auszuweichen oder auf diese zu reagieren. Das in den AFS-Regelungen definierte Landstraßenlicht (country light) entspricht in etwa dem heutigen Abblendlicht, wobei der linke Fahrbahnrand besser ausgeleuchtet wird.

Beim Stadtlicht (town light) wird der 15° Anstieg in der Hell-Dunkel-Grenze der Lichtverteilung entfernt, da bei der Aktivierung des Stadtlichts von niedrigeren gefahrenen Geschwindigkeiten und dem Vorhandensein einer Straßenbeleuchtung ausgegangen wird. Hierbei liegt die Überlegung zu Grunde, dass die Sehobjekte in der Stadt durch die vorhandene Straßenbeleuchtung hauptsächlich im negativen Kontrast (dunkles Objekt, heller Hintergrund) wahrgenommen werden.

Die Schlechtwetterlichtverteilung (adverse weather light) dient dazu Blendung für den ankommenden Verkehr zu reduzieren, indem ein Bereich links schräg vor dem Fahrzeug innerhalb der Lichtverteilung in seiner Intensität reduziert wird. Dadurch wird auch die Blendung durch totalreflektiertes Licht gesenkt. Hierbei gibt es mehrere Ansätze für deren Realisierung:

1. eigene Scheinwerfer, die nur für diese Lichtfunktion eingesetzt werden,
2. die Blendenebene der Scheinwerfer bzw. die Reflektorgeometrie werden für die gewünschte Lichtverteilung modifiziert,
3. beide Fahrzeugscheinwerfer werden mit einer individuellen Lichtverteilung angesteuert und deren Orientierung relativ zur Straße wird angepasst.

Das Überkopflicht (overhead light) wird durch das Streulicht der Scheinwerfer in den meisten Fällen bereits abgedeckt. Retroreflektierende Verkehrsschilder erleichtern zusätzlich das Ablesen auch aus größeren Entfernungen. Nachteil des Überkopflichts ist die mögliche Eigenblendung durch das schräg nach oben abstrahlende Lichtbündel.

In [8.2, KALZE, 2001] werden verschiedene Ansteuerungsstrategien für die AFS-Lichtfunktionen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, der Straßensituation und den Witterungsbedingungen vorgestellt. Dabei wird neben den verschiedenen AFS-Lichtverteilungen, dem dynamischen Kurvenlicht und den dadurch erzielbaren Sichtweiten auch auf eine intelligente Systemansteuerung eingegangen. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die konventionellen Scheinwerferlichtfunktionen und die zukünftigen AFS-Lichtfunktionen.

Tabelle 2.1: Überblick der konventionellen und AFS- Scheinwerferlichtfunktionen

konventionelle Lichtfunktionen	Abkürzung	Skizze der Lichtverteilung
Landstraßenlicht (Abblendlicht) low beam	LB	
Fernlicht high beam	HB	
Nebellicht front fog light	FFL	
Pre-AFS-Lichtfunktionen		
statisches Kurven-licht static bend lighting	stat. BL	

dynamisches Kurvenlicht dynamic bend lighting	dyn. BL	
AFS-Lichtfunktionen		
Stadtlicht town light	TL	
Autobahnlicht motorway light	ML	
Schlechtwetterlicht adverse weather light	AWL	
Überlagerung der konventionellen und AFS-Lichtfunktionen	AFS	FFL AWL TL LB ML HB stat. BL

2.6 Historie der Scheinwerferentwicklung

Zu Beginn der Scheinwerferentwicklung war das „Gesehen werden“ von größerer Bedeutung, da es nur wenige Fahrzeuge auf den Straßen gab, sodass sich die Leuchten von Kerzenlaternen über die Petroleumlaternen zu den Azetylenlaternen entwickelten. Ab 1908 wurden batteriebetriebene elektrische Lampen eingeführt. Neben dem Wandel des Mediums der Lichterzeugung, das für eine leichtere Handhabbarkeit der Scheinwerfer sorgte, wurden dadurch die Voraussetzungen für erste Verbesserungen in der erzielten, in Fahrtrichtung gerichteten Lichtstärke der Scheinwerfer geschaffen.

Die ersten Scheinwerfer hatten als Reflektorform Paraboloidreflektoren, die den Lichtstrom auf die Straße lenkten. Seit 1919 kamen neben dem Fernlicht auch ein Begegnungslicht hinzu, da mit steigender Verkehrsdichte die Blendungsproblematik anstieg. 1925 wurde die „Bilux“-Zweifadenlampe mit zwei Wendeln und einem internen „Shutter“ für eine Abblend- und eine Fernlichtverteilung aus einem Reflektor in den Markt eingeführt. Die Erhöhung der seitlichen Ausleuchtung und der Reichweite waren weitere Fortschritte in der Scheinwerferentwicklung, die bisher immer für eine symmetrische Lichtverteilung sorgten. Beginnend mit dem Jahr 1957 wurde die asymmetrische Lichtverteilung eingeführt, die mit einer angehobenen Hell-Dunkel-Grenze am rechten Fahrbahnrand eine erhebliche Steigerung der Reichweite beim Abblendlicht erzielte, ohne den Gegenverkehr zu blenden. Mitte der sechziger Jahre vollzog sich bei der Lampenentwicklung der Übergang von Glühlampen zu den Halogenglühlampen (H1), wodurch eine Steigerung der Leuchtdichten und Lichtströme bei einer verlängerten Lebensdauer erreicht wurde. Die Halogenglühlampen haben dabei je nach Anwendung axiale und transversale Wendeln. Mit der Einführung der H4-Lampe war es auch hier möglich sowohl Abblend- als auch Fernlicht mit einer Lampe und einem Reflektor zu erzeugen. Der Übergang von der H1 zur H7 Lampe steigerte erneut die Wendelleuchtdichten und sorgte für geringere Wendel- und Lagetoleranzen der Lichtquelle. Mit der Einführung der Xenon-Gasentladungslampen konnte eine erneute Steigerung der Leistungsfähigkeit der Lampen in Leuchtdichte, Lichtstrom und Lichtausbeute bei einer verlängerten Lebensdauer der Lampe erzielt werden, sodass diese Lampen für die normale Lebensdauer eines Fahrzeugs ausgelegt sind. Bei den Gasentladungslampen werden Bauformen für Projektionsscheinwerfer D2S und für Reflexionsscheinwerfer D2R mit auflackiertem „Shutter“ unterschieden [8.2, HELLA 1999; 8.2, BOSCH, 2002]. Eine Übersicht über die Leistungsfähigkeit der Lichtquellen wird in Kapitel 2.7 gegeben.

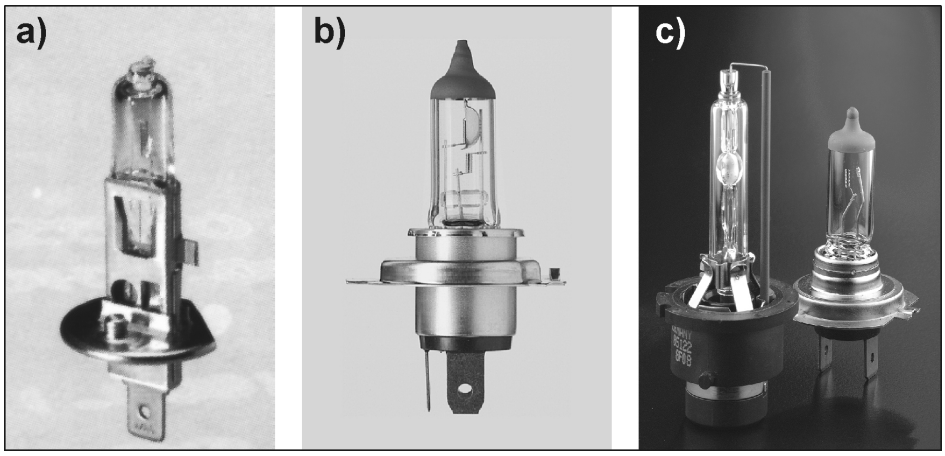


Abbildung 2.3: Bilder der H1-(a), H4-(b), D2S- und H7-Lampe (c) [8.3, KLEINKES, 2003]

Historie des dynamischen Kurvenlichts

Kurvenlicht-Scheinwerfer, früher nur mit Fernlicht erlaubt, wurden in der Historie mit einfachen mechanischen Mitteln bereits mehrmals umgesetzt. 1931 wurde [8.2, MULLER, 1931] ein Patent für motorisch in der Höhe und in der Seite verstellbare Scheinwerfer (LWR und dynamisches Kurvenlicht) erteilt. 1938 wurde ein Kfz, der Lecoq, mit dynamischem Kurvenlicht ausgestattet [8.3, WÖRDENWEBER, 1999]. Der Tucker `48 automobile #1016 von Preston Thomas Tucker entwarf 1948 ein Fahrzeug mit nur einem schwenkbaren, zentralen Fernlicht-Scheinwerfer von dem 51 Einheiten gebaut wurden [8.2, SAE 2002, HAMM]. 1972 stattete Citroën den DS 23 IE Pallas mit zwei mechanisch über Seilzug schwenkbaren Fernlicht-Scheinwerfern aus [8.2, LOTT, MARTINOT, 1999]

Seit 2003 sind auch schwenkbare Abblendlicht-Scheinwerfer gesetzlich zulässig. Neu dabei ist, dass diese elektromotorisch in Abhängigkeit vom Lenkwinkel und zusätzlich wenigstens der Geschwindigkeit sowie z.T. auch in Abhängigkeit von der Gierrate geschwenkt werden. Da das Ansteuerungsverhalten zum Kurvenein- und zum Kurvenausgang der eigentlich benötigten Ausleuchtung zeitlich verzögert ist, wird diese Schwäche erst mit einer vorausschauenden Sensorik, z.B. einer Video-Bildverarbeitung, in Zukunft behoben werden können.

2.7 Lichtquellen

Basierend auf dem Kapitel 2.6, Historie der Scheinwerferentwicklung, soll hier die Entwicklung der Gasentladungslampen aufgezeigt werden.

Seit 1991 sind Gasentladungslampen in Deutschland, seit 1996 auch in Europa zugelassen. Sie erzeugen einen Lichtstrom von ca. 3200 lm bei einer Leuchtdichte von >60 Mcd / m². Im Vergleich zu einer H7-Halogenlampe konnte der Nenn-Lichtstrom um den Faktor 2,9 gesteigert und die Leistungsaufnahme um den Faktor 0,64 reduziert werden, s. Tabelle 2.2 . Die Ursache dafür liegt in der Verwendung einer Gasentladung im Vergleich zu einem Temperaturstrahler, wie er bei den Halogenlampen verwendet wird. Damit ist es möglich die

Lichtausbeute der Lichtquelle deutlich zu erhöhen, wobei der normalerweise nicht genutzte Infrarot-Anteil der Lampen erheblich reduziert wird.

Tabelle 2.2 Vergleich der Kfz-Hauptlichtfunktions-Lichtquellen [8.3, KLEINKES, 2003]

Lampe	Prinzip	Leistungsaufnahme [Watt]	Lichtstrom bei Prüfspannung 12 V [lm]	Lichtstrom bei Kfz-Betriebsspannung 13,2 V [lm]
H1	Halogen	55	1150	1550
H4	Halogen	55	750	1000
H7	Halogen	55	1100	1500
D2R	Xenon	35	2800	2800
D2S	Xenon	35	3200	3200

Die Gasentladungslampe ist mit dem Edelgas Xenon für einen beschleunigten Zündvorgang sowie mit einer Mischung aus Quecksilber und Metallhalogeniden gefüllt. Für den Einschaltvorgang und den Betrieb ist ein elektronisches Vorschaltgerät erforderlich. Wird eine Zündspannung von 10 - 20kV angelegt, so wird das Gas zwischen den Elektroden leitend (ionisiert) und es bildet sich ein Lichtbogen aus. Damit das Anlaufverhalten beschleunigt wird, fließt ein höherer Anlaufstrom, der für ein schnelleres Erreichen der stabilen Betriebsparameter, d.h. den Nennlichtstrom von 3200 lm bei einer Betriebswechselspannung von 85V und 400 Hz sorgt.

Beim Zünden erzeugt das Xenon-Zündgas einen höheren Lichtstrom in der Anlaufphase der Gasentladungslampe. Die Xenon-Gasentladung wird im Dauerbetrieb durch eine Quecksilber-Metallhalogenid-Gasentladung abgelöst, wobei diese durch die Verwendung von Metallhalogeniden in ihrer erzielten Lichtfarbe eingestellt wird.

Aus Gründen des Umweltschutzes wird momentan intensiv an quecksilberfreien Gasentladungslampen gearbeitet, die eine mit heutigen Gasentladungslampen vergleichbare Leistungsfähigkeit aufweisen sollen [8.2, PAL2003, GRUNDMANN; 8.2, PAL 2003, JALINK].

Bei der Gasentladung ist die räumliche Begrenzung der Lichtquelle im Vergleich zu den Halogenglühlampen weniger genau definiert. Daher sind gesonderte Maßnahmen in der Scheinwerferentwicklung erforderlich. Hierzu wird der Lampenkolben der bei Reflexionsscheinwerfern eingesetzten D2R-Lampen seitlich lackiert. Bei H4-Lampen wird eine Kappe für die Abblendlichtwendel im Lampenkolben eingesetzt. Bei D2S-Lampen kann diese Vorkehrung entfallen, da im optischen System eines Projektionsscheinwerfers eine Blende im Strahlengang des Scheinwerfers angeordnet ist. Um die Lagepräzision der Gasentladung zu erhöhen, wird momentan an dem Einsatz von hochtemperaturstabilen, transluzenten Keramiken für die Einhausung der Gasentladung auch in der Kfz-Beleuchtung geforscht [8.2, OSRAM, LS10 Poster]. Die quecksilberfreien Gasentladungslampen besitzen einen schärfer begrenzten Lichtbogen. Das Reflektor- und Scheinwerferdesign muss auf diese neuen Lichtquellen angepasst werden.

Ein weiterer Trend bei den Gasentladungslampen besteht in der baulichen Vereinigung von Zündelektronik und Brenner, wodurch die Wegstrecke der Hochspannung minimiert wird. Diese Lösung findet bei D1S- und D1R-Lampen Anwendung [8.2, OSRAM, PHILIPS].

Für aktive Scheinwerfer werden teilweise neue Lichtquellen eingesetzt. Eine Fortentwicklung besteht darin, den Elektrodenabstand von 4,2mm zu verkürzen, wodurch die Leuchtdichte der Lichtquelle weiter gesteigert werden kann. Ein Betreiben der Lampe mit einer höheren Leistung führt ebenfalls zu einer Steigerung der Leuchtdichte. Das Lampendesign muss dabei der erhöhten Leistung angepasst werden, um eine gleichbleibend hohe Lebensdauer der Lampe zu gewährleisten.

UHP-Lampen, die bisher nur bei Videoprojektoren eingesetzt werden, erfüllen diese Anforderung. Diese besitzen einen Elektrodenabstand von nur 1,0 mm bis 1,3 mm. Da diese Lampen mit Quecksilber (Argon) gefüllt sind, ist deren Zündverhalten noch zu träge für den Kfz-Einsatz. Zusätzlich muss ihre Lebensdauer für die Kfz-Anwendung noch gesteigert werden. Bisher sind diese Lampen im Straßenverkehr gesetzlich nicht zugelassen. [8.2, DERRA, 2005]

LEDs weisen niedrigere Leuchtdichten und Lichtströme auf. Zum Ausgleich der geringen Lichtströme können mehrere LEDs parallel als Lichtquelle eingesetzt werden. Das erhöht die Kosten des Gesamtsystems. Eine Multichip-LED-Anordnung geht diesen Weg. Bedingt durch die noch relativ geringe Leuchtdichte der bisherigen weißen LED-Chips sind, um die geforderten Lichtstärken zu erzielen, großvolumige Scheinwerfer-Designs mit großen Linsendurchmessern oder Reflektorflächen mit geeigneten Abbildungsmaßstäben erforderlich. Die Kühlung der LED-Chips, die durch einen ausreichend dimensionierten Kühlkörper erzielt wird, ist wegen des temperaturabhängigen Lichtstromverhaltens der LEDs notwendig. Dieser Kühlkörper trägt zum Volumen des LED-Scheinwerfers bei. Eine möglichst scharf begrenzte leuchtende LED-Chip-Fläche ist für die Erzeugung der Hell-Dunkel-Grenze anzustreben.

Über Multiple-Chip-Arrays, bei denen die Halbleiterchips frei adressierbar sind, kann eine individuelle und situationsabhängige Lichtverteilung erzielt werden [8.2, EICHHORN, 2004].

Seit Mitte der 90er Jahre haben erhebliche Packaging-Fortschritte die Anwendungsmöglichkeit von Hochleistungs-LEDs mit höherer Leuchtdichte und langer Lebensdauer erhöht. LEDs werden von den Designern zunehmend als entwicklungsfähige und ansprechende Lichtquellen für die automobile Scheinwerferanwendung empfunden, da LEDs eine sehr hohe Lebensdauer besitzen, sehr haltbar sind, kein Quecksilber enthalten, kaltes Licht erzeugen, energieeffizient sind und eine Vielzahl von Styling-Möglichkeiten bieten. [8.2, SAE 2004, KERN]. Eine Reduktion in Gewicht und Bautiefe der Scheinwerfer wird in späteren Scheinwerfergenerationen ebenfalls möglich sein. Durch die Abstrahlcharakteristik in nur eine Halbsphäre lässt sich die Reflektorgröße relativ zu konventionellen Reflektoren verkleinern. Die geringe Leuchtdichte der LEDs erfordert demgegenüber aber wieder größere Reflektorflächen, um dieselbe Lichtstärke zu erzeugen. [8.2, SAE 2004 SAZUKA]

Tab 2.3: Vergleich potentieller Lichtquellen für den Scheinwerfereinsatz

Nr.	Bezeichnung	Leucht-dichte [Mcd / m²]	Licht-strom [lm]	elektr. Leistung [W]	Wirkungs-grad [lm/ W]	Lebens-dauer [h]	Größe der Lichtquelle [mm²]
1	Halogenlampe	≈ 20 – 25	1500	55	22 - 26	550	4,2 x1,2
2	Gasentladungslampe	> 60 (70)	3200	35	85	2000	4,2 mm
3	D2S kurz	170	3900	50	78	-	3 mm
4	UHP-Lampe	1000	10000	>=100	60 - 70	2000 bis >10.000	1,0 – 1,3
5.1	Weiße LED (in 2006) [Hella, 01.2006]	ca.20	110	2,4	45	>10.000	1,0 x 1,0
5.2	Weiße LED (in 2006)	ca.15	45	1	40	>10.000	1,0 x 1,0
6	Multichip LEDs (in 2007) [Hella, 01.2006]	ca.15	ca. 300	ca. 15	ca.20	-	-

[8.2, HELLA TI Scheinwerfer, 2005; 8.2, DERRA, 2005; 8.2, HELLA KGaA, 2006, diverse]

Im Hinblick auf die derzeit geringe Leistungsfähigkeit von LEDs wird deren Anwendung im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande gestreift.

2.8 Scheinwerfertechnologien

Seit Beginn der Scheinwerfertechnik haben sich zwei optische Grundbauformen, der Reflexions- und der Projektions-Scheinwerfer, durchgesetzt, die in Abhängigkeit vom Stand der Lichtquellen weiterentwickelt wurden. Heutzutage werden bei beiden Grundbauformen die Halogenlampen und die Gasentladungslampen in der Scheinwerferserie eingesetzt. Weiße LEDs wurden bisher nur für erste Scheinwerferfunktionen eingesetzt, bei denen die Signalwirkung für den entgegenkommenden Verkehr im Vordergrund steht. Zu nennen ist dabei das Positions- und das Tagfahrlicht im neuen Audi A8-Scheinwerfer, bei dem diese Lichtfunktionen erstmals in der Scheinwerferserie in LED-Technik [8.2, HELLA, 2004] ausgeführt sind. Erste Prototypen zeigen den Einsatz von LEDs in der Abblend- und Fernlichtfunktion, wobei der VW Golf Prototyp [8.2, HELLA, 2005] zuerst vorgestellt wurde. Später in 2005 wurde ein Prototyp eines Volvo SUV gezeigt. [8.2, VALEO, 2005].

Die Scheinwerfertechnologien werden im Wesentlichen von folgenden Faktoren geprägt, Abbildung 2.4: Zunächst sind die Zahl und die Art der gewünschten Lichtfunktionen der Scheinwerfer zu nennen, die bisher relativ konstant geblieben sind, sich aber in Zukunft im Rahmen der AFS-Gesetzgebung und der zukünftigen aktiven Scheinwerfersysteme deutlich erhöhen werden.

Ein zweiter, wichtiger Einflussfaktor stellen die Lichtquellen dar, die sich in ihrer Leistungsfähigkeit, d.h. Lichtstrom, Leuchtdichte und Lebensdauer, bisher ständig verbessert haben. Die LEDs stellen als Halbleiterlichtquelle eine neue Lichtquellen-Kategorie dar, die im Vergleich mit den konventionellen Lichtquellen, u.a. im Bezug auf ihre Leuchtdichte z. Zt. noch geringere Werte als Gasentladungslampen aufweist.

Die Veränderung der Abstrahlrichtungen der Scheinwerferlichtverteilung von ursprünglich quasi-statisch zu einer variablen Abstrahlrichtung in vertikaler und horizontaler Richtung führt zu einer dynamischen Lichtlenkung der Scheinwerferlichtverteilungen in einem deutlich vergrößerten Winkelbereich.

Die Art der Erzeugung der Lichtstärkeverteilungen (LSV) hat sich ebenfalls von einzelnen, additiv erzeugten, zu subtraktiv begrenzten Lichtverteilungen hin entwickelt. Die Scheinwerferzukunft wird sich zu einer energieeffizienteren Lichtstrom-Umverteilung weiterentwickeln. Additive Lichtverteilungslösungen stehen dabei nach wie vor im Wettbewerb zu den subtraktiven und lichtstromumverteilenden Lichtstärkeverteilungs-Erzeugungsarten.

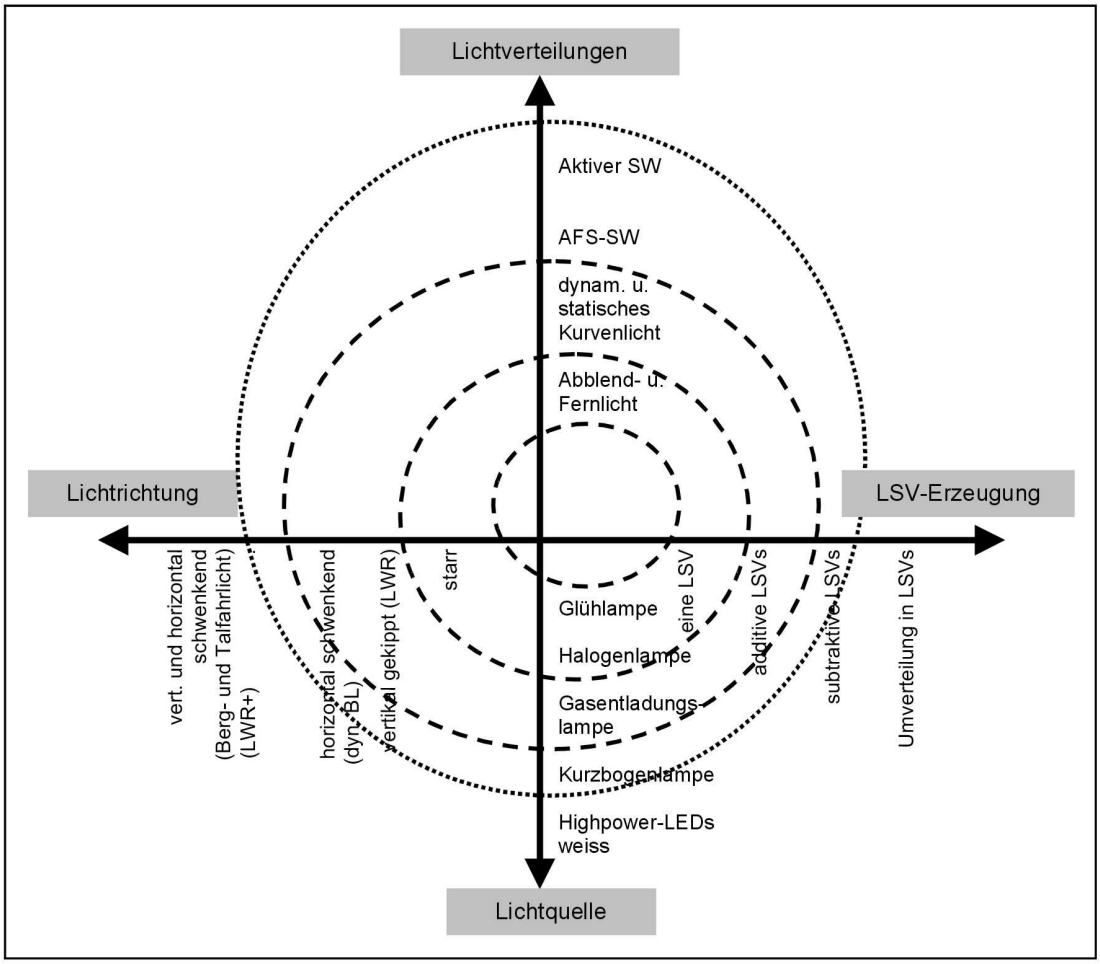


Abbildung 2.4: Radialdiagramm der Scheinwerferlichtverteilungen (-Funktionen), der Lichtquellen, der Scheinwerfertechnologien und der Art der Erzeugung der Lichtverteilungen

Diese vier Einflussfaktoren der steigenden Anzahl an Lichtverteilungen (Lichtfunktionen), der Weiterentwicklung der Lichtquellen, der Variation der Lichtrichtungen und der Art und Weise der LSV-Erzeugung, sind in Abbildung 2.4 dargestellt und werden in dieser Arbeit zu neuen Scheinwerfertechnologien führen.

Bisher werden als optische Grundbauformen der Scheinwerfertechnik das Reflexionssystem und das Projektionssystem unterschieden. Um ein Verständnis für die Funktions- und Wirkungsweise der später beschriebenen Scheinwerferprinzipien und deren bestimmenden optischen und lichttechnischen Dimensionierungsparameter zu gewinnen, sollen hier beide Grundbauformen der Scheinwerfertechnik kurz erläutert werden.

2.8.1 Reflexionstechnik

Beim Reflexionssystem wird der von der Lampe ausgesandte Lichtstrom von einem paraboloidförmigen Reflektor gesammelt und umgelenkt, Abbildung 2.5. Die geometrischen Abmessungen, Breite, Höhe, Brennweite und Bautiefe beeinflussen die Leistungsfähigkeit des optischen Systems, indem sie über physikalische Gesetzmäßigkeiten miteinander verknüpft sind und damit die Höhe des Lichtstroms und dessen Verteilung innerhalb der Lichtstärkeverteilung festlegen [8.2, WMI KG, 1983]. Die Lampenwendel liegt vor dem Reflektorbrennpunkt, wodurch die Strahlen konvergent abgestrahlt werden. Daher wird das Licht der in der Reflexionstechnik zuerst genutzten oberen Hälfte des Reflektorscheinwerfers leicht nach unten gerichtet abgestrahlt. Damit lässt sich die Blendung des Gegenverkehrs reduzieren. Bei einer real nicht existierenden Punktlichtquelle würde ein paralleles Strahlenbündel ausgesandt werden, wenn die Punktlichtquelle sich genau im Brennpunkt des Paraboloidreflektors befinden würde.

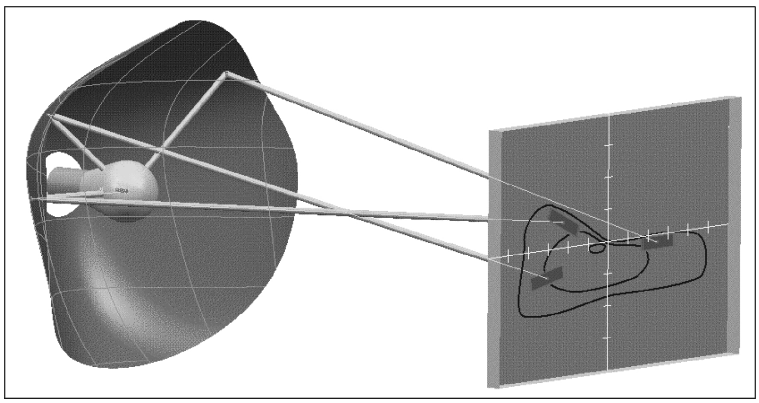


Abbildung 2.5: Prinzipielle Funktionsweise eines Reflexionssystems [8.3, KLEINKES, 2003]

Je nach Lage eines Segmentes des Scheinwerferreflektors relativ zur Lampenwendel wird durch die Reflexion der Wendel auf diesem Segment eine unterschiedliche Orientierung des Wendelbildes auf der Straße erzeugt. Reflektorteile ober- und unterhalb der Wendel erzeugen senkrecht stehende Wendelbilder, seitliche Reflektorteile bilden horizontale bzw. im Übergangsgebiet geneigte Wendelbilder auf die Straße ab. Neben der Orientierung der Wendelbilder im Raum und deren resultierender Lage unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze einer Abblendlichtverteilung spielt deren Größe eine entscheidende Rolle. Je entfernter das Reflektorseg-

ment von der Lampenwendel liegt, desto kleiner ist die projizierte Fläche des Wendelbildes auf der Straße und desto höher ist die Lichtstärke der Lampe in diese Richtung. Daher werden die äußeren Reflektorzonen zur Ausleuchtung der Bereiche nahe des HV-Punktes, am Knick der Hell-Dunkel-Grenze, verwendet. Je größer die Reflektorfrontfläche eines Scheinwerfers ist, um so besser ist seine Abbildungsleistung, da sich mit den kleineren Wendelbildern größere Lichtstärken und damit größere Reichweiten erzielen lassen. Der heutige Trend zu runden Außenformen des Reflektors und kleineren Lichtaustrittsflächen steht der Verbesserung der lichttechnischen Leistungsfähigkeit des Scheinwerfersystems aber entgegen.

Die Wendelbilder auf der Straße werden miteinander überlagert, sodass die resultierende Lichtverteilung mit dem gewünschten Lichtstärkegradienten gebildet wird. Um die Genauigkeit der Hell-Dunkel-Grenze zu erhöhen, wird ein Abschatter innerhalb des Lampenkolbens, z.B. einer H4-Lampe, Abbildung 2.6 und Abbildung 2.7 verwendet. Teilweise ist der Abschatter auch außerhalb angeordnet, z.B. bei einer D2R-Lampe. Bei dieser ist zusätzlich ein Teil des Lampenkolbens lackiert. Mit einer Lampenkappe, die direkt auf den Lampenkolben aufgebracht oder als separates Element vor der Lampe angeordnet ist, wird das sonst unkontrolliert direkt in den Straßenraum abstrahlende Licht der Lampe abgedeckt. Damit kann die Eigenblendung durch Streulicht in Nebelsituationen erheblich reduziert werden. Die Fremdblendung des Gegenverkehrs wird durch diese Maßnahme ebenfalls reduziert. In Abbildung 2.7 wird die Funktion des Abschatters bzw. der Abschattungseinrichtung gezeigt. Bemerkenswert sind der Halbschatten und Schatten, die durch die räumlich ausgedehnte Lichtquelle und die Position des Abschatters hervorgerufen werden. Die Arten einer optikbehafteten Streuscheibe und deren resultierende Strahlablenkungen werden ebenfalls dargestellt. Abschatter und Streuscheibe erzeugen in ihrer Kombination die gewünschte Hell-Dunkel-Grenze. Früher verbesserte eine optikbehaftete Streuscheibe die Ausleuchtung einzelner Felder der Scheinwerferausleuchtung, indem sie mit unterschiedlich profilierten Bereichen den Strahlengang des Reflektors korrigiert. Heute wird die Ausleuchtung fast ausschließlich durch einen Freiform-Reflektor und dessen Reflektorsegmente erzeugt.

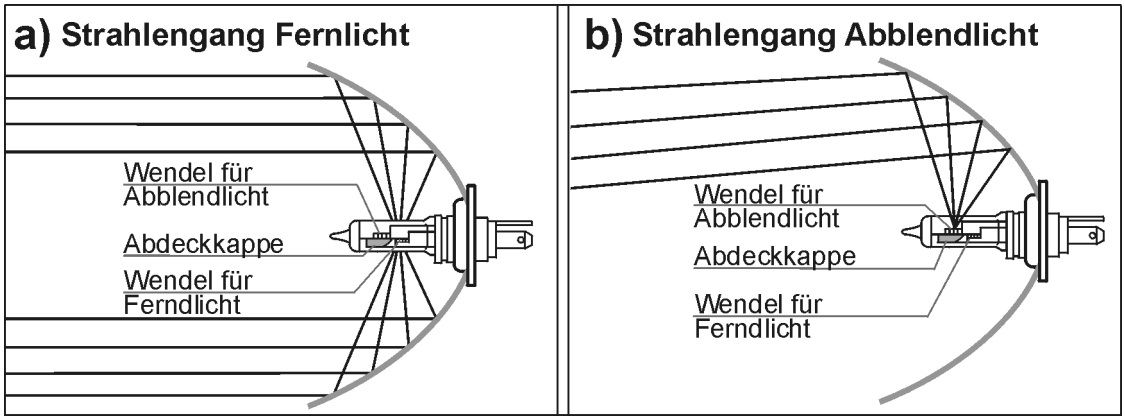


Abbildung 2.6: Paraboloid-Reflexionsscheinwerfer mit einer H4-Lampe, Strahlengang des Fernlichts a) und des Abblendlichts b). [8.3, KLEINKES, 2003]

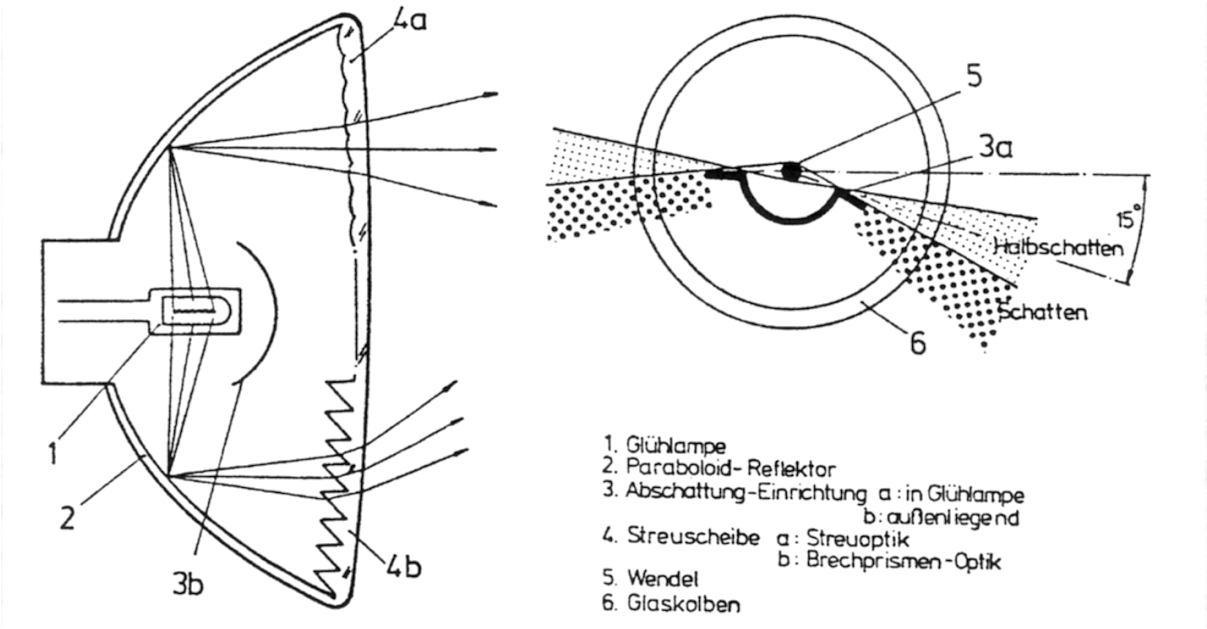


Abbildung 2.7: Optische Komponenten des Reflexionsscheinwerfers [8.2, BÖRNCHEN, 2001, (o.V.) 1983]

Beginnend mit den reinen Parabelformen des Reflektors, die z.B. für Fernlicht nach wie vor im Einsatz sind, werden zunehmend auch Stufenreflektoren verwendet, die aus Reflektorsegmenten mit parabolischen und parelliptischen (Kombination aus Parabel und Ellipse) Reflektorbereichen verschiedener Brennweiten aufgebaut sind. Stufenreflektoren weisen eine reduzierte Bautiefe auf [8.2, BOSCH, 2002].

Neben Reflektoren mit nur einem Brennpunkt (Homofocal-Reflektoren) werden auch Multifocal-Reflektoren eingesetzt.

Bei Facetten-Reflektoren sind Stufen und damit Unstetigkeiten innerhalb des Reflektors zulässig, bei denen jedes Segment eines Reflektors mit CAL-Programmen optimiert wurde.

Bei klaren, profillosen Abschlussscheiben werden in einer erweiterten Reflektortechnik Homogeneous Numerically Calculated Surface-Reflektoren verwendet, die eine erneute Wirkungsgrad-Steigerung ermöglichen. Das wird durch die Nutzung der gesamten Reflektorfläche erzielt, die bei einer optikfreien Abschlussscheibe, jedem Wendelbild eine gezielte Richtung vorgibt. Diese Wendelbilder werden zu der gewünschten Lichtverteilung überlagert. Die Reflektorstrategie und die danach computerunterstützt berechneten Reflektoren werden in ihrer mathematisch komplexen Fläche durch mehrere tausend Parameter beschrieben [8.2, WEBER,1996]. Diese stufenlosen Reflektoren werden als sogenannte FF-Reflektoren (Variabler Focus-Reflektoren) bezeichnet.

2.8.2 Projektionstechnik

Die Projektionsscheinwerfer bestehen aus einer Lichtquelle, einem elliptischen oder aus einem mehrfach elliptischen Reflektor, einer Blende und einer Linse. Das Grundprinzip des

Projektionsscheinwerfers gleicht dabei dem eines Diaprojektors, wobei das Dia durch eine Blechblende und die homogene Beleuchtung des Dias durch eine gezielt inhomogene Ausleuchtung ersetzt wird, siehe Abbildung 2.8. Die inhomogene Ausleuchtung der Blendenebene wird durch einen FF-Ellipsoidreflektor geformt. Diese Ausleuchtung wird durch die Blende begrenzt. Durch die optische Abbildung der Linse des Projektionsscheinwerfers wird das Abbild der Blende als Hell-Dunkel-Grenze auf die Straße projiziert. Je nach Position der Blende relativ zur Linse kann eine mehr oder weniger scharfe Hell-Dunkel-Grenze erzeugt werden. Eine Überlagerung der gekrümmten Linsenfläche mit einer Mikroriffelung, auch Modulation genannt, weicht die Hell-Dunkel-Grenze auf.

Der Projektionsscheinwerfer zeichnet sich durch eine deutlich reduzierte Größe der Lichtaustrittsfläche aus, und er kommt daher den heutigen Anforderungen nach einem möglichst kleinen, frontalen Erscheinungsbild der Scheinwerfer entgegen. Diese kleine Lichtaustrittsfläche ist durch den funktionsbedingten Aufbau eines Projektionsscheinwerfers aber mit einer im Vergleich zu einem Reflexionsscheinwerfer größeren Bautiefe verknüpft.

Beim Poly Ellipsoid-PLUS-System wird ein Teil der Lichtverteilung unterhalb der Projektionslinse vorbeigeleitet [8.2, BOSCH, 2002], wodurch eine verbesserte, breitere Vorfeldausleuchtung erzeugt werden kann. Bei der Verwendung eines zusätzlichen Ringreflektors kann das Erscheinungsbild des Scheinwerfers vergrößert werden, wodurch die psychologische Blendung des Gegenverkehrs reduziert wird, da die erhöhte Leuchtdichte der abbildenden Linse von in einem aufgehellten Umfeld umrahmt wird.

Die Effizienz des Projektionsscheinwerfers im Sammeln von Lichtstrom kann sehr hoch sein. Je nach Lichtquelle ist der Abstrahlraumwinkel 4π (Glühlampe, Gasentladungslampe) oder 2π (LED). Die Optik muss entsprechend der Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle abgestimmt werden.

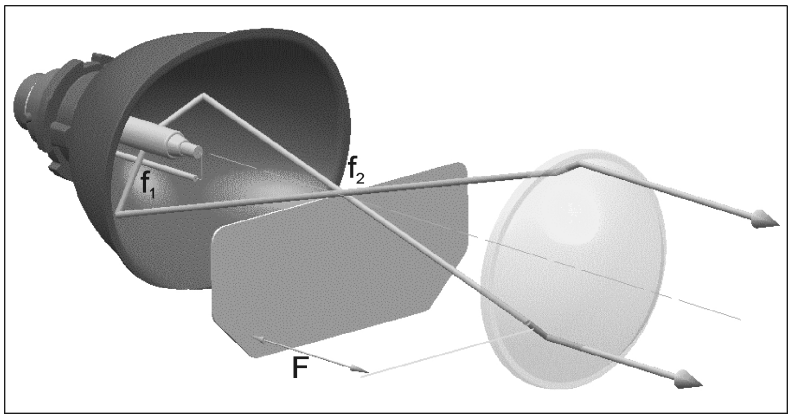


Abbildung 2.8: Prinzipielle Funktionsweise eines Projektionssystems [8.3, KLEINKES, 2003]

Die Veränderung der Lage des Schwerpunktes der Ausleuchtung eines Projektionsscheinwerfers wurde von [8.2, KOBAYASHI, SAE 1998] vorgestellt, wobei Kobayashi eine Anordnung aus einer konkaven und einer konvexen Linse verwendet. Durch das horizontale laterale Verschieben der konkaven Linse wird das Maximum der Lichtverteilung in eine Kurve hineinbewegt. Ein ähnliches System wurde im Rahmen des EUREKA-Projektes aufgebaut,

bei dem durch die Änderungen des axialen Abstandes zwischen der konkaven und der konvexen Linse die Breite der Ausleuchtung verändert wurde.

2.8.3 Leuchtweitenregelung

Seit 1990 ist eine statische Leuchtweitenregelung für Scheinwerfer vorgeschrieben. Sie erlaubt dem Fahrer in Abhängigkeit vom Beladungszustand des Fahrzeugs die Scheinwerfervorneigung anzupassen. Bei der Einführung der Gasentladungsscheinwerfer wurde zur Vermeidung von Blendung eine dynamische Leuchtweitenregelung und eine Scheinwerferreinigungsanlage vorgeschrieben. Die dynamische Leuchtweitenregelung hat die Aufgabe die Scheinwerfer in ihrer Orientierung nachzuregeln. Das geschieht nicht nur abhängig von der Beladung sondern auch von den Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen und den daraus resultierenden Nickbewegungen des Fahrzeugs, aber stets unabhängig vom Fahrer. Dabei wird die geometrische Reichweite der Scheinwerfer während der Fahrt trotz Fahrzeugdynamik möglichst konstant gehalten. Dadurch soll das Fahrzeug auch bei Fahrdynamikbewegungen nicht den Gegenverkehr blenden.

Bestrebungen für eine Anhebung der Scheinwerferlichtverteilung an die 0° Vorneigungsposition, um eine größere Reichweite der Scheinwerfer zu erzielen, werden in folgenden Veröffentlichungen beschrieben [8.2, ROSLAK, 2003; 8.8, KAUSCHKE, 2003-1]. Kuhl [8.2, KUHL, 2004] beschreibt Maßnahmen für eine vom Verlauf der Straße abhängigen Ansteuerung der Scheinwerferleuchtweitenregelung, wobei eine möglichst hohe geometrische Reichweite der Scheinwerferausleuchtung erzielt werden soll.

Die 1993 erfolgten Untersuchungen zur Sichtweitesteigerung bzw. zur Blendungsvermeidung mit UV-Licht sowie mit je nach Fahrtrichtung orientiertem, polarisiertem Licht sind eher als Sonderwege in der Scheinwerferentwicklung anzusehen.

2.9 Dimensionierung von konventionellen Scheinwerfern

Bei der Berechnung von Scheinwerfern lassen sich die folgenden Grundaussagen treffen:

1. Konventionelle Reflexions-Scheinwerfer verbessern die Qualität des Abblendlichtes mit zunehmender Reflektorgröße, da dadurch kleinere Wendelbilder auf die Straße abgebildet werden können. Die stilistischen Anforderungen der Designer nach aerodynamischeren Fahrzeugfronten kann dem Bestreben nach größeren Scheinwerfern entgegenstehen. Die Breite des Reflexions-Scheinwerfers ist dabei wichtiger als die Höhe, da insbesondere die horizontalen Wendelbilder für eine hohe Lichtstärke direkt unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze notwendig sind. Diese lassen sich besser an die Hell-Dunkel-Grenze anschmiegen.

2. Eine größere Reflektortiefe der Reflexions-Scheinwerfer erhöht etwas den Wirkungsgrad des Scheinwerfers, da dadurch ein etwas größerer Lichtstrom der Lampe eingefangen wird.

3. Die Anbauhöhe der Scheinwerfer hat einen großen Einfluss auf die geometrische Reichweite der Scheinwerfer. Da die Vorneigung der Scheinwerfer gesetzlich mit z.B. 1% (je nach Anbauhöhe z.B. 65cm) vorgeschrieben ist, wird durch die Anbauhöhe die Entfernung des Abbildes der Hell-Dunkel-Grenze auf der Fahrbahn festgelegt.

4. Die Leuchtdichte der Lichtquelle kann durch das optische System nicht erhöht werden. Sie fällt innerhalb des optischen Systems durch Reflexions- und Transmissionsverluste in ihrem Wert ab.

5. Der Etendué-Wert des optischen Ausgangs des Scheinwerfersystems ist stets gleich oder größer als der Eingangswert des optischen Scheinwerfersystems bzw. größer als der Etendué-Wert der geometrisch ausgedehnten Lampe.

Diese photometrischen Grundaussagen über Scheinwerfer und die Designanforderungen an die Systemapertur erfordern, dass LED-Lichtquellen wenigstens eine mit den gegenwärtigen Halogenlichtquellen vergleichbare Leuchtdichte aufweisen müssen. [8.2, SAE 2004, WANG]

Eine horizontale, axiale Ausdehnung der Lichtquelle ist ebenfalls von Vorteil, da damit die Lichtquellenbilder besser überlagert werden können. Dem nicht-isotropen Aspektverhältnis der Scheinwerferlichtverteilung und dem relativ scharfen vertikalen Gradienten der Scheinwerferlichtverteilung nahe der Hell-Dunkel-Grenze wird dabei am besten entsprochen. Kennzeichen der Lichtverteilung ist die relativ große horizontale Streubreite und die demgegenüber relativ geringe vertikale Streubreite.

In einem Scheinwerfer mit einem typischen Aufbau reduziert sich die Leuchtdichte der Lichtquelle durch die optischen Elemente einschließlich der äußeren Linse um etwa 25% bis 40%. [8.2, SAE 2004, SAZUKA].

2.10 Dimensionierung von nichttraditionellen Optiken für Scheinwerfer

2.10.1 TIR Linse

Bei Standardlinsen wird die Numerische Apertur begrenzt durch die Dicke der Linse. Daher ist der Wirkungsgrad des Lichtstromsammelns limitiert. Durch die Kombination aus einer zentralen Fresnellinse und einem äußeren Ring aus in Totalreflexion arbeitender Optik (Total Internal Reflection TIR) kann die Brennweite der Optik zusätzlich stark reduziert werden, wodurch sich die Numerische Apertur und die Lichtstromsammeleffizienz erhöht. Bei der TIR-Optik wird die Totalreflexion an der ersten internen Fläche ausgenutzt, nachdem das einfallende Licht sich im optisch dichteren Medium befindet. Diese Linsen werden auch als „in Achsen Hologramm-Linsen“ bezeichnet [8.2, SAE 2004, WANG]. Je nach Optikdesign treten Kaustiken auf.

2.10.2 Compound Parabolic Concentrator (CPC)

Der CPC zählt zu den nichtabbildenden Optiken, der auf eine Abwägung zwischen Abstrahlwinkel und leuchtender Fläche beruht. Bei ihm wird das Prinzip des Etendué angewendet. Je kleiner die durchstrahlte Fläche, umso größer ist der Raumwinkel des jeweils zugehörigen Lichtbündels. Soll ein vorgegebener Streuwinkel θ des Lichts für einen gegebenen Lichtquellendurchmesser d (Durchmesser der Eintrittspupille) erzielt werden, so kann die Länge l des CPC nach folgender Formel berechnet werden:

$$l = \frac{d \cos\Theta \left(1 + \frac{1}{\sin\Theta}\right)}{2}$$

Die Länge des CPC kann reduziert werden, wenn Lichtstromverluste akzeptiert werden. [8.2, SAE 2004, WANG; 8.2, WELFORD, 1989]

2.11 Literatur- und Patentanalyse

Die Motivation für bessere Scheinwerferlichttechnik wird in [8.6, ECKERT, 1993]; [8.2, PAL 1997, LANGWIEDER]; [8.3, GALL, 1998]; [8.2, WALLASCHEK, 1998], [8.2, BÖRNCHEN, 2001], [8.2, LACHMAYER / NEUNZIG, 2001]; [8.6, VDI, 2004]; [8.2, SPIEGEL, 2004]; [8.2, SPIEGEL, 2005-3] in vielfältiger Art und Weise, hauptsächlich bedingt durch deutlich erhöhte Unfallzahlen bei Nacht und eine schlechtere Wahrnehmung des Menschen bei Nacht begründet.

2.11.1 Variable Scheinwerfersysteme

Bei der Umsetzung der AFS-Lichtfunktionen wurde zunächst von der additiven Lichtverteilungserzeugung ausgegangen, wie sie bisher bei ersten Versuchsfahrzeugen zu AFS und in der Arbeit von [8.3, DAHLEM, 2001] verwendet wird. Im Bereich der Serienscheinwerfer ist dieses Prinzip beim Maybach-Scheinwerfer in Kombination mit einem Bi-Xenon-Scheinwerfer umgesetzt worden. LED-Scheinwerfer beruhen ebenfalls auf dem Prinzip der additiven Lichtverteilungserzeugung. Nachteilig sind bei additiven Scheinwerfersystemen deren großer Bauraum und die auftretenden Kosten, da für jede Lichtfunktion ein separates Scheinwerfersystem vorgesehen werden muss. Ziel muss es daher sein möglichst viele Lichtfunktionen in ein Scheinwerfermodul zu integrieren.

Das Vario-Xenon-System der Hella KG [8.2, EICHHORN, 2000] stellt mit seiner Freiform-Walze mit unterschiedlichen Konturen eine kompakte Alternative dar, bei der die Lichtverteilungen subtraktiv erzeugt werden. Dabei lassen sich auf der Freiformwalze zwischen vier und sechs verschiedene Lichtfunktionen mit ihren Hell-Dunkel-Grenzen darstellen.

Alternativ wird eine rotierende Blendenscheibe von [8.2, SAE 2003, LELEVE] vorgestellt. Stanley, vgl. Kapitel 8.9, hat basierend auf der „vertical shape line-beam headlamp“ [PAL 2001, OYAMA] einen AFS-Scheinwerfer vorgestellt, bei dem der Lampenkolben senkrecht

zur optischen Achse des Scheinwerfers steht und bei dem Reflektorsegmente geschwenkt werden, wodurch unterschiedliche Lichtfunktionen abgerufen werden können.

[8.2 KOBAYASHI, 2002] und [8.9, KOITO, 1998] stellt ein Projektionssystem mit zweigeteilten Walzenhälften vor, die je nach Drehstellung eine unterschiedliche Form der Hell-Dunkel-Grenze ermöglichen.

Bei einem Scheinwerfersystem in Lichtleittechnik werden von einer zentralen Lichtquelle über Lichtleiter und optische Schalter verschiedene Auskoppelelemente angesteuert. Durch Überlagerung der einzelnen Lichtfunktionen wird die gewünschte resultierende Lichtverteilung erzeugt. Als Auskoppelelemente werden Fresnellinsen, planparallele und rotationssymmetrische „Kartovale“ verwendet. Die Namensgebung des Kartoval setzt sich begrifflich aus den darauf basierenden Optikelementen von kartesischen Ovalen zusammen [8.2, EICHHORN, 1998].

Die Idee einer frei programmierten Lichtverteilung wird in den Arbeiten von [8.2, BOERSCH, 1999] und [8.2, ENDERS, 2001; 8.2, PAL2001, ENDERS; 8.9, OSRAM, 1999] beschrieben. Mit mikromechanischen Spiegeln, „Digital Micromirror Device“, lässt sich die Lichtverteilung nahezu frei programmieren. Mehrere Schutzrechtsveröffentlichungen [8.9, BOSCH, 1997; 8.9, OSRAM, 1999; 8.9, BOSCH, 2000-2; 8.9, ICHIKOH, 2004] zeigen ebenfalls die Erzeugung von Lichtverteilungen mit Mikrospiegelarrays auf. LCD-Scheinwerferlösungen und Hologramme zur Lichtverteilungsbeeinflussung werden in den Schutzrechtsveröffentlichungen, [8.9, BOSCH, 1999-1; 8.9, ÖSZOY, 2000] und [8.9, AL, 2001], [8.9, BOSCH, 2001] beschrieben. Scannend erzeugte Lichtverteilungen werden in [8.9, SOARDO, 1995]und in [8.9, HELLA, 2005] dargestellt. Einem Flexprisma ähnliche Anordnungen sind in Scheinwerfer und teilweise in Leuchten u.a. in [8.9, BOSCH, 1995-1], [8.9, BOSCH, 1996], [8.9, AL, 2001] und in [8.9, DC, 2000]; [8.9, HELLA, 2000-1], [8.9, VALEO, 1998-6]; [8.9, VALEO, 1999]; [8.9, VALEO, 2001] zu finden.

Darüber hinaus sind zahlreiche Erfindungsmeldungen zu Videoprojektoren in der Patentliteratur zu finden, u.a. [8.9, ZEISS, 2001; 8.9, NEC, 2000-1; 8.9, NEC, 2000-2; 8.9, EPSON, 2000; 8.9, EPSON, 2003].

Alternative Anwendungen für DMD-Arrays werden in [8.2, DUDLAY, 2005] vorgestellt.

AFS-Scheinwerfer sind in [8.2, OPEL, 2005]; [8.2, SAE 2005, DECKER]; [8.2, SCHAAL, 2003]; [8.2, SAE 2000, HOGREFE]; [8.2, PAL 2001, KALZE] u.a. zu finden.

Die LED-Scheinwerfer werden in [8.2, SCHIERMEISTER, 2003], [8.2, VALEO, 2005]; [8.2, HELLA, 2005]; [8.2, ISAL 2005, HAMM]; [8.2, GÖTZ, 2004]; [8.2, ISAL 2005, GÖTZ]; [8.2, ISAL 2005, CEJNEK]; [8.2, ISAL 2005, ALBOU] beschrieben.

2.11.2 Kurvenlicht-Scheinwerfer

Bereits im Vorfeld der 2003 umgesetzten gesetzlichen Bestimmungen für das dynamische Schwenken des Abblendlichts zeigte sich in der Patentliteratur eine Häufung an Lösungen für das dynamische Kurvenlicht. Angefangen von bereits erwähnten historischen Beispielen von

Lecoq, Tucker, Citroën, und anderen Herstellern für geschwenktes Fernlicht, werden diese Lösungen ergänzt durch geschwenkte Linsen [8.9, VALEO, 1998-4], [8.9, ZIZALA, 2001], bewegte Spiegel [8.9, VALEO, 1998-5] oder bewegte Reflektorbereiche [8.9, VALEO, 1995], [8.9, STANLEY, 1998-3], [8.9, STANLEY, 1998-2], [8.9, STANLEY, 1998-1], [8.9, HONDA, 2001], [8.9, BOSCH, 1995-3], [8.9, BOSCH, 1995-2], [8.9, VW, 2002], [8.9, AUDI, 2003], [8.9, ISAL 2005, KÖRSTEN]. Alternativ kann das gesamte Projektionssystem geschwenkt werden. [8.9, AL, 2003]; [8.9, BOSCH, 2000-1]; [8.9, BMW, 1999]; [8.9, HELLA, 2000-2];]; [8.9, KOITO, 2005]; [8.9, PORSCHE, 2001]; [8.9, VISTEON, 2004]; u.a..

In [8.2, LÖBIG, 2004] werden für ein schwenkendes Scheinwerfersystem ein Schwenkintervall von +/- 15° angegeben, bei einer Schwenkwinkelauflösung von 1/40° und einer Verstellgeschwindigkeit, die in einem Bereich von 1 bis 30 °/s variiert werden kann. Das Schwenken des Scheinwerfers erfolgt situations- und geschwindigkeitsabhängig in Abhängigkeit der Lenkbefehle des Fahrers. Über eine Plausibilitätsprüfung werden Lenkkorrekturen bei Seitenwind und gleichzeitig hohen Fahrtgeschwindigkeiten, periodisch nachgeregelte Lenkbewegungen in engen Kurven oder kritische Fahrsituationen mit z.B. Driften oder Schleudern abgefangen, sodass diese zu keinen Schwenkbewegungen des Scheinwerfers führen. Bei stehendem Fahrzeug ist aus gesetzlichen Gründen ein Linksschwenken der Scheinwerfer nicht zulässig.

2.11.3 Head-up Displays

Die Informationsdarstellung direkt im Blickfeld des Fahrers durch Head-up Displays wird heute bereits von Cadillac sowie BMW und demnächst auch von Citroën umgesetzt. Audi möchte im Unterschied zu bisherigen Systemen zur Informationsdarstellung einen Laserstrahl einsetzen, wodurch höhere Kontraste und schärfere Bilder erzielt werden sollen. In einem Forschungsprojekt des AUDI „Electronics Research Laboratory (ERL) in den USA wurde die gesamte Frontscheibe als Projektionsfläche genutzt [8.2, SPIEGEL, 2005-1]; [8.2, MAYER, 2003].

3 Aufgabenstellung und Lösungssystematik

3.1 Defizite heutiger Lichtverteilungen und Scheinwerfer

Heutige Scheinwerferlichtverteilungen können nur in einem begrenzten Maß den Fahrer in seiner Wahrnehmung unterstützen. Der erzielbare Fahrkomfort ist ebenfalls eingeschränkt, da die Lichtverteilungen nur die Wahl zwischen dem Abblend- und dem Fernlicht sowie optional dem Nebellicht offerieren. Da das bei ca. 95% der Nachtfahrten eingesetzte Abblendlicht nur einen schlechten Kompromiss aus maximaler geometrischer Reichweite und damit ermöglichter Erkennbarkeitsentfernung und begrenzter Blendung für den Gegenverkehr darstellt, ist die Wahrnehmungssicherheit und der Fahrkomfort für den Fahrer in den meisten Fällen der Nachtfahrt eingeschränkt. Die Erkennbarkeitsentfernung wird bei den heute gefahrenen Geschwindigkeiten oft überschritten, sodass ein rechtzeitiges Anhalten vor einem erkannten Hindernis nach Abzug der Reaktionszeit und der Verzögerungsdauer des Fahrzeugs bis zum Stillstand oft nicht mehr möglich ist. Es besteht daher Handlungsbedarf für die Zukunft. Ein erster Schritt in der Verbesserung der Verkehrssicherheit bestand in der Einführung des statischen und dynamischen Kurvenlichts im Jahr 2003. Die AFS-Lichtverteilungen 2006 sind weitere Schritte in der Steigerung der Sicherheit und des Fahrkomforts im Straßenverkehr.

3.2 Zielstellung an aktive Scheinwerfer

Bei der Ermittlung der Anforderungen an zukünftige Scheinwerfersysteme lassen sich zwei Hauptanforderungen unterscheiden:

1. die Steigerung der Wahrnehmungs- und Verkehrssicherheit und
2. die Erhöhung des Fahrkomforts.

Werden diese Hauptanforderungen weiter detailliert, so ergeben sich folgende Teilanforderungen:

1 Steigerung der Wahrnehmungs- und Verkehrssicherheit:

1.1 Erhöhung der geometrischen Reichweite des Scheinwerfers und damit Anpassung der Erkennbarkeitsentfernung des Fahrers an die heute gefahrenen Geschwindigkeiten

1.2 Steigerung der Homogenität der Lichtverteilung und der Verkehrsraumausleuchtung, um Irritationen durch Lichtberge und dunkle Stellen innerhalb der Lichtverteilung zu vermeiden

1.3 Reduzierung der Eigenblendung des Fahrers durch Streulicht und ein zu helles Vorfeld

1.4 Reduzierung der Fremdblendung für andere Verkehrsteilnehmer

1.5 Markierung von Gefahrenquellen im Verkehrsraum

1.6 Variable Anpassung der Lichtverteilung an die horizontale Fahrbahngeometrie (Kurven, Abbiegungen und Kreuzungen) und an die vertikale Fahrbahntopologie (Kuppen, Senken)

2 Erhöhung des Fahrkomforts:

2.1 Variable Anpassung der Lichtverteilung an die physiologischen Sehgewohnheiten und an das Sicherheitsempfinden des Fahrers im Rahmen der gesetzlich zulässigen Möglichkeiten

2.2 Reduktion der Adaptationsanforderungen an den Fahrer im Begegnungsverkehr

2.3 Darstellung von gezielten Informationen innerhalb der Lichtverteilung

Auf der Grundlage der Haupt- und Teilanforderungen an die zukünftigen, Aktiven Scheinwerfer-Systeme lassen sich folgende 6 Hauptfunktionsgruppen definieren. Diese sind in Tabelle 3.1 aufgelistet und werden in Kapitel 3.3 genauer erläutert.

Tabelle 3.1: Aufzählung der aktiven Scheinwerferhauptfunktionsgruppen und deren exemplarische Anwendungen (HF = Hauptfunktion; NF = Nebenfunktion)

1.	HF: Straßensituationsabhängiges Licht	Road situation dependent light	AFS+
	Anpassung an Kurven, Einbiegungen, Kreuzungen Überlandfahrt, Autobahn Topologie (Berg- und Talfahrlicht / LWR+) [8.2, KUHL, 2004] Straßenbeleuchtung, Tunnelbeleuchtung Witterungssituation: Regen, Nebel, Schnee und deren Intensität		
2.	HF: Verkehrssituationsabhängiges Licht, Kollektive Verkehrsraumausleuchtung	Traffic situation dependent light, collective road illumination	COL
	Kollektive Verkehrsraumausleuchtung [8.2, ROSLAK, 2005] Kolonnen- und Begegnungsverkehr „Blendfreies“ Fernlicht		
3.	HF: Markierendes Licht	Marking Light	MKL
	Markieren von Gegenständen, Verkehrszeichen, anderer Verkehrsteilnehmer Markieren von Fahrzeugen in Nebelsituationen Hervorheben der Fahrbahnmarkierungen visuelle Unterstützung bei der LDW (Lane Departure Warning) Hervorheben von Gefahrenquellen, z.B. Falschfahrer, verlorene Ladung		

4.	NF: Fahrerspezifisches Licht	Driver Specific Light	DSL
	Betonung oder Schwächung des Vorfeldes stärkere Randausleuchtung oder Betonung der eigenen Fahrbahn („Lichtleitfunktion“) schärfere oder weichere Hell-Dunkel-Grenze		
5.	NF: Display Licht bei Nacht	Display Light	DSY
	Navigations- und Telematik-(Verkehrsfluss)-Hinweise, Geschwindigkeiten, Anhaltewege, Parkabstände Display für Nightvision (IR-Nachtsicht) mit großem Anzeigefeld wichtige Meldungen vom Fahrzeug: Reparaturen, Ausfall wichtiger Systeme Im Stau oder auf Parkplätzen: Autokino, Internetvisualisierung Begrüßung des Fahrers vor Fahrtantritt und Verabschiedung am Fahrtende Ermunterung des Fahrers bei Übermüdung zu einer Pause		
6.	NF: Kommunikationsfunktion	Communication Function	COM
	Notbremsung, Unfall, Stau, Pre-Crash-Vermeidung Verbesserung des Verkehrsflusses Austausch über den Reibkoeffizienten der Fahrbahn Datenaustausch		

3.3 Zukünftige Scheinwerferlichtfunktionen

Die in Tabelle 3.1 genannten Lichtfunktionen sollen hier kurz erläutert werden. Sie sind in Tabelle 3.2 skizzenhaft dargestellt. Die Hauptfunktionen werden mit HF, die Nebenfunktionen mit NF bezeichnet.

3.3.1 Straßensituationsabhängiges Licht AFS+ [HF]

Im Rahmen des situationsabhängigen Lichts wird nicht nur ein gesamtes Schwenken der Lichtverteilung vorgenommen, wie das bisher beim dynamischen Kurvenlicht der Fall ist, sondern die Lichtverteilungen werden genauer der Straßensituation angepasst. Das geschieht durch eine exaktere Anpassung der Lichtverteilung an den horizontalen Straßenverlauf, d.h. neben dem Straßenkrümmungsradius werden die Lichtverteilungen an Abbiegungen, an Verzweigungen, an Kreuzungen, an den Straßentyp, an die Straßenbeleuchtung und an die Zahl der Fahrspuren in ihrer Breite und Ausrichtung angepasst. Bei der Berücksichtigung der Straßentopologie wird die Lichtverteilung der Scheinwerfer in einem wesentlich größeren Winkelintervall, als bisher bei der statischen und dynamischen Leuchtweitenregelung üblich, gemäß dem vertikalen Straßenverlauf vor dem Fahrzeug geneigt, vgl. dazu auch [8.2, KUHL, 2004].

3.3.2 Verkehrssituationsabhängiges Licht COL [HF]

Im Falle der kollektiven Verkehrsraumausleuchtung [8.2, ROSLAK, 2005] werden andere Verkehrsteilnehmer in der eigenen Fahrtrichtung und im Begegnungsverkehr berücksichtigt. Dabei wird die Relativlage der anderen Verkehrsteilnehmer zum eigenen Fahrzeug bestimmt, um die eigene und die Gegenverkehrsblendung auf ein absolutes Minimum zu beschränken und eine räumliche und zeitliche Konstanz der Lichtverteilung zu erzielen. Hierzu werden andere Verkehrsteilnehmer zonal innerhalb der Fernlichtverteilung ausgeblendet. Die Fahrzeuge bleiben dennoch sichtbar, da sie in dem unteren Bereich durch eine ständig vorhandene Abblendlichtverteilung ausgeleuchtet bleiben und dann auch ohne eigene Fahrzeugbeleuchtung erkennbar sind. Vorteil der verkehrssituationsabhängigen Ausleuchtung besteht in der Erkennbarkeit des Fahrzeugumfelds, obwohl die Insassen des entgegenkommenden Fahrzeugs nicht geblendet werden. Die automatische Ausblendung des Fernlichts verhindert eine zu starke Blendung des Gegenverkehrs. Das verkehrssituationsabhängige Licht soll die Hell-Dunkel-Grenze der Lichtverteilung anheben und so die Häufigkeit der Anwendung der Fernlichtverteilung in der Praxis deutlich über die bisherige Einsatzdauer von durchschnittlich ca. 5 % der Gesamtnachtfahrtdauer steigern. Damit wird das Sicherheitsniveau bei Nachtfahrten durch eine bessere Orientierung auf der Straße und eine verbesserte Objektdetektion beim Passieren von entgegenkommenden und vorausfahrenden Fahrzeugen erhöht. Die kollektive Ausleuchtung ist insbesondere für höhere Geschwindigkeiten bei Straßen ohne Straßenbeleuchtung, z.B. Autobahnen und vierspurige Bundesstraßen, sinnvoll.

3.3.3 Markierendes Licht MKL [HF]

Beim markierenden Licht werden gezielt Objekte im Verkehrsraum angeleuchtet, die potenzielle Gefahrenquellen für den Fahrer darstellen, damit dessen Aufmerksamkeit dorthin gelenkt wird. Das kann über ein lokales Fernlicht oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze der Abblendlichtverteilung oder ein lokal begrenztes, zeitweises Dunkeltasten von Objekten im Vorfeld der Fahrzeugausleuchtung erfolgen. Um die Aufmerksamkeit des Fahrers zu erzielen, kann nicht nur in der zwischen positivem (Fernfeld) und negativem Kontrast (Vorfeld der Lichtverteilung) liegenden Zone der Tarnung durch ein Pulsieren der Ausleuchtung die Wahrnehmungswahrscheinlichkeit der Objekterkennung für den Fahrer erhöht werden. In Nebelsituationen könnten Objekte, die vom Fahrer sonst Übersehen worden wären, gezielt in den Nebel hineinprojiziert werden. Eine aktive Unfallvermeidung ist insbesondere beim markierenden Licht die Zielfunktion. Die markierende Lichtfunktion hat gegenüber Head-up-Displays den Vorteil eines wesentlich größeren Markierungsbereichs und einer direkten Deckung von Markierung und realer Verkehrssituation. Das Problem der Parallaxe kann dabei nicht auftreten. Dadurch ist keine gedankliche Übertragung und Interpretation der Information vom Innenraumdisplay auf die reale Fahrsituation erforderlich. Der Fahrer kann daher sofort reagieren. Weitere Vor- und Nachteile der Informationsdarstellung von aktiven Scheinwerfern bei der markierenden und der Displaylichtfunktion werden in [8.8, KAUSCHKE, 2003-1] vorgestellt.

3.3.4 Fahrerspezifisches Licht DSL [NF]

Bei dieser Gruppe der Lichtverteilungen soll auf die Wünsche und Bedürfnisse des Fahrers eingegangen werden. Dieser soll im Rahmen seiner Sehgewohnheiten und seines Fahrkomfortempfindens entscheiden können, welche Ausprägungen oder Merkmale einer Lichtverteilung für ihn besonders förderlich sind.

Die Einstellmöglichkeiten der Lichtverteilung dürfen allerdings nur in den gesetzlich vorgegebenen Rahmenbedingungen erfolgen. Ebenfalls müssen diese auf die physiologisch sinnvollen Variationsmöglichkeiten beschränkt bleiben, damit der Fahrer aus mangelnder lichttechnischer Fachkenntnis sich und andere nicht gefährdet. Um die Auswahl zwischen den verschiedenen Lichtfunktionen zu erleichtern, könnten dem Fahrer eine begrenzte Auswahl von fest definierten Lichtverteilungsarten vorgegeben werden, die dann ausgewählt werden.

Als Variationsmöglichkeiten könnten dem Fahrer der Gradient der Hell-Dunkel-Grenze, die Breite der Scheinwerferausleuchtung, die relative Helligkeitsverteilung vom Vorfeld zu der Gesamtlichtverteilung, die lichttechnische Betonung der Randausleuchtung, eine sehr hohe Homogenität oder eine verstärkte Betonung der Ausleuchtung der eigenen Fahrbahn u.a. dienen.

3.3.5 Displaylicht DSY [NF]

Das Displaylicht arbeitet mit der Projektion von Informationen auf die Fahrbahnoberfläche direkt vor dem Fahrzeug. Es ist als Unterstützung von konventionellen Displaytechnologien zu sehen, bei denen bisher ein Head-down- oder ein Head-up-Display verwendet wird. Ein Vorteil der direkten Projektion von Informationen auf die Straße besteht in einem deutlich größeren Raumwinkel, in dem Informationen für den Fahrer bei Nachtfahrten dargestellt werden können. Unaufmerksamkeit durch Blickabwendung des Fahrers von der Fahrbahn in den Innenraum und zurück auf die Straße mit den damit verbundenen Adaptations- und Akkommodierungsvorgängen, die zur Ermüdung des Fahrers beitragen können, werden dadurch erheblich reduziert. Bei der Displayfunktion können wichtige Informationen, wie Geschwindigkeit, Navigationshinweise, Anhaltewege und Sicherheitsabstände eingeblendet werden. Störungen des Betriebszustandes des Fahrzeuges lassen sich ebenfalls darstellen. Bei der Gefahr der Übermüdung könnte das Fahrzeug den Fahrer auf eine notwendige Pause hinweisen. Eine Informationsübermittlung vom Fahrzeug zum Fahrer könnte über die Displaylicht-Informationsdarstellung erfolgen. Gewisse Einschränkungen der Displayfunktion, die nur bei Nachtfahrten angewendet wird, bei Straßenbeleuchtung, im Kreuzungsbereich durch die Überlagerung von mehreren Display-Informationen, bei einem Wasserfilm auf der Straße und bei der gesetzlichen Zulassung sind zu erwarten.

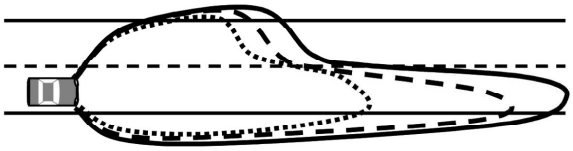
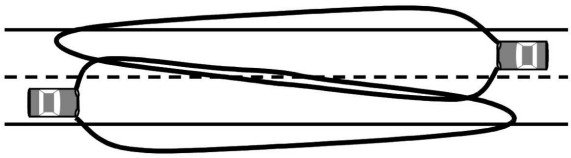
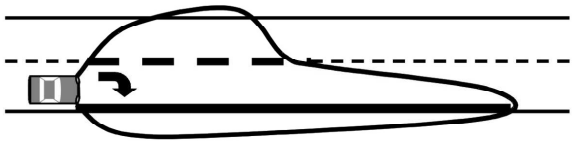
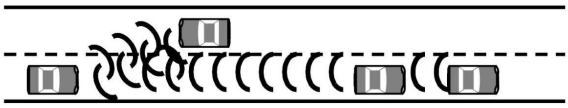
3.3.6 Kommunikationsfunktion COM [NF]

In Arbeiten von DaimlerChrysler [8.2, SCHAAL, 2003] wurde die optische Datenkommunikation über Außenbeleuchtungselemente am Kraftfahrzeug vorgestellt. Die optische Informa-

tionsübermittlung zum Anzeigen von Notbremsungen, Fahrbahnzuständen oder Daten zum besseren Verkehrsfluss stehen im Wettbewerb zu funk- und radarbasierten Kommunikations- und Sensortechniken. Teilweise kann bei der optischen Datenübertragung auf bisherige LED-Lichtquellen in Heckleuchten zurückgegriffen werden, wodurch die zusätzlichen Kosten im Vergleich zu funk- und radarbasierten Lösungen kleiner gehalten werden können. Die Reichweite der Systeme und deren Funktionieren auch bei widrigen Witterungsbedingungen ist von entscheidender Bedeutung. Die optische Kommunikationstechnik ist dabei auf einen direkten Sichtkontakt zwischen den Fahrzeugen angewiesen. Für deren Anwendung ist eine frühzeitige Standardisierung zwischen allen Fahrzeugherstellern erforderlich, damit eine hohe Marktdurchdringung der Systeme erzielt wird.

Bei den Lichtfunktionen aktiver Scheinwerfer lässt sich eine Priorisierung vornehmen. Die straßen- und verkehrssituationsabhängige Ausleuchtungen werden zusammen mit dem markierenden Licht als wichtigste Lichtfunktionen angesehen. Sie sind die entscheidenden Vorteile aktiver Scheinwerfer. Das fahrerspezifische Licht, die Displayfunktion und die Kommunikationsfunktion sind dagegen eher untergeordnete Lichtfunktionen, welche die Vorteile der aktiven Scheinwerfer aber noch weiter verstärken.

Tabelle 3.2: Darstellung unterschiedlicher aktiver Lichtfunktionen

Aktive Lichtverteilung	Abkürzung	Skizze der Lichtverteilung
Straßensituationsabhängiges Licht Street Situation Dependent Light	AFS+	siehe Beschreibung in Kapitel 3.3.1
Berg- und Talfahrlicht Hill and Valley Light	LWR+	
Verkehrssituationsabhängiges Licht – Kollektive Verkehrsraumausleuchtung Collective Road Illumination	COL	
Markierendes Licht Marking Light	MKL	
Displaylicht Display Light	DSY	
Fahrerspezifisches Licht Driver Specific Light	DSL	siehe Beschreibung in Kapitel 3.3.4
Kommunikationsfunktion Communication Function	COM	

3.4 Lichttechnische Anforderungen an Scheinwerferlichtverteilungen

Scheinwerferlichtverteilungen werden durch folgende Kenngrößen in ihrer Güte bewertet, siehe Tabelle 3.3:

Tabelle 3.3 nach [8.3, PAL 2001, VÖLKER]

Forderung	Gütemerkmal	Beschreibende Größe
Optimale Adaptationsbedingungen	Leuchtdichteniveau	Leuchtdichte L
Optische Führung, Helligkeit etc.	Leuchtdichteverteilung	L(x,y) in Fahrtrichtung
Streubreite der Ausleuchtung, Seitenausleuchtung	Winkelangaben	Grad
Ausreichende Homogenität	Gleichmäßigkeit	g
Hohe Erkennbarkeitsentfernung	Reichweite	s
Keine Blendung	Physiologische und psychologische Blendung	z.B. Schleierleuchtdichte L_S
Hoher Kontrast	E_{max} / HV bzw. E_{max} / B50L	C
Geringer Farbsaum	visuell	Relativer SW-Vergleich

Das Gütemerkmal der Homogenität wird ausführlich in [8.3, KLEINKES, 2003] beschrieben. Die Arbeiten zu dem Leuchtdichteniveau, der Leuchtdichteverteilung, der Erkennbarkeitsentfernung, teilweise als Sichtweite bezeichnet, und der Blendung werden in [8.3, VÖLKER, 2006] und z.T. in [8.3, KLEINKES, 2003] vorgestellt. In der Arbeit von [8.3, DAHLEM, 2001] werden die Methoden zur Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen vorgestellt. Das Versuchsfahrzeug war mit einer Vielzahl von konventionellen Scheinwerfern ausgestattet, wobei durch additive Überlagerung die gewünschte Lichtverteilung eingestellt wurde.

Bei den aktiven Scheinwerfern kommen noch zusätzlich folgende Anforderungen an die Lichtfunktion hinzu, Tabelle 3.4:

Tabelle 3.4: Lichttechnisches Lastenheft aktiver Scheinwerfersysteme

Nr.	Kenngröße	Einheit	Art des Aktiven Scheinwerfers / Umsetzung
Gesamtlichtverteilung – Begrenzung der Lichtverteilung			
1.1	Auflösung	Pixel / °	horizontal / vertikal
1.2	Aspektverhältnis	h:v	Höhe zur Breite der Ausleuchtung
1.3	Öffnungswinkel	Grad	von Stadtlicht / Nebellicht
1.4	Schwenkwinkel Scanner	Grad	
1.5	geometrische Reichweite	m	von Fernlicht
1.6	maximale Lichtstärke	cd	von Fernlicht

Anbau / Ausprägung der Lichtverteilung			
2.1	Lage der aktiven Lichtfunktion		im Vorfeld / im Zentrum der Lichtverteilung / gesamte Lichtverteilung
2.2	Gradient des Vorfeldes	cd / °	Adaptationsbedingungen des Fahrers / Einfluss auf Erkennbarkeitsentfernung
2.3	Kombination mit anderen Lichtverteilungen		aktive Gesamtlichtverteilung / Kombination mit statische(r/n) Grundlichtverteilung(en)
2.4	Zahl der aktiven Scheinwerfer pro Fahrzeug	Stück	2 aktive Scheinwerfer (SW) 1 aktiver Scheinwerfer + 1 konv. SW 1 aktiver Scheinwerfer + 2 konv. SW
2.5	Lichtquelle		UHP, D2S, Kurzbogenlampe
2.6	Lichtstrom der Lichtquelle	lm	integraler Lichtstrom
2.7	Lichtstrom nach der Optik	lm	Gesamtlichtstrom (ohne Schwächung)
2.8	lichttechnischer Wirkungsgrad	%	Lampenlichtstrom / SW-Lichtstrom
2.9	Lichtstärke-Verteilungskurven	cd	
2.10	homogene Verkehrsraumausleuchtung		Steigerung der Homogenität im Vgl. zu bisherigen Scheinwerfern
2.11	Lichtverteilung mit minimalen Adaptationsanforderungen		Anpassung von Vor-, Mittel- und Fernfeld an die Verkehrs- und Umfeldsituation
2.12	maximale Erkennbarkeitsweite bei minimaler Fremdblendung		dynamische Anpassung der geometrischen Reichweite des SW
2.13	minimale Eigen- und Fremdblendung bei jeder Witterung		Anpassung der Lichtstärkewerte innerhalb der Lichtverteilung zur Blendungsreduktion
Darstellung von Informationen			
3.1	Kontrast an der Hell-Dunkel-Grenze	1:100	
3.2	Lichtstärkegradient der HDG	cd	ATN-Wert, etc.
3.3	Kontrast der Markierungsfunktion bzw. der Displaylichtdarstellung	C	positiver / negativer Kontrast im Vorfeld / positiver Kontrast im Fernfeld der Lichtverteilung (Markierungsfunktion)
3.4	Blendung anderen Verkehrspartner	lx	in 50m Entfernung / durch Markierungsfkt.
3.5	Irritation durch Vorfeldprojektionen		subjektive Bewertung bei der Displaylichtfunktion
3.6	Projektionsfeld der Displayfunktion	m² (m)	Lage u. Größe der projizierten Information
3.7	Verzerrung der dargestellten Inform.		subjektive Bewertung

Dynamik der Lichtverteilung			
4.1	Blinkfrequenz der Markierung	Hz	z.B. in der Tarnzone der Lichtverteilung
4.2	Wiederholfrequenz der Lichtverteilung / der Darstellung	Hz	Scannerfrequenz, DMD-Spiegelansteuerung, LCoS-Ansteuerung
4.3	dynamische Homogenität der Lichtverteilung		kollektive Ausleuchtung, gemeinsame Ausleuchtung des Verkehrsraums mit anderen Verkehrsteilnehmern

Je nach Ausführungsform der aktiven Scheinwerfersysteme sollte es möglich sein, die Leuchtweite der Scheinwerfer per Software einzustellen bzw. nachzuregeln. Die optimale Erkennbarkeitsentfernung sollte durch eine besser der Fahrsituation angepasste Hell-Dunkel-Grenze, d.h. eine Nachregelung der Lichtverteilung in vertikaler Richtung, angestrebt werden. Als Entwicklungslinien sind dabei die kollektive Ausleuchtung des Verkehrsraumes [8.2, ROSLAK, 2005] und die Anpassung der Ausleuchtung an die Topologie [8.2, KUHL, 2004] zu nennen.

Über ein horizontales Nachführen der Lichtverteilung kann die Erkennbarkeitsentfernung auch bei Kurvenfahrten maximiert werden [8.2, EWERHART, 2001-1; 8.2, HOFFMANN, 2003; 8.4, SCHWAB, 2003].

Zukünftige Scheinwerfersysteme müssen sich daran messen lassen, inwieweit sie die Wahrnehmungs- und die Verkehrssicherheit als auch den Fahrkomfort steigern. Ihre Adaptivität an den Fahrer, das Verkehrsgeschehen und die Fahrbahntopologie sind weitere wichtige Kenngrößen.

Lichttechnische Anforderungen bei der Markierungsfunktion und der kollektiven Ausleuchtung

Bei der Markierung von Objekten ist neben einer ausgereiften Sensorik darauf zu achten, inwieweit das entgegenkommende Fahrzeug markiert werden kann. Das kann eine gezielte Anleuchtung des Objektes oder dessen Umfeldes sein, wobei beim Umfeld senkrecht stehende Objekte in nicht zu großer Entfernung erforderlich sind, damit überhaupt noch eine ausreichender, für den eigenen Fahrer wahrnehmbarer Kontrast sichtbar wird. Die Anleuchtung von Objekten kann dabei oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze mit lokalem Fernlicht erfolgen, d.h. in positivem Kontrast. Im Vorfeld der Ausleuchtung ist dagegen der negative Kontrast zu bevorzugen, da dort die auftretenden Leuchtdichten schon relativ hoch sind und der erforderliche Kontrast sonst nicht erzielt werden kann. In dem dazwischenliegenden Bereich kann die ungewünschte Tarnung auftreten. Dieser reduzierten Wahrnehmbarkeit könnte entweder weiterhin mit negativem oder positivem Kontrast zum Objektumfeld begegnet werden. Ein Pulsieren des markierenden Objektes wäre ebenfalls möglich und

sinnvoll, um die Aufmerksamkeit des Fahrers gezielt in die Richtung des markierten Objektes zu lenken.

Bei der Dunkeltastung von Objekten, die nicht geblendet werden sollen, und im Gegensatz dazu bei Objekten, die markiert werden, ist zu klären, inwieweit die Objekte als Ganzes oder in Teilen abgedunkelt bzw. markiert werden. Im Falle der kollektiven Ausleuchtung des Verkehrsraumes [8.2, ROSLAK, 2005] ist abzuwägen, inwieweit die Objekte als solche in ihren ganzen Abmaßen für den Fahrer noch sichtbar bleiben müssen bzw. inwieweit der entgegenkommende Fahrer das Fahrzeug mit aktiver Scheinwerfertechnik noch erkennen kann, wenn in seine Richtung, aus Gründen der Blendungsvermeidung, eine zum Erkennen des Fahrzeugs nicht ausreichende Lichtstärke abgestrahlt wird.

Zwischen einer gezielten Anstrahlung und damit einem frühzeitigen Erkennen von entgegenkommenden Fahrzeugen und deren Blendung, d.h deren Sichtbedingungen werden eingeschränkt, muss ein für beide Seiten tragbarer Kompromiss gefunden werden, damit beiden Verkehrsteilnehmern weiterhin ein sicheres Führen ihres Fahrzeugs möglich ist. Die Verkehrssicherheit beider Verkehrsteilnehmer muss dabei erhalten bleiben. Diese Überlegungen sind insbesondere während der Zeit der Markteinführung der neuen aktiven Scheinwerfersysteme und der Marktdurchdringung bedeutend.

Die Firma Gentex [8.2, GENTEX, 2004] untersucht den Ansatz des permanenten Fernlichtes, bei dem durch eine videobasierte Kameraauswertung der Gegenverkehr dunkelgetastet wird. Diese adaptive Fernlichtausleuchtung wird als Smart Beam® bezeichnet.

Zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und zur Erhöhung des Fahrkomforts durch aktive Scheinwerfer lassen sich folgende Thesen aufstellen:

1. Anhebung einer variablen Hell-Dunkel-Grenze bei gleichbleibender oder geringerer Blendung für den Gegenverkehr und eine dadurch erzielte, deutlich höhere Erkennbarkeitsentfernung für den Fahrer. Die Anhebung der Hell-Dunkel-Grenze geschieht in Abhängigkeit von der Verkehrs- und Straßensituation.

2. Formung eines „blendfreien“ Fernlichts, bei dem sonst geblendete Verkehrsteilnehmer gezielt ausgeblendet werden, wodurch die Erkennbarkeitsentfernung weiter optimiert werden kann.

3. Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung für den Fahrer durch eine angepasste Schärfe der HDG auf der Gegenfahrbahn und auf der eigenen Fahrbahn.

4. Erhöhung der Lichtstärken unmittelbar unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze, um die Erkennbarkeitsentfernungen durch einen verbesserten Objektkontrast im Fernfeld der Lichtverteilung zu erhöhen.

5. Markierung von Gefahrenquellen im Verkehrsraum durch ein lokales Fernlicht („Lichthupenfunktion“).

6. Reduktion der Adaptationsanforderungen an den Fahrer im Begegnungsverkehr mit einem verlangsamt ansteigenden und abfallenden Adaptationsniveau, das durch die eigenen variablen Scheinwerfer der jeweiligen Fahrsituation angepasst wird.
7. Darstellung von gezielten Informationen innerhalb der Lichtverteilung. Das kann nur unter der Einschränkung und Berücksichtigung der Witterungsbedingungen, der Umgebungshelligkeit und des Verkehrsaufkommens erfolgen.
8. Hochdynamische Leuchtweitenregelung über das aktive Scheinwerfersystem, um Fahrdynamikbewegungen auszugleichen.

3.5 Anforderungsanalyse des Scheinwerferumfeldes / der Sensorik

Für die zukünftigen adaptiven und aktiven Scheinwerferlichtverteilungen ist es erforderlich, dass neben der Fahrzeugsituation auch das Fahrzeugumfeld, das Fahrzeugvorfeld, das zwischen Fahrzeugvor- und -fernfeld liegende Fahrzeugmittelfeld und das Fahrzeugfernfeld detektiert werden. Nur so lassen sich neben den fahrerspezifischen Lichtverteilungen und der Displayfunktion, die weitgehend ohne Sensorik auskommen, auch eine verkehrs- und straßensituationsabhängige Beleuchtung und ein markierendes Licht realisieren. Zur Detektion des Fahrzeugumfeldes müssen geeignete Sensoren eingesetzt werden: Als Sensoren kommen hier RADAR- und LIDAR-Sensoren für den Fernbereich, IR-Laser-Scanner und Kamerasysteme für den Mittel- und Nahbereich in die nähere Auswahl (Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: Übersicht über Sensorsysteme und deren Eigenschaften [8.4, ROSLAK, 2005]

Sensorprinzipien / Benötigte Messeigenschaften	77 GHz Radar (Fern)	Lidar . (Fern)	24 GHz Radar (Nah)	Video Sensor (Nah)	Laser Scanner (Nah)
große Reichweite	●	●		●	
großer horizontaler Öffnungswinkel (Abdeckung der ganzen Fahrbahnbreite)			●	○	●
Ermittlung der Objektgeschwindigkeit im Messbereich: -180km/h...360km/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

Die Auswertung eines IR-Nachtsichtsystems könnte als Ergänzung zu rein im VIS-Bereich arbeiteten Kamerasystemen dienen. Das ist insbesondere bei größeren Entfernungen für die Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer wichtig. Insbesondere schwächere Verkehrsteilnehmer mit keiner oder einer eigenen Fahrzeuglichttechnik geringer Lichtstärke, d.h. Fußgänger, Radfahrer und andere Zweiradfahrer, können dadurch früher erkannt werden.

Eine ausschließlich videobasierte Sensorik, die nur das sichtbare Licht ohne die IR-Strahlung verwendet, ist für große Entfernungen eher ungeeignet, da Videokameras große Beleuchtungsstärken erfordern, die bei Nachtfahrten durch die eigene Scheinwerferlichtverteilung nicht gegeben sind. Der Übergang von CCD- auf CMOS-Kameras hat die Empfindlichkeit der Videokameras zwar erhöht, dennoch besteht die Gefahr der Übersteuerung bei entgegenkommenden Blendquellen. Zur Auswertung der Video-Sensorsignale ist eine hohe Auflösung für eine sichere Bildauswertung erforderlich. Da die Chip-Auflösung der Kamera begrenzt ist, muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen einem breiten Erfassungswinkel der Kamera und einer hohen Auflösung des Kamerabildes in großen Entfernungen. Je nach Wahl der Breite der Kamerabilder kann es teilweise erforderlich sein, die Kamera dem Straßenverlauf nachzuführen. Werden Kameras mit einer hohen Auflösung verwendet, so besteht die

Anforderung der Verarbeitung von großen Datenmengen in Echtzeit, um daraus die Objekte für die gezielte Anleuchtung durch markierendes Licht herauszufiltern. Dabei muss eine Klassifikation und Hierarchisierung der Objekte vorgenommen werden, damit der Fahrer nicht durch unnötig viele, teils auch irrelevante, gezielt angeleuchtete Objekte verwirrt wird. Treten mehrere Gefahrenquellen gleichzeitig auf, so muss das System der Bildauswertung und der gezielten Markierung in der Lage sein, diese Objekte gleichzeitig oder in kurzer Sequenz hintereinander dem Fahrer mitteilen zu können.

Vorteilhaft ist eine Sensorfusion. Bei der Sensorfusion werden Sensorsignale aus verschiedenen Sensorsystemen kombiniert und gemeinsam ausgewertet, wodurch die spezifischen Vorteile der Sensorsysteme für eine höhere Informationssicherheit der Sensorsignale ausgenutzt werden können. Der entscheidende Ansatz bei der Sensorfusion besteht darin, dass die einzelnen Sensoren die detektierten Objekte jeweils an eine zentrale Auswerteeinheit übergeben und die verschiedenen Sensoren sich in Reichweite und Auflösung gegenseitig ergänzen. Dadurch wird ein möglichst weitreichendes und möglichst feinmaschiges Netz an detektierten Objekten im Fahrzeugvor- und umfeld vorgehalten, das dann je nach ausgewerteter Sensorik immer genauere Aussagen über die anderen Verkehrsteilnehmer, deren Position, Geschwindigkeit, Breite, Klassifikation, Fahrer- und Beifahrerposition, etc. treffen kann.

Eine photometrische Sensorik sollte mit Sensoren der Entfernungsbestimmung kombiniert werden, damit gezielt auf Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge reagiert werden kann. Störgrößen, wie eine erhöhte Umfeldhelligkeit, z.B. hervorgerufen durch die Straßenbeleuchtung, Tunnelbeleuchtungen, Tages- oder Witterungsbedingungen könnten dann herausgefiltert werden. Eine zusätzliche Lokalisierung der entgegenkommenden Blendquellen ist erforderlich, damit unterschieden werden kann, ob diese für die Ausblendung innerhalb der eigenen Fahrbahnausleuchtung relevant sind. Nur dann muss die fahrzeugeigene Lichtverteilung darauf angepasst werden. Ein erster Schritt in diese Richtung wurde 1972 mit dem automatischen Abblenden durch den sogenannten „Lucas Auto-Sensor“ [8.4, SAE 1972, RAYNER] unternommen. Hierbei besteht der Ansatz darin, dass das wechselseitige Prinzip der Blendung ausgenutzt wird. Sobald ein anderes Fahrzeug eigene Blendung verursacht, so wird davon ausgegangen, dass auch die eigene Fahrzeugbeleuchtung den entgegenkommenden Verkehrsteilnehmer blendet. Offen bleibt allerdings die Frage, was passiert mit entgegenkommenden Fahrzeugen, die bereits vor Erreichen des Sensordetektionsfeldes auf Abblendlicht umgeschaltet haben? Durch die geringere Lichtstärke der Abblendlichtverteilung werden diese Fahrzeuge erst spät erfasst, sodass diese Verkehrsteilnehmer zu lange mit Fernlicht geblendet werden könnten. Darüber hinaus weist eine kamerabasierte, beleuchtungsstärkeabhängige Schaltschwelle zwischen Abblend- und Fernlicht bzw. zwischen kollektiver Ausleuchtung und Fernlicht den Nachteil auf, dass Verkehrsteilnehmer, die keine eigenen bzw. nur Scheinwerfer mit geringer Lichtstärke oder nur Signalbeleuchtung haben, nur sehr spät oder überhaupt nicht detektiert werden. Davon sind z.B. Fahrradfahrer und Fußgänger betroffen. Daher ist neben der geeigneten Schaltschwelle zwischen Abblend- und Fernlicht eine Sensorfusion mit anderen Sensoren erforderlich, die diese Ausnahmefälle abdecken und dafür sorgen, dass diese Verkehrsteilnehmer nicht unnötig stark geblendet werden (z.B. mit der Kombination eines IR-Nachtsichtsystems)

Die zukünftigen Lichtfunktionen markierendes Licht und kollektive Verkehrsraumausleuchtung sind eng mit der fahrzeugeigenen Sensorik und deren Auswertung verknüpft. Nur wenn das Fahrzeug besser sehen und auswerten kann als der Mensch, z.B. durch die Auswertung von IR-Nightvision-Systemen, ist eine zusätzlich markierende Lichtfunktion durch eine gezielte Anleuchtung von Objekten im realen Straßenraum sinnvoll. Voraussetzung ist eine Sensorik mit hoher Reichweite, eine schnelle Auswertung und Umsetzung der Sensorsignale in eine angepasste Lichtverteilung, damit die Lichtverteilung eine höhere Erkennbarkeitsentfernung ermöglicht als mit einer normalen Abblendlichtverteilung erzielt wird. Nur dann hat der Fahrer einen aktiven Sicherheitsgewinn, indem er frühzeitig auf Hindernisse reagieren kann. Ziel muss es dabei sein, die Erkennbarkeitsentfernung von deren Minimum in der Abblendlichtverteilung möglichst nahe an deren Maximum in der Fernlichtverteilung zu verschieben. Aktive Lichtverteilungen, wie markierendes Licht und kollektive, blendfreie Verkehrsraumausleuchtung, sind Lichtfunktionen, die dieses Ziel der Annäherung an die Fernlichtverteilung anstreben. Der Unterschied der beiden Lichtfunktionen besteht darin, dass das markierende Licht potenzielle Gefahrenquellen durch gezielte, kurzzeitige Beleuchtung hervorhebt, um die Aufmerksamkeit des Fahrers darauf zu lenken. Die kollektive Ausleuchtung strebt eine Art Fernlicht an, die normalerweise dadurch geblendete Verkehrsobjekte nicht ausleuchtet. Die Herausforderung besteht dabei in der Auswahl von relevanten Verkehrs- und Gefahrenquellen.

In der Arbeit von [8.4, ROSLAK, 2005] wurde ein LIDAR-Sensor zur Fahrzeugdetektion eingesetzt. Dieser hat eine hohe Reichweite und ermöglicht anhand der Relativgeschwindigkeit der Verkehrsobjekte relevante Verkehrsobjekte von unrelevanten zu unterscheiden. Dennoch hat auch dieser Sensor noch eine zu geringe Reichweite, sodass es vor dem Umschalten zwischen Fernlicht und kollektiver Verkehrsraumausleuchtung noch zu einer etwas erhöhten Blendung kommt. Auch hier zeigt sich, dass die Sensorleistungsfähigkeit den vollen Nutzen der kollektiven Ausleuchtung bisher begrenzt.

Ein erster Schritt in Richtung einer besseren Ausleuchtung, ohne den Einsatz von noch leistungsfähigerer Sensorik, besteht in der Ausnutzung der heute in höherer Präzision gefertigten Scheinwerferlichttechnik, mit der ebenfalls eine etwas verbesserte Ausleuchtung erzielt werden kann. Dazu könnte der Sicherheitsabstand der Vorneigung der Scheinwerfer zur Vermeidung von Blendung zum Ausgleich der Toleranzen bei der Scheinwerferfertigung und -justage und zum Ausgleich von Fahrzeugdynamikvorgängen weiter eingegrenzt bzw. ganz auf Null gesetzt werden, wodurch die Scheinwerfer eine höhere geometrische Reichweite der Ausleuchtung ermöglichen [8.8, KAUSCHKE, 2003-1]. Hierzu ist nur eine hochdynamische Leuchtweitenregelung erforderlich [8.2, OPGEN-RHEIN, 2003, KFOT].

3.5.1 Vertikale Scheinwerfereinstellung

Für die aktive Lichtfunktion des Berg- und Talfahrlichts, d.h. der straßensituationsabhängigen Ausleuchtung, ist es erforderlich, die Topologie der Straße im Vorfeld des Fahrzeugs zu erfassen. Da bisherige GPS-Karten zwar eine Höheninformation aufweisen, aber deren Datenpunkte zu weit von einander entfernt sind, ist eine fahrzeugautonome Sensorik erforder-

lich. Neben einer Verbesserung der Auswertung der Fahrzeugniveausensoren besteht die Möglichkeit deren Messverfahren z.B. durch eine Ultraschall-Sensorik zu optimieren. Diese Maßnahmen haben allerdings den Nachteil, dass sie nur Aussagen über den momentan Nickwinkel des Fahrzeugs bzw. die vertikale Krümmung der Fahrbahn direkt unterhalb des Fahrzeugs treffen können. Ein Sensorsystem, das präzise den Fahrbahnverlauf vor dem Fahrzeug und deren Topologie erfasst, wäre ideal, da dadurch die Scheinwerfereinstellung den tatsächlich im Vorfeld des Fahrzeugs herrschenden Sichtweitebedingungen angepasst werden kann.

Eine geeignete Messmethode ist die Triangulation, bei der ein oder mehrere Laserstrahlen schräg auf die Fahrbahn vor dem Fahrzeug gerichtet werden. Deren Auftreffpunkte werden in hoher Winkelauflösung erfasst. Basierend auf 3 Auftreffpunkten könnte dann die vertikale Straßenkrümmung bestimmt werden. Neben der Augensicherheit ist insbesondere die Auswertung des Signals des am weitesten vom Fahrzeug entfernten Auftreffpunkts unter unterschiedlichen Witterungsbedingungen und unter Signalstärke-Rauschabstand-Gesichtspunkten schwierig.

Alternativ könnte eine Videosensorik einsetzt werden, welche die Krümmung der Fahrbahnränder erfasst und diese bezüglich des vertikalen Fahrbahnverlaufs auswertet. Straßen mit Fahrbahnmarkierungen lassen sich dabei deutlich besser auswerten als Straßen ohne eindeutige Fahrbahnbegrenzung. Weitere Betrachtungen hierzu sind in [8.2, KUHL, 2004] nachzulesen.

3.5.2 Horizontale Scheinwerfereinstellung

Für eine optimierte situationsabhängige Fahrbahnausleuchtung ist eine horizontale Detektion des Fahrbahnverlaufes und deren Verzweigungen erforderlich. Die bisherige Sensorik mit der Auswertung des Lenkwinkels, der Blinkerbetätigung, der Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit, der unterschiedlichen Raddrehzahlen und / oder der Ermittlung der Fahrzeuggierrate kommen mit der Erfassung des Fahrbahnverlaufes bald an ihre Grenzen, da sie jeweils nur die eigene momentane Fahrzeugsituation erfassen. Da die Ausleuchtung der Fahrbahn immer den Bereich zwischen 2 m und 140 m vor dem Fahrzeug betrifft, ist eine vorausschauende Sensorik wünschenswert. Erste Ansätze in diese Richtung sind die Auswertung von GPS-Daten über die der zukünftige horizontale Fahrbahnverlauf ermittelt wird. Da diese GPS-Daten noch keine dafür ausreichende Genauigkeit aufweisen, ist das Fahrzeug immer noch auf die fahrzeugeigenen Sensoren zur Bestimmung seiner Position innerhalb der GPS-Daten-Punkte angewiesen.

Neben der Auswertung von GPS-Datensignalen für die größeren Entfernungen vor dem Fahrzeug ist eine weitere Sensorik für den unmittelbar vor dem Fahrzeug liegenden Bereich bzw. für nicht kartierte Straßen und Wege oder Baustellen erforderlich. Die videobasierte Erfassung der Fahrbahnmarkierungen bei kooperativen Straßen (d.h. mit Fahrbahnmarkierungen) und deren Extrapolierung erlaubt mit einer zu weiteren Entfernungen abnehmenden Wahrscheinlichkeit den erwarteten, zukünftigen Fahrbahnverlauf zu ermitteln [8.4, HÖVER, 2003]. Weist eine Fahrbahn keine Fahrbahnmarkierungen auf, sind diese durch Schnee

abgedeckt oder verschmutzt, durch Baustellenmaßnahmen aufgehoben oder entfernt worden, kommt auch diese Sensorik teilweise an ihre Grenzen.

3.6 Anforderungsanalyse des mechatronischen Scheinwerfersystems

Ausgehend von den theoretischen Überlegungen werden jetzt die Anforderungen an aktive Scheinwerfer weiter präzisiert, wobei diese teilweise auf Anforderungen an konventionelle Scheinwerfern basieren. Zusätzlich sind weitere Anforderungen von Videoprojektoren abgeleitet worden, welche in der Visualisierung im Büro oder im Homeentertainment Bereich eingesetzt werden.

Tabelle 3.6: Anforderungsliste an Aktive Scheinwerfer-Prototypen, nach [8.7, TAUBENRAUCH, 2004]. Die Anforderungen wurden teilweise von konventionellen Scheinwerfern abgeleitet.

Anforderungsliste an Aktive Scheinwerfer-Prototypen (statisch (S) und dynamisch (D) am Fahrzeug)			
Anforderungen	Quantifizierung	Zuordnung	Wichtung
1. Festforderungen			
1.1 Geometrie	Anpassung an Scheinwerfer-Serien-Gehäuse	D	* *
1.2 Vorneigung	Variabel, 0° bis 2°	S; D	* * *
1.3 Dyn. Kurvenlicht	+ / - 15°	D	* *
1.4 LWR	+2°; -4°	(D)	
1.5 Lichtstrom	> 1000 lm	S; D	* * * * *
1.6 Kontrast	1: 100	S; D	* * * *
1.7 Lichtfunktionen	LB (CL), HB, ML, TL, AWL, dyn. BL, MKL, COL, DSY, FSL (Rechts- / Linksverkehr) vgl. Tabelle 2.1 (S.11) und Tabelle 3.1 (S.29) und Tab. 3.2 (S.33)	S; D	* * * * *
1.8 Lichtforderungen	vgl. Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 (S.34ff)	S; D	* * * *
1.9 Flexibilität / Adaptivität	(sehr) hoch vgl. Tabelle 4.3 (S.77)	S; D	* * * * *
1.10 Elektronikschnittstelle	Ansteuerung über Software und µController	S; D	* * * * *
1.11 Mech. Schutz	IP 65 durch Einbau in Scheinwerfergehäuse	D	* *
1.12 Elektrik	(230V) 12,5V Bordnetzspannung (+/-2 V)	(S); (D)	* * * *
1.13 Sensoranforderungen	vgl. Tabelle 3.5 (S.39)	D	* * *
1.14 Bordnetzanforderungen	Highspeed-CAN-Bus-Anbindung	D	*
1.15 Lebensdauer	10 – 15 Jahre	S; D	* *
1.16 Vibrationsrobustheit	siehe Scheinwerfer-Spezifikationen	(S); (D)	* *

1.17 Betriebstemperatur	0°C bis +50°C (später SW-Spezifikationen)	(S); D	* * *
2. Mindestforderungen			
2.1 Gewicht	< 3 kg ohne Scheinwerfergehäuse	D	* *
2.2 Leistungsaufnahme	möglichst gering, < 300 Watt insgesamt	S; D	* * *
2.3 Wirkungsgrad	> 11%	S; D	* *
2.4 Wärmeabfuhr	aktive (passive) Kühlung	S; D	* * * *
2.5 Leuchtmittel	UHP Projektorlampe, < 250 W; bzw. D2S-Lampe kurz, modifiziert	S; D	* * *
2.6 Anzahl der optischen Elemente	Möglichst gering	S; D	* *
2.7 Werkstoffe	Aluminium, Stahl, Kunststoff, Glas	S; D	* *
3. Wünsche			
3.1 Lichtfunktionen	ECE-, SAE-Zulassung, DRL, z.T. dyn. BL, FFL, stat. BL, (COM)	S; D	* *
3.2 Einfacher Aufbau		S; D	* * *
3.3 Geringe Teilezahl		S; D	* * * * *
3.4 Geringe Bauteilkomplexität		S; D	* * *
3.5 Hohe Betriebssicherheit		S; D	* * * *
3.6 Kostenoptimierung		(S); D	*
3.7 Geringe Lichtstromverluste		S; D	* * * *
3.8 Mechanische Robustheit		S; D	* * * *
3.9 Gute Zugänglichkeit / Wartung		S; D	* * * * *
3.10 Justierbarkeit / Untersuchung variabler Optikanordnungen		S; D	* * * * *
3.11 Gutes Erscheinungsbild / Design		D	* *

3.7 Funktionsanalyse des aktiven Scheinwerfers

Ausgehend von dem Lastenheft in Kapitel 3.6 kann eine Funktionsanalyse der vom Endnutzer bzw. dem OEM-Kunden gewünschten Lichtfunktionen abgeleitet werden. Diese aktiven Scheinwerferlichtfunktionen sind in Kapitel 3.3 beschrieben worden. Für die Realisierung dieser aktiven Lichtfunktionen werden in Kapitel 3.4 die lichttechnischen Anforderungen zusammengestellt. In Kapitel 3.5 sind die Anforderungen an das Scheinwerferumfeld aufgelistet worden. Kapitel 3.6 beschreibt zusammenfassend die Anforderungen an das mechatronische System Scheinwerfer, die in diese Funktionsanalyse des aktiven Scheinwerfers münden.

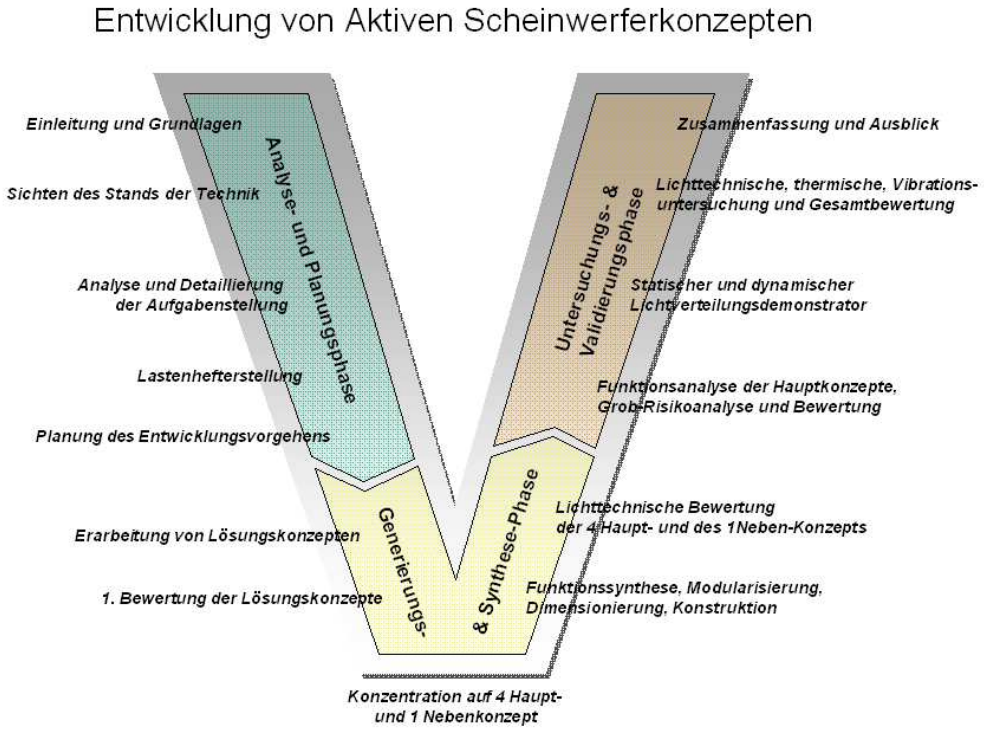


Abbildung 3.1: Vorgehensmodell beim aktiven Scheinwerfer nach VDI 2206

Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, wurde bei den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum aktiven Scheinwerfer nach dem „V-Modell“ der VDI-Richtlinie 2206 [8.1, VDI 2206] vorgegangen. Dieses V-Modell gliedert sich in eine Analyse- und Planungsphase, der sich eine Generierungs- und Synthese-Phase anschließt. In der Untersuchungs- und Validierungsphase werden die erarbeiteten Lösungen und Systeme mit der Aufgabenstellung und dem Lastenheft abgeglichen und evtl. in einer zweiten Entwicklungsschleife nachgearbeitet. Damit wird sichergestellt, dass die Zielstellung auch erreicht wird.

Neben dem methodischen Vorgehen nach dem V-Modell lässt sich die Art der Lichtverteilungserzeugung unterscheiden [8.8, WALLASCHEK, 2003-1]. Ausgehend von bestehenden

Scheinwerfersystemen, Abbildung 3.2, lassen sich, wenn man von deren baulichen Realisierung abstrahiert, drei Arten der Lichtverteilungserzeugung unterscheiden:

1. additive Erzeugung der Lichtverteilungen

Einzelne, unabhängig voneinander ansteuerbare Scheinwerfer erzeugen Lichtverteilungen, die überlagert werden. Ein solches additiv erzeugendes Scheinwerfersystem kann völlig ohne bewegliche Teilen auskommen. Neben mehreren Reflektorkammer-Scheinwerfern können u.a. LED-Arrays auch zu dieser Art der Lichtverteilung gezählt werden.

2. subtraktive Erzeugung der Lichtverteilungen

Ein Teil des Lichtstroms wird ausgeblendet oder abgeschattet z.B. mittels starrer, eingeschwenkter Blenden, gedrehter Scheiben- oder zylinderähnlicher Walzenkörper bzw. mit Hilfe von variablen optischen Elementen, Kapitel 4.2; 4.6.1 und Kapitel 4.6.4 bzw. Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3.

3. Erzeugung der Lichtverteilungen durch variable optische Elemente

Eine Umverteilung des Gesamtlichtstroms erfolgt mittels variabler optischer Elemente oder durch ein scannendes System. Das ermöglicht eine örtlich und zeitlich variable Lichtverteilung, die z.B. zeilenweise geschrieben wird, siehe auch Kapitel 4.6.3 bzw. Kapitel 5.5. Alternativ kann eine Matrix von lichtstromlenkenden Elementen, ein Analoges Mikrospiegel Array (AMD-Array), Kapitel 4.6.2 bzw. Kapitel 5.4, oder ein einzelnes, flexibles, optisches Element, z.B. ein Flexprisma, Kapitel 4.6.5 bzw. Kapitel 5.6 eingesetzt werden.

Die Scheinwerfer der ersten Gruppe stellen für jede weitere Lichtfunktion einen zusätzlichen Lichtstrom zur Verfügung, der entweder für sich alleine die gesamte Lichtverteilung erzeugt oder zu einer bereits vorhandenen Grundlichtverteilung (z.B. Stadtlicht) additiv eine weitere Komponente ergänzt (z.B. statisches Kurvenlicht).

Bei der zweiten Gruppe wird der maximale Lichtstrom für alle zu erzeugenden Lichtfunktionen stets vollständig zur Verfügung gestellt, wobei je nach gewünschter Lichtfunktion ein Teil des Lichtstroms ausgeblendet und damit in Wärme umgewandelt wird. Eine subtraktive Lichtverteilung kann z.B. über mechanisch einschwenkbare bzw. starre Blenden, wie beim Bi-Xenon System erfolgen. Es können aber auch optische Elemente eingesetzt werden, deren Transmissions- oder Reflexionsgrad von einer angelegten elektrischen Spannung abhängt.

Bei dem Lösungsprinzip der variablen Lichtverteilung kann eine Umverteilung des Gesamtlichtstroms dadurch erfolgen, dass Teile des Lichtstroms je nach gewünschter Lichtfunktion in die jeweils gewünschten Bereiche des Verkehrsraumes gelenkt werden, wobei der Gesamtlichtstrom gleich bleibt. Z.B. könnte dabei der ursprünglich oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze abgestrahlte Lichtstrom des Fernlichtes im Stadtbereich für eine breitere Ausleuchtung des Verkehrsraumes verwendet werden. Eine spezielle Lösung stellen dabei scannende Systeme dar, mit denen prinzipiell sehr viele unterschiedliche Lichtverteilungen erzeugt werden

können. Dabei wird mit hohen Lichtstärken und hohen Wiederholfrequenzen eine Lichtverteilung z.B. zeilenweise erzeugt, die je nach Größe des Raumwinkels des ausgesandten Lichtbündels unterschiedlich feingliedrig variiert werden kann. Dabei sind verschiedene Scan-Strategien denkbar, die Einfluss auf die zeitlich integrierte Lichtstärkeverteilung haben. Das scannende Lichtbündel muss eine umso höhere Lichtstärke aufweisen, je feingliedriger die Lichtverteilung gescannt werden soll.

Über die Kombination dieser Prinzipien zur Lichtverteilungserzeugung lassen sich weitere Scheinwerferbauformen synthetisieren. [8.8, WALLASCHEK, 2003-1].

3.8 Funktionsstruktur

Basierend auf der Funktionsanalyse wird in diesem Kapitel die Funktionsstruktur für den aktiven Scheinwerfer erstellt, welche die gewünschten aktiven Lichtfunktionen in Haupt- und Nebenfunktionselemente überführt. Diese werden durch den Energiefluss zwischen dem Lichterzeugen, dem Lichtformen und der variablen Lichtverteilung miteinander verbunden. Da eine variable Lichtverteilung erzeugt werden soll, muss der Energiestrom der Lampe nicht nur gebündelt und geformt werden, sondern über ein variables optisches Element mit einem Informationsstrom überlagert werden. Dieser Informationsstrom dient dazu, die gewünschte Lichtverteilung auszuwählen bzw. entsprechend den menschlichen, verkehrstechnischen oder sensordetektierten Erfordernissen der Fahrsituation anzupassen. In Abbildung 3.2 wird zunächst die Funktionsstruktur eines konventionellen Reflexions- bzw. Projektionsscheinwerfers dargestellt. In Abbildung 3.3 ist die Funktionsstruktur eines aktiven Scheinwerfers wiedergegeben [8.8, WALLASCHEK, 2003-1]. Die Hauptfunktionen Lichtstrom erzeugen und Lichtstrom formen sind dabei in ihre jeweiligen Teilfunktionen aufgeteilt worden. Störfunktionen sind ebenfalls als ableitende bzw. zuleitende Seitenäste angefügt.

Die Funktionsstruktur des aktiven Scheinwerfers kann in mehrere Module, d.h. die Einkoppeloptik, die Mitteloptik und die Auskoppeloptik, gegliedert werden. Deren Aufbau und Gliederung werden in den Kapiteln 5.2.2, 5.3.2, 5.4.2, 5.5.2 und 5.6.2 genauer beschrieben werden.

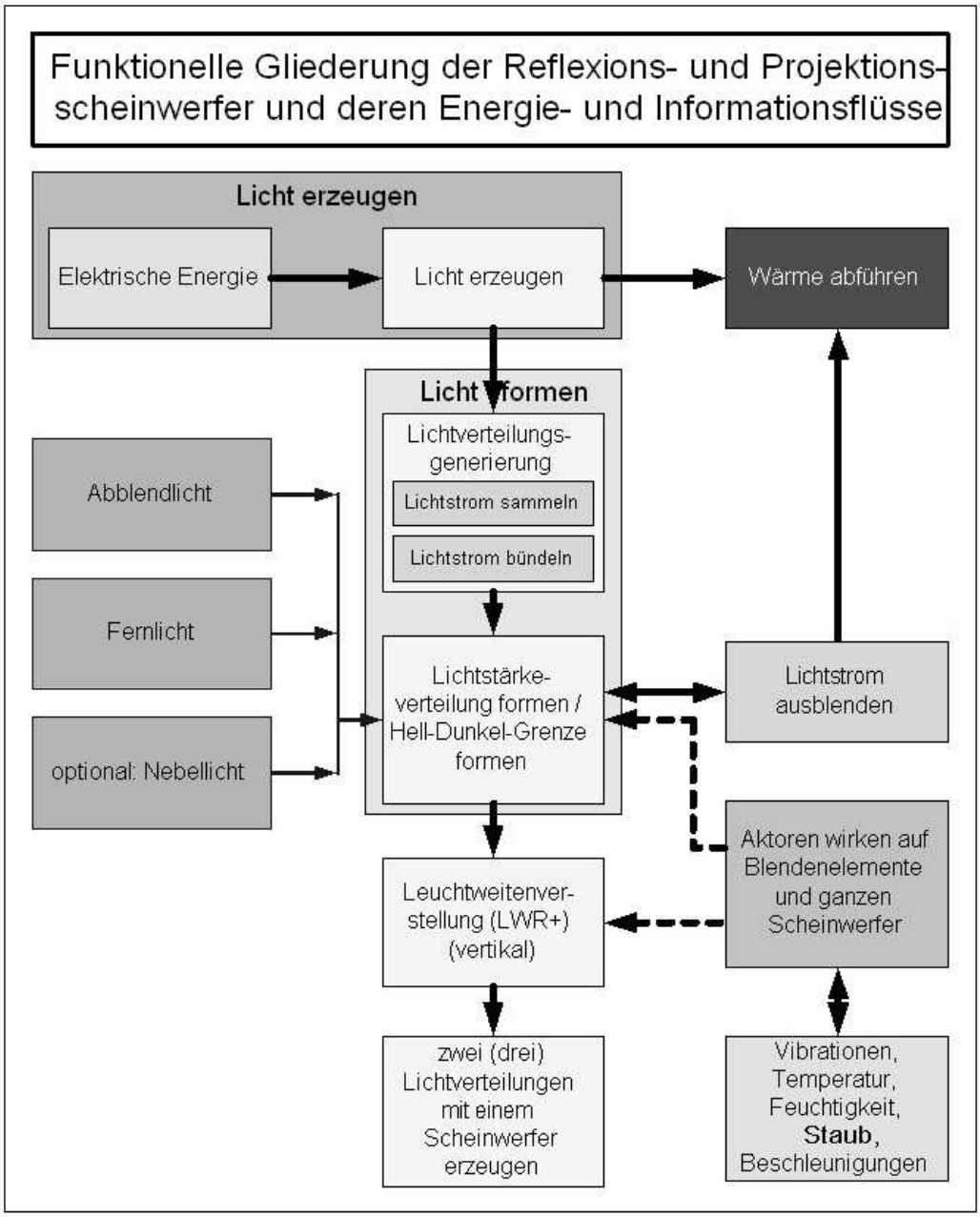


Abbildung 3.2: Funktionsstruktur eines konventionellen Scheinwerfers (Energiefluss = durchgezogen, Informationsfluss = gestrichelt)

In Kapitel 4 werden mögliche Lösungselemente in einer Morphologie, in einer Systematik der Lösungselemente aufgezeigt und bewertet, bevor diese zu ersten Lösungsansätzen kombiniert werden. Diese werden in Kapitel 5 im Detail vorgestellt, diskutiert und bewertet.

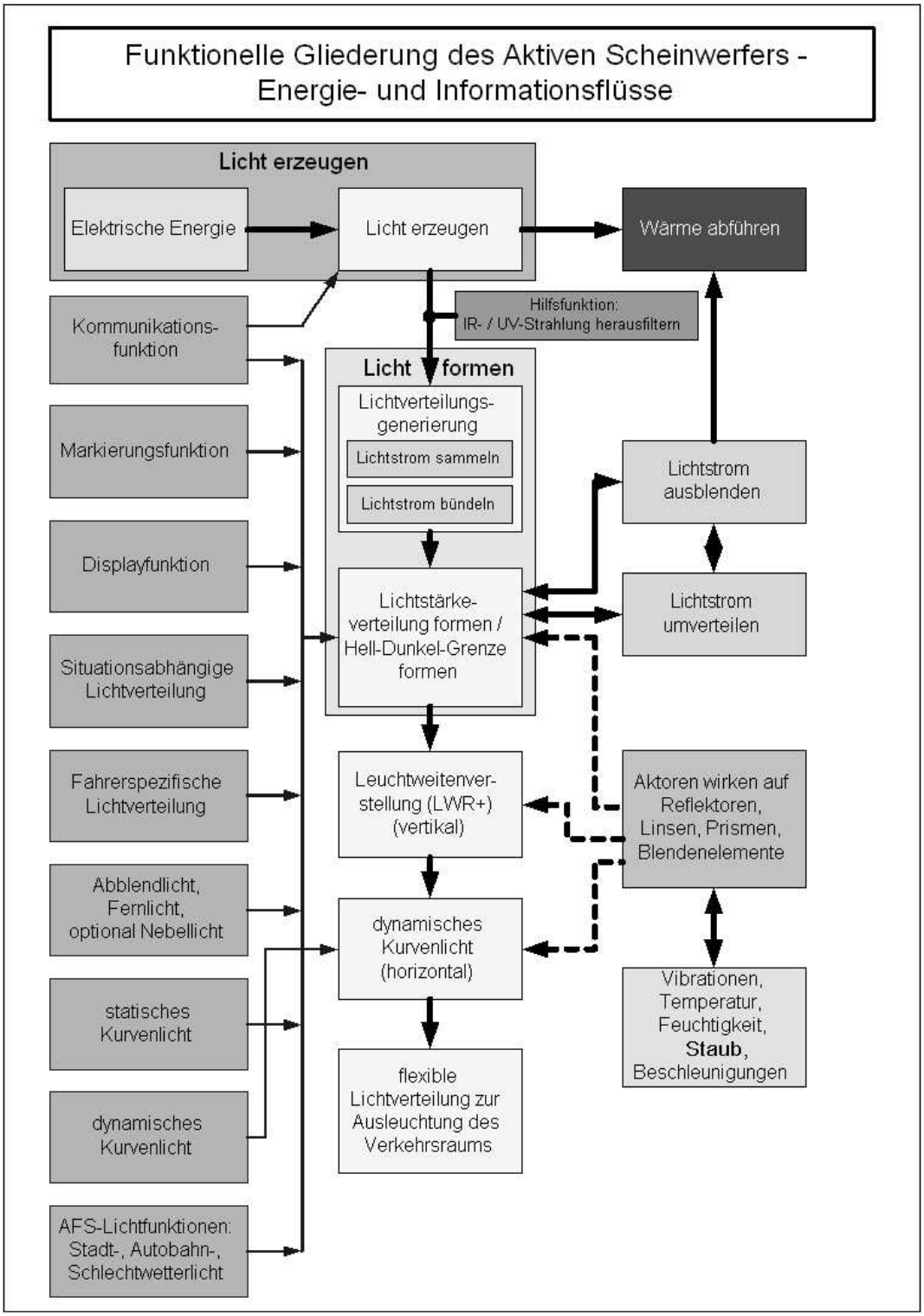


Abbildung 3.3: Funktionsstruktur eines aktiven Scheinwerfers (Energiefluss = durchgezogen, Informationsfluss = gestrichelt)

4 Generierung von Scheinwerferkonzepten

4.1 Lösungsgenerierung – Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit sind zahlreiche Scheinwerferkonzepte entstanden. Bei der Generierung dieser Konzepte lassen sich mehrere Herangehensweisen unterscheiden [8.1, o.V. PROJEKTSEMINAR, 2003]

Intuitive Methoden

1. Kreative Methoden
2. Nutzen von Gruppendynamiken
3. Brainstorming (individuelles und Gruppen-Brainstorming)
4. 635-Methode
5. Mindmapping, etc.
6. Diskussion mit Experten und fachfremden Kollegen auf dem Gebiet der Scheinwerfer

Diskursive Methoden

1. Systematische Methoden
2. Nutzen von physikalischen und technischen Effekten
3. Abstraktion von Problemen

In dieser Arbeit fanden beide Methodenklassen, die intuitiven und diskursiven Methoden, Anwendung. Neben einem individuellen Brainstorming wurden angrenzende Fachdisziplinen, wie Lichttechnik, Optik, Physik und Mechatronik, danach untersucht, inwieweit sich Lichtquellen, optische Anordnungen, physikalische Effekte und mechatronische Systeme für den Aufbau von Scheinwerferkonzepten eignen. In der anschließenden Bewertung dieser Konzepte sollen die generierten Scheinwerferideen den Anforderungen der Scheinwerferserie gegenübergestellt werden.

Die einzelnen Konzepte sind durchnummeriert, um die anschließende Bewertung leichter durchführen zu können. Unter jeder Konzeptbezeichnung wird eine Klassifikation vorgenommen. Der erste Begriff beschreibt das zentrale Element des Konzepts zur Lichtverteilungserzeugung, der zweite Begriff steht für die Art der Lichtverteilungserzeugung und der dritte Begriff kategorisiert die Art der technischen Umsetzung.

4.2 Konzeptideenbeschreibung

K1: LED-Scheinwerfer (neue Lichtquellen, additive LSV, lichttechnische Lösung)

Da die LEDs noch einen relativ geringen Lichtstrom aussenden, müssen im Scheinwerfer eine Vielzahl von LEDs eingesetzt werden. Diese lassen sich in verschiedenen Anordnungen konfigurieren. Hochleistungs-LEDs werden gezielt einzelnen Linsen und Reflektoren zugeordnet. Über die Summe der Lichtverteilungen wird die gewünschte Lichtverteilung erzeugt. Da die Leuchtdichte heutiger LEDs im Vergleich zu konventionellen Lichtquellen noch relativ gering ist, sind große Linsendurchmesser und große Reflektorflächen erforderlich, die möglichst viel Lichtstrom der LED einsammeln und lichtstark auf die Straße lenken.

Ein großer Vorteil der LED besteht darin, dass der Lichtstrom nur in einen Halbraum abgestrahlt wird. Der erzeugbare Gradient in der Lichtverteilung ist abhängig von der seitlichen Begrenzung der Lichtquelle. Da bei LEDs teilweise eine Phosphormasse zum Verguss verwendet wird, ist je nach Auftragstechnik die Grenze der leuchtenden Fläche der Lichtquelle nicht genau definiert. Für eine scharfe Hell-Dunkel-Grenze wird daher eine integrierte Blende vorgesehen. Die integrierte Blende ist erforderlich, da das blaue Licht der LED mit einem gelblichweißen Konvertierungsphosphor teilweise in weißes Licht überführt wird und ohne Blende benachbarter Phosphor aufleuchten würde.

Mit einer freien Konfiguration und gezielten Anordnung der LED-Chips in einem Array lässt sich die gewünschte Lichtstärkeverteilung als Intensitätsgefälle innerhalb der Lichtverteilung durch die gezielte Platzierung von unterschiedlich lichtstarken LEDs aufbauen. Eine direkte Ansteuerung der LED-Chips ermöglicht die ausgesandte Lichtstärke pro Chip individuell zu variieren. Da Hochleistungs-LEDs bisher relativ teuer sind, müssen für den Übergang sowohl von einer Abblend- und Fernlichtverteilung zu den AFS-Lichtverteilungen, wie z.B. Autobahnlicht, Stadtlicht und Schlechtwetterlicht als auch zu den aktiven Lichtverteilungen und dem dynamischem Kurvenlicht zusätzliche Maßnahmen getroffen werden. D.h. die Lichtverteilung muss als Ganzes oder in Teilen geschwenkt werden, damit die Anzahl der LEDs minimiert werden kann. Das Schwenken der Lichtverteilung kann dabei z.B. mit einem Flexprisma optisch erfolgen, das innerhalb dieser Arbeit entstanden ist. Alternativ kann ein vorgelagerter Spiegel die Lichtverteilung umlenken oder das Gesamtsystem oder auch nur Teilsysteme kann bzw. können mechanisch geschwenkt werden. Darüber hinaus können innerhalb eines LED-Arrays die LEDs so einzeln angesteuert werden, dass der Eindruck einer quasi-geschwenkte Lichtverteilung erzeugt wird. Da die Hochleistungs-LEDs gekühlt werden müssen und ein Kühlkörper zusammen mit einem Lüfter bisher meist dafür eingesetzt wird, sollte deren Zahl im Scheinwerfer ebenfalls minimiert werden. Neben einer gewünschten geringen Bautiefe muss durch die Verarbeitung der LEDs ein geringer Wärmewiderstand zwischen den LED-Halbleiterchips und dem Kühlkörper gewährleistet werden.

Die standardmäßig verkauften LED-Chips sind mit einer Primäroptik versehen. Bei konventionellen LED-Leuchten wird zur weiteren Modellierung der Lichtverteilung eine Sekundäroptik eingesetzt. Werden die LED-Halbleiterchips direkt verarbeitet, so können die Primär- und

Sekundäroptik zu einer einzigen Optik zusammengefasst werden. Dadurch ist es möglich die Bauhöhe der LED-Leuchten und –Scheinwerfer erheblich zu reduzieren und gleichzeitig die Lichtverluste an den Grenzflächen der Optiken zu minimieren. Die Chipdirektverarbeitung ist dabei sicherlich eine Schlüsseltechnologie, da eine selbstangefertigte Optik wesentlich genauer an die Chipgeometrien angepasst werden kann. Ein Beispiel für einen ersten LED-Scheinwerfer wurde auf der IAA 2003 z.B. von der Hella KG vorgestellt und ist hier in Abbildung 4.2 (links) zu sehen.

K2: Digitale Projektion (digital schwenkbare Mikrospiegel, subtraktive LSV, mikromechanische mechatronische Lösung)

Bei der digitalen Projektion kann ein DMD-Chip (Digitial Micromirror Device) von Texas Instruments eingesetzt werden. Dieser Chip besteht z.B. aus einer Chipfläche von 14 x 10 mm², die ca. 800.000 Mikrospiegel umfasst, Abbildung 4.1(rechts). Die Gesamtanordnung eines DMD-Scheinwerfers ist in Abbildung 4.1(links) zu sehen. Mit den Spiegeln des DMD-Chips (2) kann das von der Lichtquelle (1) erzeugte Licht digital in zwei Endlagen hin- und hergeschwenkt werden. Eine dieser Endlagen wird als Nutzlichtstellung verwendet, in welcher der Lichtstrom durch eine Auskoppellinse (3) auf eine Zielprojektionsfläche (4) abgebildet wird. In der Absorberlichtstellung wird der Lichtstrom auf einen Absorber, eine matte, schwarze, diffus reflektierende und absorbierende Fläche gelenkt, auf welcher der Lichtstrom in Infrarotstrahlung umgewandelt wird und von der die Energie als Wärme abgeführt werden muss.

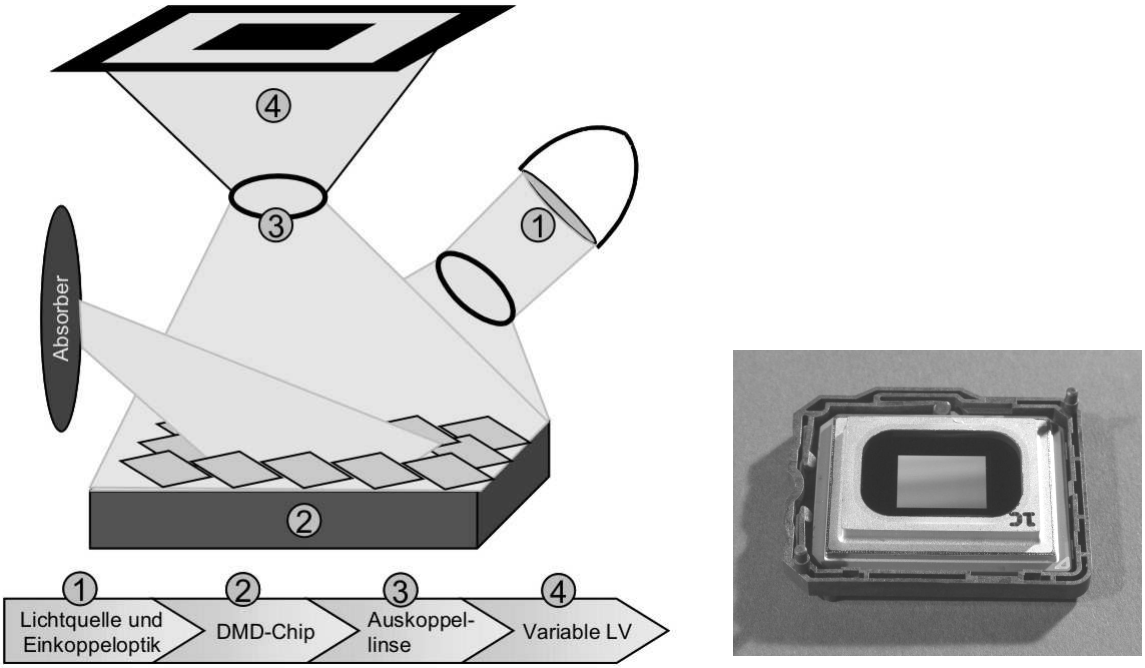


Abbildung 4.1: Aufbau eines DMD-Scheinwerfers(links) [8.7, MÜLLER 2004]; DMD-Chip (rechts)

Bei den DMD-Mikrospiegeln wird eine elektrostatische Aktorik über einer SDRAM-Zelle verwendet, wobei der einzelne Mikrospiegel über die beiden Adresselektroden elektrostatisch ausgelenkt wird. Der Aufbau der DMD-Mikrospiegel ist sehr kompliziert. Er wird in einem Multi-Layer-Lithografie-Beschichtungs- und Ätzverfahren hergestellt.

Der Aufbau eines DMD-Spiegel-Arrays ist in Abbildung 4.2 (Mitte) zu sehen. Erste Videoprojektoren mit einem derartigen DMD-Chip wurden 1996 von Texas Instruments in den Markt eingeführt.

K3: Analoge Projektion (analog schwenkbare Mikrospiegel, LSV mit variablen optischen Elementen, mikromechanische mechatronische Lösung)

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von analog, kontinuierlich schwenkbaren Mikrospiegeln, die in jeder Winkelposition statisch verharren können. Diese Mikrospiegelarrays werden als AMD (Analog-Micromirror-Device) bezeichnet, siehe Abb. 4.2 (rechts). Die Lichtlenkung erfolgt über den AMD-Chip im ersten Strahlengang. Zur Ansteuerung dieser Mikrospiegel wird bisher eine Vorwärtssteuerung eingesetzt. Eine Regelung ist über eine Positionserfassung der Mikrospiegel möglich. Dies kann z.B. über Laserstrahlen erfolgen, die in einem zweiten Strahlengang auf den AMD-Chip gelenkt werden und deren Reflexionsbilder durch eine CCD-Matrix erfasst werden.

Als Antrieb dieser Mikrospiegel können thermoelektrische „Bimaterial“-Elemente, Piezoelemente bzw. kann eine elektromagnetische, eine elektrostatische oder eine elektrodynamische Aktorik bzw. MEM-Aktorik verwendet werden. Exoten wären sicherlich pneumatische oder hydraulische Lösungen.

Ein kritischer Punkt bei allen Mikrospiegeln ist die Wärmeabfuhr aus den Mikrospiegeln, die durch das nichtreflektierte Licht erzeugt wird. Insbesondere der Dauerbetrieb ist dabei zu untersuchen. Die Vibrationsempfindlichkeit der Mikrospiegel ist eine weitere potenzielle Schwachstelle. Da die Mikrospiegel sehr feine Strukturen haben, müssen sie gegen Staub und Feuchtigkeit geschützt werden.

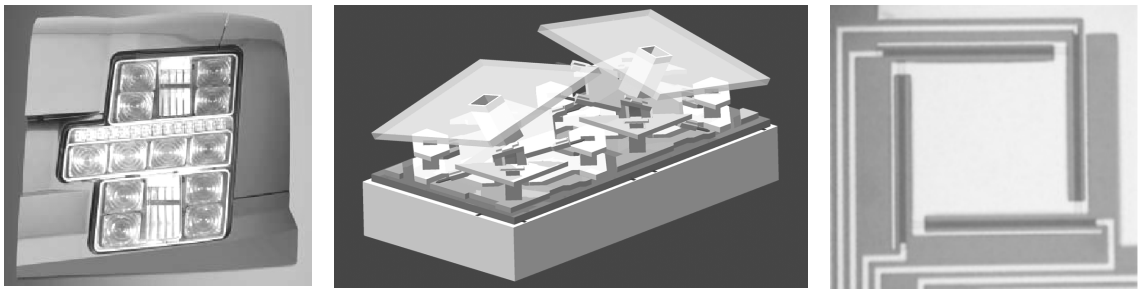


Abbildung 4.2: LED-Scheinwerfer [HELLA KG](links); DMD-Spiegelarray-Aufbau [TI](Mitte); AMD-Aufbau [FG SENSORIK, UNI PADERBORN](rechts)

K4: Scanner / scannender Scheinwerfer (scannende Makrospiegel / Mikrospiegel, LSV mit variablen optischen Elementen, mikromechanisch mechatronische Lösung)

Bei dem scannenden Scheinwerfer, Abbildung 4.3, handelt es sich um eine Hybridlösung einer Lichtverteilung, die aus einer statischen Grundlichtverteilung (1) und einer scannend generierten Zusatzlichtverteilung (4) besteht. Diese Hybridlösung wird gewählt, um die dynamischen Anforderungen zu reduzieren.

Bei scannenden Scheinwerfern in Reflexionstechnik kann der Teil der Lichtverteilung, der klassisch für den 15° Anstieg zuständig ist, für den scannenden Anteil der Lichtverteilung verwendet werden. Der scannend generierte Teil der Lichtverteilung (4) wird mit einer Auskoppellinse (2) gebündelt und dann mit Hilfe von zwei Galvanometerscannern (3) und deren Spiegeln vertikal und horizontal abgelenkt. Mit einer gezielten Ansteuerung der Galvanometerscanner wird die Scanstrategie und damit die Belichtung bzw. resultierende Beleuchtungsstärke auf der Straße erzeugt. Die unterschiedlichen Lichtverteilungen werden durch die Variation des scannenden Lichtverteilungsanteils moduliert. Dabei sind die Spiegeldynamik, die maximale Scanfrequenz, der ausgekoppelte Lichtstrom und die Lichtstärke des Scanlichtstrahlenbündels entscheidende Kenngrößen für die Leistungsfähigkeit des scannenden Scheinwerfersystems.

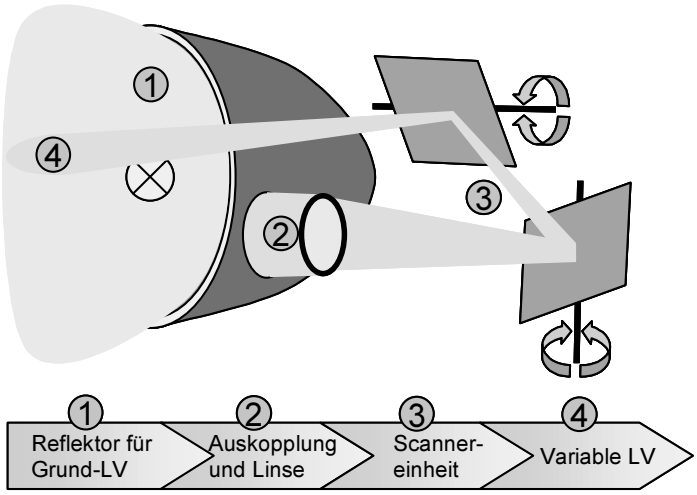


Abbildung 4.3: Aufbau eines scannenden Scheinwerfers [8.7, MÜLLER, 2004]

K5: LCoS-Konzept / LCD-Konzept (LCoS- / LCD-Array mit polarisiertem Licht, subtraktive LSV, elektrostatisch gedrehte nematische Zellen als Reflektor- / Blendenlösung)

Bei dem LCoS-Konzept, Abbildung 4.4, handelt es ich um ein Scheinwerferkonzept, bei dem das Licht einer Lichtquelle (1) zunächst homogenisiert, polarisiert (2) und dann auf einem LCoS-Chip (4) konzentriert wird. Der LCoS-Chip ist ein reflektives LCD-Display. Es hat einen höheren Flächennutzungsgrad als konventionelle LCD-Chips und es kann von seiner Rückseite her besser gekühlt werden als transmittive LCD-Chips. Über die pixelweise angelegte Spannung an einzelnen nematischen Zellen kann die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts gedreht werden. Über einen Polarisationsstrahlteiler (PBS) (3) wird das

Licht in zwei Lichtwege aufgetrennt, wobei nur ein Lichtweg (5) zur Generierung der Lichtverteilung (6) genutzt wird.

Bei dem LCD-Chip (Liquid Crystal Display) oder dem LCoS-Chip (Liquid Crystal on Silicon) wird in Abhängigkeit von der Drehstellung der Makromoleküle in den nematischen Zellen polarisiertes Licht, je nach seiner Polarisationsrichtung vom LCD-Chip bzw. vom LCoS-Chip mit gleichbleibender oder gedrehter Polarisationsrichtung hindurchgelassen bzw. reflektiert. An jede nematische Zelle kann eine äußere elektrische Spannung angelegt werden, die eine Ausrichtung der Makromoleküle entlang der elektrischen Feldlinien hervorruft. In diesem Zustand können die Makromoleküle die Polarisationsebene des einfallenden Lichts nicht drehen, wodurch die nematische Zelle optisch sperrt bzw. als eine pixelweise schaltbare Blende funktioniert. Dadurch kann die gewünschte Lichtverteilung des Scheinwerfers pixelweise mit der Liquid Crystal-Zelle eingestellt werden.

Um die Effizienz der Polarisation zu steigern, müssen beide linear polarisierten Anteile des erzeugten Lichts relativ verlustarm genutzt werden. Einer der Anteile wird in seiner Polarisationsrichtung durch ein $\lambda/2$-Plättchen gedreht, um dann mit dem anderen polarisierten Lichtbündel vereint zu werden. Dichroitische Filter werden eingesetzt, um die unerwünschten IR- und UV-Anteile herauszufiltern, damit die thermische Belastung des LCD- und LCoS-Chip möglichst gering ist.

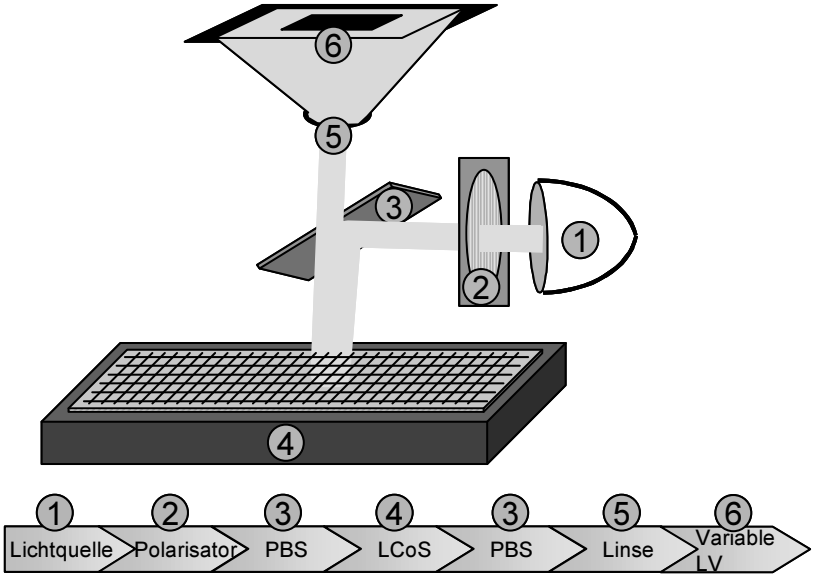


Abbildung 4.4: LCoS-Scheinwerferaufbau [8.7, MÜLLER, 2004]

K6: Zoomlinse (Linsenelement, LSV mit variablen optischen Elementen, variable Krümmung der Linsenflächen und damit variable Brennweiten)

Bei der Zoomlinse handelt es sich um eine Linse, deren Krümmungsradius und damit die Brennweite verändert werden kann. Die Berechnung der Bildbrennweite f ' erfolgt nach folgender Formel [8.6, SCHRÖDER, 1998]:

$$f' = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{n \cdot r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot d + n \cdot (r_2 - r_1)}$$

f' = Bildbrennweite einer Linse in Luft, n = Brechungsindex, r_1 = erster Krümmungsradius, r_2 = zweiter Krümmungsradius, d = Dicke der Linse

Die Zoomlinse besteht aus einer Linsenhülle, die mit einem transparenten optischen Medium gefüllt ist. Alternativ kann die Zoomlinse aus mehreren elastischen Hüllen aufgebaut sein, ähnlich einer Zwiebel oder der Augenlinse des menschliche Auges, wodurch eine höhere Formstabilität erzielt wird. Die Linse kann auch aus einer silikonartigen Masse oder einem transparenten PU-Material gefertigt werden. Bei der Zoomlinse wird durch Variation der Krümmung der Linse der Abbildungsmaßstab und damit die Breite der Scheinwerferausleuchtung variiert. Wichtig ist bei einer verformbaren Linse der Stellbereich der Formvariation und die Reproduzierbarkeit der Form über die gesamte Lebensdauer des optischen Systems hinweg. Die Form der Zoomlinse muss auch unter dem Einfluss von Vibrationen erhalten bleiben. [8.9, DE 4436620 A1, BOSCH 1996].

K7: Flexprisma (variables Linsenelement, LSV mit variablen optischen Elementen, variabler Prismenwinkel des Optikkörpers sorgt für variablen Ablenkwinkel des Lichtbündels)

Das Flexprisma stellt eine Optikkomponente dar, deren Prismenwinkel variiert werden kann, wodurch die Ablenkung des Lichts zur Prismenbasis variabel veränderbar ist. Als Bauformen sind mehrere Varianten geeignet, die in Kapitel 5.6.2 genauer vorgestellt werden. In der Literatur sind in [8.6, SCHRÖDER, 1998] und in [8.9, BOSCH, 1995-1] teilweise vergleichbare Lösungen bekannt.

Das Flexprisma kann als mögliche Alternative zu geschwenkten Projektionsmodulen angesehen werden. Es arbeitet ausschließlich auf optischem Wege. Bauraum für das Schwenken des gesamten optischen Systems muss nicht vorgesehen werden. Die Dispersion des Lichts muss bei diesen Anordnungen untersucht und ggf. berücksichtigt und korrigiert werden. Das kann durch eine geeignete Materialwahl der Optikkörper und / oder teilweise deren Füllungen erzielt werden. Werden flüssige Medien als Füllung vorgesehen, so muss ein Expansionsbereich für die thermische Ausdehnung des Mediums vorgesehen werden. Ein Einfrieren des flüssigen Mediums bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes muss vermieden werden.

K8: Schwenkspiegel (dreh- und / oder schwenkbarer Reflektor, LSV mit variablen optischen Elementen, variabler Reflexionswinkel des Lichtbündels)

Der Schwenkspiegel ist vom Audi Avantissimo-Messe-Prototypen und der Patentliteratur [8.9, AUDI, 2003] bekannt. Hierbei wird ein rechteckiger Spiegel eingesetzt, der zunächst um eine horizontale Schwenkachse gekippt wird (horizontale Spiegelaußenkanten oder parallel dazu verlaufende Achsen). Dadurch kann beispielsweise die Leuchtweitenregelung bei der vertikalen Ausrichtung eines Lichtmoduls erzielt werden. Durch das zusätzliche Drehen des Schwenkspiegels um die optische Achse des Lichtmoduls ist ein weiterer Rotationsfreiheits-

grad gegeben, der für das Schwenken des dynamischen Kurvenlichts eingesetzt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass durch das Drehen um die optische Achse auch die Hell-Dunkel-Grenze der Anordnung gedreht wird. Es ist daher erforderlich auch wenigstens die Blendenebene, besser das gesamte Lichtmodul um die optische Achse zu drehen.

K9: Lichtquellenbewegung (verschieb- und kippbare Lichtquelle, variable Lichtquelle, variable Lichtverteilung durch andere Lichtquellenposition)

Bei der Lichtquellenbewegung wird die Lichtquelle innerhalb des Reflektors in ihrer Position verschoben bzw. geschwenkt, wodurch sich eine modifizierte Lichtverteilung ergibt. Die Schwierigkeit bei dieser Art der Modifizierung der Lichtverteilung besteht in der Auslegung des Kompromisses zwischen den beiden oder mehreren Lichtverteilungen, da je nach Lampenposition sich andere Lichtverteilungen durch die konstante Reflektorform ergeben. In der Patentliteratur sind z.B. Lösungen von [8.9, BOSCH, 1996-2] und [8.9, STANLEY, 1998-1] bekannt.

K10: Mehrere Lichtquellen in einem Lampenkolben (mehrere feststehende Lichtquellen in einem Reflektor, Lichtquelle, variable Lichtverteilung durch andere Lichtquellenposition)

Bisher werden bei Reflexionsscheinwerfern teilweise Lampen eingesetzt, bei denen sich mehrere Lichtquellenwendeln in einem Lampenkolben befinden. Z.B. wird bei der H4-Lampe eine Lampenwendel mit eingebautem Shutter für die Abblendlichtverteilung verwendet. Die zweite Lampenwendel wird für die Fernlichtverteilung eingesetzt. Die H13-Lampe ist eine Weiterentwicklung diese Zweiwendellampe. Mehr als zwei Lichtverteilungen lassen sich durch diese Lichtquellenart aus lampenthermischen Gründen mit einem Reflektor allerdings nicht erzielen. Bei Gasentladungslampen ist eine solche Lampenkonfiguration bisher nicht möglich, da an die Gasentladung besondere Anforderungen bezüglich Lampenkolbendruck und Elektrodenabstand gestellt werden.

K11: Reflektorvariation durch Makrosegmente (kippbare Reflektorsegmente in einem Reflektor, LSV mit variablen optischen Elementen, mechatronische Lösung)

Bei diesem Scheinwerfer werden Teile des Reflektors durch große, kippbare Segmente ersetzt, die eine Modifikation der Lichtverteilung ermöglichen. Dieses Lösungskonzept ist eine makroskopische Variante des AMD-Chips, vgl. K3. Diese Reflektorsegmente können statisch in beliebigen Winkellagen verharren oder sie werden scannend angetrieben.

K12: Lichtleiterscheinwerfer (Lichtleiter, Umverteilung, additive Lichtverteilung, Überlagerung von mehreren Lichtverteilungs-Auskoppelelementen, Trennung von Ein- und Auskopplung)

Der Lichtleiterscheinwerfer besteht aus drei Elementen: Einkopplung, Lichtleiter und Auskopplung. Über variable Auskoppeleinheiten oder eine Vielzahl von Auskoppelelementen, die je nach Stellung der Lichtleiter oder eines Umlenkelementes mit Lichtstrom versehen werden, können verschiedene Lichtverteilungen abgerufen und miteinander überlagert

werden. Teilweise wird für jede Lichtfunktion ein separates Auskoppelelement vorgesehen. Kennzeichen der Lichtleiterscheinwerfer ist die Trennung von Lichterzeugung und Lichtumverteilung. Im Bereich der Lichtleiterscheinwerfer sind umfangreiche Forschungsaktivitäten bei der Hella KG [8.2, LÜDER, 2003] durchgeführt worden.

K13: Hologramme (Weißlicht- und Volumenhologramme, LSV mit variablen optischen Elementen, optische Lösung)

Bisher werden Hologramme mit monochromatischem Licht von Lasern erzeugt. Diese können je nach Art der Aufnahme mit einem monochromatischen Referenzstrahl oder mit weißem Licht wieder abgerufen werden. Werden auf einem Hologramm mehrere Lichtverteilungen abgelegt, so kann je nach Position und Ausleuchtung des Referenzstrahles auf dem Hologramm ein anderer Teil der Lichtverteilung abgerufen werden. Bei Volumenhologrammen ist es ebenfalls möglich, je nach Lichtrichtung des einfallenden Referenzbündels, ein anderes Hologramm und damit eine andere Lichtverteilung abzurufen [8.6, PAUL, 1999].

K14: Mikro- / Midioptik-Scheinwerfer (Lichtlenkung mit Mikrostrukturen, Refraktiv, Diffraktiv, Optische Lösung, mikromechanische Lösung)

Midi soll hier eine Zwischenstufe zwischen Mikro- und Makro-Spiegel- und Linsen-Anordnungen beschreiben. Das Scheinwerferkonzept besteht aus Multi-Midi-Linsenanordnungen mit starren und flexiblen Mikrolinsen. Diese Midi-Linsenanordnungen sind teilweise so ausgelegt, dass keine Blenden erforderlich sind. Wird die Mikrointegration noch weiter vorangetrieben, so können Mikrostrukturen als refraktive Fresnellinsen oder diffraktive Elemente zur Lichtlenkung verwendet werden [8.2, FSRM, 2002]. Über das Design der Mikrolinsen kann ein LED-artiges Erscheinungsbild erzeugt werden. Dieses Erscheinungsbild ist auch mit konventionellen Lichtquellen erzielbar, die z.B. über einen Paraboloidreflektor das Licht in die Mikrostrukturen einkoppeln. Die Firma Stanley hat mit ihrem „Gattling Beam“-Scheinwerfer [8.2, PAL2001, STANLEY] dieses Prinzip verfolgt. Auf der Cebit 2004 wurde eine virtuelle Laser-Keyboard-Projektion für PDAs [8.2, IBIZ, 2004] vorgestellt.

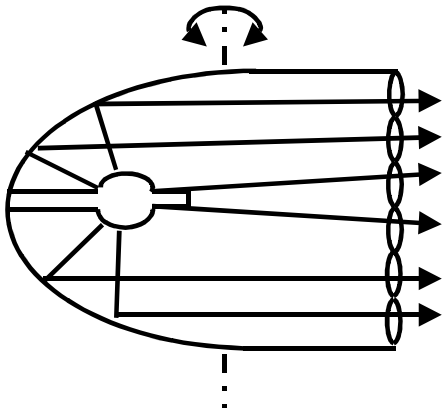


Abbildung 4.5: Midi-Optikscheinwerfer mit Paraboloidreflektor-Hinterleuchtung

K15: Freiformlinse + Shutter (Blende) (FF-Linse, subtraktive Lichtverteilung, teils Umverteilung, mechatronische Lösung mit bewegter Blende oder bewegter FF-Linse)

Auf einer Freiformlinse werden räumlich getrennt unterschiedliche Lichtverteilungen platziert, die je nach Stellung einer Ringblende (evtl. mit Lasche) abgerufen werden können. Diese Ringblende deckt Bereiche ab, die für die Summe der Lichtverteilungen nicht benötigt werden. Da Linsen grundsätzlich abbildende Elemente sind, ist eine ausschließliche Steuerung der Bildhelligkeit durch eine Variation des Blendendurchmessers nicht gewünscht. Erforderlich ist hierfür eine segmentierte / facettierte Linse, die Teile des Lichtbündels in eine vorher definierte, feste Lichtrichtung ablenken. Der jeweiligen Linsenkrümmung wird dabei eine jeweils unterschiedliche Prismenform überlagert, die neben der Abbildung für eine Strahlablenkung sorgt. In ihrer Summe könnte die Linse als Frei-Form-Linse ausgeprägt sein.

K16: Elektrooptische Halbleiterlinse (Halbleiterlinse, Umverteilung des Lichts, elektrooptische Lösung)

Die Lichtlenkung erfolgt durch unterschiedliche Brechungsindizes in einer elektrooptischen Halbleiterstruktur, die je nach angelegter Spannung ihre Brechungszahl ändert. Über eine Sandwich-Struktur von Halbleiterebenen, siehe Abbildung 4.6 links, können die erforderlichen Spannungen für die notwendigen elektrischen Felder reduziert und die Materialkosten gesenkt werden. Der Nachweis dieses Funktionsprinzips mit „weißem“, breitbandigem Licht muss noch erfolgen. [8.2, FRAUNHOFER, IPM, 2002], [8.2, HINKOV, 2001]. Nur für diskrete Ablenkwinkel lässt sich, Abbildung 4.6 rechts, ein 2D-Halbleiterscanner aufbauen. Da eine Strahlablenkung nur innerhalb der Halbleiterebene erfolgen kann, ist eine sequentielle Anordnung von um 90° rotierten Halbleiterebenen in einer gefächerter Orientierung erforderlich.

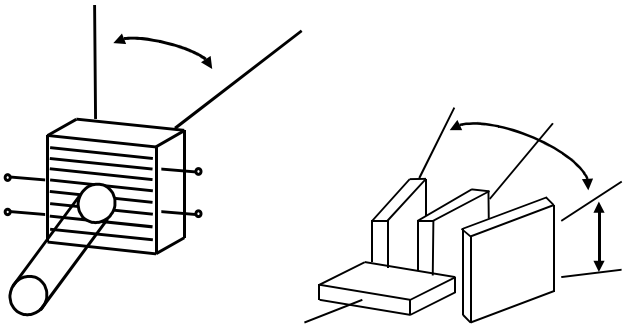


Abbildung 4.6: Halbleitersandwich zur Laserstrahlablenkung (links), 2D-Halbleiterscanner mit teils diskreten Ablenkwinkeln (rechts)

K17: Shutter-Matrix (mechanisch oder elektrooptisch, subtraktive Lichterzeugung, mikromechanische oder elektrooptische Lösung)

Hierbei wird eine Matrix aus mechanisch / elektrooptisch freischaltbaren Pixelelementen, siehe Abbildung 4.7, zur Erzeugung der gewünschten Lichtverteilungen verwendet. Die mechanischen Elemente könnten aus kleinen Klappen oder aus elektrostatisch auf- und abgerollten Folien bestehen. Bei der elektrooptischen Lösung handelt es sich um elektro-

chrome Elemente, die je nach angelegter Spannung ihre Farbe ändern und damit ihre Transmission reduzieren bis zu dem Zustand, in dem sie die gesamte auftreffende Strahlung absorbieren.

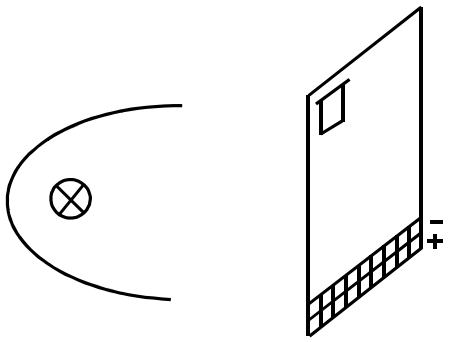


Abbildung 4.7: Shutter-Matrix mit mechanisch oder elektrooptisch angesteuerten Blenden / Pixelelementen

K18: Hängebrückenreflektor (Makro- / Mikrospiegel, LSV mit variablen optischen Elementen, makromechanische Lösung)

Die Spiegelelemente sind an den beiden Tragseilen einer „Hängebrücke“, siehe Abbildung 4.8, befestigt. Über Zug an den Traversen (Verbindungsseilen) kann die Lage und die Neigung der Spiegelsegmente variiert werden. Je nach Ausrichtung der Traversenseile können verschiedene Freiheitsgrade der Mikrospiegel erzielt werden. Denkbar sind dabei Lösungen mit einem elastischen Tragseil und Lösungen mit einem annähernd längenkonstanten Tragseil. Die Spiegelelemente, Tragseile und Traversen müssen jeweils unter Zugspannung gehalten werden, damit die Spiegelelemente eine eindeutige räumliche Lage einnehmen.

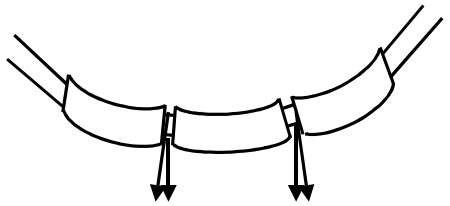


Abbildung 4.8: Hängebrückenreflektor mit auf Tragseilen gelagerten Spiegelelementen, die über Traversen in ihrer Neigung verändert werden können

K19: Drehspiegelreflektor (Makro- / Mikrospiegel, LSV mit variablen optischen Elementen, makromechanische Lösung)

Für das Tragen der Makro- / Mikrospiegel dient ein mittig angeordnetes Seil, das gleichzeitig als Drehachse der Spiegel dient. Über Zugseile werden die Spiegel um das Tragseil gekippt oder je nach angelegter Zugspannung kann die Parabelform der Spiegel, welche durch deren Gewichtskraft hervorgerufen wird, modifiziert werden. Bei diesem Konzept müssen die Zugseile der Spiegel ebenfalls unter Zugspannung gehalten werden, damit die Lage der Spiegel und die resultierende Form des Tragseils eindeutig bestimmt sind. Alternativ können Makrospiegel, siehe Abbildung 4.9, in einem kartesischen Rahmen gelagert sein, in dem sie gemeinsam gekippt und geschwenkt werden können.

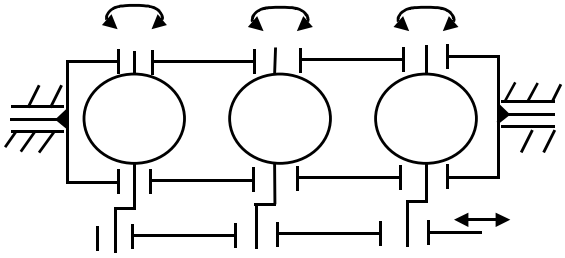


Abbildung 4.9: Makrospiegel, die um eine horizontale und jeweils um eine vertikale Achse gedreht werden können

K20: Membranspiegel (Spiegelmembran, LSV mit variablen optischen Elementen, werkstofftechnische Lösung / makromechanische Lösung)

Der Reflektor besteht aus einer elastischen Membran, siehe Abbildung 4.10, die in ihrer Form stetig verändert werden kann. Die Lichtverteilungen werden mit dieser veränderlichen Membrangeometrie erzeugt. Als Stützstellen und zur Einbringung von Kraft dienen piezoelektrische Folien, weitere Piezobiege- und -stapelaktoren oder Nagelkissen mit Linearaktoren, die z.B. elektrostatisch oder elektromagnetisch betätigt werden können. Die Herstellung einer elastischen Verspiegelung für diese Membran stellt eine Herausforderung dar. Die spiegelnde Beschichtung könnte sich je nach Krümmung der Membran gegenseitig überlappen (Fischschuppenprinzip), wodurch keine unerwünschten Auffaltung entstehen. In der umgekehrten Bewegungsrichtung könnten in der Verspiegelung Risse auftreten. Mit definierten Sollbruchstellen könnte dennoch eine definierte Lage und Orientierung der einzelnen verspiegelnden Bereiche erzielt werden. Wird mit einem relativ flachen Lichteinfallswinkel gearbeitet, könnte die Brechzahldifferenz zugunsten der Totalreflexion auf der Membranspiegeloberfläche ausgelegt werden, wodurch eine elastische Verspiegelung nicht mehr notwendig ist. Die Verformung der Membran auf Zug kann alternativ auch mit einer Druckdifferenz zwischen Membranober- und –unterseite erfolgen. In der Literatur sind Membranspiegel mit einem Durchmesser von 10 mm und einem maximalen Hub von 30µm durch elektrostatische Auslenkung mit einer Spannung von 300V für die Korrektur von Laserwellenfronten bekannt [8.2, MOSIS, 2001].

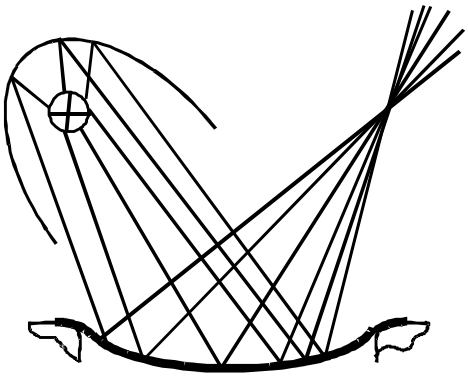


Abbildung 4.10: Spiegelmembranreflektor

K21: Klappspiegelanordnungen (Austausch von Reflektorsegmenten, LSV mit variablen optischen Elementen, teils Austausch, Kippen / Drehen von Makrosegmenten, makromechanische Lösung)

Neben einem Reflektorgrundsegment für die Grundlichtverteilung (zentral um den Lampenkolben angeordnet), können angrenzende Makrosegmente in mehreren Ebenen / Staffelungen ausgetauscht werden. Das kann über Kippen erfolgen, ähnlich dem Letterwechsel einer Schreibmaschine, siehe Abbildung 4.11, oder über Drehen von Reflektorsegmenten, die wie Gondeln in einem Karussell angeordnet sind, dessen Drehachse vertikal, horizontal oder schräg im Raum orientiert ist.

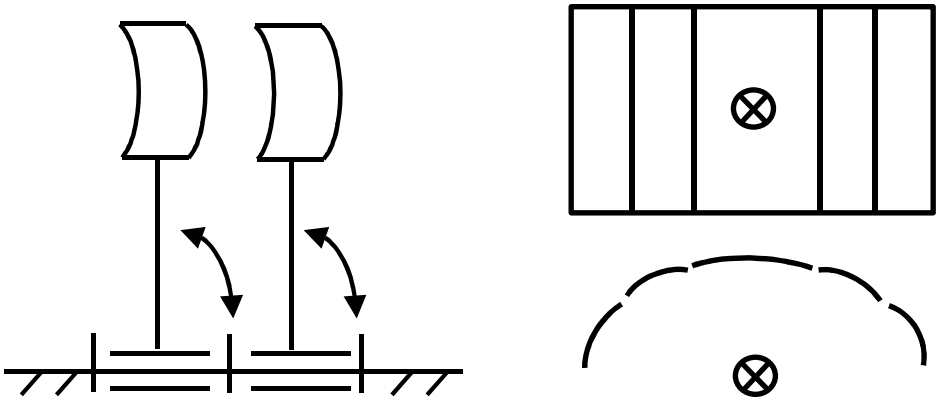


Abbildung 4.11: Klappspiegelanordnung Prinzip (links), Frontansicht (rechts oben), Draufsicht auf den statischen Mittelteil und die auswechselbaren Seitensegmenten (rechts unten)

K22: Revolver / gestaffelte Linsen (Linsenelemente, Blendenelemente, LSV mit variablen optischen Elementen, Austausch von starren optischen Elementen bzw. Blenden, makromechanische Lösung)

Ähnlich wie bei einem Revolver können in einem Magazin, siehe Abbildung 4.12, verschiedene Linsen- oder Prismenelemente einzeln angeordnet oder als eine Freiform-Linsen-Scheibe oder als mehrere Blendenscheiben ausgebildet sein, die über die rotatorische Achse ausgetauscht bzw. gedreht werden. Die Drehachse des Revolvers ist dabei parallel oder unter einem zur optischen Achse geneigten, spitzen Winkel angeordnet. Durch die Überdeckung der Blendenelemente und / oder durch die Kombination der Linsen- und Optikelemente wird die gewünschte Lichtverteilung erzeugt [8.2, SAE 2003, LELEVE]. In der Veröffentlichung von Valeo [8.9, EP1197387, 17.4.2002; US 2002-0044451] wird ein Projektionssystem beschrieben, bei dem eine konische Blende um eine Drehachse, die relativ zur optischen Achse nach unten geneigt ist, gedreht wird. Dabei können je nach Drehstellung der Blendenscheibe an deren Umfang unterschiedliche Hell-Dunkel-Grenzen abgefragt werden. Das dargestellte Projektionssystem stellt eine interessante Alternative zum Hella Vario-Xenon-Modul dar. Eine Weiterentwicklung dieses Projektionssystems mit einer kreisförmig rotierenden Blendenscheibe besteht in der Aufteilung der Blendenfunktion auf mehrere unabhängig voneinander ansteuerbare Blendenscheiben. Anstelle der Blendenscheiben können auch optische Elemente verwendet werden, die je nach Drehstellung eine unterschiedliche Lichtverteilung

erzeugen. Die optischen Elemente können kontinuierlich als eine FF-Optikscheibe, als FF-Reflektorsegmente oder als eingesetzte diskrete Optikelemente in einem Träger ausgeführt werden.

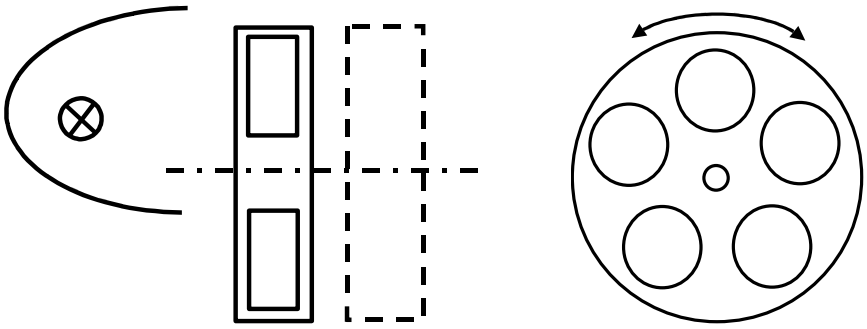


Abbildung 4.12: Revolver-Scheinwerfer in Seitenansicht mit einem, evtl. zwei Magazinen mit optischen Elementen (Linsen, Prismen, Blenden)(links), Draufsicht auf ein Magazin mit hier separaten optischen Elementen (rechts)

K23: Totalreflexion aufgehoben durch Kontakt (variables Reflexionselement, LSV mit variablen optischen Elementen, werkstofftechnische Lösung, makromechanische Lösung)

Bei einem Prisma bzw. einer Scheibe, die Licht unter Ausnutzung der Totalreflexion reflektiert, wird die Totalreflexion aufgehoben, indem das Brechungszahlenverhältnis von Glas-Luft durch eine Materialpaarung mit optisch ähnlichen Dichten ersetzt wird. Dadurch ist es möglich, die Hell-Dunkel-Grenze innerhalb einer Lichtverteilung zu verlagern, indem je nach angelegter Kraft ein elastisches Kontaktmedium an ein Prisma gedrückt bzw. abgehoben wird, wobei sich die Kontaktfläche vergrößert bzw. verkleinert. Als elastisches Medium könnte ein Silikonkissen oder ein elastisches PU-Kissen dienen. Beide elastischen Werkstoffe sind in der gewählten Ausführungsform transparent und können dadurch das ausgekoppelte Licht ableiten, wodurch der Kontrast der erzeugbaren HDG erhöht wird. Die Totalreflexionsebene des Prismas muss eine Abbildungsebene des Systems sein, damit eine scharfe Abbildung der in der Totalreflexionsebene erzeugten Hell-Dunkel-Grenze erfolgen kann. Wird diese Bedingung nicht erfüllt, so ändert die Lichtverteilung nur ihre Gesamthelligkeit in Abhängigkeit vom ausgekoppelten Lichtstrom. Die Thermik innerhalb des Prismas muss ebenfalls beachtet werden, damit thermische Spannungen durch lokale Lichtkonzentrationen nicht zu einer Zerstörung des Prismas führen.

K24: Cartesischer-Taucher-Blende (variables Blendenelement, subtraktive LSV, fluidostatische Lösung)

In einer Reihe von flüssigkeitsgefüllten Kapillaren befinden sich einseitig verschlossene Röhren, auch als „Taucher“ bezeichnet, die zum Teil mit einem Gas gefüllt sind und je nach unterschiedlich anliegendem äußeren Druck in eine andere Höhe aufsteigen bzw. absinken, sodass eine neue variable Position der HDG erzeugt wird.

K25: Flüssigkeitsoptik (Totalreflexion) (variables Optikelement, LSV mit variablen optischen Elementen, fluidostatische Lösung)

Durch Fluten und Leeren von Kapillaren und anderen Optikkörpern wird die Totalreflexion, die Brechung bzw. die Absorption / Reflexion an einer Flüssigkeit ausgenutzt, um die HDG zu erzeugen. Je nach verwendetem Medium lassen sich durch die anderen Verhältnisse bei den Brechungsindizes neue Optikwege oder Lichtbündelformungen abrufen.

K26: akustooptischer Effekt (variables Optikelement, LSV mit variablen optischen Elementen, fluidodynamische Lösung)

Mit Hilfe von Schallwellen (Ultraschall) werden Dichteunterschiede im Medium erzeugt, die eine Beugung des Lichts bewirken. Dieser Effekt könnte auch zur Lichtverteilungsgenerierung eingesetzt werden.

K27: Zentrifugenoptik (variables Optikelement, LSV mit variablen optischen Elementen, fluidodynamische Lösung)

Die Lichtsteuerung erfolgt über Reflexion an einer Flüssigkeitsoberfläche bzw. Brechung an der Flüssigkeitsoberfläche und Reflexion am Boden einer Zentrifuge. Blenden können eingesetzt werden, um die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze genauer einzustellen. Über die Drehzahl der Zentrifuge wird die Krümmung der Oberfläche der Flüssigkeit und damit deren optische Wirkung auf die Lichtverteilung variiert.

K28: aktive Hydraulik-Blende (variables Blendenelement, subtraktive LSV, fluidostatische Lösung)

Es wird Flüssigkeit über eine Hydraulik in Hydraulikzylinder gepumpt, deren Kolbenoberkante die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze darstellen. Dabei werden mehrere Stempel eingesetzt, um die Form und Höhe der HDG feingliedriger zu modulieren.

K29: Kapillar-Blende (variables Blendenelement, subtraktive LSV, fluidostatische Lösung)

Die Adhäsions- und Kohäsionskräfte von Flüssigkeiten und den angrenzenden Gefäßwänden werden bei diesem Konzept ausgenutzt. Je nach Abstand von Platten / Röhren / Kapillaren steigt die verwendete Flüssigkeit unterschiedlich hoch. Der Abstand der Platten muss dabei in unterschiedlichen Zonen der HDG veränderbar sein, damit die Variabilität der HDG gewährleistet werden kann.

K30: Magnetorheologische Flüssigkeiten (variables Optikelement, LSV mit variablen optischen Elementen, fluido- und magnetostatische Lösung)

Je nach angelegtem Magnetfeld wird die Oberfläche einer magnetorheologischen Flüssigkeit in ihrer Form verändert. Die Flüssigkeitsoberfläche kann als in seiner Krümmung variabler Spiegel dienen.

K31: Kerr- und Pockelszelle (variables Blendenelement, subtraktive LSV, elektrostatische Lösung)

Die optische Aktivität als Wechselwirkung von Licht und Materie kann ebenfalls zur Lichtstrommodulation eingesetzt werden. Diese tritt praktisch nur bei der Lichtausbreitung in Richtung der optischen Achse des Kristalls auf. Elektische und magnetische Felder und auch mechanische Kräfte können in isotropen Substanzen erzwungene Doppelbrechung hervorrufen. Beim Kerr-Effekt wird eine optisch isotrope Flüssigkeit, z.B. Nitrobenzol, im transversalen elektrischen Feld doppelbrechend. Es werden typischerweise Feldstärken von $E \approx 10^6$ V/m für einen Gangunterschied von $\Delta=\lambda/2$ benötigt. Beim Pockels-Effekt werden piezoelektrische Kristalle ohne Symmetriezentrum im longitudinalen elektrischen Feld doppelbrechend. Bei deuterisiertem Kaliumdihydrogenphosphat sind bei longitudinaler Zelle Halbwellenspannungen von $U \approx 4$ kV erforderlich. Beim Cotton-Mouton-Effekt werden Magnetfelder einer Größe von $H \approx 10^7$ A/m senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichts bei anisotropen Molekülen einer Flüssigkeit, z.B. Benzol, eingesetzt. Dieser Effekt ist relativ klein und wird daher praktisch kaum eingesetzt. Er ist das magnetische Analogon des elektrooptischen Kerr-Effekts. Der Faraday-Effekt nutzt die Magnetorotation von durchsichtigen isotropen Körpern im longitudinalen Magnetfeld. Der Verdrehwinkel hängt ab von der Dicke der Substanz, der Magnetfeldstärke und einer Materialkonstanten (Verdet'sche Konstante) der ferromagnetischen Granate seltener Erden.

Alle Effekte haben gemeinsam, dass sie mit polarisiertem Licht und zwei Polarisationsfiltern, eingesetzt als Polarisator und als Analysator, arbeiten [8.6, HERING, 1997]. Weitere Informationen zu elektrooptischen und magnetoptischen Effekten und deren Anwendung als Modulatoren des Lichts lassen sich aus [8.6, PAUL, 1999; HECHT, 2001; HAFERKORN, 2003] entnehmen.

K32: elektrochrome Schichten (variables Blendenelement, subtraktive LSV, elektrochemische / elektrodiffusive Lösung)

Elektrische Spannungen an leitenden Glasplatten sorgen durch ihr Feld (Kondensatoranordnung) für die Diffusion von Makrofarbmolekülen [8.2, CUMMINS, 2000], die beim Erreichen der Empfängerelektrode zu einem Farbumschlag von transparent zu z.B. blau oder schwarz führen. Diese elektrochromen Schichten können auch pixelweise angeordnet werden. Wird eine Kondensatorelektrode verspiegelt, so entsteht ein schaltbarer Spiegel. Der erreichte Kontrast und die erzielten Schaltgeschwindigkeiten waren bisher, neben möglichen thermischen Problemen, noch nicht ausreichend für einen Kfz-Scheinwerfer-Einsatz [8.2, SAE 2005, STRAZZANTI].

4.3 Bewertung der Scheinwerferkonzepte

Wie Kapitel 4.2 gezeigt hat, lassen sich zahlreiche Lösungskonzepte aus unterschiedlichen Bereichen der Lichttechnik, Optik, Physik und Technik finden. Diese sind auf deren Anwend-

barkeit für zukünftige Scheinwerfersysteme zu überprüfen, um zielgerichtet nur die vielversprechendsten Lösungsansätze weiter zu verfolgen.

Die Bewertung der Scheinwerferkonzepte erfolgt in Tabelle 4.1. Diese ist in einen Klassifizierungs- und Bewertungsteil untergliedert.

Zur besseren Übersichtlichkeit des Lösungsraumes lassen sich die generierten Scheinwerferkonzepte K1 bis K32 in folgende Gruppen gliedern:

1. mechanische Lösungen
2. fluide Lösungen
3. flexible Lösungen (mit elastischen Elementen)

Die ersten Lösungskonzepte weisen einen unterschiedlichen Systemumfang auf, sodass diese als Komponenten eines Gesamtsystems oder bereits als vollständiges Gesamtsystem eingesetzt werden können.

Die technischen und physikalischen Prinzipien sind teilweise wellenlängenselektiv, sodass diese bisher nur mit monochromatischem Licht Anwendung fanden. Alternativ lassen sich die Lösungskonzepte mit einem breitbandigen Wellenlängenbereich, d.h. weißem Licht, umsetzen.

Da für die gewünschten aktiven Scheinwerferfunktionen eine hohe Variabilität erforderlich ist, wird diese zusammen mit ihrer Dimension und einer Unterscheidung zwischen einer analogen, kontinuierlichen Verstellmöglichkeit oder einem digitalen Schalten unterschieden.

Das variable Optikelement und die Art der Lichtverteilungserzeugung runden den klassifizierenden Teil der Bewertung ab.

Die eigentliche Bewertung wurde mit einer Expertenrunde durchgeführt. Es wurde in Anlehnung an das Lastenheft in Kapitel 3.4 bewertet: die Variabilität bzw. die Freiheitsgrade des Scheinwerfersystems, der Bauraum für das Gesamtsystem bzw. die Komponenten, die Vibrationsunempfindlichkeit, Temperaturunempfindlichkeit, Toleranzen und Reproduzierbarkeit von Lichtfunktionen, Herstellbarkeit und Fertigung, Innovationsgrad und die Anforderungen an die Ansteuerungselektronik und Elektrik.

Ausgehend von dieser Bewertung der Lösungskonzepte und der Ergänzung durch weitere Lösungselemente eines morphologischen Kastens in Kapitel 4.4 wird in Kapitel 4.5 die Kombination der Lösungselemente vorgenommen.

Erklärungen zu Tabelle 4.1:

2-4F = 2 bis 4 „Freiheitsgrade“ / Variabilität je nach Ausführungsform,

d = digital, a = analog,

Ges. oder Komp. (Gesamtoptikkonzept oder Komponente)

LSV-Erzeugung: a = additiv, s = subtraktiv, u=Lichtstrom umverteilt

Tabelle 4.1: 1.Klassifizierungsteil der Scheinwerfer-Konzeptideen

Klassifikation		KL1	KL2	KL3	KL4	KL5	KL6
		Medium der Lösung	Komponente / Gesamt-konzept	monochrom. Licht / „weißes“ Licht	Variabilität, Dimension, analog / digital	variables Optikelement	LSV-Erzeugung
Nr.	Konzept						
K1	LED-Scheinwerfer	fest	Ges.	w	mittel, 2F, a	Lichtquelle	a
K2	Digitale Projektion	fest	Ges.	w	hoch, 2F, d	DMD-Array	s
K3	Analoge Projektion	fest	Ges.	w	hoch, 4F, a	AMD-Array	u
K4	Scanner	fest	Ges.	w	mittel, 2-4F, a	Scan-Spiegel	u
K5	LCoS / LCD-Konzept	fest	Ges.	w	hoch, 2F, a	LCoS-Array	s
K6	Zoom-Linse	fest	Komp.	w	gering, 1F, a	Optikelement	u
K7	Flexprisma	fest	Komp.	w	gering, 2F, a	Optikelement	u
K8	Schwenkspiegel	fest	Komp.	w	gering, 2F, a	var. Reflektor	u
K9	Lichtquellenbewegung	fest	Ges.	w	gering, 1F, a	Lichtquelle	u
K10	Mehrere Lichtquellen in einem Lampenkolben	fest	Ges.	w	gering, 1F, d	Lichtquelle	a
K11	Reflektorvariation durch Makrosegmente	fest	Ges.	w	mittel, 4F, a	var. Reflektor	u
K12	Lichtleiterscheinwerfer	fest	Ges.	w	gering, 1-2F, a	Optikelement	a
K13	Hologramme	fest	Ges.	m	gering, 2F, d	Hologramm	u
K14.1	Mikrooptikscheinwerfer	fest	Ges.	m, w	gering, 2F, d	Mikrooptiken	u
K14.2	Midilinsenscheinwerfer	fest	Ges.	w	mittel, 2-4F, a	Midilinsen	u
K15	Freiformlinse + Shutter	fest	Ges.	w	gering, 1-2F, a	Optikelement + Blende	s
K16	Elektrooptische Halblei-terlinse	fest	Komp	m, w	gering, 1-2F, a	Optikelement	u
K17	Shutter-Matrix	fest	Komp	w	mittel, 2F, d	Blendenmat-rix	s
K18	Hängebrückenreflektor	fest	Ges.	w	mittel, 4F, a	var. Reflektor	u
K19	Drehspiegelreflektor	fest	Ges.	w	mittel, 4F, a	var. Reflektor	u
K20	Membranspiegel	flex.	Ges.	w	mittel, 4F, a	var. Reflektor	u
K21	Klappspiegelanordnung	fest	Ges.	w	gering, 1-3F, d	var. Reflektor	u
K22	Revolver / gestaffelte Linsen	fest	Ges.	w	mittel, 2-4F, d	Optikelemen-te / Blenden	u
K23	Totalreflexion durch Kontakt aufgehoben	flex.	Ges.	w	gering, 2F, d	Optikelement	s

Tabelle 4.1: 1.Bewertungsteil der Scheinwerfer-Konzeptideen

Bewertung		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	G1	G2
		Variabilität / Freiheits-grade	Bauraum Gesamtsystem / Komponente	Vibrationsunem-pfindlichkeit	Temperaturun-empfindlichkeit	Toleranzen / Reprodu-zierbarkeit	Herstellbarkeit / Fertigung	Innovationsgrad	Ansteuerungselektronik / Elektrik	Gesamturteil	Rangfolge
Nr.	Konzept										
K1	LED-Scheinwerfer	2	3	4	2	2	3	3	3	22	5
K2	Digitale Projektion	4	3	3	3	3	3	4	2	25	2
K3	Analoge Projektion	4	3	3	2	3	2	4	2	23	4
K4	Scanner	3	2	3	2	3	3	4	2	22	5
K5	LCoS / LCD-Konzept	4	2	4	3	2	3	4	2	24	3
K6	Zoom-Linse	1	3	2	3	1	2	2	3	17	10
K7	Flexprisma	3	3	3	3	3	3	3	4	25	2
K8	Schwenkspiegel	2	2	3	4	3	4	3	4	25	2
K9	Lichtquellenbewegung	1	3	3	3	2	3	1	3	19	8
K10	Mehrere Lichtquellen in einem Lampenkolben	0	4	4	4	4	4	1	4	25	1
K11	Reflektorvariation durch Makroscherben	2	2	3	4	3	3	2	3	22	5
K12	Lichtleiterscheinwerfer	1	2	4	4	4	4	2	4	25	2
K13	Hologramme	1	2	3	4	3	2	4	3	22	5
K14.1	Mikrooptikscheinwerfer	2	3	3	4	4	2	4	3	25	2
K14.2	Midilinsenscheinwerfer	2	2	2	4	3	2	4	2	21	6
K15	Freiformlinse + Shutter	2	2	4	4	3	2	4	3	24	3
K16	Elektrooptische Halbleiterlinse	2	2	4	3	2	2	4	1	20	7
K17	Shutter-Matrix	3	3	4	3	2	2	3	1	21	6
K18	Hängebrückenreflektor	2	2	1	4	2	1	3	2	17	10
K19	Drehspiegelreflektor	2	2	2	4	2	1	3	2	18	9
K20	Membranspiegel	2	1	3	4	2	2	4	1	19	8
K21	Klappspiegelanordnung	1	0	4	4	4	4	3	2	22	5
K22	Revolver / gestaffelte Linsen	2	1	4	4	4	4	2	3	24	3
K23	Totalreflexion durch Kontakt aufgehoben	1	2	4	3	3	3	4	2	22	5

Tabelle 4.1: 2.Klassifizierungsteil der Scheinwerfer-Konzeptideen

Klassifikation		KL1	KL2	KL3	KL4	KL5	KL6
		Medium der Lösung	Komponente / Gesamtkonzept	monochrom. Licht / „weißes“ Licht	Variabilität, Dimension, analog / digital	Variables Optikelement	LSV-Erzeugung
Nr.	Konzept						
K24	Cartesische Taucherblende	Flüssig	Komp.	w	gering, 2F, a	Blendenreihe	s
K25	Flüssigkeitsoptik	Flüssig	Ges.	w	gering, 1F, d	Optikelement	u
K26	akustooptischer Effekt	Flüssig	Komp	m	gering, 1F, a	Optikelement	u
K27	Zentrifugenoptik	Flüssig	Ges.	w	gering, 1F, a	Optikelement	u
K28	Aktive Hydraulikblende	Flüssig	Komp	w	gering, 2F, a	Blendenreihe	s
K29	Kapillarblende	Flüssig	Komp	w	gering, 2F, a	Blendenreihe	s
K30	Magnetorheologische Flüssigkeiten	Flüssig	Ges.	w	gering, 2F, a	Optikelement	u
K31	Kerr- und Pockelszelle	Fest	Komp	w	gering, 2F, d	Optikelement	s
K32	elektrochrome Schichten	Fest	Komp	w	gering, 2F, a	Blenden-scheibe	s

Tabelle 4.1: 2.Bewertungsteil der Scheinwerfer-Konzeptideen

Bewertung		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	G1	G2
		Variabilität / Freiheitsgrade	Bauraum Gesamt-system / Komponen-te	Vibrationsunem-pfindlichkeit	Temperaturun-empfindlichkeit	Toleranzen / Reproduzierbarkeit	Herstellbarkeit / Fertigung	Innovationsgrad	Ansteuerungselekt-ronik / Elektrik	Gesamturteil	Rangfolge
Nr.	Konzept										
K24	Kartesische Taucherblende	2	2	2	2	3	2	4	3	20	7
K25	Flüssigkeitsoptik	1	1	3	2	3	2	4	1	17	10
K26	akustooptischer Effekt	1	2	2	3	2	2	3	1	16	11
K27	Zentrifugenoptik	1	1	1	3	3	1	3	2	15	12
K28	Aktive Hydraulikblende	2	2	3	3	3	1	3	2	19	8
K29	Kapillarblende	2	3	1	2	2	2	4	1	17	10
K30	Magnetorheologische Flüssigkeiten	1	1	1	3	2	4	3	2	17	10
K31	Kerr- und Pockelszelle	1	2	4	4	2	2	3	1	19	8
K32	elektrochrome Schichten	2	3	4	2	3	3	3	4	24	3

Tabelle 4.1: Bewertungsskalen der Scheinwerfer-Konzeptideen

	B1	B2	B3	B4
	Variabilität / Freiheitsgrade	Bauraum Gesamtsystem / Komponente (je getrennt bewertet)	Vibrationsunempfindlichkeit	Temperaturunempfindlichkeit
4	sehr hoch	sehr gering	sehr hoch	sehr hoch
3	hoch	gering	hoch	hoch
2	mittel	mittel	mittel	mittel
1	gering	hoch	gering	gering
0	ungenügend	sehr hoch	ungenügend	ungenügend

	B5	B6	B7	B8
	Toleranzen / Reproduzierbarkeit	Herstellbarkeit / Fertigung	Innovationsgrad	Ansteuerungselektronik / Elektrik
4	gering / sehr hoch	Großserie	sehr hoch	sehr einfach
3	mittel / hoch	Mittelserie	hoch	einfach
2	hoch / mittel	Kleinserie	mittel	mittel
1	sehr hoch / gering	Einzelstücke	gering	komplex
0	ungenügend	zu hoher Aufwand	Serie	sehr komplex

Basierend auf der Tabelle 4.1 sind die folgenden Scheinwerferkonzepte nach der Gesamtbewertung G1 und der Rangfolge G2 ausgewählt worden: Neben der Gesamtbewertung G1 war für die endgültige Auswahl die Bewertung B1, der Grad der Variabilität der Lichtverteilung bzw. der Freiheitsgrade, und die Bewertung B7, der Innovationsgrad, von großem Gewicht für die weitere Scheinwerferentwicklung. Die Bewertung B1, Grad der Variabilität stellt sicher, dass der Scheinwerfer ausreichend viele Freiheitsgrade besitzt, um die zahlreich geforderten Lichtverteilungen formen zu können. Mit der Bewertung B7, dem Innovationsgrad, wird sichergestellt, dass der Forschungs- und Know-howvorsprung der Konzepte möglichst lange sichergestellt werden kann. Daher sind die in der Gesamtbewertung gut dastehenden Konzepte K 8 Schwenkspiegel, K10 Mehrere Lichtquellen, K12 Lichtleiterscheinwerfer, K14.1 Mikrooptikscheinwerfer und K15 Freiformlinse + Shutter aufgrund ihrer begrenzten Freiheitsgrade nicht weiter verfolgt worden. Technologische Risiken bei K32 Elektrochrome Schichten, K14.1 und K15 und die Patentlage bei K8 Schwenkspiegel und in Teilen bei K22 Revolver /gestaffelte Linse unterstützten die Entscheidung, diese Konzepte nicht weiter zu verfolgen. Hauptfokus der weiteren Arbeit sind daher die Hauptkonzepte K2 Digitale Projektion, K3 Analoge Projektion, K4 Scanner und K5 LCoS / LCD-Konzept, basierend auf Ihren Freiheitsgraden und dem Innovationsgrad geworden. Das Konzept K7 Flexprisma wurde als seriennaheres Nebenkonzept ebenfalls weiter verfolgt.

4.4 Morphologie der Lösungselemente

Nachdem diese Konzeptvorschläge, basierend auf intuitiven Methoden, in Kapitel 4.2 dargestellt und in Kapitel 4.3 bewertet wurden, soll jetzt ein weiterer Lösungskatalog vorgestellt werden, der den diskursiven Methoden zugeordnet werden kann. Dieser basiert auf der Effekte-Datenbank der Software TechOptimizer ™. Teile daraus sind bereits in den Diplomarbeit von Steffen und Michels [8.1, MICHELS, 2001] und [8.7, BERHEIDE, 2004] beschrieben worden.

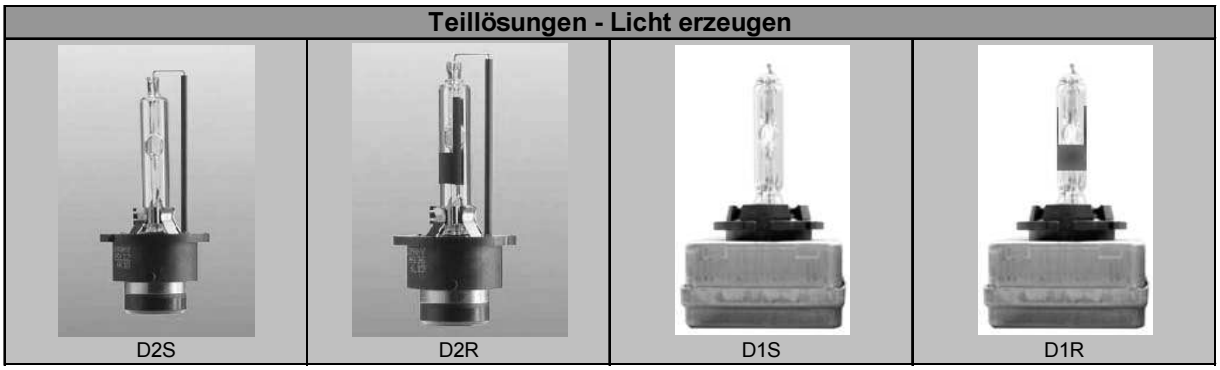


Abbildung 4.13: Teillösungen des Lichterzeugen [8.7, BERHEIDE, 2004]

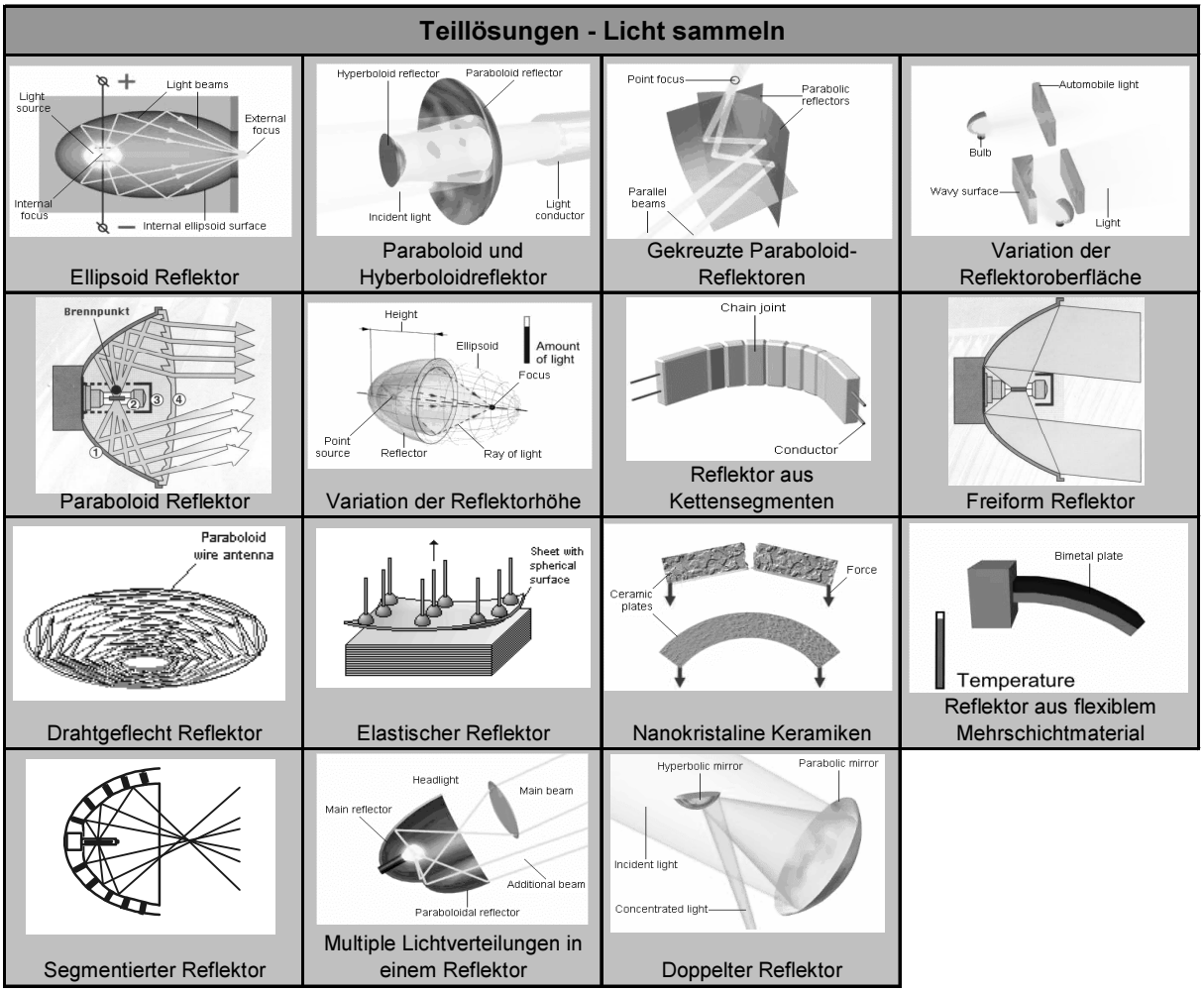


Abbildung 4.14: Teillösungen des Lichtsammelns [TechOptimizer, 2004][8.7, BERHEIDE, 2004], nach[8.1, MICHELS, 2001]

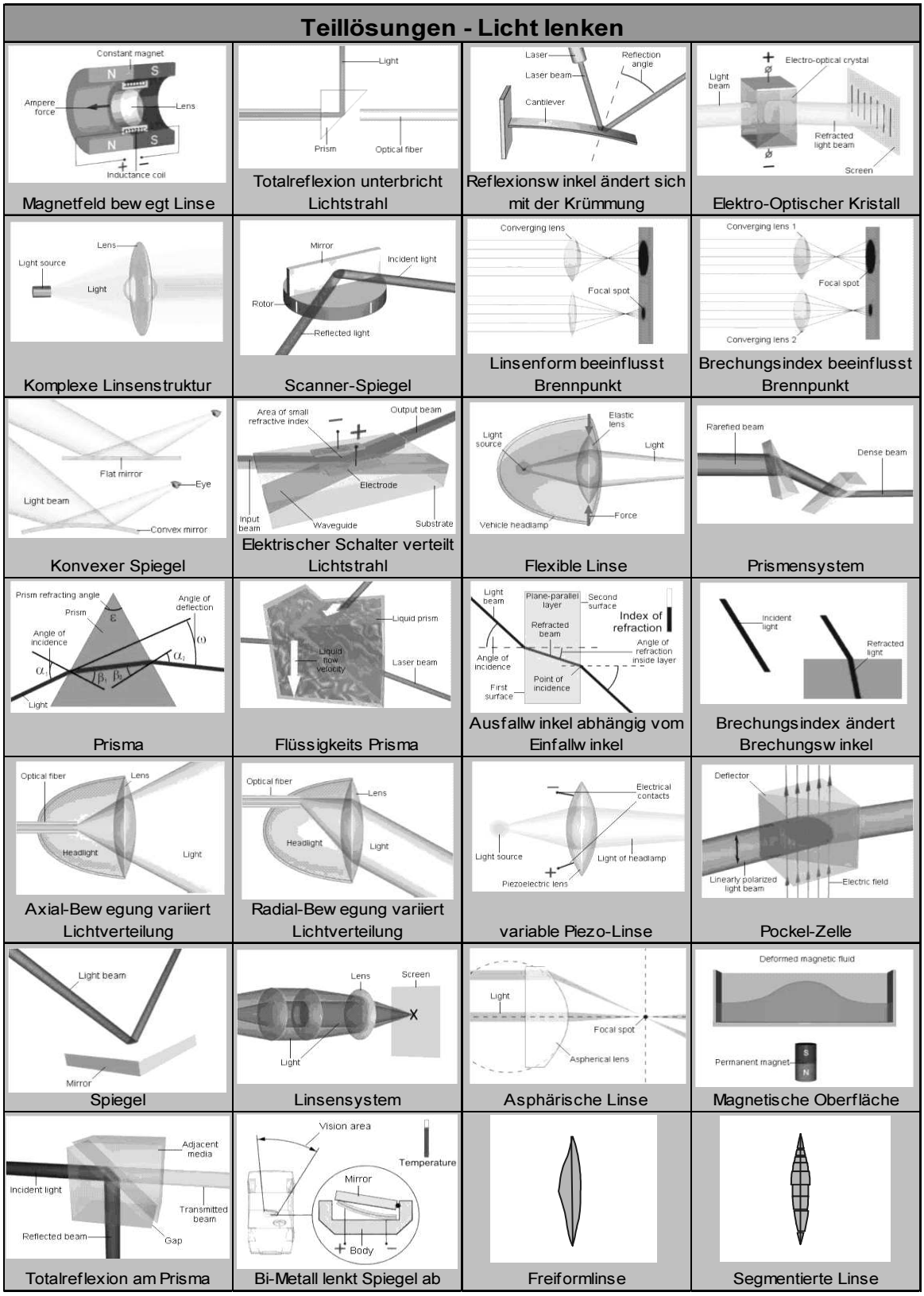


Abbildung 4.15: Teillösungen des Lichtlenkens [TechOptimizer, 2004][8.7, BERHEIDE, 2004], nach [8.1, MICHELS, 2001]

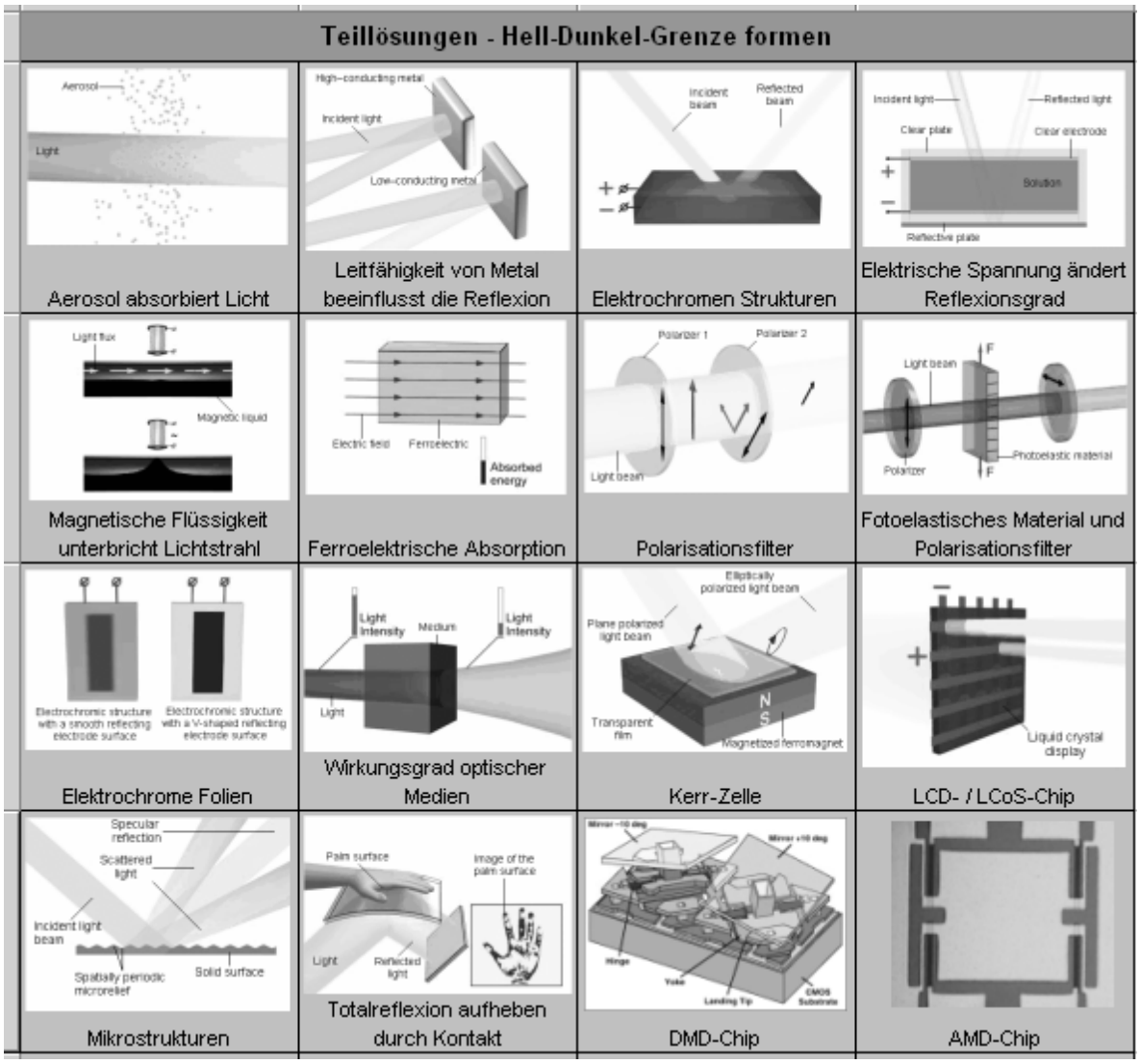


Abbildung 4.16: Teillösungen der Hell-Dunkel-Grenze formen [TechOptimizer, 2004][8.7, BERHEIDE, 2004], nach [8.1, MICHELS, 2001]

4.5 Kombination der Lösungselemente

Ausgehend von der Funktionsstruktur der aktiven Scheinwerfer in Kapitel 3.8 soll hier eine Kombinationstabelle vorgestellt werden, anhand der die Lösungselemente für die aktiven Scheinwerfer-Funktionalitäten ausgewählt werden können. Da die aktiven Scheinwerfer dem Nutzer eine Vielzahl an Lichtverteilungen ermöglichen sollen, ist ein Scheinwerfersystem erforderlich, das einen entsprechend hohen Freiheitsgrad aufweist, der es erlaubt, die Lichtverteilungen gemäß der gewünschten Lichtfunktion zu beeinflussen. Die Freiheitsgrade der Lösungselemente lassen sich in dieser Lösungstabelle multiplizieren. Gleichzeitig sollen die Gesamtsysteme einen hohen Gesamtwirkungsgrad besitzen, der sich ebenfalls aus dem Produkt der Einzelwirkungsgrade der Lösungselemente berechnet.

Tabelle 4.2 zeigt u.a. die Hauptfunktionen Lichtstrom erzeugen, Lichtstrom formen und Lichtstärkeverteilung formen.

Exemplarisch ist mit durchgezogenen Pfeilen ein DMD-Scheinwerfer, mit gestrichelten Pfeilen ein scannender Scheinwerfer und mit strichpunktierten Pfeilen ein LED-Scheinwerfer dargestellt.

Tabelle 4.2, Lösungskombinationen

* ... Abschätzung

Nr.	Kategorie	A-Variante 1	B-Variante 2	C-Variante 3	D-Variante 4	E-Variante 5	Beschreibung
1.	Lichtstrom erzeugen Lampe	Halogenlampe	Halogenlampe	Gasentladungslampe	Kurzbogenlampe	weiße LED	Leistungskenngrößen etc.
		H7	H4 oder H11	D2S, D2R, D1S, D1R	UHP, D2S kurz	Luxeon	
		55	55	35	35 bzw. 220	1	elektr. Leistung[W]
		1100	1100	3200	3200 bzw.14000	30 *	Lichtstrom[lm]
		ca. 30	ca. 30	ca. 90	>ca.90 *	ca. 3 *	Leuchtdichte [Mcd/m²]
		4,2 x 1,2	4,2 x 1,2	4,2 x 1,2 Bogen	1,3 bis 1,0 Bogenlänge	1x1 bzw. 1,2 x 1,2	Wendelgröße[mm³]
		1	2	1	1	1	Freiheitsgrad
		ca. 20 lm /W	ca. 20 lm /W	ca. 90 lm /W	ca. 65 lm /W	ca. 30 lm /W *	Effizienz / Lichtausbeute
2.	Lichtstrom formen						
2.1	Lichtstrom sammeln	Ellipsoid-Reflektor	Paraboloid-Reflektor	Hyperboloid-Reflektor	Halbzylinder-Reflektor	FF-Reflektor	Beschreibung
		Regelgeometrie oder FF-Ellipsoidreflektor	Regelgeometrie oder FF-Paraboloidreflektor	regulärer Hyperboloid-Reflektor mit variiertem Krümmungsradius	Halbzylinder-Reflektor mit variablem Krümmungsradius	Freiform-Reflektor	
		3^n	3^n	3	3	3^n	Freiheitsgrad
		90	90	90	90	90	Reflexionsgrad in %
2.2	Lichtstrom bündeln	Ellipsoid-Reflektor	Paraboloid-Reflektor	Konvex-Spiegel	Halbzylinder-Reflektor	FF-Reflektor	Beschreibung
		Regelgeometrie oder FF-Ellipsoidreflektor	Regelgeometrie oder FF-Paraboloidreflektor	Wölbspiegel mit variiertem Krümmungsradius	Halbzylinder-Reflektor mit variablem Krümmungsradius	Freiform-Reflektor	
		3^n	3^n	2	3	3^n	Freiheitsgrad
		90	90	90	90	90	Reflexionsgrad in %

3.	Lichtstärkeverteilung	Blenden	Schaltspiegel	Polarisationsdreher mit Strahlteilern bzw.	Schwenkspiegel	Spiegelarrays	
	formen	Membranspiegel	Prismen	Polarisatoren	Linsen	FF-Reflektoren	
		reflektiv	refraktiv	diffraktiv	filtern	polarisieren	
3.1	Ausblenden von	ebene Blenden	Blendenwalzen, Blendenscheiben	DMD-Array	LCoS-Array	LCD-Array	
	Lichtstrom	starre Blenden in Reflexions- oder Projektions-Scheinwerfer	Freiform-Blendenwalze im Vario-Xenon-Modul oder rotierende Blendenscheibe	Pixelarray mit digital ansteuerbaren Mikrospiegeln, die über Pulsweitenmodulation die Bildpunkthelligkeit variieren	reflektives LCoS-Array mit pixelweise ansteuerbaren Flüssigkeitskristallen, welche die Polarisationsrichtung drehen	transmittives LCD-Array mit pixelweise ansteuerbaren Flüssigkeitskristallen, welche die Polarisationsrichtung drehen	Subtraktive Lichtverteilungs-Formung
		2	2 x 5	n x m Pixel	n x m Pixel	n x m Pixel	Freiheitsgrad
		100% Luft, 0% Blende	100% Luft, 0% Blende	<= 68%	<=93% / 90%	< LCoS	Wirkungsgrad in %
3.2	Umverteilen von	Schwenk- / Schaltspiegel	Scanspiegel	Membranspiegel	Flexprisma	Linsen / Prismen	
	Lichtstrom	statische Schwenkpositionen um eine oder zwei Raumachsen	scannend, periodische Ansteuerung von Spiegeln in ein oder zwei Raumachsen	stetige Spiegelfläche, die verformt werden kann (vgl. adaptive optics in der Astronomie)	Kippen / Schwenken oder Rotieren von starren Prismenelementen	variable Linsen-Radien (Zoom-Augen-Linse) oder variable Prismenwinkel	Lichtstrom-Umverteilung
		1 bzw. 2	1 bzw. 2	3^n, jedoch stetig	2	3	Freiheitsgrad
		90	ca. 95 *	ca. 90 *	85	ca. 94 *	Reflexions- bzw. Transmissionsgrad in %
4.	Leuchtweitenregelung	mechanisch Gesamtsystem	mechanisch nur Reflektor	mechanisch nur Linse	mechanisch nur Blende	optisch Flexprisma	
		Kippen des Gesamt-Scheinwerfers	Kippen des Reflektors	vertikales Verschieben der Linse	vertikales Verschieben einer Blende	Kippen oder Rotieren von starren Prismenelementen	Beschreibung
		1	1	1	1	1	Freiheitsgrad
		100	100	ca. 80 *	ca. 70 *	85	Wirkungsgrad in %
5.	dynamisches	mechanisch Gesamtsystem	mechanisch nur Reflektor	mechanisch nur Linse	mechanisch nur Blende	optisch Flexprisma	
	Kurvenlicht	Schwenken des Gesamt-Scheinwerfers	Schwenken des Reflektors	seitliches Verschieben / Schwenken der Linse um Abbildungsebene	seitliches Verschieben einer Blende	Schwenken oder Rotieren von starren Prismenelementen	Beschreibung
		1	1	1	1	1	Freiheitsgrad
		100	100	ca. 80 *	ca. 60 *	85	Wirkungsgrad in %

Aus der Lösungskombinationstabelle 4.2 lassen sich folgende Scheinwerfersysteme herausarbeiten: Das Produkt der freien Parameter ist ein Maß für die Zahl der Einflussmöglichkeiten auf die Erzeugung der Lichtverteilung.

Tabelle 4.3: Produkt der freien Parameter und der Wirkungsgrade der aktiven Scheinwerfer

Scheinwerfer-Konzept	Digitale Projektion K2	Analoge Projektion K3	Scanner K4	LCoS-Konzept K5	Flexprisma K7
	Hauptkonzept	Hauptkonzept	Hauptkonzept	Hauptkonzept	Nebenkonzept
Produkt der freien Parameter	$3 \times (2 \times c \times d) \times 3^{2n}$	$3 \times (e^2 \times c \times d) \times 3^{2n}$	$e^2 \times 3^{2n}$	$3 \times (2 \times c \times d) \times 3^{2n}$	e^2
theoretisches Wirkungsgrad-Produkt (ohne Lampe)	0,52	0,55	0,73	0,63	0,85
Erklärung	c = Breite des Arrays, d = Höhe des Arrays, e = Drehstellungen um eine Achse (AMD, Scanner) ; n = Zahl der Stützpunkte bei FF-Reflektor				

4.6 Konzentration auf 4 Hauptkonzepte (K2-K5) und 1 Nebenkonzept (K7)

Bei der Bewertung der Scheinwerferkonzepte haben sich vier Favoriten, die digitale und analoge Projektion, der Scanner und das LCoS-Konzept, herausgestellt. Diese zeichnen sich durch einen hohen Freiheitsgrad in der Gestaltung der Lichtverteilung aus. Zusätzlich sind diese in hohem Maße innovativ. Als seriennäheres Nebenkonzept wurde das Flexprisma ausgewählt, das ebenfalls in dieser Arbeit erforscht und beschrieben werden soll.

4.6.1 Digitale Projektion K2

Bei der digitalen Projektion ist das zentrale Element ein DMD-Array, ein Digital MicroMirror Device der Firma Texas Instruments. Es besteht aus einem Array von z.B. 1024 x 768 Mikrospiegelspalten und –zeilen. Die Mikrospiegel lassen sich jeweils digital um eine diagonale angeordnete Achse schwenken, die in Abbildung 4.17 durch Torsionsfederbänder (hinge) angedeutet werden. Die Adresselektroden (address electrode) dienen zur elektrostatischen Auslenkung der Mikrospiegel-Gegenelektroden bzw. Joche (yoke). Die Mikrospiegel weisen nur zwei stabile Endlagen auf, die in der Abbildung 4.17 dargestellt sind und mit Schaltzeiten <20µs angesteuert werden können. Unter jedem Mikrospiegel befindet sich eine SDRAM-Zelle, die auf dem CMOS-Substrat angeordnet ist und die je nach angelegter Spannung den Mikrospiegel in die Nutzlichtstellung oder in die Absorberlichtstellung auslenkt. In der Nutzlichtstellung wird das Licht von der Lichteinkopplung in die Lichtauskopplung gelenkt. In der Absorberstellung der Mikrospiegel wird das Licht von der Lichtein-

kopplung auf einen Absorber gerichtet. Dabei wird der umgelenkte Lichtstrom komplett in Wärme, d.h. in IR-Strahlung gewandelt, die aus dem optischen Gerät abgeführt werden muss.

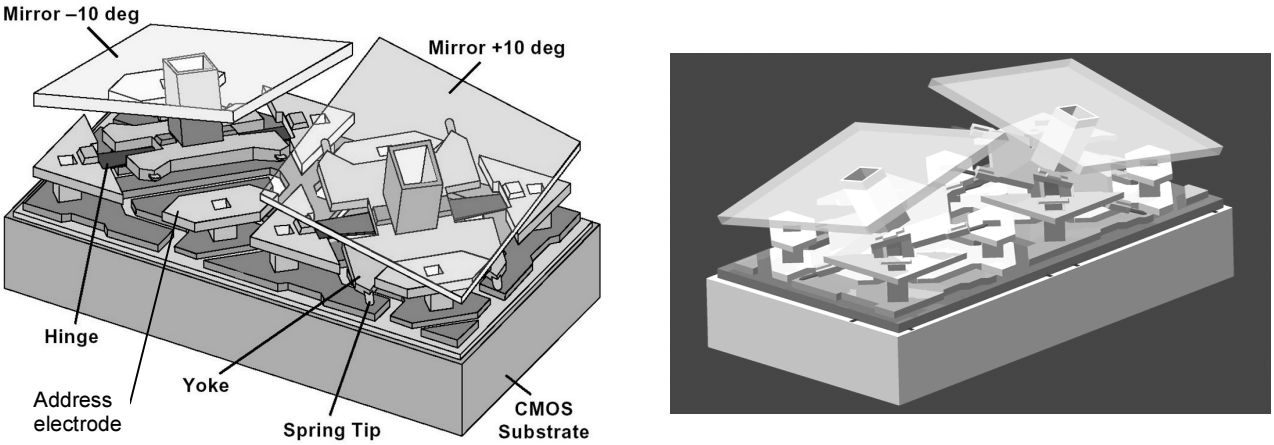


Abbildung 4.17: Aufbau eines digitalen Mikrospiegelarrays [TI]

In [8.2, Texas Instruments, TI 2001-1] werden Hinweise zur Haltbarkeit der in Dünnschichttechnologie hergestellten Torsionsgelenke der DMD-Chips gegeben. Durch die Anwendung dieser Technologie werden Verspannungen im Material an der Oberfläche des Torsionsfilms abgebaut. Ein Festkleben der Mikrospiegel durch Feuchtigkeit und Van der Waals-Kräfte wird vermieden durch eine Anti-Haft-Beschichtung und durch kleine Mikrofedern (spring tip), die Verformungsenergie in den Spiegelendlagen speichern und dadurch die Spiegel bei ihrer Rückbewegung beschleunigen. Eine Versiegelung der Mikrospiegel in einer trockenen, staubfreien Atmosphäre verhindert das Eindringen von Feuchtigkeit und Schmutz und damit ein Verkleben und eine Blockade. Die Haltbarkeit der Mikrospiegel bei Vibrationsuntersuchungen wird durch deren kleine Masse – sie wird in Millionstel Gramm gemessen – und deren niedrigster Eigenfrequenz begründet [8.2, TI 2001-2]. Die Einwände zu Qualitätsbeeinträchtigungen der Mikrospiegel durch hohe Kippgeschwindigkeiten und daraus resultierender Beschädigungen werden durch mittlere Geschwindigkeiten von 40cm/s und Spiegelbewegungen von 2µm in 5µs ebenfalls entkräftet. Die umfangreichen Tests zur Dauerhaltbarkeit der Mikrospiegel haben Lebensdauern von >100.000h und mehr als 1 Trillion Spiegelschaltzyklen nachgewiesen [8.2, TI 2001-2].

4.6.2 Analoge Projektion K3

Im Gegensatz zum DMD-Array handelt es sich beim AMD-Array um ein Mikrospiegelarray, bei dem die Mikrospiegel nicht nur digital zwischen zwei Endlagen sondern analog in beliebige Schwenkwinkel bewegt und angehalten werden können. Als Aufbaukonfigurationen werden Anordnungen mit zwei senkrecht zueinander stehenden Schwenkachsen gegenüber Anordnungen mit nur einer Schwenkachse bevorzugt. Diese erlauben zwei unabhängig voneinander stattfindende Schwenkbewegungen der Mikrospiegel, die deutlich mehr Freiheitsgrade in der Modellierung der Lichtverteilung erlauben. Im Abbildung 4.18 ist deren

prinzipieller Aufbau dargestellt. An der zentralen Spiegelfläche sind an deren Ecken 4 Bi-Material-Biegeaktoren (schwarze Streifen) angelenkt, die jeweils einzeln verformt werden können, wodurch ein Neigen der Spiegelfläche um jeweils senkrecht zueinander stehende Schwenkachsen möglich ist. Weitere Angaben zu den analogen Mikrospiegeln (AMD) sind in Kapitel 5.4.3 nachzulesen.

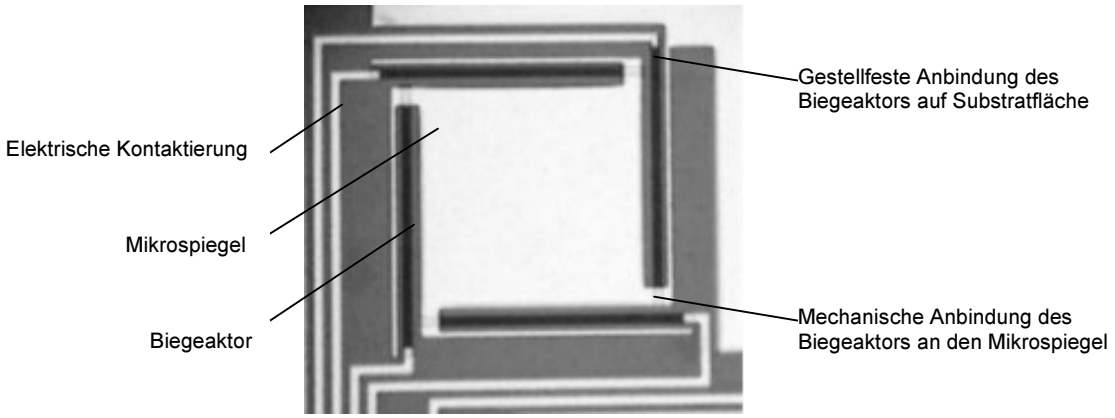


Abbildung 4.18: Aufbau eines analogen Mikrospiegelarrays [FG Sensorik, Uni Paderborn]

4.6.3 Scannender Scheinwerfer K4

Der scannende Scheinwerfer erzeugt die Gesamtlichtverteilung durch die Überlagerung einer statischen Grundlichtverteilung mit einer scannend erzeugten Zusatzlichtverteilung. Die Zusatzlichtverteilung kann je nach Scanstrategie z.B. zeilenweise, mäanderförmig oder in elliptischen Scanstrahlbahnen erfolgen. Da die Scanstrategien mit hohen Wiederholfrequenzen abgefahren werden, wird vom menschlichen Auge nur die resultierende Belichtung bzw. Beleuchtungsstärke wahrgenommen. Der scannende Anteil der Lichtverteilung wird durch zwei unabhängig voneinander schwenkbare Drehbewegungen eines oder mehrerer Scannerspiegel abgelenkt, siehe Abbildung 4.19.

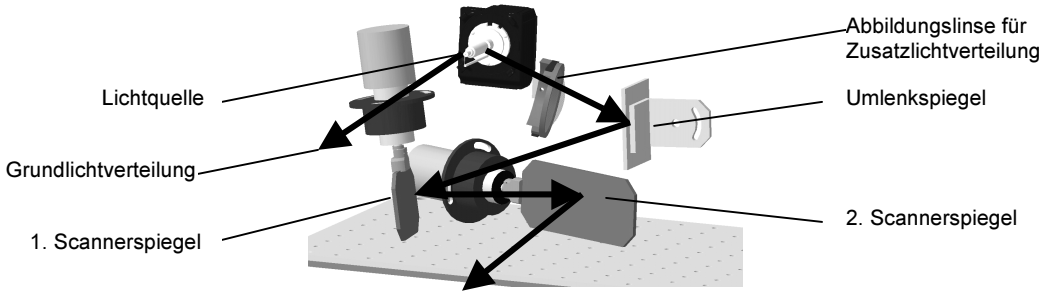


Abbildung 4.19: Aufbau einer scannenden Spiegelanordnung

4.6.4 LCoS-Scheinwerfer K5

Der LCoS-Scheinwerfer besteht aus einem reflektiven LCD-Display. Die Entdeckung und Beschreibung von flüssigen Kristallen erfolgte bereits 1888 durch Prof. Friedrich Reinitzer in Prag. Ein auf dieser Basis entwickeltes Anzeigegerät entstand erstmals 1918. Im Jahre 1968

wurde die Technik wieder aufgegriffen und bis zum heutigen Stand weiterentwickelt. Die Bestandteile der Flüssigkeitskristallanzeige (LCoS – Liquid Crystal on Silicon Displays) sind in Abbildung 4.20 dargestellt.

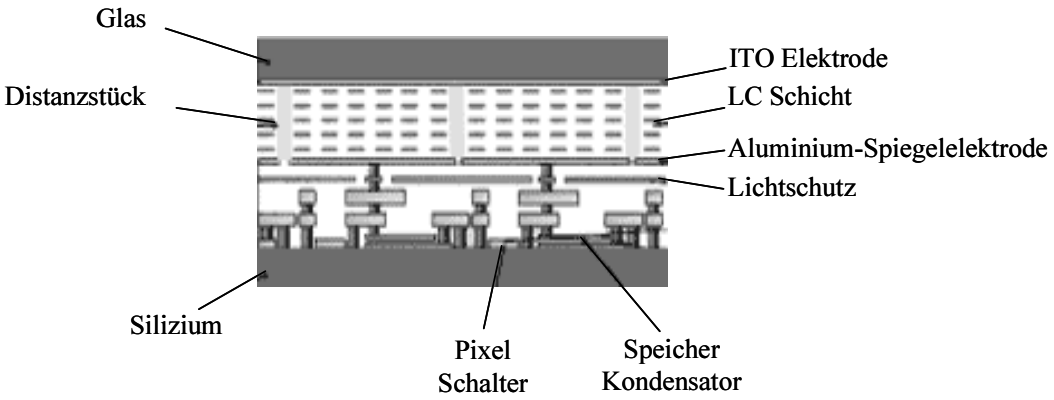


Abbildung 4.20: Aufbau eines Liquid Crystal on Silicon Displays [8.2, WU, 2001]

Flüssigkristalle:

Flüssigkristalle bestehen aus organischen Substanzen. Deren Moleküle werden aus zwei oder mehreren linear verketteten Benzolringen gebildet, an denen gestreckte Molekülgruppen angelagert sind. Ihre Gesamtgröße beträgt ca. 2nm Länge und 0,5nm Durchmesser. Phenylcyclohexane werden oft in LCDs eingesetzt. Die Kristalle liegen in der Mesophase vor, d.h. sie befinden sich in einem Temperaturintervall zwischen der Schmelztemperatur T_S und unterhalb der Klärpunkttemperatur T_K [8.6, PEDROTTI, 2002]. In diesem flüssigkristallinen Zustand besitzen sie sowohl Fließverhalten als auch anisotrope Eigenschaften. In der Mesophase werden drei Phasen unterschieden: smektisch, nemantisch und cholesterisch. In der smektischen Phase weisen die Moleküle alle die gleiche Richtung auf und ihre Schwerpunkte sind in Schichten gleichen Abstandes angeordnet. In dieser Phase der hohen Viskosität der Flüssigkeit können die Schichten gegeneinander verschoben werden. In der nemantischen Phase liegen die Molekülschwerpunkte in für Flüssigkeiten typischer unregelmäßiger Anordnung vor, die Richtung der Moleküle ist allerdings regelmäßig. Werden nemantische Phasen geschichtet und schraubenförmig gegeneinander verdreht, erhält man die cholesterische Phase. Die Ganghöhe g der entstehenden Helix variiert zwischen ca. 0,1 µm und 20µm. Für LCDs werden Flüssigkristalle in der cholesterischen Phase benutzt. Oft wird diese als nemantische Phase mit helixförmiger Anordnung (twisted nematic) bezeichnet. Die Dicke der Kristallschicht in einem LCD beträgt ca. 5µm bis 10µm [8.7, BÜTTNER, 2003].

Glasplatten und Spacer:

Mit Glasplatten, die durch Distanzstücke auf konstanten Abstand gehalten werden, wird die Flüssigkristallschicht eingeschlossen.

Polarisatoren:

Bei konventionellen LCDs sind Polarisationsfilter auf den Außenseiten der Glasplatten angeordnet. Sie sind orthogonal gekreuzt orientiert und lassen zusammen mit der Flüssigkristallschicht nur bei fehlender äußerer Spannung linear polarisiertes Licht hindurch.

Elektroden:

Die äußere Spannung wird durch auf der Innenseite der Glasplatten angeordnete dünne transparente Elektroden aus Indium-Zinnoxid (ITO) angelegt. Durch die mit feinen parallelen Rillen versehene Innenseite der Elektroden werden die länglichen Moleküle parallel zur Transmissionsachse der Polarisatoren ausgerichtet. Die feinen Rillen werden durch unidirektionales Reiben oder Polieren hergestellt.

TFT (Thin Film Transistor) und Black Matrix:

Jedes Pixel des Displays wird durch einen MOSFET-Transistor beschaltet, der von einer Zeilenelektrode und einer Spaltenelektrode adressiert wird. Mit der Black Matrix werden die TFTs für den Betrachter verdeckt. Deren Anordnung ist allerdings bei genauer Betrachtung sichtbar. Die Anordnung der TFTs und der Black Matrix sorgt für einen geringeren Flächennutzungsgrad der LCDs im Vergleich zu den LCoS-Displays.

Liquid Crystal on Silicon (LCoS):

Vor ca. 15 Jahren startete die Firma Philips die Forschung an der LCoS-Technologie, mit der das Gewicht, das Volumen und der Stromverbrauch von mobilen Systemen verringert werden sollte [8.2, ZIMMERMANN, 2000]. Im Vergleich zu den DMD-Kippspiegeln von Texas Instruments wurde ein günstigerer Preis angestrebt. LCoS-Panels sind sehr vielseitig einsetzbar. Sie werden in Projektoren, Rückprojektionsfernsehern, optischer Messtechnik, in adaptiven Beleuchtungen, lithografischen Belichtungssystemen und weiteren Projektionssystemen eingesetzt [8.2, FRAUNHOFER IOF, 2002]. Die hohe Auflösung (XVGA bis HDTV), kombiniert mit der geringen Baugröße und dem sehr guten Preis-Leistungs-Verhältnis, zeigt das Potenzial dieses Systems [8.2, LOEHNEYSEN, 2001]. Der Elektronik-Hersteller JVC hat eine vergleichbare LCoS-Technologie, die noch ein höheres Kontrastverhältnis aufweist. Sie wird als D-ILA (Digital-Image Light Amplification) bezeichnet.

4.6.5 Flexprisma K7

Das Flexprisma ist ein variabler Prismenkörper, dessen äußere, optisch aktiven, ebenen Grenzflächen zueinander in ihrer Neigung variabel eingestellt werden können, Abbildung 4.21. Die Breite der Prismenbasis ist beim Flexprisma abhängig von der Neigung der optisch aktiven Grenzflächen. Da für eine optische Lichtablenkung das Prisma eine höhere optische Dichte haben muss als das Umfeld des Flexprismas, ist es erforderlich, dass ein optisch dichteres Medium zwischen den optisch aktiven Grenzflächen angeordnet wird. Dieses Medium kann ein Gas, eine Flüssigkeit, eine gelartige Masse oder mehrere Festkörper sein,

deren benachbarte Grenzflächen optisch inaktiv auszuführen sind. Neben parallelen Planflächen lassen sich konzentrische Kugelflächen oder Zylinder- mit Zylinderwannenflächen einsetzen, die durch ihren geringen Versatz nur für eine leichte Weitung bzw. Bündelung der Lichtverteilung sorgen.

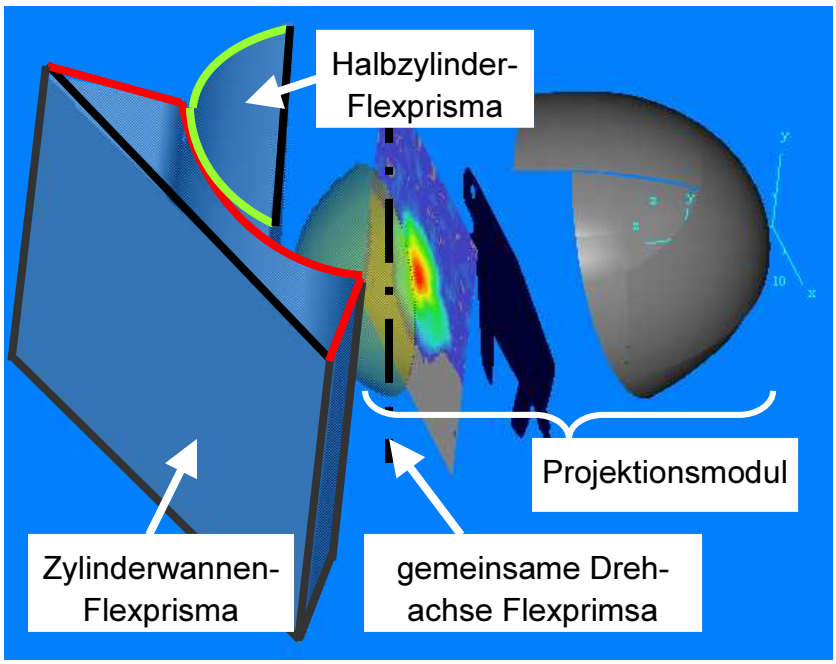


Abbildung 4.21: Flexprisma mit variabler Neigung der Prismenflächen

4.7 Etendué – Helmholtz-Lagrange'sche Invariante

Bei der Dimensionierung von optischen Systemen ist das Etendué [8.6, GALL, 2004] (Synonyme sind die Begriffe des geometrische Flusses oder der Helmholtz-Lagrange'schen Invariante) ein begrenzender Faktor für die Leistungsfähigkeit optischer Systeme. Ausgangspunkt der Dimensionierung ist die Lichtquelle, die idealisiert eine Punktlichtquelle darstellt, in der Realität allerdings als ein ausgedehnter Volumenstrahler ausgebildet ist. Die Abmessung und die Ausdehnung des Lichtquellenbildes wird über die Abbildungsgesetze im Strahlengang vergrößert. Das hat zur Folge, dass die Leuchtdichte der Lichtquelle nie im optischen System gesteigert werden kann.

Das Etendué oder der geometrische Fluss beschreibt dabei als Produkt aus strahlender Fläche und abgestrahltem Raumwinkel, eine Größe, die im optischen System, beginnend von der Lichtquelle in einem idealen optischen System konstant ist. In der Realität wird das Etendué durch jede Abbildung der ausgedehnten Lichtquelle sich stetig vergrößern.[8.2, VERBRUGH, 2003]

5 Synthese

5.1 Projektoren

Als Projektoren werden in dieser Arbeit LCoS-Scheinwerfer, DMD-Scheinwerfer und AMD-Scheinwerfer zusammengefasst, da bei allen eine Array-Anordnung eines variablen Lichtelements eingesetzt wird. Beim LCoS- und beim DMD-Scheinwerfer muss dieses auf die Bildebene abgebildet werden. Beim AMD-Scheinwerfer kann z.T. eine Abbildung eingesetzt werden.

5.2 LCoS-Scheinwerfer

5.2.1 Funktionssynthese

Der LCoS-Scheinwerfer basiert auf einem reflektiven LCD-Display, das je nach angelegter Spannung das einfallende polarisierte Licht unverändert reflektiert oder dessen Polarisationsrichtung dreht.

Als Grundvoraussetzung ist die Erzeugung von polarisierendem Licht zu nennen. Dabei muss unterschieden werden zwischen optischen Elementen, die Licht mit einem geänderten Polarisationszustand bereitstellen, den Polarisatoren, und den Analysatoren, die zum Nachweis oder der Untersuchung von polarisiertem Licht dienen. Polarisatoren für zirkular und elliptisch polarisiertes Licht werden Phasenplatten genannt. [8.6, HAFERKORN, 2003]

Der LCoS-Scheinwerfer besteht aus folgenden Funktionselementen:

1. Lichtquelle mit Reflektor
2. (optional Homogenisator)
3. Polarisator
4. Lichtkonzentrator
5. polarisierender Strahlteilerwürfel
6. LCoS-Chip
7. Auskoppeloptik

Ihr funktionaler Zusammenhang ist in Abbildung 5.1 dargestellt:

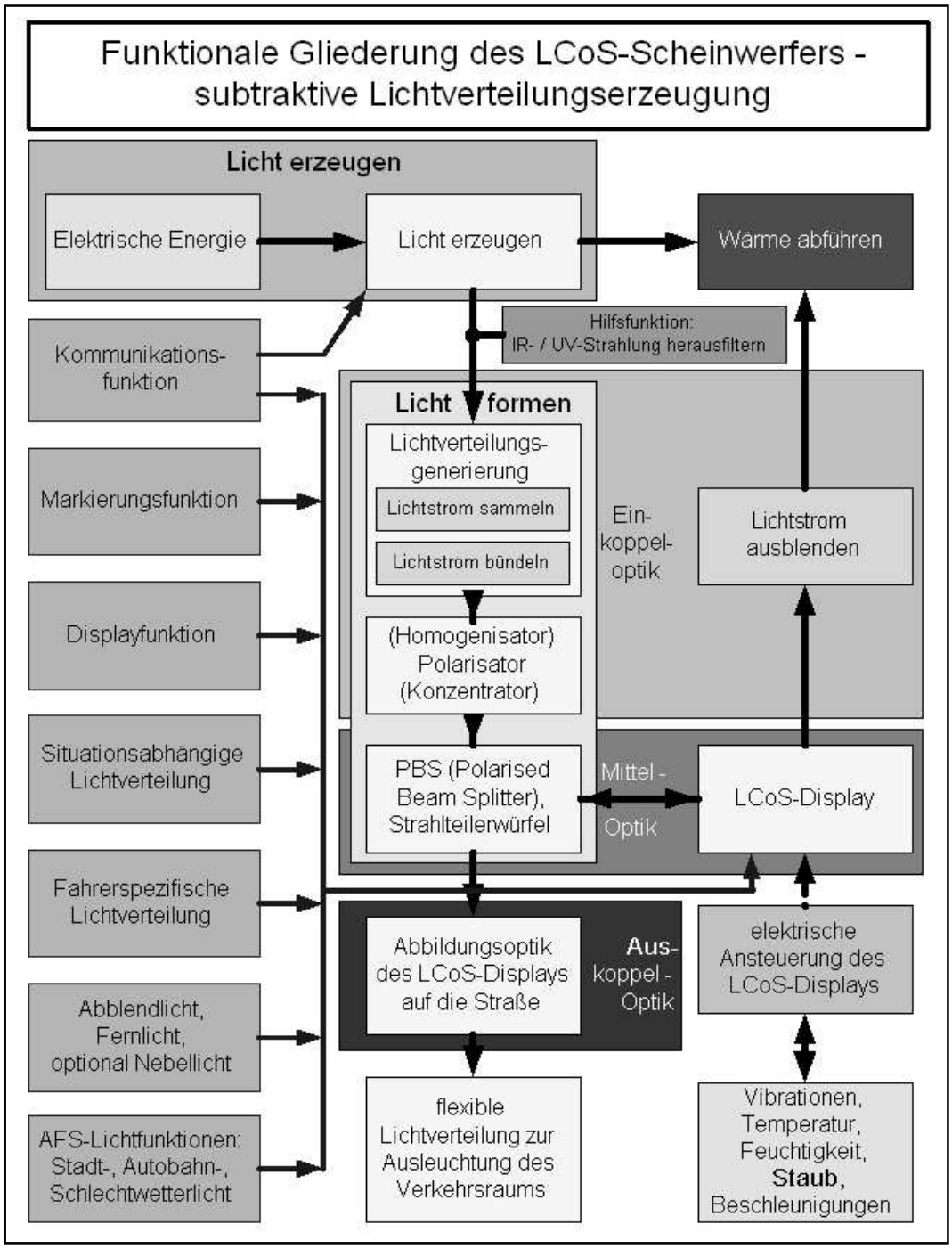


Abbildung 5.1: Funktionsstruktur des LCoS-Scheinwerfers

Die Funktionselemente haben folgende Aufgaben: Der Lichtstrom der Lichtquelle wird über einen Reflektor gebündelt und in Richtung des Homogenisators gelenkt. Der Homogenisator lenkt den gebündelten Lichtstrom annähernd gleichmäßig auf den ersten Polarisator. Dadurch soll der Lichtstrom so effizient wie möglich polarisiert werden bei gleichmäßig geringer thermischer Belastung des Polarisators.

Polarisator

Der Polarisator hat die Aufgabe, das einfallende Licht so effizient wie möglich zu polarisieren. Hierzu ist es erforderlich, nicht nur eine Richtung des polarisierten Lichts, sondern möglichst beide linearen, senkrecht zueinander stehenden Polarisationsanteile des einfallendes Lichtes zu verwenden. Hierzu wird einer der linearen Polarisationsrichtungsanteile mit einer $\lambda/2$-Platte gedreht und mit dem anderen linearen Polarisationsanteil kombiniert. Dadurch liegt nur noch eine Polarisationsrichtung vor. Der Aufbau des Polarisators wird in Abbildung 5.2 gezeigt. Von links kommend wird der Polarisator mit Strahlenbündeln zweier Polarisationsrichtungen bestrahlt. Der Lichtstrom wird polarisationsrichtungsabhängig über die erste geneigte Prismenfläche aufgetrennt. Der aufgetrennte Teil des Lichtstroms wird an der zweiten geneigten Prismenfläche umgelenkt und durch eine $\lambda/2$-Platte in der Polarisationsrichtung gedreht und mit der bereits polarisiert transmittierten Komponente des Lichtstroms rekombiniert.

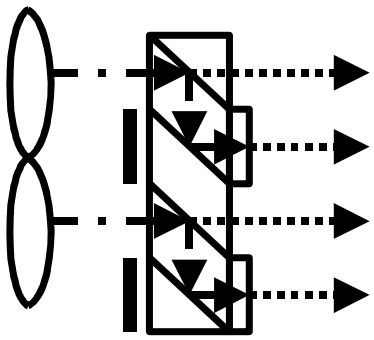


Abbildung 5.2: Rekombinations-Parallelogramm-Prismen-Polarisator

Teilweise gibt es LCoS-Videoprojektoren-Aufbauten, die noch einen zweiten Polarisator unmittelbar direkt vor dem Polarisationsstrahlteilerwürfel aufweisen. Dadurch wird der Polarisationsgrad der Polarisation des einfallenden Lichts erhöht.

Folgende fünf Ausführungsformen von polarisierenden Funktionselementen sind bekannt [8.6, HAFERKORN, 2003]:

1. Polarisationsprismen (doppelbrechende Kristalle)
2. Polarisationsfilter (dichroitische Stoffe)
3. Interferenzpolarisatoren (Systeme aus dünnen Schichten)
4. Reflexionspolarisatoren (reflektierende oder durchlässige Grenzflächen)
5. Phasenplatten (doppelbrechende planparallele Platten)

Polarisationsprismen

Bei den Polarisationsprismen werden verschiedene Bauformen unterschieden, deren Elemente in den meisten Fällen mit Kanadabalsam gekittet sind. Dieser optisch transparente Kitt ist jedoch nur begrenzt temperaturbeständig, wodurch sich im Scheinwerferbau Probleme auftun können. Die zur Herstellung von Polarisationsprismen verfügbaren Einkristalle mit homogenen optischen Eigenschaften ermöglichen nur relativ geringe Lichtstrahlenbündel-Querschnitte. Die Einkristalle sind zusätzlich relativ teuer. Der maximale Konvergenzwinkel des Lichtbündels, das durch die Polarisationsprismen geleitet werden kann, ist je nach Aufbau zwischen 8° und 31° (42°) begrenzt. Teilweise kann die relativ lange Baulänge der Prismen für den Einbau in einen Scheinwerfer problematisch sein. Als typische Prismenformen sind das Glan-Thompson'sche Prisma, das relativ lang baut und die wesentlich kürzer bauenden Prismen von Rochon, Sénarmont und Wollaston zu nennen. Beim Dove-Prisma ist der Aufbau sehr einfach und bei ihm wird der Strahlengang um 90° gefaltet. Bei den doppelbrechenden Polarisationsprismen wird der Lichtstrom zu beinahe 50% ausgenutzt. Dabei treten nur geringe Reflexions- und Absorptionsverluste auf [8.6, HAFERKORN, 2003]. Problematisch ist bei den meisten Prismen der geringe Winkel zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl. Der Polarisationsgrad der Teilstrahlen ist ebenfalls eine entscheidende Größe für die Verwendbarkeit der Prismen. Beim Fresnelschen Parallelepiped wird durch zweifache Totalreflexion zirkular polarisiertes Licht erzeugt.

Polarisationsfilter

Die Polarisationsfilter sind den Flächenpolarisatoren zuzuordnen. Sie bestehen aus dichroitischen Stoffen, die einen großen Unterschied des Absorptionskoeffizienten zwischen dem ordentlichen und dem außerordentlichen Strahl aufweisen. Bestehen die Flächenpolarisatoren aus einachsigen optischen Kristallen, so ist der Absorptions- und Polarisationsgrad wellenlängenabhängig. Die Flächenpolarisatoren haben eine sehr geringe Baulänge, ein geringes Gewicht, fluchtende optische Achsen und sie lassen sich in relativ großen Durchmessern herstellen. Nachteilig sind die Färbung des Lichts, der unter 1 liegende Polarisationsgrad und die Änderung des Polarisationsgrades bei der Neigung des Polarisationsfilters. Werden Flächenpolarisatoren aus Hochpolymeren hergestellt, so lassen sich bei geeigneter Wahl von Folie und Farbstoff Polarisationsgrade >99% erzielen, allerdings ist bei weißem Licht der Transmissionsgrad nur etwa 30%. Durch ein Einkitten der Folien zwischen Deckgläsern wird der Hygroskopizität der Polarisationsfolie entgegengewirkt. Da die Hochpolymere aus organischen Stoffen bestehen, ist deren Temperaturstabilität ebenfalls begrenzt.

Interferenzpolarisatoren / Reflexionspolarisatoren

Interferenzpolarisatoren werden bei Prismenwürfeln eingesetzt. Sie erhöhen den Anteil des reflektierten, senkrecht zur Einfallsebene stehenden, linear polarisierten Lichtbündelanteils durch die Verwendung von dielektrischen Schichten. Diese Interferenzpolarisationsschichten bestehen abwechselnd aus Schichten mit hoher und niedriger Brechzahl, die zwischen den gekitteten Prismen gleicher Brechzahl angeordnet sind. Hier werden $\lambda/4$-Schichten verwen-

det. Die Brechzahlen des Glases, aus dem die Prismen bestehen, müssen so eingestellt werden, dass die Polarisationswinkel an den Grenzflächen zwischen hoch- und niedrigbrechenden Flächen eingehalten werden.

Die Interferenzschichten müssen auf das breitbandige Spektrum, das bei Scheinwerfern eingesetzt wird, abgestimmt werden bei einer sehr hohen Selektivität zwischen den verschiedenen Polarisationsrichtungen.

Interferenzpolarisatoren sind in ihrem erreichbaren Polarisationsgrad vergleichbar mit anderen Polarisatoren. Die Lichtausbeute ist teilweise anderen Polarisatoren überlegen durch die praktisch vollständige Absorptionsfreiheit und die Möglichkeit der Nutzung von beiden Polarisationsanteilen.

Phasenplatten

Phasenplatten bestehen aus doppelbrechenden, planparallelen Platten, die zur Erzeugung einer Phasendifferenz zwischen senkrecht zueinander schwingenden Wellen eingesetzt werden. Es werden $\lambda/4$-Plättchen, die eine Phasendifferenz von $\delta = \pi/2$ erzeugen, und $\lambda/2$-Plättchen, die eine Phasendifferenz von $\delta = \pi$ hervorrufen, unterschieden. Aus fertigungstechnischen Gründen werden oft ungeradzahlige Vielfache der notwendigen Schichtdicken hergestellt.

Lichtkonzentrator

Der Lichtkonzentrator hat die Aufgabe, die Lichtverteilung so vorzumodellieren, dass die gewünschte Lichtverteilung auf dem LCoS-Chip der maximal möglichen Lichtstärkeverteilung auf der Straße entspricht. Die maximalen Lichtstärken sind bei der Fernlichtverteilung erforderlich. Die Haupt-Gradienten innerhalb der Lichtverteilung werden durch eine gezielte Ausleuchtung des LCoS-Chips erzeugt, wodurch Lichtverluste durch ein teilweises Dunkelblenden des LCoS-Chips in den Chip-Randbereichen vermieden werden.

LCoS-Chip

Der Aufbau eines LCoS-Chips ist ähnlich einem reflektierenden LCD-Panel. Als Unterschied des LCoS-Chip zum LCD-Chip sind einzeln ansteuerbare, pixelförmige Elektroden mit reflektierenden Eigenschaften und eine unterhalb der Elektroden liegende Steuer-Elektronik zu nennen. Gegenüber normalen LCDs hat das den Vorteil, dass das Licht praktisch von der gesamten Oberfläche des Chips reflektiert wird [8.2, MELCHER, 2003]. Der Flächennutzungsgrad der lichtausgesetzten Fläche liegt bei ca. 93% [8.2, HCINEMA, 2003]. Zur genaueren Beschreibung des Aufbaus siehe auch [8.2, WU, 2001].

Das Schaltverhalten der LCoS-Displays bzw. der LCDs ist temperaturabhängig. Dabei steigen die Schaltzeiten von 10°C bis zu –10°C um den Faktor 3 an. Das Schalten von weiß auf schwarz funktioniert schneller als das Schalten von schwarz auf weiß [8.2, 3-5: LCoS-Virtual, 2003]

Bei den LCoS-Displays werden on-axis (Einkoppelwinkel $\alpha = 0°$) und off-axis ($\alpha > 0°$) [8.9, PHILIPS, 2002] Lichteinkopplungen unterschieden. Die Eigenschaften des LCoS-Chip sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1: Eigenschaften von LCoS-Chips

Daten von LCoS-Chips	[8.2, Sony SXRD-Produkte, 2003; 8.2, Three-Five 1920-chip, 2003]	[8.2, WU,2001]
Kontrast	600:1 (bis 3000:1)	300:1 (bis zu 1000:1)
Umschaltgeschwindigkeit	< 25ms (bis 5 ms)	<16 ms
Pixelgröße	12µm (bis 9µm)	13µm (Lücke 0,5µm)
Reflexion	65 bis 70%	91%
Pixelabstand	0,35µm	
Auflösung	1920 x 1080 Pixel	1365 x 1024 Pixel
Flächennutzungsgrad	-	93%
Format des LCoS-Chips (Chip-Diagonale)	0,78'' (0,53'' bis 0,85'') (je nach Auflösung)	23 mm
Max. Lichtstromsteuerung	-	< 15000 lm

Polarisationsstrahlteiler

Der Polarisationsstrahlteiler (PBS) wird benötigt, um den erforderlichen Kontrast des LCoS-Displays zu erzeugen. Fällt ein Lichtstrahl auf den PBS, Abbildung 5.3, so wird das s-polarisierte Licht (d.h. die Polarisationsrichtung ist senkrecht zur Einfallsebene orientiert) reflektiert und das p-polarisierte Licht (parallel zur Einfallsebene orientiert) wird durch den PBS transmittiert und nicht abgelenkt.

Der Polarisationsstrahlteiler hat die Aufgabe die beiden Polarisationsrichtungen möglichst vollständig in die beiden Abstrahlrichtungen aufzutrennen, damit auch bei dem verwendeten breiten Frequenzspektrum des eingekoppelten, weißen Lichts keine Kontrastverflachung durch teilweise transmittierte Spektralbereiche auftritt.

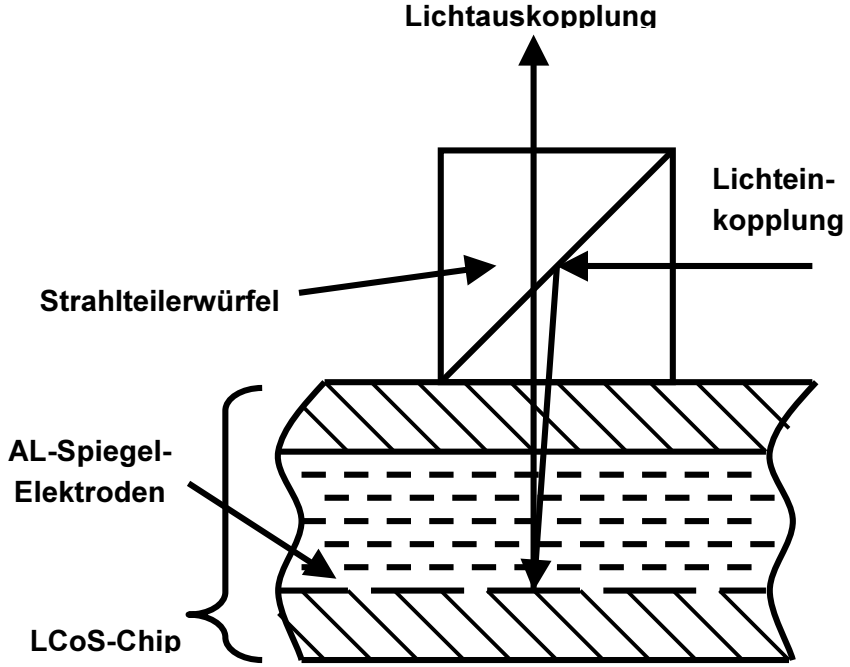


Abbildung 5.3: Schematischer Strahlengang am LCoS-Chip [nach 8.2, PFEIFFER, 2000]

Das eingekoppelte Licht fällt auf den Strahlteilerwürfel, das s-polarisierte Licht wird reflektiert und auf den LCoS-Chip geleitet. Das Licht passiert die transparente ITO-Elektrode und wird im spannungslosen Zustand durch die Flüssigkeitskristallschicht in seiner Polarisationsrichtung gedreht. Danach wird das Licht an den Aluminium-Spiegelelektroden, siehe Abbildung 5.3 reflektiert und erneut durch die Flüssigkeitskristallschicht geleitet. Es liegt nun p-polarisiertes Licht vor, d.h. die Polarisationsrichtung liegt in der Einfallsebene. Das Licht wird durch den PBS hindurchgeleitet und durch die Auskoppeloptik auf die Zielfläche abgebildet. Durch den Einsatz einer $\lambda/4$-Schicht wird die Schwingungsebene des Lichtanteils, der diese Schicht zweimal passiert, um 90° gedreht.

Liegt Spannung an den einzelnen Pixeln des LCoS-Chips an, so wird die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts nicht gedreht. Das reflektierte Licht wird nach dem Passieren des LCoS-Chips in den Einkoppelstrahlengang zurückreflektiert, da es weiterhin s-polarisiert vorliegt.

Unterhalb der Spiegelelektroden, die einen Reflexionsgrad von ca. 91% haben, [8.2, WU, 2001], befinden sich die elektrischen Schaltkreise zur Ansteuerung der einzelnen Pixel. Die elektrischen Schaltungen werden durch einen Lichtschutz vor einfallender Strahlung geschützt. Hierdurch werden Photoströme und die thermische Belastung in der Elektronik reduziert, [8.2, WU, 2001; 8.7, BÜTTNER, 2003].

5.2.2 Modularisierung

Der LCoS-Scheinwerfer kann in folgende Funktionsgruppen, Abbildung 5.1, aufgeteilt werden:

1. Einkopplungsoptik mit

   Lichtquelle, (optionalem Homogenisator), Polarisator und (optionalem Konzentrator)

2. Mitteloptik mit

   Polarisationsstrahlteiler und LCoS

3. Auskoppelungsoptik mit

   Objektiv

Einkoppeloptik

Die Einkoppeloptik besteht aus einer Kurzbogenlampe als Lichtquelle, einem optionalen Homogenisator, einem Polarisator und einem optionalen Konzentrator.

Bei der Einkopplung ist darauf zu achten, dass das eingekoppelte Licht möglichst effizient in polarisiertes Licht gewandelt wird. Das kann nur durch die Nutzung beider Polarisationsanteile des Lichtes erfolgen. Durch die Verwendung einer $\lambda/2$-Platte wird eine Polarisationsrichtung gedreht und anschließend mit dem zweiten linearen Polarisationsanteil kombiniert, wodurch die Gesamteffizienz der Polarisierung auf ca. 80% (Messergebnis) gesteigert werden kann.

Der Homogenisator hat die Aufgabe die Beleuchtungsstärke und damit den Energieeintrag auf dem Polarisator zu vergleichmäßigen. Darüber hinaus wird er eingesetzt, um die Ausleuchtung des Videobildes bei Videoprojektoren möglichst zu vergleichmäßigen. Ein Randabfall wird in dem konventionellen Einsatzfall des LCoS-Videoprojektors nicht gewünscht. Beim Einsatz der LCoS-Technologie im Kfz-Scheinwerfer wird eine Lichtstrom-Konzentration im Zentralbereich der Ausleuchtung benötigt, um die erforderliche Lichtstärke der Lichtverteilung für große Entfernungen zu erzielen. Daher wird nach dem thermisch empfindlichen und damit möglichst gleichmäßig ausgeleuchteten Polarisator ein Lichtkonzentrator in der Einkoppeloptik eingesetzt. Limitierender Faktor bei der Lichtstrombündelung ist dabei das Etendué oder der geometrische Fluss, der innerhalb eines optischen Systems stets ansteigt bzw. im besten Fall konstant gehalten werden kann. Der Abbildungsmaßstab der Kurzbogenlampe auf den LCoS-Chip sollte daher möglichst klein gehalten werden.

Mitteloptik

Ein als Würfel ausgebildeter Polarisationsstrahlteiler hat in der Funktionsgruppe der Mitteloptik die Aufgabe eines polarisationsabhängigen Reflektors, der das eingekoppelte s-polarisierte

Licht möglichst vollständig reflektiert und auf den LCoS-Chip lenkt. Von Vorteil ist seine polarisationsrichtungsabhängige Reflexion bzw. Transmission, auch für den Polarisationsgrad des eingekoppelten aber auch für das ausgekoppelte Strahlenbündel. Sollte das Einkoppelstrahlenbündel nicht vollständig s-polarisiert sein, so wird der restliche p-polarisierte Lichtstromanteil am LCoS-Chip vorbeigeleitet, wodurch der Kontrast des Gesamtsystems möglichst hoch bleibt. Das Maß der polarisationsrichtungsabhängigen Selektivität des Polarisationsstrahlteilerwürfels über den breitbandigen, visuellen Bereich ist die maßgebliche Kenngröße für den Kontrast des LCoS-Scheinwerfers, neben dem Kontrast des LCoS-Displays.

Auskoppeloptik

Die Auskoppeloptik hat die Aufgabe, den LCoS-Chip auf die Straße abzubilden. Hierzu wird ausschließlich das p-polarisierte Licht des LCoS-Chips verwendet, da das s-polarisierte Licht durch den polarisierenden Strahlteilerwürfel abgetrennt und in den Einkoppelstrahlengang zurückgeleitet wurde. Der Strahlteilerwürfel wirkt in der Auskoppeloptik nur als planparallele Platte, da seine Außenflächen parallel sind und die Prismenhälften aus dem gleichen Material hergestellt werden. Mit einer Variation der Abbildungsmaßstäbe durch z.B. zwei Zylinderlinsen in horizontaler und vertikaler Richtung kann das Aspektverhältnis des Chips von 4:3 auf die Erfordernisse der Ausleuchtung der Straße, d.h. z.B. 9:2 (2x 45° horizontal zu -15° + 5° vertikal), angepasst werden.

Die Effizienz des Projektors wird vom Wirkungsgrad der Lampe, dem Polarisations-Konvertierungs-Wirkungsgrad, dem LCoS-Flächennutzungsgrad und dessen Reflexionsgrad sowie dem Wirkungsgrad des Strahlteilerwürfels und von der numerischen Apertur der Projektionslinse bzw. des Abbildungsobjektivs der Auskoppeloptik bestimmt. Eine Bündelbegrenzung durch eine Austrittsblende und damit eine Reduktion der mittleren Bildleuchtdichte ist dabei zu vermeiden.

5.2.3 Dimensionierung

Der LCoS-Scheinwerfer kann, ebenso wie der DMD-Scheinwerfer, aus mehreren Richtungen und von verschiedenen Ausgangspunkten ausgehend dimensioniert werden. Eine „Vorwärts“-Dimensionierung erfolgt ausgehend von der Lampe entlang der Einkoppeloptik. Eine „Rückwärts“-Dimensionierung basiert auf der Ermittlung der lichttechnischen Erfordernisse auf der Straße, von denen dann auf die notwendigen Leuchtdichten und Lichtstärken auf dem LCoS-Chip zurückgerechnet wird. Mit dem dritten Ansatz, der Etendué-Berechnung, wird die Divergenz des Auskoppelstrahlenbündels auf die des Einkoppelstrahlenbündels abgestimmt. Alle drei Ansätze werden in Kapitel 5.3.3, Dimensionierung des DMD-Scheinwerfers, genauer vorgestellt.

Außerdem wird beim LCoS-Scheinwerfer polarisiertes Licht eingesetzt. Dieses wird über einen Polarisator erzeugt, der über zwei Lichtwege beide Polarisationsteile nutzt, davon einen um 90° dreht und dann beide rekombiniert. Der Polarisationsgrad kann über einen Polarisator, der als Analysator eingesetzt wird, ermittelt werden. Jedes weitere Optikelement hinter dem

Polarisator verschlechtert den Polarisationsgrad. Daher werden in LCoS-Videoprojektoren zusätzliche Polarisationsfilter unmittelbar vor dem Polarisations-Strahlteilerwürfel, PBS, eingesetzt. Der PBS hat neben seiner optischen „Weichenfunktion“, je nach Polarisationsrichtung wird der Lichtstrom transmittiert oder an einer inneren polarisationsselektiven Schicht reflektiert und um 90° abgelenkt, die Aufgabe, den Polarisationsgrad der eingekoppelten Strahlenbündel und des ausgekoppelten Strahlenbündels möglichst hoch zu selektieren. Durch eine spektral breitbandige Auslegung des Polarisationsstrahlteilerwürfels und eine hohe Güte in der Selektivität der Polarisationsgrade (polarisationsrichtungsabhängige Reflexion oder Transmission) kann ein hoher Kontrast der LCoS-Lichtverteilung erzielt werden. Ein zusätzlicher Polarisationsfilter zwischen dem PBS und der Auskoppeloptik erhöht auf der einen Seite den Kontrast, auf der anderen Seite weist dieser Filter weitere Transmissionsverluste auf und er reflektiert Teile des Lichts durch Fresnel’sche Reflexionen.

Ein alternativer Aufbau besteht in einer V-förmigen Lichteinkopplung bzw. Lichtauskopplung auf einen LCoS-Chip. Das hat den Vorteil, dass auf einen kostenintensiven PBS verzichtet werden kann. Dafür müssen im Auskoppelstrahlengang und optional im Einkoppelstrahlengang relativ zueinander gedrehte, hochwertige Polarisationsfilter verwendet werden. Diese transmittieren den einfallenden Lichtstromanteil mit der selektierten Polarisationsrichtung und absorbieren bzw. teilweise reflektieren den Lichtstrom mit der senkrecht dazu stehenden Polarisationsrichtung, vgl. [8.9, PHILIPS, 2002]. Da Teile des Lichtstroms absorbiert werden, sind dessen Anforderungen an Temperaturbeständigkeit und an die Kühlung der Polarisationsfilter hoch.

5.2.4 Konstruktiver Aufbau

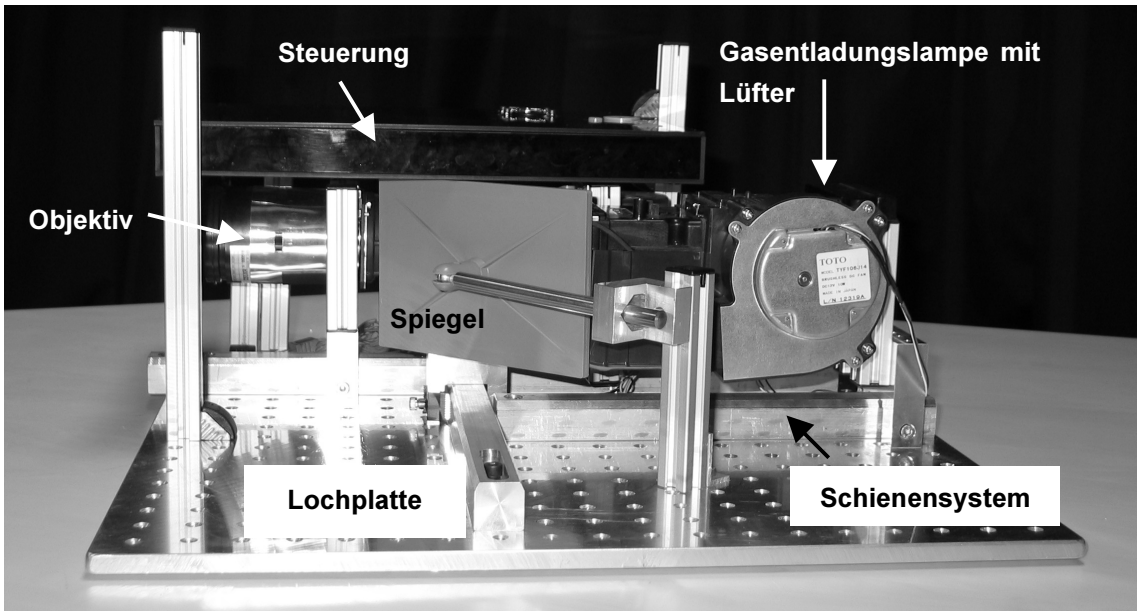


Abbildung 5.4: LCoS-Scheinwerfer, Versuchsträger

Kennzeichen des Versuchsaufbaus, siehe Abbildung 5.4, ist dessen hohe Flexibilität in der Anordnung der Komponenten und deren jeweilige Justierung. Hierzu wurde ein Schienensys-

tem verwendet, das auf einer Lochrasterplatte angeordnet wurde. Auf den quaderförmigen Schienen sind die optischen Komponenten mit U-förmigen Klemmhaltern angeordnet worden. Diese ermöglichen eine Verschiebung in Richtung der optischen Achse und eine in Grenzen mögliche Höhenjustierung der Optikkomponenten senkrecht zur optischen Achse. Zusätzlich ist eine Verkippung der U-Klemmhalter möglich, welche insbesondere bei Reflektoren sinnvoll sein kann. Mit einem quaderförmigen optischen Schienensystem können zusätzlich schnell Komponenten eingesetzt, ausgetauscht oder herausgenommen werden.

Die Klemmhalter haben auch den Vorteil, dass sie eine hohe Stabilität auch gegenüber Erschütterungen und Vibrationen aufweisen. Die Führungslänge der Halter ist allerdings auf die jeweilige Linsenfassungstiefe beschränkt.

Beim Aufbau des LCoS-Scheinwerfers wird zunächst auf die Komponenten eines dafür gekauften LCoS-Videoprojektors für den konventionellen Büroeinsatz zurückgegriffen. Der Scheinwerfereinsatz erfordert dagegen einen robusten Aufbau. Die Lichtfarbe der Scheinwerferlichtverteilung ist weiß. Eine Trennung in Farbanteile ist daher nicht erforderlich. Daher konnten für den Scheinwerfereinsatz überflüssige Komponenten entfernt werden.

Die Ansteuerung der Lichtstärkeverteilung sollte beim Versuchsträger nur in Graustufen erfolgen, wodurch auf die Aufsplittung in mehrere Farbkanäle oder auf die Verwendung eines lichtstromverlustbehafteten Farbrades verzichtet werden konnte. Zusätzlich besitzen Videoprojektoren einen Homogenisator, der die Aufgabe hat, die Lichtstärkeverteilung über das Projektorbild auszugleichen. Die Homogenisierung kann über einen Hohllichtleiter durch Mehrfachreflexion oder über in ihrer jeweiligen Brennweite distanziert angeordnete Mikrolinsenarrays erfolgen. Demgegenüber haben Kfz-Scheinwerfer die Aufgabe, eine hohe zonale Lichtstärke aufzuweisen, die für eine hohe Erkennbarkeitsentfernung erforderlich ist. Daher ist keine Homogenisierung, sondern eine starke Lichtkonzentration auf dem LCoS-Chip erforderlich. Das polarisierte Licht muss daher auch innerhalb der LCoS-Chip-Fläche einen hohen Lichtstärkegradienten aufweisen. Das kann über einen Lichtstromkonzentrator erzielt werden. Dieser kann eine Sammellinse, eine Linsenkombination oder auch eine konvexe, sammelnde Reflexionsoptik sein.

Im Rahmen der Diplomarbeit von [8.7, BÜTTNER, 2003] wurden bei den LCoS-Scheinwerfern die Z- und die L-Anordnungen unterschieden. In den Abbildungen 5.5 und 5.6 ist die Z-Anordnung dargestellt. Diese besteht aus einer UHP-Kurzbogenlampe eingekittet in einem Paraboloid-Reflektor. Dieser lenkt das Licht auf zwei Linsenarrays, die in ihrer jeweiligen Brennweite zueinander angeordnet sind. Die Polarisator-Prismenanordnung schließt sich an, bei der beide Polarisationsanteile zunächst voneinander getrennt, ein Polarisationsanteil gedreht und dann mit dem zweiten rekombiniert werden. Dann wird der Strahlengang mit einem Umlenkspiegel gefaltet und mit den vor- bzw. nachgelagerten beiden Linsen über den Strahlteilwürfel (PBS) auf den LCoS-Chip gelenkt. Die beiden Linsen und der Umlenkspiegel konzentrieren den Lichtstrom auf die kleinere LCoS-Chip-Fläche und sorgen für den Lichtstrom-Gradienten auf ihm. Der LCoS-Chip reflektiert den Lichtstrom,

dreht dessen Polarisationsrichtung und leitet ihn durch den Stahlteilerwürfel (PBS) über die Auskoppellinse auf die Straße. Die Auskoppellinse bildet dabei den LCoS-Chip auf die Straße ab.

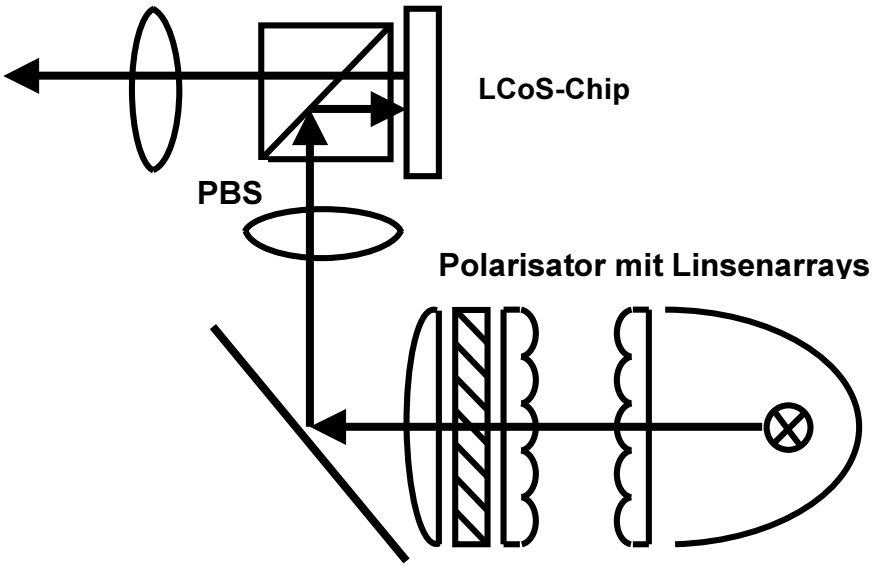


Abbildung 5.5: Z-Anordnung eines LCoS-Scheinwerfers

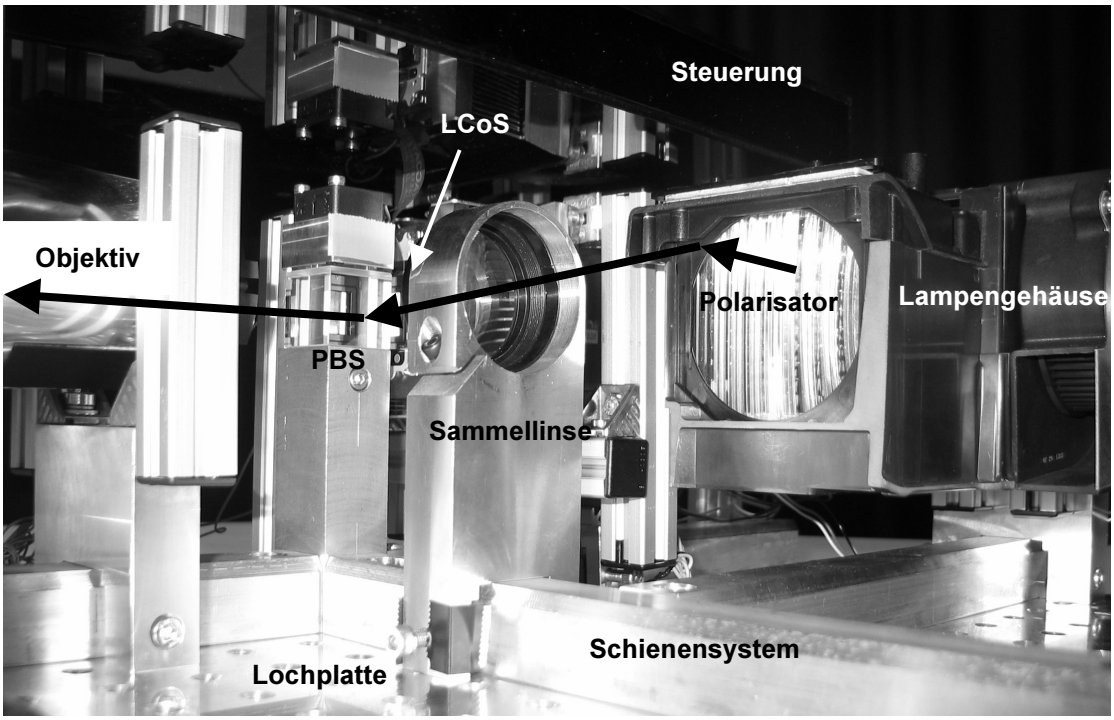


Abbildung 5.6: Optikdesign des LCoS-Scheinwerfers [8.7, BÜTTNER, 2003]

Nachteilig wirkt sich bisher noch die nicht umsetzbare Verlängerung der Zuleitung der LCoS-Chips aus, die eine räumliche Trennung zwischen Optik und Elektronik verhindert.

Der bisher realisierte Platzaufwand der Gesamtanordnung, siehe Abbildung 5.4, ist zu groß. Die Komponenten für die Lichteinkopplung und die Erzeugung von polarisierendem Licht sind daher noch zu verkleinern.

Dennoch wurden Überlegungen zu einem möglichen Scheinwerfer-Serieneinsatz gemacht. Eine Kombination aus einer statischen Grundlichtverteilung und einer variablen, aktiven LCoS-Lichtverteilung sind dabei aus energetischen Gesichtspunkten vorteilhaft. Da sich zukünftige Scheinwerfer nicht mehr ohne die Funktionalität des dynamischen Kurvenlichts verkaufen lassen werden, ist auch für diese Lichtfunktionalität eine technische Realisierung vorzusehen. Das ist erforderlich, da sich die dynamische Kurvenlichtfunktion allen Lichtverteilungen in ihrer Winkelorientierung überlagert (vgl. Seite 102f).

5.2.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit LCoS-Scheinwerfer

Im Rahmen der Einzelkomponentenvermessung des LCoS-Scheinwerfers konnten die erzielbaren Lichtströme und teilweise die maximalen Beleuchtungsstärken ermittelt werden. Aus den Lichtströmen lässt sich die Effizienz des Strahlengangs bis zu der entsprechenden Einzelkomponente berechnen. Die Messwerte und die berechneten Effizienzen sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt worden.

Tabelle 5.2: Leistungseigenschaften der LCoS-Prototypen-Komponenten

Komponente	Lichtstrom	Beleuchtungs-stärke (max)	Wirkungsgrad / Effizienz	Kontrast (4 x 4 Schachbrett)
UHP-Lampe	14.000 lm		100 %	
nach UHP-Lampe, vor Homogenisator	10.700 lm	5.524 lx	76 %	
nach Polarisator, vor Umlenkspiegel	8.824 lm	754 lx	63 %	
Einkoppeloptik, PBS, LCoS, PBS	Optimierungspotenzial			
nach Abbildungsoptik, weißes Bild	852 lm	15,9 lx	6,1 %	1:12,8
LCoS-Videoprojektor, weißes Bild	1.113 lm	11,9 lx	7,9 %	1:88

Wie aus Tabelle 5.2 ersichtlich ist, werden vom Lampenreflektor ca. 10.700 lm erfasst und in die Einkoppeloptik gelenkt. Der Homogenisator und insbesondere der Polarisator arbeiten relativ effizient, da nach dem Polarisator noch 8.824 lm polarisierter Lichtstrom zur Verfügung stehen. Dieser Lichtstrom weist z.T. allerdings eine erhöhte Divergenz auf, bedingt durch die Reflexionen innerhalb der Glasprismen des Polarisators, sodass dieser Teil des Lichtstroms im weiteren Verlauf des Einkoppelstrahlengangs nicht mehr vollständig nutzbar ist. Es besteht weiteres Optimierungspotenzial in der Fokussierung des polarisierten Lichtstroms des Polarisators auf den LCoS-Chip. Damit dieses Potenzial erzielt wird, ist die gewünschte Fernlichtverteilung mit ihrer nötigen Lichtstärke, dem erforderlichen Lichtstrom, und gleichzeitig der gewünschten maximalen Streubreite für z.B. eine Stadtlichtverteilung anzustreben. Wird diese Fokussierung durch einen Freiformreflektor effizient durchgeführt,

so können die Lichtstrom-Verluste am LCoS-Chip reduziert werden. Lichtfunktionsabhängig, d.h. je nach vertikaler Lage der Hell-Dunkel-Grenze, werden die Lichtstromverluste, verursacht durch das subtraktive Lichtverteilungs-Formungsprinzip des LCoS-Scheinwerfes, ansteigen. Dennoch sollten diese für die Fernlichtverteilung minimal werden. Hierzu müssen die Lichtstärken an die Fernlichtverteilung und die Streubreiten an die Stadtlichtverteilung angepasst werden, damit der LCoS-Chip möglichst wenig Lichtstrom zurück in den Einkoppelstrahlengang lenken und dunkel tasten muss.

In dem in LCoS-Technologie erstellten Versuchsträger wurde das prinzipielle Vorgehen für einen LCoS-Scheinwerfer demonstriert, wobei durch weitere Optimierungen der lichttechnische Wirkungsgrad, die Effizienz des Systems und der erzielbare Kontrast zu erhöhen sind. Dazu muss noch eine Freiform-Einkopplungsoptik ausgelegt werden. Zusätzlich ist eine spektrale Erhöhung der Breitbandigkeit des Polarisations-Strahlteilerwürfels erforderlich, da bisher der erzielbare Kontrast, d.h. die polarisationsrichtungsabhängige Selektivität im blau-violetten und im roten Spektralbereich noch nicht ausreichend hoch sind. Es kommt zu einer Kontrastverflachung, da blau-violetter und roter Lichtstrom, der vom LCoS-Chip mit ungedrehter Polarisationsrichtung reflektiert wird, vom PBS transmittiert statt reflektiert wird.

Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit des LCoS-Scheinwerfers mit dem DMD-Scheinwerfer wird in Kapitel in 6.5.1 vorgenommen.

5.3 DMD-Scheinwerfer

5.3.1 Funktionssynthese

Ausgehend von den in Kapitel 3.3 vorgestellten Lichtfunktionen wird in Kapitel 3.8 die Funktionsstruktur zukünftiger aktiver Scheinwerfersysteme beschrieben. Diese Funktionsstruktur wird hier in ihre Hauptfunktionen HF und Teilfunktionen TF zergliedert, damit die notwendigen Komponenten eines aktiven DMD-Scheinwerferssystems daraus abgeleitet werden können, siehe auch Abbildung 5.7:

1. HF: UHP-Lampe zur Lichtstrom-Erzeugung
2. HF: Lichtstrom-Modulation
   - 2.1 TF1: Ellipsoid- oder Paraboloid-Glasreflektor zum Lichtstrom sammeln
     (optional Farbrad zur Erzeugung der Farbkomponenten)
     (optional Homogenisator zum Vergleichmäßigen der Lichtstärkeverteilung)
   - 2.2 TF2: Linsensystem zur Abbildung des Lichtbündels auf den DMD-Chip
   - 2.3 TF3: DMD-Chip zur pixelweisen Lichtstärke-Modulation
   - 2.4 TF4: Objektiv zur Abbildung des DMD-Chips auf die Bildfläche
3. HF: Leuchtweitenregelung LWR+ (vertikal) (optional)
4. HF: dynamisches Kurvenlicht dyn.BL (horizontal) (optional)

Beim DMD-Scheinwerfer erfolgt die Lichterzeugung (1. Hauptfunktion) mit einer UHP-Lampe, die eine sehr kurze Lichtbogenlänge von 1,0mm bis 1,3mm und eine hohe Leuchtdichte aufweist. Die UHP-Lampe ist in einem, zur Erfüllung der 2. Hauptfunktion (Lichtstrom-Modulation) benötigten, hochpräzisen Glasreflektor positioniert. Dieser ist für das visuelle Lichtspektrum (VIS) spektral selektiv reflektierend und für die Infrarotstrahlung (IR) transmittierend. Als Reflektorformen kommen Ellipsoid- und Paraboloid-Reflektoren zum Einsatz. Wie von DMD-Video-Projektoren bekannt, kann optional ein Farbrad eingesetzt werden, das sequentiell die Farben herausfiltert oder eine spektrale Aufsplittung in drei Farbkanäle bewirkt. Mit einem nachgeordneten Hohllichtleiter oder zwei Linsenarrays kann optional eine Homogenisierung des Einkoppellichtbündels vorgenommen werden. Dem Reflektor und den optionalen Komponenten ist ein Linsensystem zugeordnet, welches das homogenisierte Lichtbündel auf einen DMD-Chip bzw. auf bis zu drei DMD-Chips abbildet. Der DMD-Chip bzw. die DMD-Chips dienen der pixelweisen Lichtstärke-Modulation. Der Aufbau, die Funktion und die Ansteuerung des DMD-Chips wurden in Kapitel 4.6.1 be-

schrieben. Schließlich werden die zur Erfüllung der 2.Hauptfunktion benötigten Komponenten von einem Objektiv abgeschlossen, welches die Abbildung des DMD-Chips auf eine Projektionsfläche bzw. auf die Straße projiziert.

Die Leuchtweitenregelung (3. Hauptfunktion) kann durch die Ansteuerung des DMD-Chips per Software erfolgen, wobei nur der unmittelbar auf dem DMD-Chip abgebildete Lichtstrom variiert werden kann. Alternativ kann für eine Leuchtweitenregelung der gesamten

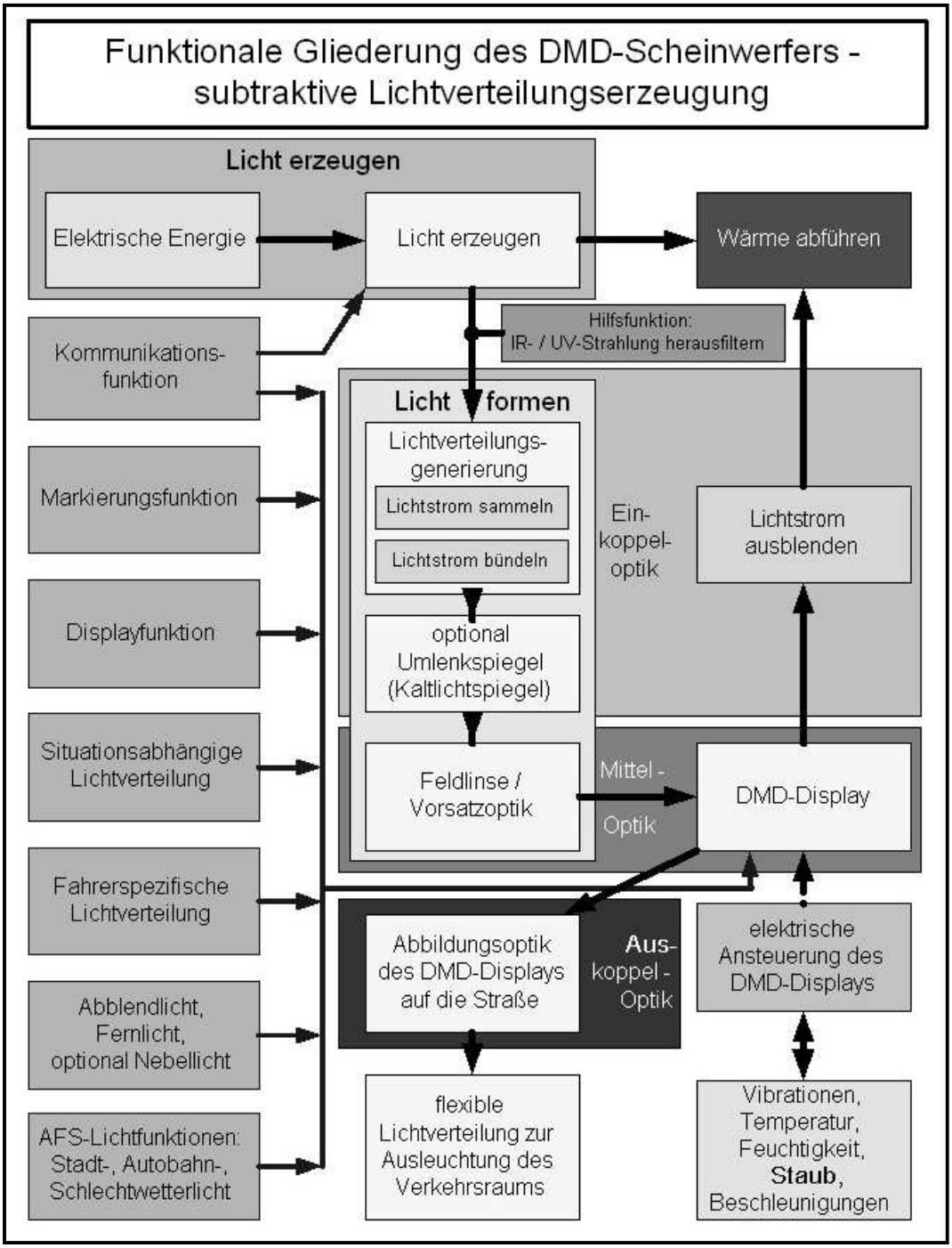


Abbildung 5.7: Funktionsstruktur des aktiven DMD-Scheinwerfers

Lichtverteilung ein mechanisches Verkippen des Gesamtsystems oder nur das Verkippen eines nachgelagerten Spiegels vorgesehen werden. Für das dynamische Kurvenlicht (4. Hauptfunktion) lassen sich ebenfalls mehrere Realisierungsformen mit unterschiedlicher Wirksamkeit und Energieeffizienz beschreiben, siehe das nachfolgende Kapitel.

5.3.2 Modularisierung

Beim DMD-Scheinwerfer lässt sich der Aufbau, wie beim LCoS-Scheinwerfer, in unterschiedliche Module gliedern, denen sich folgende Komponenten zuordnen lassen:

1. Einkoppeloptik mit

   Lichtquelle und Optik zum Lichtstrom sammeln und bündeln

2. Mitteloptik mit

   Feldlinse (optional) und DMD-Chip

3. Auskoppeloptik mit

   Objektiv

Eine Systematik des DMD-Scheinwerfers bezüglich seiner Komponenten, Varianten und Abarten ist in Tabelle 5.3 am Ende dieses Teilkapitels angegeben.

Einkoppeloptik

Als Einkoppeloptik wird die Anordnung der Lampe sowie des Reflektors oder der Reflektoren (z.B. Lampenreflektor und Kaltlichtspiegel) bezeichnet, die den Lichtstrom der Lampe sammeln, umlenken und fokussieren. Zusätzlich können auch Linsen eingesetzt werden, die Zwischenbilder der Lichtquelle auf den DMD-Chip abbilden.

Die Einkoppeloptik hat die Aufgabe der Vormodellierung der Lichtstärkeverteilung des DMD-Scheinwerfers. Sie ist die begrenzende Größe, welche die maximal mögliche Lichtverteilung in Bezug auf die Lichtstärke beim Fernlicht und die Breite der Ausleuchtung beim Stadtlicht vorgibt. Grund dafür ist das subtraktive Funktionsprinzip der Erzeugung der Lichtverteilung des DMD-Scheinwerfers, da ein Anteil der größten gemeinsamen Lichtverteilung durch den DMD-Chip ausgeblendet wird. Die maximale Lichtstärke der Lichtverteilung und der maximale Lichtstrom des Scheinwerfersystems werden durch die Einkoppeloptik maßgeblich definiert. Das Etendué der Einkoppeloptik muss möglichst klein gehalten werden, damit die Lichtverluste im folgenden optischen System durch Beschnitt des Strahlenbündels minimal gehalten werden können.

Mitteloptik

Die Mitteloptik ist Bindeglied zwischen der Einkoppeloptik und der Auskoppeloptik und umfasst mindestens einen die Lichtstärkeverteilung pixelweise modulierenden DMD-Chip.

Die Winkel-Verhältnisse der Ein- und Auskopplung und des Absorberstrahlengangs werden über die Mitteloptik definiert. Diese Winkelverhältnisse haben maßgeblich Einfluss auf den erzielbaren Kontrast, den Gesamtwirkungsgrad des optischen Systems und die Aufheizung des DMD-Chips. Zur Auslegung der Mitteloptik kann neben den geometrischen Erfordernissen auch die Kenngröße des Etendué verwendet werden. Je nach Konfiguration ist die Verwendung einer Feldlinse zur Abbildung der Austrittspupille der Einkopplung auf die Eintrittspupille der Auskopplung sinnvoll. In der Anordnung der Feldlinse gibt es ebenfalls mehrere Möglichkeiten. Sie kann direkt vor dem DMD-Chip oder nur im Einkoppelstrahlengang angeordnet sein. Zur Lichtlenkung lässt sich ein oder auch mehrere Spiegel einsetzen. Eine Justage-Möglichkeit des Lichtstrom einkoppelnden Umlenkspiegels um zwei Drehachsen ist vorteilhaft. Die geometrische Anordnung der unterschiedlichen Einkoppel- und Auskoppelstrahlengänge zueinander kann mittels der Form von Buchstaben beschrieben werden. Diese sind in Tabelle 5.3 in der Zeile „An3“ beschrieben als L-, T-, V-, Z-, N-, K-, F-, E- oder S-Anordnung.

Beim Strahlengang des DMD-Scheinwerfers und bei dessen Ansteuerung werden die beiden folgenden Schaltstellungen des DMD-Chips unterschieden:

1. die Nutzlichtstellung, in der das Licht durch eine Auskoppeloptik auf die Straße abgebildet wird.
2. die Absorberlichtstellung, in der eine Lenkung des Lichts auf einen Absorber erfolgt, auf dem es in Wärme (IR-Strahlung) umgewandelt wird.

Zur Intensitätssteuerung des Scheinwerfers werden die Mikrospiegel des DMD-Chips über Pulsweitenmodulation in ihrem Taktverhältnis angepasst, wodurch sich 255 Graustufen der relativen Lichtstärkesteuerung einstellen lassen. Werden die Mikrospiegel des DMD-Chips komplett auf ihre Nutzlichtstellung geschwenkt, so wird vom DMD-Scheinwerfer der maximal mögliche Lichtstrom, die maximale Lichtstärke und die maximal mögliche Breite der Ausleuchtung auf die Straße projiziert. Geringere Lichtstärken werden, je nach Taktverhältnis von Nutzlichtstellung und Absorberlichtstellung, mit einem zeitweisen Dunkelschalten der Mikrospiegel durch Pulsweitenmodulation erzielt. Im Falle des kompletten Dunkelschaltens des DMD-Scheinwerfers wird der gesamte Lichtstrom auf den Absorber gelenkt. Ein stattdessen erfolgendes Abschalten der Lampe verbietet sich, da diese ein verzögertes Warmstartverhalten hat.

Die Lichtstärkeverteilung des DMD-Scheinwerfers stellt eine Faltung der absoluten Lichtstärkeverteilung der Einkoppeloptik und der relativen Lichtstärkemodulation des DMD-Chips dar. Die Auskoppeloptik bildet als Ganzes die vom DMD-Chip relativ modulierte Lichtverteilung auf die Straße ab. Die Faltung der Lichtstärkeverteilung der Einkoppeloptik und der relativen Lichtstärkemodulation des DMD-Chips hat zur Folge, dass die 255 Graustufen des DMD-Chips im Bereich der maximalen Lichtstärke am weitesten gestaffelt sind im Vergleich zu der sehr feingliedrigen Lichtstärkevariation in den Randbereichen der Lichtverteilung.

Auskoppeloptik

Die Aufgabe der Auskoppeloptik besteht in der lichtstarken Projektion des DMD-Chips auf die Straße mit hoher Schärfentiefe, wenig Verzeichnung, geringem Streulicht und damit hohem Kontrast. Ein hoher Wirkungsgrad und möglichst keine oder nur geringe Farbfehler sind anzustreben.

Aufteilung der Lichtverteilung

1. DMD-Lichtverteilung (Gesamtlichtverteilung)
2. Kombination aus Grundlichtverteilung und DMD-Lichtverteilung
3. Zusatzscheinwerfer in DMD-Technologie

Da der DMD-Chip seine Ursprungsanwendung in der Unterhaltungsindustrie hat bzw. im Büro- und Präsentationseinsatz verwendet wird, ist sein Aspektverhältnis 4:3 bzw. 16:9. Beide Aspektverhältnisse sind im Kfz-Einsatz nur begrenzt sinnvoll, wie Abbildung 5.8 zeigt, da ein großer Anteil des verfügbaren Lichtstroms dadurch nicht genutzt werden kann. Eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des DMD-Scheinwerfers stellt Abbildung 5.9 dar, in der einer DMD-Lichtverteilung eine Grundlichtverteilung mit verbessertem Wirkungsgrad und angepasstem Aspektverhältnis überlagert wird.

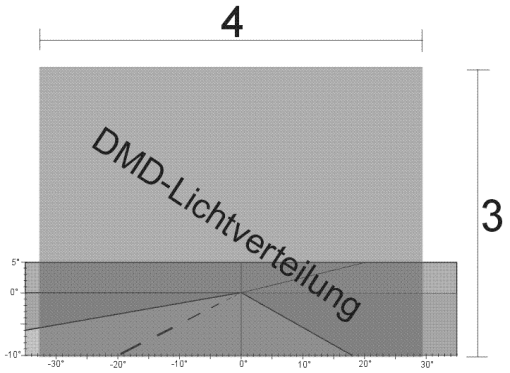


Abbildung 5.8: Überlagerung der DMD-Chip-Abmessungen mit einer Straßenszenerie [8.7, MÖNCHMEIER, 2004]

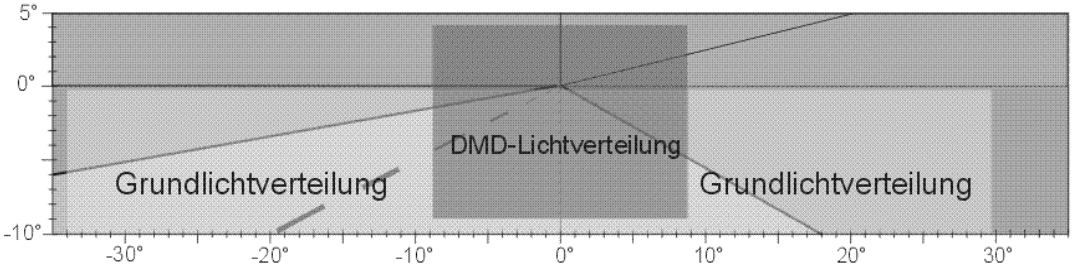


Abbildung 5.9: Grundlichtverteilung und DMD-Lichtverteilung kombiniert [8.7, MÖNCH-MEIER, 2004]

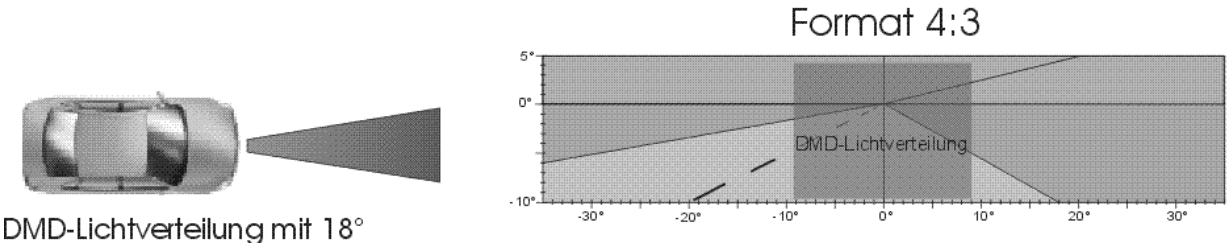


Abbildung 5.10: DMD-Lichtverteilung eines Zusatzscheinwerfers [8.7, MÖNCHMEIER, 2004]

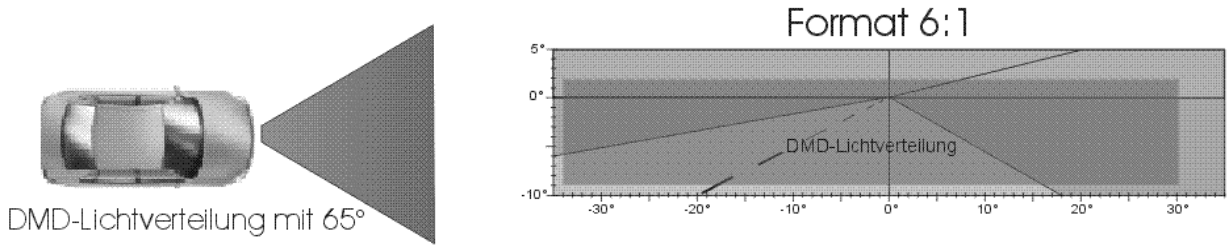


Abbildung 5.11: gespreizte DMD-Lichtverteilung [8.7, MÖNCHMEIER, 2004]

Neben der Möglichkeit die Gesamtlichtverteilung über zwei DMD-Scheinwerfer zu erzeugen, ist ein mögliches Einführungsszenario nur einen DMD-Zusatzscheinwerfer mit einem angepassten Aspektverhältnis von beispielsweise 4:3, Abbildung 5.10 oder 6:1, Abbildung 5.11, zu verwenden.

Varianten der Realisierung des dynamischen Kurvenlichts

1. Kurvenlicht durch Drehen des gesamten Scheinwerfers
2. Kurvenlicht durch Drehen eines zusätzlichen Spiegels (Schwenkspiegels)
3. Kurvenlicht durch den Einsatz eines Flexprismas
4. Kurvenlicht durch die Drehung einzelner Komponenten
5. Softwaretechnische Realisierung des Kurvenlichts

1. Kurvenlicht durch Drehen des gesamten Scheinwerfers

Konventionell wird in den meisten Fällen zur Erzeugung des Kurvenlichts der gesamte Scheinwerfer geschwenkt (Variante 1). Das hat zur Folge, dass das optische System in seiner relativen geometrischen Anordnung exakt erhalten bleibt. Diese Lösung erfordert jedoch einen vergrößerten Bauraum, der für das Schwenken der Scheinwerfereinheit benötigt wird. Darüber hinaus werden größere Massen bewegt, die bei Vibrationen Probleme bereiten können. Von Zizala [8.9, ZIZALA, 2002] wird der Ansatz verfolgt, nur die Projektionslinse zu schwenken Dabei wird zwar die optische Achse der Abbildung gedreht, jedoch bleibt bei einem Projektionsmodul die Aus- und Hinterleuchtung der Blendenebene in der vorgegebe-

nen Orientierung erhalten. Eine erforderliche breitere Abstrahlcharakteristik des Projektionsmoduls und Lichtstromverluste beim Schwenken der Projektionslinse sind die Folge.

2. Kurvenlicht durch Drehen eines zusätzlichen Spiegels

Bei der 2. Variante ist dem optischen System ein Schwenkspiegel nachgelagert, der eine geringe Masse aufweist und je nach Orientierung mit einer horizontalen Schwenkachse die Leuchtweitenregelung und mit einer vertikalen Schwenkachse das dynamische Kurvenlicht realisiert. Nachteilig ist der zusätzlich erforderliche Bauraum für den Schwenkspiegel. Bei einer Drehung des Schwenkspiegels um eine parallel zur optischen Achse orientierten Schwenkachse muss die Blendenebene des Systems mitgedreht werden, da sonst die Hell-Dunkel-Grenze, je nach Schwenkstellung des Spiegels, nicht mehr horizontal steht bzw. geneigt ist. Der erste Aufbau einer in Zusammenarbeit mit der Hella KG entwickelten Schwenkspiegelanordnung wurde beim Showcar Audi Avantissimo vorgestellt.

3. Kurvenlicht durch den Einsatz eines Flexprismas

Die 3. Variante, das Flexprisma, ist in den Kapitel 4.6.5 und 5.6 näher beschrieben. Es besteht aus einem oder mehreren optischen Elementen, die in der Summe ihrer optischen Wirkungen ein Prisma erzeugen, welches einen variablen Prismenwinkel aufweist [8.8, KAUSCHKE, 2003-4].

4. Kurvenlicht durch die Drehung mehrerer optischer Elemente

In der 4.Variante zur Erzeugung des Kurvenlichts werden mehrere optische Elemente (Spiegel, Linsen etc.) des Gesamtsystems geschwenkt [8.7, SPRENGER, 2003]. Das hat allerdings den Nachteil, dass die optischen Elemente, je nach Anordnung, mit unterschiedlichen Winkelabhängigkeiten bewegt werden müssen. Das ist Folge des Reflexionsgesetzes, bei dem der abgelenkte Lichtstrahl mit dem doppelten Schwenkwinkel der reflektierenden Oberfläche bewegt wird. Ein alleiniges Verschieben einer Linse, ohne die Richtung des eingekoppelten Lichtes zu ändern, ist daher ungeeignet, da Lichtstromverluste und Abbildungsfehler auftreten.

5. Softwaretechnische Realisierung des Kurvenlichts

Die 5. Variante besteht in dem softwaretechnischen Schwenken der Lichtverteilung. Diese Variante hat allerdings den Nachteil, dass die Breite des DMD-Chips und dessen resultierende Abbildung begrenzt ist, sodass ein Schwenken nur in den engen Grenzen der Ausleuchtung möglich ist. Außerdem nachteilig ist dabei, dass das Maximum der Lichtverteilung nicht mit geschwenkt wird. Die Breite der Ausleuchtung könnte über mehrere parallel nebeneinander angeordnete DMD-Chips oder wesentlich preiswerter durch eine horizontal verzerrende Abbildung realisiert werden. Da bei einem softwaretechnischen Schwenken die jeweils maximalen relativen Lichtstärken für einen der Gesamtlichtverteilung überlagerten Schwenkwinkeloffset von +/-15° vorrätig gehalten werden müssen, ist die Gesamteffizienz

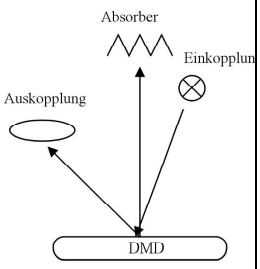
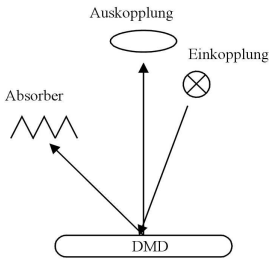
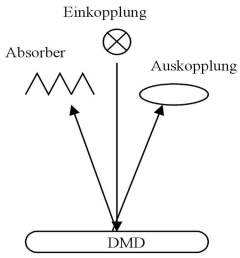
des Systems deutlich geringer als wenn auf rein optischem oder mechanischem Weg die Gesamtlichtverteilung geschwenkt wird.

Systematik der DMD-Scheinwerferkomponenten

Tabelle 5.3 Systematik der DMD-Scheinwerferkomponenten

DMD = Digital MicroMirror Device; O = Optik; An = Anordnung; LSV = Lichtstärkeverteilung; dyn. BL = dynamisches Kurvenlicht (Bending Light); Th = Thermik; L = Lichtquelle; CPC = Compound Parabolic Concentrator (Hohllichtleiter in modifizierter Paraboloidform, teils auch in FF-Form), übrige siehe Glossar

Nr.	Kategorie	Variante 1	Variante 2	Variante 3
DMD1	DMD	stehend	hängend	liegend
DMD2	DMD	+/-10°	+/-12°	AMD
DMD3	DMD-modifiziert	Standard-DMD für Videobeamer	ohne Ecken	mit variabler Spiegelgröße und -aufteilung
DMD4	DMD-modifiziert	teils mit statischen Elementen	teils mit einzelnen Defektpixeln	
O1	Optikaufbau	Einkoppeloptik [8.2, TESCHKE, 2005]	Mitteloptik	Auskoppeloptik
O2	Optikdesign für die drei Optikaufbauten	Linsenoptik	Reflektoroptik	Mischform
O3	Linsensystem	Einlinsensystem	Mehrlinsensystem	Feldlinsendesign
O4	Abbildung	Zylinderlinsen	FF-Reflektor	FF-Linsen, „Standard“-Linsen etc.
O5	Optikdesign vor DMD	Strahlengangdurchdringung	Spiegelumlenkung [8.7, NÖLKEL, 2002]	Prismenumlenkung [8.7, TAUBENRAUCH, 2004]
O6	Strahlengangfaltung	keine	geometrische / physikalische Strahlteiler	Spiegel / Prismen: Porroprisma, “3-Wege-Prismenwürfel”
O7	Strahlengangorientierung	Einkopplung von oben → Auskopplung nach unten bzw. in die Mitte	Einkopplung von unten → Auskopplung nach oben bzw. in die Mitte	

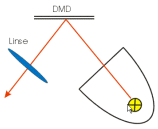
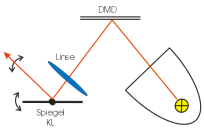
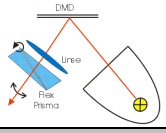
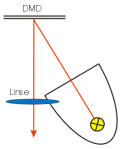
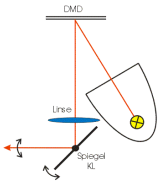
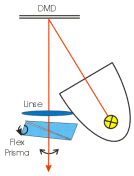
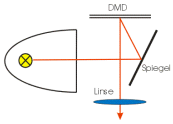
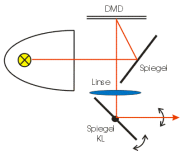
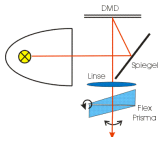
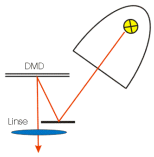
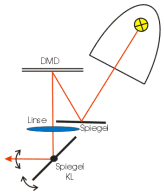
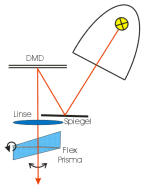
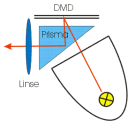
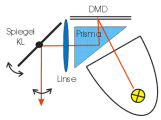
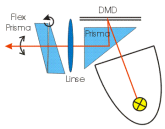
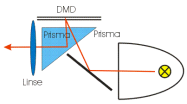
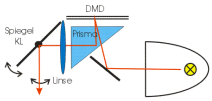
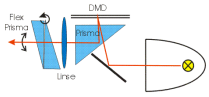
O8	Lichteinfall auf DMD (Aufheizung des DMD, Abbildungs-qualität Auskopplung)	möglichst senkrecht (unter ca. 24°)	senkrecht	unter Winkeln >ca.24°, z.B. ca. 45°
O9	Homogenisierung	keine	Hohllichtleiter, quaderförmig / Zylinderlinsenarrays	CPC, FF-Hohllichtleiter
O10	Farbrad	keines	sektorenartig aufgeteilt	spiralförmig segmen-tiert
O11	Feldlinse	nur im Einkoppel-strahlengang	im Ein- und Aus-koppelstrahlengang	direkt vor DMD angeordnet
O12	Auskopplung1	Einlinser (konvex)	Mehrlinser	zusätzlich mit Zylinderlinse
O13	Auskopplung2	Asphäre	Konvex-Zylinderlinsen-kombination mit zwei verschiedenen Krümmungsradien	Zylinderlinsen-Aplanat [8.6, HAFERKORN, 2003]
An1	Anwendung Gesamt-system	nur ein DMD-Scheinwerfer und eine Leuchtdichte-Attrappe	zwei DMD-Scheinwerfer	DMD-Zusatzscheinwerfer zu konventionellen Scheinwerfern
An2	Anordnung DMD – Absorber – Einkopp-lung [8.7, NÖLKEL, 2002]	Anordnung 1 	Anordnung 2 	Anordnung 3 
An3	Gesamtanordnung	L, T, V, Z, N, K, F, E, S, Prisma oder Prisma und Spiegel etc., siehe auch Tabelle 5.4		
An4	Absorberlicht	Absorberlichtnut-zung	Abbildung davon	Integration

An5	Kompaktheit des Systems	sehr kompakt (Minimalanzahl 3 Elemente) FF-Einkoppel-reflektor, DMD-Chip und FF-Auskoppelreflektor oder eine Auskop-pellinse	optische Erweiterung	optische High-End Lösung (Mehrlinsen-system mit optional Zoom und Fokus-Baugruppe)
An6	Spiegelpositionserfas-sung bei AMD	keine	über einen separaten 2. Strahlengang (Laser + CCD-Zeilen bzw. Matrix)	über geeignete, sonstige Sensorik
An7	Schaltspiegel	keinen	für Fernlicht, klappbaren Schalt-spiegel	elektrochromes, schaltbares Spiegel-element
An8	Restlichtnutzung Lampe	keine	das sonst nicht genutzte, direkte Licht wird über einen Reflektor für eine statische Grundlicht-verteilung genutzt	2 Lampen, eine für Abblendlicht, 2. für Fernlicht, weniger Lichtstromverluste, bessere Energie-bilanz; Redundanz (Failsafe)
LSV1	Lichtverteilungs-erzeugung	nur DMD-Abbildung	DMD mit Umfeldver-spiegelung (weniger thermische Belastung, erhöhte Breite der Ausleuchtung), Umfeldverspiegelung in Nutzlichtstellung (in Auskoppellinse) ausgerichtet	DMD mit separater, statischer Grund-lichtverteilung (Lampenrestlicht-nutzung)
LSV2	AFS-Lichtverteilungen	statisches Kurven-licht	dynamisches Kurvenlicht	Landstraßenlicht (Abblendlicht)
		Stadtlicht	Autobahnlicht	Schlechtwetterlicht

LSV3	Aktive Lichtverteilungen	frei programmierbar	Fahrerspezifisches Licht	Straßen- / Verkehrssituationsabhängiges Licht
		Markierendes Licht	Displaylicht	etc.
LSV4	Lichtverteilungsvormodulation	Summe aus Fernlicht und Stadt- oder Nebellicht	homogene Ausleuchtung	2. Brennpunkt der Einkoppeloptik nahe des DMD-Chips, um den notwendigen LSV-Gradienten zu erzeugen
LSV5	Lichtverteilungsrandanwendungen: Fernsehen, Internet	keine Farbe (da energieeffizienter)	einschwenkbare Farbfilter	einschwenkbares Farbrad bzw. Farbspirale
dyn. BL1	dynamisches Kurvenlicht	nur mit Spiegel	mit Linsen / (Flex)Prismen	mit mehreren Elementen erzeugt
dyn. BL2	dynamisches Kurvenlicht	nur ein Element bewegt	mehrere Elemente aufeinander abgestimmt bewegt	Gesamtsystem geschwenkt
Th1	IR-Strahlungsreduktion	Kaltlichtfilter bei der Lampe	Kaltlichtspiegel	
Th2	Kühlung DMD	passiv	aktiv	
Th3	Kühlmaßnahme	Kühlkörper	Lüfter	Peltierkühler
Th4	Kühlmedium	Luft	Wasser	Öl
Th5	Kühlsystem	autark	an Fahrzeugklimaanlage angeschlossen	an Motorkühler- / Ladeluftkühler etc. angeschlossen
L1	Lichtquelle	UHP-Lampe	Kurzbogenlampe	D2S-, D2R-Lampe
L2	Lichtquelle	Halogenlampe	Wolframgitter	LED-Array (plan angeordnet oder kugelförmig gekrümmt)
L3	Lichtquellenanordnung	direkter, erster Teil des optischen Systems	indirekt über Prismenarrays	indirekt über Lichtleiter

Anordnungskonfigurationen für den DMD-Scheinwerfer

Tabelle 5.4: Auszug aus den DMD-Scheinwerfer-Anordnungen [8.7, MÖNCHMEIER, 2004]

GL Verteilung	DMD Optik-anbindung	Realisierung der Funktion Kurvenlicht KL		
		KL durch Schwenken	KL durch Schwenkspiegel	KL durch Flexprisma
Grundlichtverteilung GLV mit DMD	Spiegel L-Anordnung	Konzept 1 	Konzept 2 	Konzept 3 
	Spiegel V-Anordnung	Konzept 4 	Konzept 5 	Konzept 6 
	Spiegel T-Anordnung	Konzept 7 	Konzept 8 	Konzept 9 
	Spiegel Z-Anordnung	Konzept 10 	Konzept 11 	Konzept 12 
	Prisma	Konzept 13 	Konzept 14 	Konzept 15 
	Prisma mit Spiegel	Konzept 16 	Konzept 17 	Konzept 18 

5.3.3 Dimensionierung

Die Dimensionierung des DMD- und auch des LCoS-Scheinwerfers, Kapitel 5.2, kann von von der Lampe ausgehend, entlang dem optischen Strahlengang oder von der auf der Straße gewünschten Lichtverteilung rückwirkend auf das Scheinwerfersystem oder anhand des Etendué erfolgen.

1. „Rückwärts"-Dimensionierung

Der erste Ansatz in der Dimensionierung basiert auf den Leistungsanforderungen an die angestrebten, maximal möglichen Lichtverteilungen, die sowohl die maximale Streubreite des Scheinwerfers als auch eine maximale geometrische Reichweite bzw. maximale Lichtstärke aufweisen müssen.

Kennzeichnend für die Leistungsfähigkeit des Scheinwerfers ist das Objektiv. Dieses bestimmt zusammen mit dem Objekt, hier dem DMD-Chip, und dessen lokaler Leuchtdichteverteilung die maximale Leistungsfähigkeit des Systems. Für die erste Auslegung des DMD-Scheinwerfers soll ein Einlinsensystem verwendet werden, das die erforderliche Abbildungsfunktion vom DMD-Chip auf eine 10m-Messwand bzw. auf die 25m-Messsphäre der gesetzlichen Beleuchtungsstärkemessung bzw. auf die Straße erlaubt.

2. „Vorwärts"-Dimensionierung

Der zweite Ansatz besteht in der Auslegung des Einkoppelstrahlengangs. Dieser wird dominiert von der Leuchtdichte, der Abstrahlcharakteristik und dem Spektrum der Lichtquelle. Der Abbildungsmaßstab, d.h. das Verhältnis aus dem Abstand Lichtbogen zum nächsten Reflektor gegenüber dem Abstand zwischen Reflektor und Zielfläche (DMD-Chip), hat zusammen mit den Reflexions- und Brechungsgesetzen, den Fresnel'schen Reflexionen und dem Etendué zur Folge, dass die Wendel- bzw. Lichtbogenbilder größer abgebildet werden. Wie bei einer realen optischen Abbildung tritt ein Öffnungsfehler auf mit einer kaustikförmigen Lichtkonzentration im zweiten Brennpunkt. Das ist auch die Ursache dafür, dass die Leuchtdichte in einem optischen System nie gesteigert werden kann.

Dieser Zusammenhang kann mit der Formel

$$\alpha = \frac{1}{\beta} \text{ bzw. } \beta = \frac{1}{\alpha}$$

berechnet werden, wobei α = Öffnungswinkel und β = Abbildungsmaßstab sind.

3. Etendué-Berechnung

Der dritte Ansatz besteht in der Betrachtung des Etendué, dem Produkt aus Fläche und zugehörigem Raumwinkel sowohl im Einkoppelstrahlengang als auch im Auskoppelstrahlengang. Das Etendué kann nicht verkleinert werden, im Gegenteil, es steigt im Gegensatz zur

Leuchtdichte von der Lichtquelle über den DMD-Chip zur Auskoppeloptik hin an. Die Auslegung einer Feldlinse als möglichst effizientes Bindeglied zwischen der Einkoppeloptik und der Auskoppeloptik ist Teil dieses dritten Ansatzes. Der DMD-Chip mit dessen maximalem Schwenkwinkel von +/-12° und dessen begrenzter Gesamtspiegel-Fläche von 10 x 14mm² ist die limitierende Größe der Etendué-Betrachtung. Der Schwenkwinkel von +/-12° ermöglicht nur eine Trennung der Strahlengänge von 24°, wenn von einer senkrechten Strahlauskopplung ausgegangen wird. Der Einkoppelstrahlengang muss so ausgelegt sein, dass das Etendué bis zum DMD-Chip nicht größer ist als der DMD-Chip maximal „verarbeiten“ kann, da sonst die Lichtstrom-Verluste innerhalb des optischen Systems durch Beschnitt des optischen Strahlenbündels zusätzlich ansteigen. Um eine lichtstarke Abbildung des DMD-Chips zu erhalten, muss die dem DMD-Chip am nächsten liegende Auskoppellinse einen großen Durchmesser aufweisen. Die straßenseitige Lichtaustrittsfläche der Auskoppeloptik sollte ebenfalls groß dimensioniert sein, damit die mittlere Leuchtdichte der Lichtaustrittsfläche möglichst gering ist. Dadurch wird die Blendung für den Gegenverkehr minimiert. Ein Ausgleich zwischen den Optimierungsgrößen einer lichtstarken Einkopplung und einer lichtstarken Auskopplung kann durch den geringen Schwenkwinkel der DMD-Mikrospiegel (geometrie- und wirkungsgradbedingt) zur Durchdringung der Strahlengänge und zu einem gegenseitigen Beschnitt der Linsenflächen der Ein- bzw. Auskoppeloptik führen. Dieser Beschnitt bewirkt eine Vignettierung. Letztere lässt sich nur teilweise vermeiden. Eine zukünftige Möglichkeit könnte in einer diffraktiven Struktur mit möglichst hohem Wirkungsgrad als „Feldlinsen-Ersatz“ im Einkoppelstrahlengang liegen.

Beschreibung der unterschiedlichen DMD-Optikkonzept-Anordnungen

Die unterschiedlichen Anordnungen der Optik-Komponenten können der Offenlegungsschrift zu den DMD-Scheinwerfern [8.8, KAUSCHKE, 2003-5] entnommen werden. Bewertungen der Anordnungen sind in den Diplomarbeiten von [8.7, NÖLKEL, 2002], [8.7, SPRENGER, 2003], [8.7, MÖNCHMEIER, 2004] und [8.7, TAUBENRAUCH, 2004] vorgenommen worden, insbesondere in der Diplomarbeit von TAUBENRAUCH.

Leistungsanforderungen an den Chip

Der DMD-Chip, der exklusiv von Texas Instruments (ti) für den Consumer- und Office-Bereich hergestellt und vertrieben wird, stellt das prinzipbestimmende Funktionselement dar. Da am Beginn der Einführung des DMD aktiven Scheinwerfers nur relativ geringe Stückzahlen zu erwarten sind, sind kundenspezifische Änderungen an dem sehr aufwändig in zahlreichen mikrolithografischen Prozess-Schritten herzustellenden Chip kaum zu erwarten. Der bisherige Preis des DMD-Chips ist noch relativ hoch, einmal sicherlich bedingt durch die Monopol-Stellung von Texas Instruments, auf der anderen Seite evtl. auch wegen der relativ hohen Ausschussrate in den mikrolithografischen Prozess-Schritten. Um die Kosten für den DMD-Chip zu senken, besteht die Überlegung auch Chips mit einzelnen Defektpixeln bzw. Defektbereichen zu verwenden. Untersuchungen bei [8.7, REINSDORF, 2004] haben ergeben, Abbildung 5.12, dass im Vorfeld der Ausleuchtung und oberhalb der Hell-Dunkel-

Grenze des Stadtlichts einzelne Defektpixel für den Fahrer nicht störend sind. Die oberen Randbereiche der Fernlichtausleuchtung können größere Defektbereiche aufweisen, da sie vom Fahrer kaum wahrgenommen werden. Um die Zuverlässigkeit des DMD-Chips trotz einzelner Defektpixel zu gewährleisten, dürfen im Chip-Gehäuse keine losen Teilstücke verbleiben, damit diese keine funktionsfähigen Mikrospiegel blockieren.

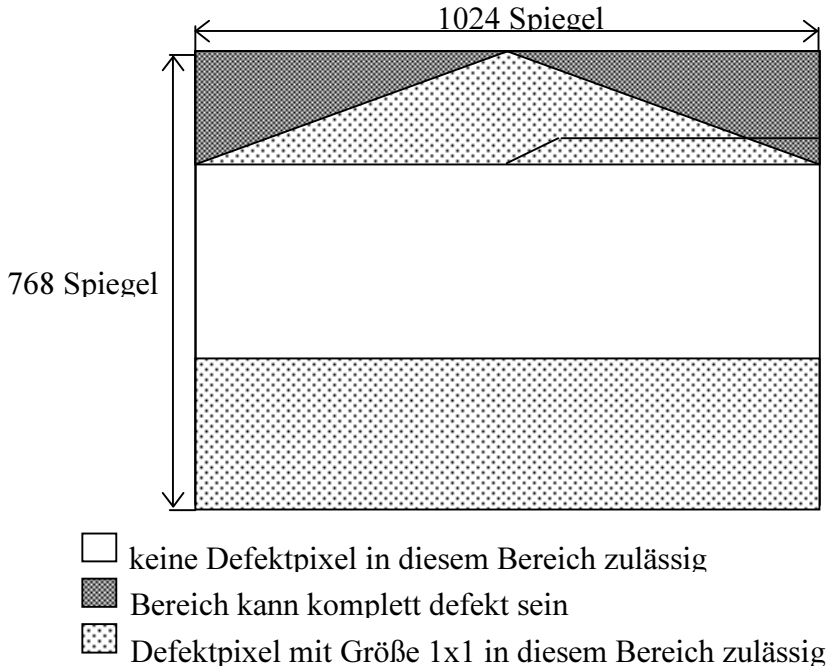


Abbildung 5.12: Übersicht der zulässigen Defektpixel innerhalb der Lichtverteilung

Der Abbildungsmaßstab des DMD-Chips variiert auf der relativ zur Lichtabstrahlrichtung des DMD-Scheinwerfers sehr flach geneigten Straße, wie in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5: Abbildungsmaßstab der DMD-Pixel und Pixelabbildgröße auf der Straße

Entfernung der Straße vom Scheinwerfer (DMD-Chip mit 1024 x 768 Pixel) (b x h)	vertikale Pixelabbildgröße auf der Straße in dieser Entfernung	Abbildungsmaßstab für Breite b; Höhe h
5 m	7,9 x 2,3 mm² (b x h)	1:576 ; 1:168
10 m	15,8 x 4,6 mm² (b x h)	1:1.153; 1:336
25 m	39,4 x 11,5 mm² (b x h)	1:2.882; 1:839
50 m	78,9 x 23,0 mm² (b x h)	1:4.612; 1:343
100 m	157,7 x 45,9 mm² (b x h)	1:11.530; 1:3.357
140 m	220,8 x 64,3 mm² (b x h)	1:16.141; 1:4.699
200 m	315,5 x 91,8 mm² (b x h)	1:23.059; 1:6.713

Anpassung der Breite der Ausleuchtung an die Erfordernisse des Kfz-Scheinwerfers

Heutige Kfz-Scheinwerfer haben eine Lichtverteilung, die eine Breite der Ausleuchtung von +/- 45° und eine Höhe der Ausleuchtung von –15° und +5° aufweisen. Für die Gesamtausdehnung der Lichtverteilung ergeben sich daher Winkelsummen von horizontal 90° und vertikal 20°. Diese Winkelsummen lassen sich ins Verhältnis zueinander setzen, wodurch das Aspektverhältnis gebildet wird. Das Aspektverhältnis stellt dabei das Verhältnis aus Breite zur Höhe der Ausleuchtung dar.

Bisherige Videoprojektoren haben auf Grund von Fernsehnormen ein Aspektverhältnis von 4:3 bzw. von 16:9. Diese beiden Aspektverhältnisse sind allerdings den Erfordernissen einer Kfz-Lichtverteilung, die ein Aspektverhältnis von 9:2 aufweist, nicht angepasst. Daher sind Maßnahmen erforderlich, die eine solche Anpassung ermöglichen:

1. Anpassung des DMD-Chip-Aspektverhältnisses
2. Umfeldverspiegelung der DMD-Chipfläche
3. Variation der Abbildungsbedingungen der Auskoppeloptik

1. Anpassung des DMD-Chip-Aspektverhältnisses

Da die Chipfläche durch die Auskoppeloptik auf der Straße abgebildet wird, ist eine definierte Beziehung durch den Abbildungsmaßstab zwischen dem Aspektverhältnis der Chipfläche und der räumlichen Ausdehnung des Abbilds des DMD-Chips auf der Straße gegeben. Zur Einführung des DMD-Scheinwerfers in den Markt werden nur relativ geringe Stückzahlen von DMD-Chips gefordert im Vergleich zu den Stückzahlen der Büro- und Homeentertainment-Anwendungen. Daher war Texas Instruments bisher nicht bereit einen DMD-Chip zu entwerfen, der gezielt auf den Erfordernissen des Kfz-Marktes angepasst ist. Der hierfür erforderliche Entwicklungsaufwand liegt dabei nicht nur im inneren Chipdesign, sondern auch in der hermetischen Einhausung der Mikrostrukturen, damit äußere Einflüsse ausgeschlossen werden können.

2. Umfeldverspiegelung

Die Breite der Ausleuchtung kann über eine seitliche Verspiegelung des Chipumfeldes aufgeweitet werden. Dabei ist für die Ausrichtung der seitlichen Verspiegelung eine solche Orientierung der Spiegelflächen vorzusehen, dass das eingekoppelte Licht, wie bei den Mikrospiegeln in ihrer Nutzlichtstellung, in das Auskoppellinsensystem fällt. Für die Orientierung der Umfeldverspiegelung sind daher Spiegelnormalen erforderlich, die bei einer Lichteinkoppelung von unten unter ca. –17°, um –12° nach unten und um –12° nach rechts relativ zur Normalen des DMD-Chipgehäuses orientiert sind (Blick auf die DMD-Spiegelfläche). Weiterhin ist die Position der Umfeldverspiegelung so zu wählen, dass sie die Hell-Dunkel-Grenze des DMD-Chips seitlich verlängert. Wird dagegen eine Einkopplung des Lichtes von oben gewählt, so sind die entsprechenden Winkelbedingungen umzukehren,

damit die Orientierung der Spiegelnormalen der Umfeldverspiegelung der Nutzlichtstellung der Mikrospiegel des DMD-Arrays auch in diesem Fall entsprechen. Kennzeichen der Umfeldverspiegelung ist deren statischer Aufbau, wodurch eine Höhenvariation der seitlichen Ausleuchtung, d.h. der HDG, im späteren Betrieb des Scheinwerfers nicht mehr möglich ist. Eine softwaretechnisch angesteuerte, vertikale Verschiebung der Hell-Dunkel-Grenze hat daher keinen Einfluss auf die statische Umfeldverspiegelung des DMD-Chips. An die Umfeldverspiegelung werden darüber hinaus folgende Anforderungen gestellt:

1. gleiche / möglichst gleiche Abbildungsebene: nahtloses Anschließen an die Mikrospiegel bei der Abbildung
2. Anpassung des Auskoppelstrahlengangs an das breitere, abzubildende DMD-Objekt
3. keine Abschattung der DMD-Chipfläche durch die Umfeldverspiegelung
4. hohe Güte der Ebenheit der Umfeldverspiegelungsflächen, um Streulicht zu vermeiden
5. Anpassung des Einkoppelstrahlengangs an die vergrößerte Gesamtspiegelfläche
6. Ideal wäre eine Integration der Umfeldverspiegelung in den DMD-Chip (in das hermetisch abgeschlossene Vakuum, um dieselbe Abbildungsebene zu erzielen)

3. Variation der Abbildungsbedingungen der Auskoppeloptik

Eine Variation der Abbildungsbedingungen der Auskoppeloptik stellt eine Alternative zur Anpassung des Aspektverhältnisses zwischen dem DMD-Chip und der Lichtverteilung auf der Straße dar. Das Abbildungsverhältnis wird durch den Abbildungsmaßstab definiert, der sich aus dem Abstand der Hauptebenen der Linse zu dem Objekt bzw. zu dem Bild berechnen lässt. Da eine reale Abbildung erforderlich ist, kommt nur eine insgesamt sammelnde Optik in Betracht. Diese kann aus mehreren Linsen, auch teils aus konkaven Linsen aufgebaut sein. Prinzipiell wäre eine Abbildung mit einer möglichst kurzbrennweitigen Optik sinnvoll, da dadurch der Abbildungsmaßstab zu Gunsten einer größeren horizontalen Spreizung der Lichtverteilung und damit einer gewünschten größeren Breite der Abbildung geändert wird. Die Ein- und Auskoppelstrahlengänge erfordern einen großen Strahldurchmesser, damit die Abbildung möglichst lichtstark wird. Gleichzeitig soll der limitierende Faktor des Etendué des optischen Systems an dem begrenzenden Element des DMD-Chips maximal ausgeschöpft werden. Sind die Einkoppel- und Auskoppelstrahlbündel zu groß gewählt, so tritt eine Durchdringung der Strahlenwege und teilweise eine Bündelbegrenzung bzw. Vignettierung der Strahlengänge durch die sich gegenseitig im Wege stehenden optischen Elemente auf, wodurch die Abbildung lichtschwächer wird. Diesem Vorgehen stehen allerdings die geringen Schwenkwinkel der Mikrospiegel des DMD-Arrays entgegen, die für einen geringen Winkel zwischen dem Einkoppel- und dem Auskoppelstrahlenbündel sorgen. Daher kann ein Mindestabstand zwischen DMD-Chip und erster Linse der Auskopplung nicht unterschritten werden, wenn kein Beschnitt im Strahlengang oder eine Durchdringung erfolgen soll. Der

Durchdringung der optischen Elemente kann durch einen größeren Abstand der Linsen von der DMD-Chipfläche begegnet werden. Das führt jedoch zu einer erhöhten Baugröße des Systems und zu einem geringeren Etendué. Der begrenzte Bauraum an der Fahrzeugfront limitiert diesen Ansatz. Dem erhöhten Bauraumbedarf kann durch den Einsatz von Spiegeln, welche den Strahlengang falten, oder durch den Einsatz von Prismen begegnet werden.

Beim Einsatz einer Zylinderlinse wird das Aspektverhältnis der Abbildung nur in einer senkrecht zur optischen Achse stehenden Koordinate angepasst. Je nach Wahl des Krümmungsradius der Zylinderlinse ist die Spreizung des Abbildes des DMD-Chips unterschiedlich stark ausgeprägt. Dabei tritt teilweise auch eine unscharfe Verzerrung der Abbildung auf.

Wenn dieser Ansatz durch eine zweite Zylinderlinse ergänzt wird, dann werden die abbildenden Eigenschaften der Sammellinse auf zwei Zylinderlinsen „verteilt“. Die erste Zylinderlinse legt dabei mit ihrer minimalen Brennweite die maximal mögliche horizontale Breite der Abbildung fest. Die zweite Zylinderlinse bildet die vertikale Öffnung des Strahlenbündels ab. Die Breite der zweiten Zylinderlinse muss auf die Breite des durch die erste Linse geweiteten Strahlenbündels angepasst werden. Wird anschließend noch eine Zerstreuungslinse eingesetzt, so wird das gesamte Abbild der Lichtverteilung nochmals sowohl horizontal als auch vertikal geweitet. Die Kombination aus zwei Zylinderlinsen wird in [8.6, HAFERKORN, 2003] auch als Zylinderlinsenaplanat bezeichnet.

In Kinoprojektoren werden mehrerer Prismen eingesetzt, die das Aspektverhältnis des Films der Breitbild-Projektion anpassen.

Alternativ zu den Zylinderlinsen oder Prismen können Spiegel eingesetzt werden. Anstelle der für eine Aspektverhältnisanpassung nicht anwendbaren Planspiegel sind zylindrisch gekrümmte Spiegel geeignet. Die optische Wirkung dieser zylindrisch gekrümmter Spiegel entspricht der von Zylinderlinsen, wobei der Strahlengang durch die Spiegelreflexion umgelenkt wird.

Der Einsatz von einem FF-Spiegel gemeinsam für die Ein- und Auskopplung des Strahlensystems wird als problematisch angesehen, da die Lichtwege von einkoppelndem und auskoppelndem Strahlbündel durch die Verkippung der Mikrospiegel unterschiedliche sind. Beide Strahlenbündel sind diagonal gegeneinander versetzt. Hierbei geht der divergierende Strahldurchmesser jeweils von den DMD-Chip-Spiegelflächen aus. Ohne eine eindeutige Zuordnung der FF-Spiegelflächen auf eine Lichtrichtung ist deren Berechnung nicht mehr eindeutig.

Wirkungsgrad des optischen Systems

Einflussgrößen für den Wirkungsgrad des Gesamtsystems DMD-Scheinwerfer sind:

Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems setzt sich zusammen aus dem Produkt des Wirkungsgrads der Lampe und dem des optischen Systems. Hier soll nur das optische System genauer betrachtet werden, und zwar hinsichtlich folgender Gesichtspunkte:

1. Abbildungs-, Transmissions- und Reflexionsverluste der Einkoppel- und der Auskoppeloptik
2. Vormodellierung der Lichteinkopplung auf dem DMD-Chip
3. Schaltspiegel im Einkoppelstrahlengang
4. DMD-Chip
5. Softwaretechnische Ansteuerung
6. Absorberlichtnutzung
7. Umfeldverspiegelung zur Erzeugung einer Grundlichtverteilung

1. Abbildungs-, Transmissions- und Reflexionsverluste der Einkoppel- und der Auskoppeloptik

Das Gesamtsystem DMD-Scheinwerfer wird in seinem Wirkungsgrad bestimmt durch die Abbildungs- und Transmissionsverluste der Einkopplung des Lichtbündels auf den DMD-Chip und der Auskopplung des Abbildes des DMD-Chips auf die Straße.

Die Reflexionsverluste innerhalb des Systems werden von den Reflexionsgraden der Oberflächen und dem Gesamtwirkungsgrad des DMD-Chips, d.h. dem Produkt aus Reflexionsgrad der Mikrospiegel und dem Flächennutzungsgrad der DMD-Chip-Fläche bestimmt.

Die Entfernung der Lichtquelle vom DMD-Chip hat Konsequenzen für die minimale Abbildungsgröße der Wendellänge bzw. des Lichtbogens auf dem DMD-Chip. Dieser Abbildungsmaßstab legt die maximale Leuchtdichte und damit die maximal resultierende Lichtstärke des DMD-Scheinwerfers fest. Daher sollte für Anwendungen, die eine hohe Lichtstärke erfordern, z.B. bei Scheinwerfern, die Lichtquelle so nah wie möglich an den DMD-Chip herangerückt werden.

Da das Licht auf dem DMD-Chip fokussiert wird, tritt innerhalb des DMD-Chips ein Temperaturgradient auf. Damit dieser die Lebensdauer des DMD-Chips nur minimal reduziert, muss für eine gute Kühlung des Chips gesorgt werden. Bei der Verwendung von Prismen nahe dem DMD-Chip ist darauf zu achten, dass der Temperaturgradient in dem Prisma nicht zu hoch wird, da sonst eine Zerstörung durch thermische Spannungen hervorgerufen werden kann.

2. Vormodulierung der Lichteinkopplung auf dem DMD-Chip

Eine Einkopplungs-Vormodellierung des Lichtbündels auf dem DMD-Chip steigert den Wirkungsgrad des DMD-Scheinwerfersystems gegenüber einer homogenen Einkopplung bzw. Ausleuchtung des DMD-Chips. Die optimale Vormodellierung der Lichtverteilung ist so dimensioniert, dass die gewünschte Intensität auf der Straße in den meisten Fällen auch ohne

ein zeitweises lokal notwendiges Dunkeltasten der Chipfläche und damit einer zeitweisen Verringerung des Wirkungsgrades erzielt wird.

3. Schaltspiegel im Einkoppelstrahlengang

Mit einem Schaltspiegel, der den Lichtstrom entweder auf den DMD-Chip oder an ihm vorbei lenkt, kann der DMD-Chip je nach Lichtfunktion teilweise oder ganz umgangen werden, wodurch der Wirkungsgrad des Systems erhöht wird, da die Lichtstromverluste der Nutzlichtstellung des DMD-Chips entfallen. Anwendung könnte ein solcher Schaltspiegel bei der Umschaltung zwischen Fernlicht und einer vom aktiven Scheinwerfer modulierten Lichtverteilung finden.

4. DMD-Chip

Wird die Energiebilanz des DMD-Scheinwerfers betrachtet, so wird deutlich, dass der Hauptverlustbringer der DMD-Chip selbst ist, der mit einem effektiven Wirkungsgrad von 68% [8.2, DGaO 2002, RIECHE] angegeben wird. Dieser Wirkungsgrad wird gebildet aus dem Produkt des Flächennutzungsgrades, d.h. dem Verhältnis aus verspiegelter Chipfläche zur Gesamtfläche des DMD-Chips und dem Reflexionskoeffizienten für das Gesamtsystem, der sich aus dem Reflexionsgrad der Mikrospiegelflächen und dem Transmissionsgrad der Abdeckscheibe des DMD-Chips zusammensetzt. Hierfür gilt $\eta_{Ges} = \rho_{DMD} \cdot \tau_{Glas}^2 \cdot \alpha_{FNG}$, wobei η_{Ges} = Gesamtwirkungsgrad, ρ_{DMD} = Reflexionsgrad der DMD-Mikrospiegel, τ_{Glas} = Transmissionsgrad der Abdeckscheibe und α_{FNG} = Flächennutzungsgrad sind.

5. Softwaretechnische Ansteuerung

Wichtiges Kennzeichen der DMD-Scheinwerfer-Systemkonfiguration ist die Abhängigkeit des Wirkungsgrades des Gesamtsystems von der eingestellten Scheinwerferlichtfunktion und damit der Softwareansteuerung des DMD-Chips. Das ist die Folge des subtraktiven Wirkungsprinzips des DMD-Scheinwerfers, bei dem der nicht innerhalb der Lichtverteilung genutzte Lichtstrom auf einen Absorber gelenkt wird, der den ungenutzten Lichtstrom in Wärme und damit in Infrarotstrahlung wandelt. Wird die volle Ausleuchtung der DMD-Chipfläche verwendet, so ist der softwaretechnisch bedingte Wirkungsgrad maximal, da dann alle Mikrospiegel in ihre Nutzlichtstellung geschwenkt sind, in welcher der Lichtstrom durch das Objektiv gelenkt wird. Dieser maximale softwaretechnische Wirkungsgrad wird bei der Fernlichtverteilung des Gesamtsystems erzielt.

Bei allen weiteren Lichtverteilungen, Abbildung 5.13, werden Teile der Lichtverteilung auf den Absorber gelenkt, wodurch sich das Verhältnis von erzeugtem Lichtstrom und tatsächlich auf der Straße genutztem Lichtstrom verschlechtert. Der maximale Lichtstrom der Fernlichtverteilung von > 1700 lm verringert sich z.B. auf den Lichtstrom von 1150lm beim Abblendlicht. Ein Abblendlichtverteilungsvorfeld niedriger Leuchtdichte lässt den genutzten Lichtstrom auf z.B. 440 lm (bei geringem Vorfeldgradient der Lichtverteilung) weiter absinken.

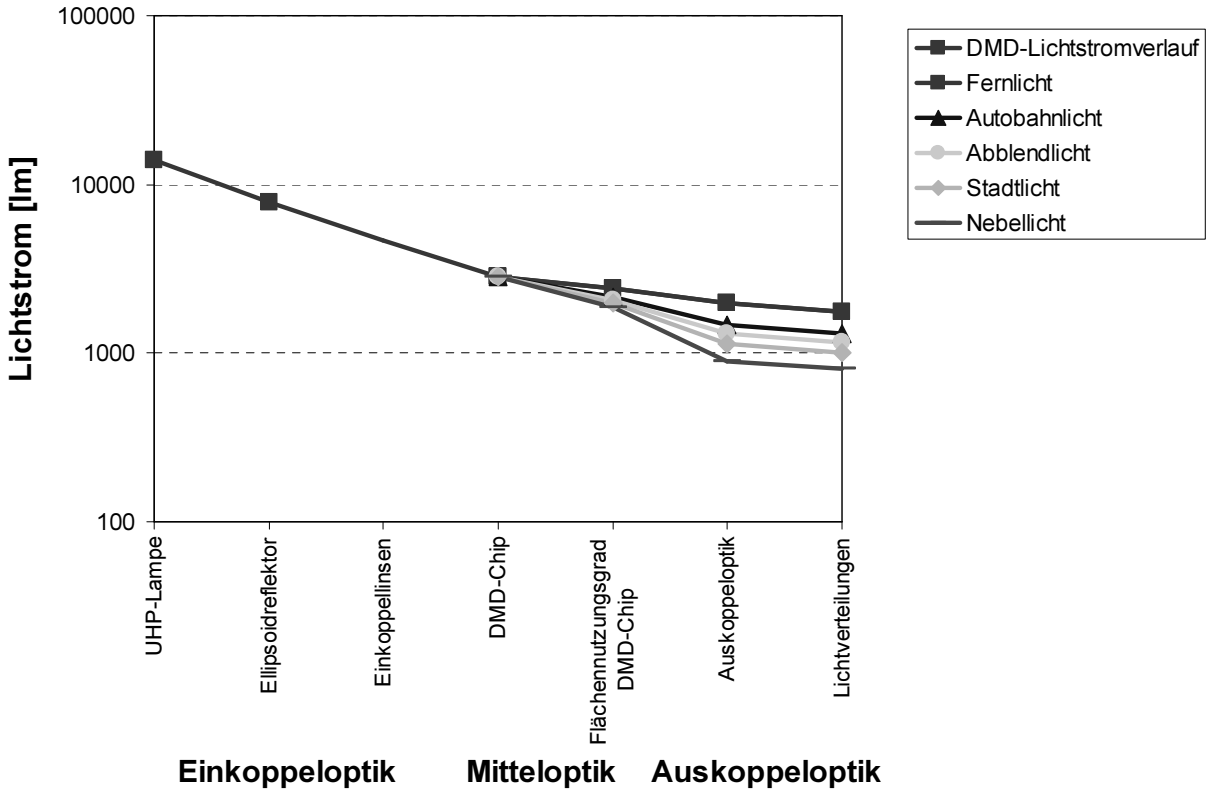


Abbildung 5.13: Lichtstromverläufe der subtraktiven DMD-Lichtverteilungserzeugung

6. Absorberlichtnutzung

Bei der Dimensionierung eines DMD-Scheinwerfers stellt sich die Frage, ob eine Wirkungsgraderhöhung durch die Nutzung des Absorberlichtes erzielt werden kann. Dabei werden auf den zwei Winkelstellungen des DMD-Chips beruhende Anwendungsmöglichkeiten nachfolgend betrachtet:

1. Licht wird innerhalb der Lichtverteilung genutzt oder auf einen Absorber gelenkt und in Wärme (IR-Strahlung) gewandelt.

2. Licht wird in eine erste oder in eine zweite Richtung innerhalb der Lichtverteilung gelenkt.

Der erste Anwendungsfall wird bei DMD-Videoprojektoren eingesetzt, wobei das Ausblenden von Lichtbündeln, d.h. Umlenken von Lichtbündeln auf den Absorber, stets mit Leistungsverlusten verbunden ist. Diese Leistungsverluste sind auch bisher Kennzeichen der Projektionsscheinwerfer. Bei ihnen wird der Lichtstrom, der für Lichtverteilungen mit einer angehobenen HDG (Autobahnlicht) oder keiner HDG (Fernlicht) stets vorrätig gehalten wird, in der Lichtfunktion Abblendlicht auf die Blende gelenkt. Die Blende wird je nach Lichtverteilung aus dem Strahlengang herausgeschwenkt oder um ihre eigene Achse rotiert. Alternativ lassen sich kippbare Blenden oder rotierende Blendenscheiben bzw. -kegel bei Projektionsscheinwerfern von Wettbewerbern der Hella KGaA finden. Der auftretende Energieverlust ist

von den Kunden allerdings nicht gewünscht und soll in zukünftigen Scheinwerferkonzepten nach Möglichkeit vermieden werden.

Im zweiten Anwendungsfall der digitalen Lichtstromumverteilung tritt eine logische Verknüpfung zwischen Bereichen innerhalb der Lichtverteilung auf, die nur wechselweise ausgeleuchtet werden können. Das hat zur Folge, dass die Summe des Lichtstroms innerhalb der Lichtverteilungen stets konstant bleibt, sieht man von unterschiedlichen Verlusten innerhalb der alternativen optischen Wege ab. Diese wechselseitige Verknüpfung ist beim Entwurf des Scheinwerfersystems mit fest definierten Lichtverteilungen bei unterschiedlichen Hell-Dunkel-Grenzen in Teilen möglich. Werden allerdings fahrerspezifische oder situationsabhängige Änderungen innerhalb der Lichtverteilung zugelassen, dann verändert sich der umgelenkte Lichtstrom in variabler Höhe. Die alternativ mit dem umgelenkten Lichtstrom angeleuchteten Bereiche der Lichtverteilung sind dabei denselben Schwankungen der räumlichen Zuordnung, der Divergenz des Strahlenbündels und der veränderten Lichtstärke unterworfen. Treten diese Änderungen in rascher Folge auf, so werden diese vom Fahrer sicherlich als störendes Pulsieren bzw. irritierende Variationen im Randbereich oder im Vorfeld der Lichtverteilung empfunden werden. Bei den Lichtfunktionen Markierendes Licht und Displaylicht sind die Variationen innerhalb der Lichtverteilung demgegenüber auf kleinere Bereiche innerhalb der Lichtverteilung beschränkt, wodurch eine logische Verknüpfung mit anderen Bereichen der Lichtverteilung noch weniger sinnvoll sind. Eine Fallunterscheidung zwischen Markierendem Licht mit positivem und negativem Kontrast oder blinkender Beleuchtung soll an dieser Stelle nicht weiter vorgenommen werden.

Bei den Lichtfunktionen Displaylicht und Markierendes Licht könnte die logische Verknüpfung durch einen Integrator aufgehoben werden, der die räumliche Zuordnung von dunkelgetasteten Bereichen auf dem DMD-Chip und der möglichen Lichtlenkung in andere Bereiche der Lichtverteilung aufhebt.

Damit der auf den Absorber fallende Lichtstrom sinnvoll genutzt werden kann, ist ein separater Strahlengang erforderlich. Das liegt daran, dass ein Schwenken der Lichtbündel innerhalb eines optischen Linsensystems mit denselben Krümmungsradien nur zu einem veränderten Lichtweg führt, das Abbild des DMD-Mikrospiegelarrays in der Bildebene aber an der konstanten Stelle bleibt.

Der Einsatz eines zweiten DMD-Chips nur für den Absorberstrahlengang erhöht die Kosten des Systems und reduziert den nutzbaren Lichtstrom des Absorberstrahlengangs des ersten DMD-Chips noch zusätzlich. Die Vor- und Nachteile der Absorberlichtnutzung sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Tabelle 5.6 Vor- und Nachteile der Absorberlichtnutzung

Vorteile der Absorberlichtnutzung	Nachteile der Absorberlichtnutzung
mehr Lichtstrom für eine größere Streubreite	2. Strahlengang notwendig
höherer Gesamtlichtstrom innerhalb jeder Lichtverteilung	Streubreite variiert je nach logischer Verknüpfung mit den ausgeblendeten Bereichen
Energiebilanz bleibt annähernd konstant bei jeder Lichtfunktion	beim Markierungs- und Displaylicht, bei der kollektiven Ausleuchtung und beim dynamischen Kurvenlicht (software-technische Lösung) ist eine logische Verknüpfung mit anderen Bereichen der Lichtverteilung nicht sinnvoll
	bei fahrerspezifischem Licht ist eine logische Verknüpfung mit anderen Bereichen der Lichtverteilung wenig sinnvoll.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass der Mehraufwand für eine Absorberlichtnutzung den Nutzen einer geringfügig und zeitweise verbesserten Randausleuchtung nicht rechtfertigt und deshalb hier nicht weiter verfolgt wird.

7. Umfeldverspiegelung zur Erzeugung einer Grundlichtverteilung

Über eine Umfeldverspiegelung oder eine zusätzliche statische Grundlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers kann der Wirkungsgrad des Gesamtsystems gesteigert werden, da in diesen Lichtverteilungsbereichen der Wirkungsgrad des DMD-Chip mit seinen effektiv 68% durch den wesentlich höheren Reflexionsgrad einer stetigen Spiegelfläche ersetzt wird, wodurch das Gesamtsystem energieeffizienter arbeitet. Zusätzlich weist das System durch eine Grundlichtverteilung eine erhöhte Zuverlässigkeit auf, da selbst bei einem Ausfall des DMD-Chips oder dessen Ansteuerungselektronik die statische Grundlichtverteilung erhalten bleibt, die dem Fahrer bei Dunkelheit das Lenken des Fahrzeugs zur nächsten Werkstatt ermöglicht. Dadurch wird die Fail-safe-Sicherheit des Gesamtsystems erhöht.

Vibrationen und mechanische Schwingungen

Die Abbildungsgüte des Systems wird neben den optischen Eigenschaften auch durch die Robustheit gegen mechanische Vibrationen bestimmt. Die mechanischen Erschütterungen und Beschleunigungsspitzen können die Mikrospiegel des DMD-Chips in ihrer Position beeinflussen. Darüber hinaus kann der Lichtbogen der UHP-Kurzbogenlampe schwingen. Das führt zu Unregelmäßigkeiten innerhalb der Lichtverteilung. Die optischen Komponenten des Strahlenganges sind ebenfalls möglichst stabil zu befestigen, da auch sie mit ihren Erschütterungen und Eigenresonanzfrequenzen zu Bildstörungen in horizontaler und/oder vertikaler Richtung führen können. Bei Nachtfahrten wurden bisher innerhalb der Lichtverteilung im Vorfeld

Unregelmäßigkeiten festgestellt. Deren Ursache konnte bei Vibrationsuntersuchungen auf einem Schwingungsprüfstand noch nicht eindeutig festgestellt werden.

Geometrie und Lebensdauer der DMD-Mikrospiegel

Ein Nachteil der bisherigen DMD-Mikrospiegelarrays besteht in der diagonal angeordneten Schwenkachse der Mikrospiegel, die zu einer aufwändigeren Optik führen. Die diagonal angeordnete Schwenkachse ist von Texas Instruments gewählt worden, damit die Länge der Torsionsgelenke der Mikrospiegel möglichst groß ist, wodurch größere Schwenkwinkel, geringere Rotationsbewegungen um die Spiegelnormale und geringere Torsionsspannungen innerhalb der Torsionsgelenke erzielt werden. Durch diese Vorteile kann die Lebensdauer der Torsionsgelenke, messbar in deren Schaltzyklen, erhöht werden. Alternativ lässt sich dadurch die Chiptemperatur erhöhen, da durch die geringen Torsionsspannungen die Gefahr von Relaxationsprozessen, d.h. Verlängerung der Torsionsgelenke bei dauerhafter Auslenkung in eine Richtung reduziert werden können.

5.3.4 Konstruktiver Aufbau des DMD-Scheinwerfers

Beim ersten Gesamtaufbau eines DMD-Scheinwerfer-Prototypen wurde darauf geachtet einen möglichst flexiblen Aufbau zu haben, der unterschiedliche Aufbaukonfigurationen bietet. Hierzu wurde, wie in Abbildung 5.14 dargestellt, ein Schienensystem verwendet, das auf einer Lochrasterplatte unterschiedliche Anordnungen, d.h. variable Winkel zwischen der Einkopplung und der Auskopplung des Strahlenganges ermöglicht.

Freiheitsgrade des Prototypenaufbaus

Auf dem Schienensystem sind die Optikkomponenten angeordnet. Sie können in ihrer Position verschoben werden. Als Freiheitsgrade wurden bei der Lampe neben dem Verschieben auf der optischen Achse, eine Variation der Lampenachsenhöhe und deren Neigung vorgesehen. Die Abstrahlcharakteristik der Lampe und deren optische Achse lässt sich dadurch auf das nachfolgend angeordnete optische System ausrichten. Die Linsen der Lichteinkoppelung lassen sich ebenfalls auf der optischen Achse variabel positionieren. Damit wird die Fokussierung des Lichtbündels auf den DMD-Chip und der maximal mögliche Lichtstärkegradient auf dem DMD-Chip bestimmt. Insbesondere bei den Lichtstärken für große Entfernungen ist die Leuchtdichteverteilung von großem Einfluss, da sie die maximalen Beleuchtungsstärken und deren relative Breite festlegt. Über einen Umlenkspiegel, der als Kaltlichtspiegel ausgeführt wurde, lässt sich der IR-Anteil der Lichteinkopplung auf den DMD-Chip minimieren. Indem die Neigung des Spiegels über Feintriebe verändert werden kann, ist es möglich, den Punkt der maximalen Lichtstärke innerhalb der Lichtverteilung in der vertikalen und horizontalen Winkelposition zu verschieben. Mit einer Feldlinse wird das einfallende Lichtbündel über den DMD-Chip auf die Auskoppeloptik abgebildet. Die Feldlinse erlaubt mit großen Strahldurchmessern die Lichteinkopplung auf dem DMD-Chip aufzubauen, wodurch eine besonders lichtstarke Lichteinkopplung und eine darauf abge-

stimmte lichtstarke Lichtauskopplung möglich ist. Das den optischen Strahlengang limitierende Etendué des DMD-Chips kann dadurch am besten ausgenutzt werden.

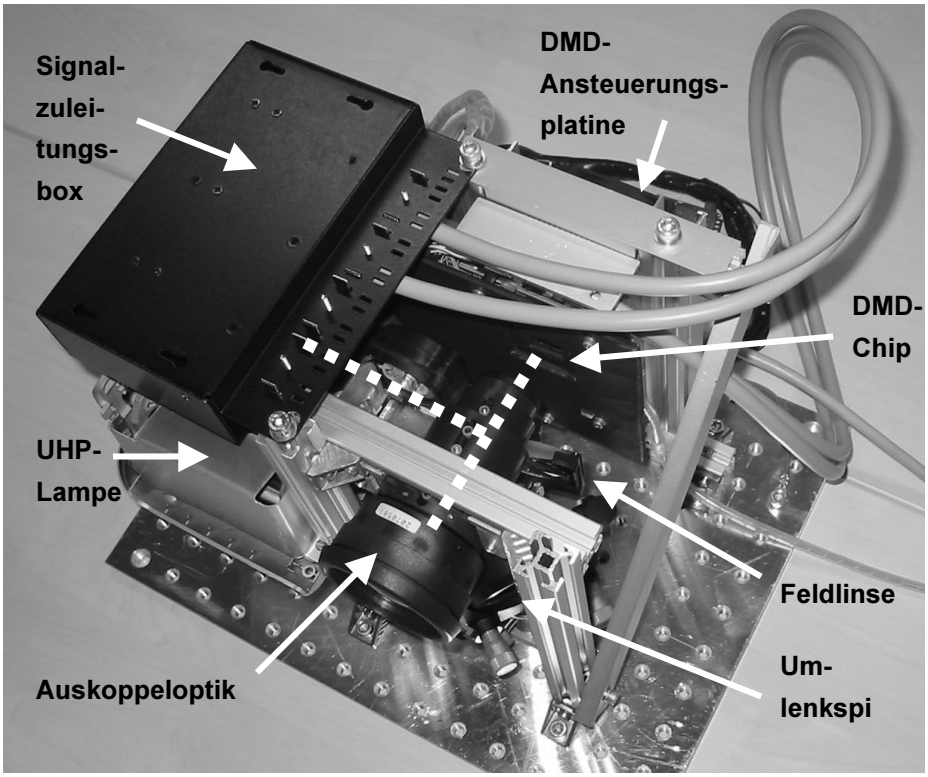


Abbildung 5.14: Konstruktiver Aufbau des DMD-Scheinwerfers

Mit der Auskoppeloptik wird die Größe der Abbildung des DMD-Chips auf der Straße und die Breite der Ausleuchtung festgelegt. Das erfolgt durch den Abbildungsmaßstab, der durch die Gesamtbrennweite des optischen Systems festgelegt wird. Mit geeigneten optischen Mitteln kann das Aspektverhältnis des DMD-Chips angepasst werden. Hierzu wurden zwei Zylinderlinsen gekreuzt angeordnet, wobei die Linsen mit ihren Brennweiten die Größe der Abbildung in ihrer optisch aktiven Koordinatenrichtung festlegen. Eine Alternative besteht in der Kombination aus einer Sammellinse und einem Zylinderlinsen-Aplanat. Die Sammellinse übernimmt dabei die abbildenden Eigenschaften und eine Kombination aus einer sammelnden und einer zerstreuenden Zylinderlinse weitet das Abbild in der horizontalen Orientierung. Die Anordnung der Zylinderlinsen besteht in einer umgekehrten Fernlichtanordnung.

Mitteloptikanordnungen und deren Konsequenzen

Unter der Mitteloptik werden in dieser Arbeit die Anordnungen der Strahlengänge und die Winkellagen der Lichtein- und Lichtauskopplung relativ zum DMD-Chip verstanden. Die Lichteinkopplung kann unter einem Winkel von horizontal und vertikal geneigten 12° erfolgen [8.7, NÖLKEL, 2002], vgl. auch Tabelle 5.3, Zeile An2, auf S.105. Die Neigung der Lichteinkopplung sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung ist Folge der um 45° geneigten Drehachse der DMD-Mikrospiegel und deren einfachem Schwenkwinkel von 12°. Das Reflexionsgesetz bewirkt bei einer Lichteinkopplung von 24° von unten eine senkrechte

Lichtauskopplung in der unteren Nutzlichtstellung der Mikrospiegel. In der oberen Absorberlichtstellung der Mikrospiegel wird das Lichtbündel unter einem Winkel von 2 x 36° (=24° + 12°) = 72 ° abgelenkt.

Weitere Alternativen bestehen in einer senkrechten Lichteinkopplung oder einer noch stärker geneigten Lichteinkopplung.

Die senkrechte Lichteinkopplung ermöglicht nur einen Abstand von insgesamt 48° zwischen dem Auskoppelstrahlengang und dem Absorberstrahlengang. Die geringe Winkeldifferenz kann zu einem reduzierten Kontrast im Auskoppelstrahlengang führen. Die Abbildungsqualität des Auskoppelstrahlengangs ist schlechter, da der DMD-Chip und der Auskoppelstrahlengang nicht senkrecht zueinander orientiert sind.

Bei einer stärker geneigten Lichteinkopplung verschlechtert sich die Abbildungsgüte des DMD-Chips und dieser heizt sich zusätzlich auf. Daher wurde auch von dieser Alternative Abstand genommen.

Als Anordnung wurde neben einer T-Konfiguration, siehe Abbildung 5.14, mit der die höchste Beleuchtungsstärke erzielt wurde, auch eine Z-Konfiguration untersucht. Bedingt durch die Abmessungen der DMD-Ansteuerungsplatine lässt sich nur eine Winkelanordnung von ca. 30° zwischen dem Auskoppelstrahlengang und dem Einkoppelstrahlengang realisieren. Eine Überlagerung der DMD-Lichtverteilung mit einer Grundlichtverteilung, die Teile des Einkoppelstrahlenganges umfasst, wäre nur bei einer parallelen Orientierung von Ein- und Auskoppelstrahlengang möglich gewesen. Die Grundlichtverteilung bietet eine breitere Randausleuchtung des Abblendlichts. Ergänzend könnte der obere Teil der Ausleuchtung als ein mit einem Schaltspiegel freigeschaltetes Fernlicht ausgeführt sein. Anstelle des Schaltspiegels könnte auch ein für IR-Strahlung durchlässiger Kaltlichtspiegel eingesetzt werden, der eine IR-Fernlichtverteilung auf die Straße transmittiert, die durch ein IR-Nachtsichtsystem ausgewertet und dem Fahrer auf einem Display zur Verfügung gestellt werden könnte.

Eine Umsetzung der Umfeldverspiegelung konnte mit dem bisherigen DMD-Chip-Design nicht erfolgen, da die Umfeldverspiegelung nicht in derselben Abbildungsebene wie die DMD-Mikrospiegel angeordnet werden konnte. Das hat zur Folge, dass die Umfeldverspiegelung auf der der Lichteinkopplung zugewandten Seite einen Schatten auf den DMD-Chip wirft. Dieser Schatten kann bei einer vorgelagerten Umfeldverspiegelung nicht vermieden werden, da die Lichteinkopplung und die Lichtauskopplung aus unterschiedlichen Winkeln erfolgt. Auf der Lichteinkopplung abgewandten Seite des DMD-Chips sorgt die vorgelagerte Umfeldverspiegelung für eine Abschattung des Lichts bei dessen Auskopplung und bei der Absorberlichtstellung der Mikrospiegel. Beide Abschattungen sind von geringer Bedeutung, da sie das ausgekoppelte Bild nur unwesentlich negativ beeinflussen.

Wichtige Voraussetzung für eine effiziente Nutzung der Umfeldverspiegelung ist eine Anpassung der Lichteinkopplung, damit auch die Umfeldverspiegelung mit der gewünschten Lichtstärke angestrahlt wird.

Das Referenzobjektiv des Videoprojektors kann für die Umfeldverspiegelung nicht verwendet werden, da in ihm eine Blende (in der Zwischenbildebene) eingefügt ist, die einen stark divergenten Strahlenverlauf der Umfeldverspiegelung abschattet. Zusammengefasst ist die Umfeldverspiegelung nach bisherigem Kenntnisstand eher als problematisch einzustufen, da sie bisher keine lückenlose Ergänzung der über den DMD-Chip erzeugten Lichtverteilung ermöglicht.

5.3.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit des DMD-Scheinwerfers

Die lichttechnische Leistungsfähigkeit des DMD-Scheinwerfers ist gekennzeichnet durch den Wirkungsgrad der Lampe, der Einkoppeloptik, der Mitteloptik sowie des DMD-Chips und der Auskoppeloptik. Die Effizienzbetrachtung des lichttechnischen Systems DMD-Scheinwerfer wird in Kapitel 6.5.1 vorgenommen. Neben der elektrischen Leistung der Lampe lässt sich der DMD-Scheinwerfer durch dessen maximalen Lichtstrom in der Fernlichtverteilung und die maximale Streubreite der Lichtverteilung beschreiben. Die Gleichmäßigkeit der Lichtverteilung ist ein weiteres Kriterium. Dieses wird in Kapitel 6.5.2 genauer betrachtet. Die Flexibilität der Lichtverteilung wird durch das Auflösungsvermögen des DMD-Chips mit z.B. 1024 x 768 Pixeln = 786.432 Einzelspiegeln und den erzielbaren Kontrast innerhalb der Lichtverteilung generiert. Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit der beiden aufgebauten Scheinwerfer-Prototypen wird in Tabelle 5.7 vorgenommen.

Vergleich der Leistungsfähigkeit der DMD-Scheinwerferprototypen

Im Rahmen von vier Diplomarbeiten [8.7, NÖLKEL, 2002], [8.7, SPRENGER, 2003], [8.7, MÖNCHMEIER, 2004] und [8.7, TAUBENRAUCH, 2004] wurden zwei DMD-Scheinwerfer aufgebaut, Abbildung 6.1 und 6.2 in Kapitel 6.3, S.205.

Wie aus Tabelle 5.7 ersichtlich wird, haben die beiden DMD-Scheinwerfer unterschiedliche Entwicklungsziele gehabt. Der erste DMD-Scheinwerfer (I) sollte eine möglichst lichtstarke Lichtverteilung haben, deren Lichtstrom, Lichtstärke, resultierende Beleuchtungsstärke und Kontrast maximiert wurde. Hierbei wurde ein größeres Optikbauvolumen und ein höherer Leistungsbedarf in Kauf genommen. Beim zweiten DMD-Scheinwerfer (II) stand die Bauraumminimierung und die Funktionserweiterung durch ein integriertes dynamisches Kurvenlicht im Vordergrund. Durch den geringeren Leistungseinsatz steht beim zweiten Prototyp allerdings ein geringerer maximaler Lichtstrom zur Verfügung. Dieser konnte nur mit einer kleineren Lichtstärke auf die Straße gelenkt werden, sodass die maximale Beleuchtungsstärke abnahm. Dennoch wurde die Beleuchtungsstärke in 25m Entfernung um den Faktor 5 gegenüber einem leistungsgleichen DMD-Videoprojektor gesteigert. Das optische System des zweiten DMD-Scheinwerfers (II) hat u.a. im Kontrast noch Optimierungspotenzial. Der Wirkungsgrad seines optischen Systems zeigt eine Verbesserung um 19%. Deutliche Fortschritte wurden in der Bauraumminimierung erzielt, sodass das Bauvolumen der Optikeinheit um 86% gesenkt werden konnte. Zusammengefasst ist der zweite DMD-Scheinwerfer (II) ein großer Schritt in Richtung einer DMD-Scheinwerfer-Serienvorentwicklung.

Tabelle 5.7: Leistungsfähigkeitsvergleich der DMD-Scheinwerfer-Prototypen

Kategorie	DMD-Scheinwerfer (I)	DMD-Scheinwerfer (II) (noch nicht optimiert)	II vs. I in %
Lichtverteilung	Gesamtlichtverteilung aktiv	Teillichtverteilung aktiv + dynamisches Kurvenlicht	
Erhöhung des Gesamt-Wirkungsgrades / Zusatzlicht-Funktionen	ausgekoppelte IR-Strahlung könnte für Nightvision-HB verwendet werden	Lichtverluste könnten für eine Grundlichtverteilung verwendet werden	
Diplomarbeiten von:	[8.7, NÖLKEL, 2002], [8.7, SPRENGER, 2003]	[8.7, MÖNCHMEIER, 2004], [8.7, TAUBENRAUCH, 2004]	
Streubreite	(bisher) +/-14,5°	+/-14,8°	+ 2%
Leistungsbedarf	220 W	145 W	-34%
maximaler Lichtstrom	1.750 lm	1.370 lm	-22%
Maximale Beleuchtungs-stärke	109 lx	53 lx	-51%
Kontrast	1:800	1:72	-91%
Wirkungsgrad-Gesamt-system (HB) in lm / W	7,95 lm / W (HB) bei ca. 22.000 lm Lampenlichtstrom	9,45 lm / W (HB) bei ca. 14.000 lm Lampenlichtstrom	+19%
Optikbauraum (h x b x l)	240 x 245 x 310 mm³	80 x 120 x 270 mm³	-86%

5.4 AMD-Scheinwerfer

5.4.1 Funktionssynthese

Ausgehend von den DMD-Mikrospiegelarrays, die bisher in Videoprojektoren eingesetzt werden und die nur digital schaltbar sind, sollen diese Arrays zu analog ansteuerbaren Mikrospiegelarrays (AMD) weiterentwickelt werden. Das AMD-Mikrospiegelarray hat Einzelspiegel, die analog in beliebigen Winkelstellungen angesteuert werden können. Darüberhinaus besitzt jeder Mikrospiegel bis zu zwei senkrecht aufeinander stehende Schwenkachsen. Diese Ausgestaltung hat den Vorteil den Lichtstrom innerhalb einer Lichtverteilung energetisch günstig umzuverteilen. Hierdurch bleibt die Gesamtenergiebilanz der Scheinwerfer-Lichtverteilungen konstant, da jede Lichtverteilung denselben Lichtstrom in einer unterschiedlichen Verteilung aufweist. Im Gegensatz zum DMD muss in vielen Fällen kein Licht auf einen Absorber gelenkt werden. Die analogen Mikrospiegelarrays haben keine digitale logische Verknüpfung zwischen den Schaltpositionen der Mikrospiegel. Eine logische Entweder-Oder-Verknüpfung zwischen Bereichen einer Lichtverteilung besteht bei ihnen im Gegensatz zu den DMD-Mikrospiegelarrays nicht. Die beiden senkrecht stehenden Drehachsen des AMD-Einzelspiegels ermöglichen eine hohe Variabilität in der Umverteilung des Teillichtbündels eines AMD-Einzelspiegels innerhalb der Gesamtlichtverteilung des aktiven Scheinwerfers.

Über eine Kooperation des L-LAB mit dem Fachgebiet Sensorik, Prof. Hilleringmann, Universität Paderborn, wurden mehrere Mikrospiegelarrays aufgebaut, die analog ansteuerbar und um zwei Achsen kippbar sind. Diese weisen universell einsetzbare Spiegelgeometrien auf und können daher in unterschiedlichen Scheinwerferaufbauten verwendet werden. Diese Mikrospiegel sind noch Technologie-Demonstratoren und die Leistungsfähigkeit des verwendeten Layouts ist bisher hinsichtlich Flächennutzungsgrad und Schwenkwinkel noch nicht überzeugend. Daher werden voraussichtlich weitere Mikrospiegel in einem verbesserten Layout aufgebaut. Bisher wird als Aufbauverfahren nur eine ebene Unilayer-Aufbautechnik für die Mikrospiegel verwandt. Die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens und die Eigenschaften der analogen Mikrospiegel der Uni Paderborn werden in diesem Kapitel ebenfalls beschrieben. Die Funktionsstruktur des AMD-Scheinwerfers lässt sich der folgenden Abbildung 5.15 entnehmen.

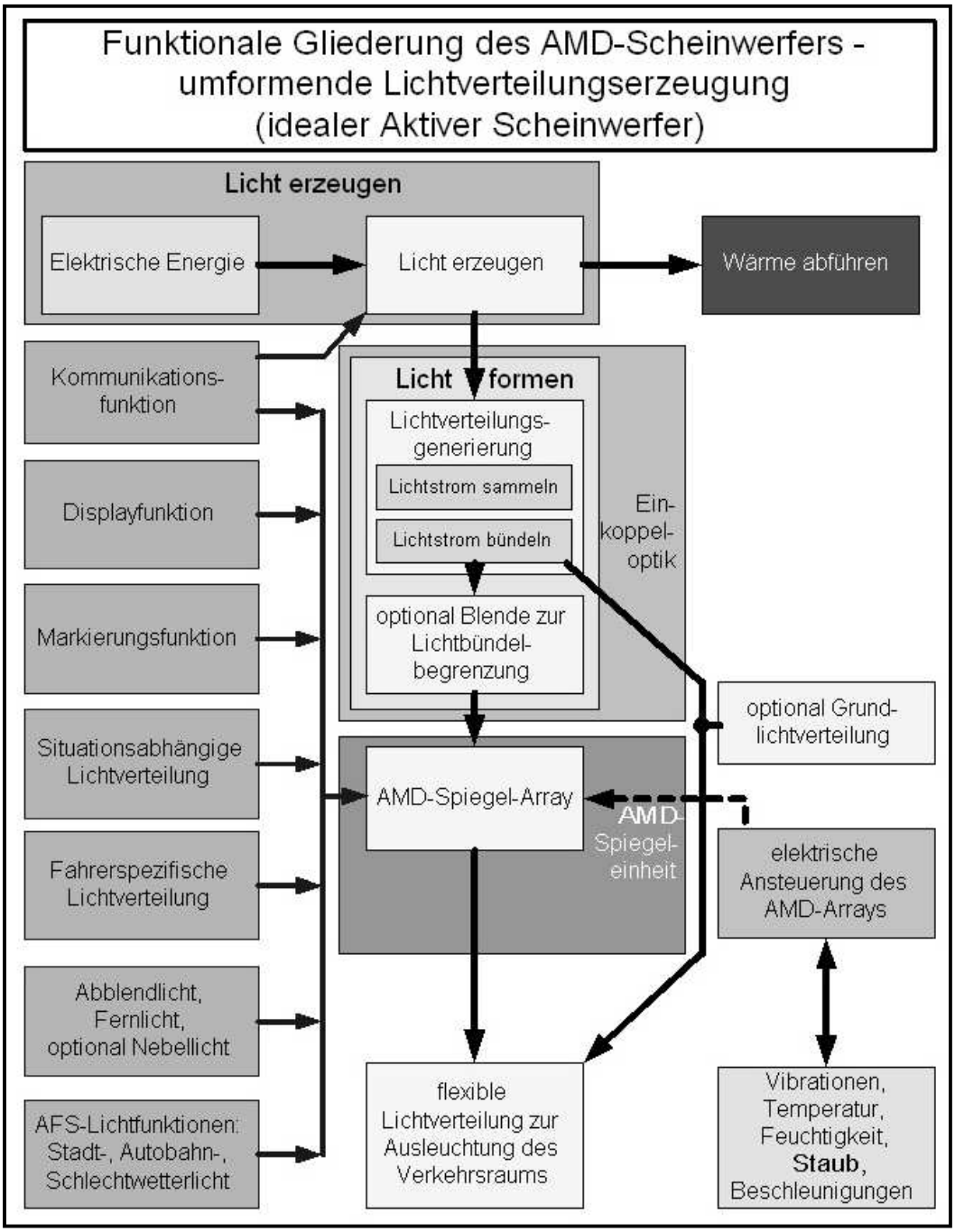


Abbildung 5.15: Funktionsstruktur des AMD-Scheinwerfers

Varianten der analogen Mikrospiegelarrays

Als Funktionsprinzipien bei analogen Mikrospiegelarrays ergeben sich folgende Varianten:

1. einachsig, analog schwenkbare Mikrospiegelarrays
2. zweiachsig, analog schwenkbare Mikrospiegelarrays
3. Phasenshift-Arrays

Je nach Anwendungsfeld können den Mikrospiegeln mit nur einer analog schwenkbaren Achse weitere Mikrospiegel oder ein Makrospiegel nachgeschaltet werden, um die zweite Schwenkbewegungsrichtung zu ermöglichen.

Unterschied zwischen phasenmodulierenden, phasen-schiebenden und lichtlenkenden AMD-Spiegelstrukturen.

Das Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme, IPMS, arbeitet auf dem Gebiet der Lichtmodulatoren mit mikromechanischen Spiegelarrays. Die Flächenlichtmodulatoren (Surface light modulators, SLM) arbeiten mit deformierbaren Spiegelanordnungen. Sie bestehen aus einem Array von unabhängig voneinander adressierbaren Mikrospiegeln, die mit einer aktiven Matrix-Ansteuerung betrieben werden und die in einem CMOS-kompatiblen Prozess hergestellt werden. Die Spiegelstrukturen werden in einer Opferschicht-Technik hergestellt, wobei nach dem Aufdampfen einer Aluminiumschicht, der darunter liegende Hohlraum freigeätzt wird. Es entstehen frei tragende Spiegelelemente mit darunterliegenden Steuerelektroden, die über Aluminiumstützstrukturen getragen werden. Die Mikrospiegel werden über eine Steuerspannung zwischen Spiegel und Steuerelektrode auslenkt, indem die Spiegel auf Grund von elektrostatischen Kräften in Richtung der Steuerelektrode ausgelenkt werden. Bisher werden diese Elemente ausschließlich zur Phasenmodulation eingesetzt. Über eine Weiterentwicklung der Mikrospiegelelemente mit mehreren Adresselektroden lassen sich auch Kippungen der Mikrospiegel realisieren, die das Lichtlenken erlauben. Als phasenmodulierendes Element wird eine pyramidale Verformung von Spiegelecken verwendet [8.2, FRAUNHOFER IPMS 2003], Abbildung 5.16 oben. Bei dem phasenschiebenden Element werden die Mikrospiegel über eine Quadro-Lenker-Struktur in ihrer senkrechten Orientierung zu den einfallenden Lichtstrahlen in Richtung ihrer Spiegelnormalen verschoben, Abbildung 5.16 unten.

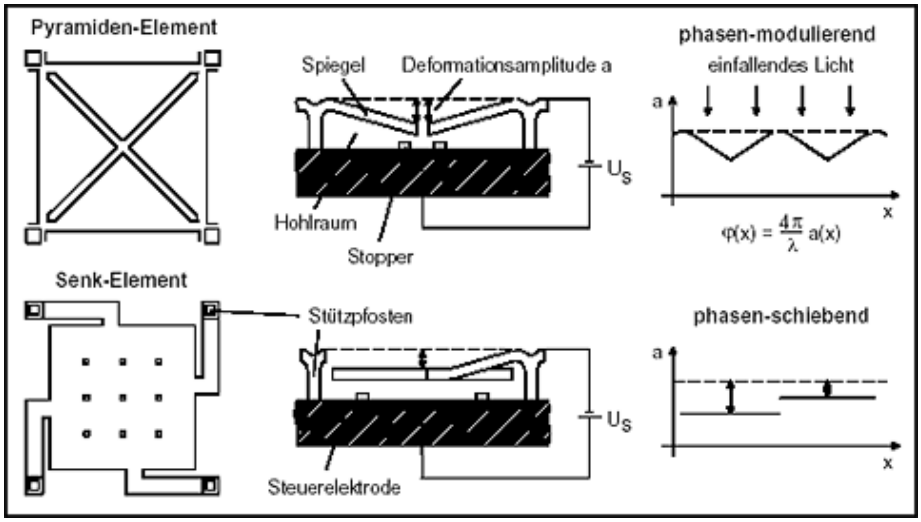


Abbildung 5.16: Schematische Darstellung von Aufsicht, Querschnitt und resultierendem Phasen-Profil für zwei verschiedene Mikrospiegelvarianten [8.2, FRAUNHOFER IPMS, 2003-1]

In der vorliegenden Arbeit findet eine Beschränkung auf lichtlenkende Strukturen statt, deren Spiegelnormale geschwenkt bzw. gekippt wird. Teilweise werden in der Literatur die Mikrospiegelarrays auch als Mikro-Opto-Elektro-Mechanische-Systeme (MOEMS) in Siliziumtechnologie bezeichnet.

[8.2, KIM, 2000] beschreibt die prozesstechnische Entkopplung in der Herstellung von Mikrospiegelarrays. Dabei wird die Entwicklung von 3 Generationen von Mikrospiegelarrays beschrieben, angefangen von einem Uni-Layer-Design zu einem Mehr-Layer-Thinfilm-Micromirror-Array, bei dem die Spiegelfläche als separate Ebene über der piezoelektrisch betätigten Auslenkstruktur angeordnet ist. Die 97µm Kantenlänge großen Spiegel werden um eine Achse ausgelenkt.

Abbildung 5.17: Mikromechanische Scanner-Spiegel (1D und 2D) [8.2, FRAUNHOFER IPMS, 2003-2]

Die in Abbildung 5.17 dargestellten mikromechanischen Scannerspiegel werden zur ein- und zweidimensionalen Ablenkung von Licht eingesetzt. Sie werden in einem CMOS-kompatiblen Prozess hergestellt. Die Ablenkwinkel von bis zu +/-30° werden bereits bei 20V Antriebsspannung erreicht. Die Spiegelabmessungen liegen im Bereich von 0,5 x 0,5 mm² bis 3 x 3 mm² bei Scanfrequenzen von 150 Hz bis 32 kHz. Bei diesen Mikrospiegeln handelt es sich um Resonanzscanner. Sie werden in der Barcode- und Symbolerkennung, der Objektvermessung, der Projektion, der Endoskopie und der Laserkennzeichnung angewandt. [8.2, FRAUNHOFER IPMS, 2003-2].

AMD-Chipdesign

Ausgehend von Mikrospiegeln aus der Literatur wurden elektrothermisch auslenkbare AMD-Mikrospiegel [8.2, HILLERINGMANN, 2004] entworfen und aufgebaut.

Bei dem AMD-Chip-Design der Einzelspiegel lassen sich folgende Möglichkeiten aufzeigen:

1. Quadratisch (bisheriges Design) mit 4 oder 3 Anlenkarmen
2. Rechteckig (Anpassung an Wendelbilder) mit 4 oder 3 Anlenkarmen
3. Dreieckig (symmetrisch und asymmetrisch) mit 3 Anlenkarmen
4. Sechseckig (symmetrisch und asymmetrisch) mit 3 oder 4 Anlenkarmen
5. Fünfeckig mit 3 oder 4 Anlenkarmen

Um einen hohen Flächennutzungsgrad zu erzielen, muss eine regelmäßige Fläche gefunden werden, die ohne Lücken ein Master-Layout für eine Kette bzw. eine Matrix aus Einzelelementen darstellt und dadurch den Halbleiter-Nutzen effizient nutzt.

Bei der Aufhängung der Einzelspiegel kann für eine kontrollierte Kippbewegung in 2 Schwenkrichtungen eine 3-Punkt oder eine 4-Punkt-Aufhängung gewählt werden. Für große Kippbewegungen sind lange Schwenkarme erforderlich, die teilweise mit spannungskompensierenden Strukturen an die Spiegelfläche oder an eine Hilfs-Zwischenebene angelenkt werden. Wird ein Ein-Ebenen-Layout gewählt, so sind die Auslenk- und Antriebsstrukturen und die Leitungsbahnen der Stromzuführung ebenfalls in derselben Ebene angeordnet. Diese beiden Supportstrukturen reduzieren allerdings den Gesamtflächennutzungsgrad des AMD-Chips. Über eine sinnvolle Gruppierung von Einzelspiegeln kann die Zahl der Zuleitungen deutlich reduziert werden und damit auch die Ansteuerungsproblematik erheblich vereinfacht werden.

Die maximale Auslenkung der Einzelspiegel ist abhängig vom AMD-Chip-Design. Daher können mit langen Halte- und Bi-Material-Strukturen große Auslenkungen erzielt werden. Diese sind um so größer, je geringer der Abstand zwischen benachbarten Haltestrukturen an die Einzelspiegelfläche ist, da der relative Hub zwischen benachbarten Haltestrukturen, die Größe der Auslenkwinkel definiert. Spannungskompensierende Strukturen, die nachgiebig sind und die Längenreduktion durch die räumlich schrägstehenden Haltestrukturen ausgleichen, erhöhen ebenfalls den Auslenkwinkel. Begrenzend für den Auslenkwinkel ist die Einzelspiegelfläche und –dicke bzw. die Si-Wafer-Dicke. Bedingt durch das Aufbringen der Nickel- / Titan-Heizmaterials an der Chip-Oberfläche, wird der AMD-Spiegel stets nach unten ausgelenkt und stößt dabei an die Montagefläche des Chip-Gehäuses. Die Auslenkung kann dabei durch die thermische Ausdehnung der Bi-Material-Streifen stets nur nach unten erfolgen. Durch eine räumliche Umkehr dieser Strukturen könnte die Auslenkung nach oben erfolgen, wodurch evtl. größere Auslenkungen möglich wären. Das lässt sich nach heutigem Kenntnisstand technologisch nicht mikrolithographisch herstellen. Nur bei einer inversen Montage wären die größeren Auslenkungen evtl. umsetzbar.

Ein oder zwei Drehachsen

Eine Schwierigkeit bei mikrosystemtechnisch herstellten Elementen liegt darin, die Anbindung an die „Makrowelt“ zu gewährleisten. Bisher wurde dabei die Verwendung eines Elektronikchip-Gehäuses gewählt, in dem der AMD-Chip platziert wurde. Das Elektronik-Chip-Gehäuse hat dabei neben der mechanischen Lagerung auch die Aufgabe der elektrischen, lösbaren Verbindung des AMD-Chips mit einer Ansteuerungsplatine sowie der thermischen Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung zu erfüllen. Wird ein optisch transparentes Abdeckglas verwendet, so kann zusätzlich ein Staub- und Feuchtigkeitsschutz für den AMD-Chip erzielt werden. Eine Herausforderung innerhalb des AMD-Chip-Gehäuses besteht in der elektrischen Verbindung der AMD-Chip-Zuleitungs-felder mit den inneren Kontaktstellen des Chip-Gehäuses mit Bonddrähten. Da für jeden einzeln adressierbaren AMD-Spiegel bis zu 5 Zuleitungen (vier für die Leistungszufuhr der thermoelektrisch ausgelenkten Bi-Material-Haltearme und eine Massezuleitung) erforderlich sind, werden zusätzlich hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit des Bondens und der AMD-Chip-Herstellung und –Montage gestellt, damit die Yield-Rate, d.h. die Chip-Ausbeute pro prozessiertem Silizium-Wafer möglichst hoch ist.

5.4.2 Modularisierung

Einkoppeloptik

Die Einkopplung des Lichtstroms auf das AMD-Mikrospiegelarray kann durch einen Freiform-Reflektor erfolgen, Abbildung 5.18, der dafür sorgt, dass das AMD-Array ungleichmäßig oder auch homogen ausgeleuchtet wird. Bei einer ungleichmäßigen Ausleuchtung wird die reflektierte Lichtstärke der AMD-Mikrospiegel unterschiedlich hoch gestaltet, sodass die Mikrospiegel mit einem hohen Lichtstrom und einer hohen Lichtstärke für die Fernfeldausleuchtung verwendet werden können. Andere Bereiche können eher für untergeordnete Beleuchtungsaufgaben verwendet werden. Maßgeblich bei der Ausleuchtung ist die Divergenz des eingekoppelten Strahlenbündels. Diese wird bestimmt durch die reale Lichtquellengröße sowie den Abbildungsmaßstab zwischen Lichtquelle, erstem Reflektor und AMD-Array-Auftreffpunkt. Je nach Divergenz des Einkoppelstrahlenbündels wird ein lichtstärkeres, kleineres Wendelbild oder ein lichtschwächeres, größeres Wendelbild über das AMD-Array abgelenkt. Die Lage dieser Wendelbilder wird durch die Winkelstellung der AMD-Mikrospiegel festgelegt. Die Orientierung der Wendelbilder wird durch die räumliche Lage des Reflektorelements des ersten Reflektors relativ zur Lichtquellenposition bestimmt. Durch die Verwendung eines Einkoppelreflektors und eines AMD-Arrays tritt bei diesem Scheinwerfertyp eine Mehrfachreflexion an Freiform-Flächen auf. Theoretisch denkbar ist auch die Nutzung des direkt in Richtung oder nahe der Richtung der Lage des AMD-Arrays abgestrahlten Lichtstroms, wenn eine Linse für deren Lichtlenkung auf das AMD-Array oder ein CPC- oder eine TIR-Optik verwendet wird, ähnlich Abbildung 5.18 Mitte. Das hat allerdings zur Konsequenz, dass mehrere Wendelbilder über denselben AMD-Mikrospiegel abgelenkt werden können, die zu einer Überlagerung der Wendelbildlage der beiden Lichtwe-

ge auf der Straße führen. Wird für dieses direkt abgestrahlte Licht über ein zweites AMD-Array gelenkt oder werden (Teil-)Bereiche des AMD-Arrays nur für das direkt abgestrahlte Licht verwendet, Abbildung 5.18 links, so kann diese Zweideutigkeit vermieden werden.

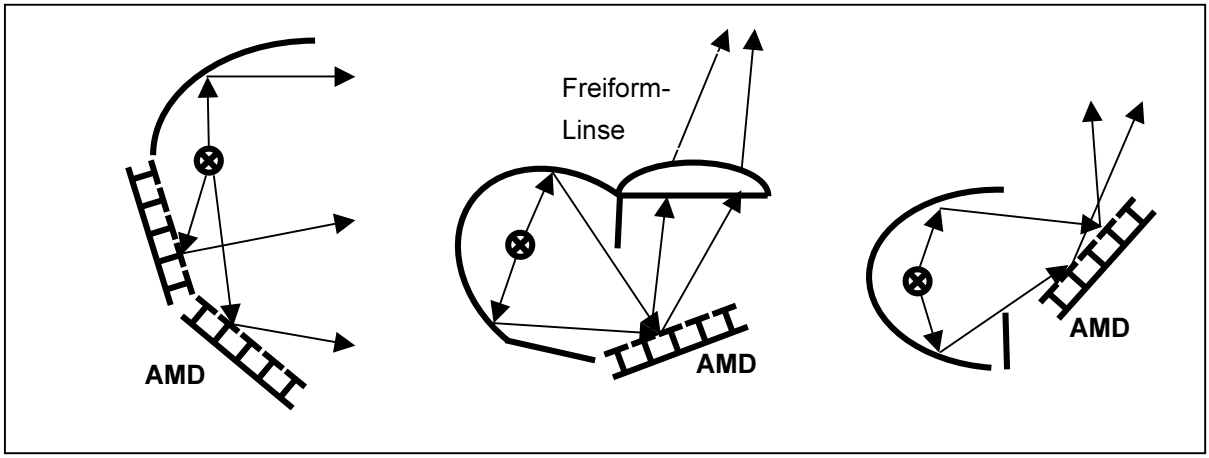


Abbildung 5.18: AMD-Mikrospiegel-Anordnungen: Reflexions-AMD-Anordnung (links), Projektions-AMD-Blendenanordnung (mittig) und Projektions-AMD-Linsenanordnung (rechts)

Mitteloptik

Auf eine Mitteloptik kann bei der Reflexions-AMD-Anordnung, Abbildung 5.18 links, verzichtet werden.

Bei der Projektions-AMD-Blendenanordnung, Abbildung 5.18 mittig, wird anstelle einer Blende das AMD-Mikrospiegelarray eingesetzt. Der sonst an einer Blende in Wärme, d.h. IR-Strahlung gewandelte Lichtstrom, wird hier beim Einsatz einer Freiform-Linse und eingeschränkten Lichtbündeldivergenzen in andere Bereiche der Lichtverteilung gelenkt. Die Flächen am Rand des Freiform-Ellipsoid-Reflektors sind Teile einer CPC-Optik.

In der Projektionsbauvariante des AMD-Scheinwerfers, Abbildung 5.18 rechts, kann zwischen dem ersten Reflektor und dem AMD-Array eine Feldblende eingefügt werden, die eine scharfe Begrenzung der Wendelbilder der Zwischenbildebene ermöglicht. Die Lage und die Größe dieser Blende sollte so gewählt werden, dass die Lichtstromverluste minimal sind.

Je nach AMD-Anordnung kann anstelle der Feldblende, Abbildung 5.18 rechts, eine CPC- oder TIR-Optik, Abbildung 5.18 mitte (links neben AMD-Array), eingesetzt werden.

Auskoppeloptik

Bei der Reflexions-AMD-Anordnung ist keine Auskoppelung erforderlich, da die Lichtverteilung durch die Überlagerung der Wendelbilder geschieht.

Im Gegensatz zu optischen Konzepten mit einem DMD-Mikrospiegelarray wird beim AMD-Mikrospiegelkonzept keine weitere optische Abbildung, Abbildung 5.18 rechts, vorgenom-

men. Das ist erforderlich, da jede nachgeschaltete Linse (keine Freiformlinse) das Mikrospiegelarray abbildet, wodurch die gezielt beim AMD gewünschte Änderung der Lage des reflektierten Lichtbündels nicht mehr erfolgt. Durch die Verwendung einer konventionellen Linse würde sich nur die Größe der projizierten, gekippten Spiegelfläche ändern, deren räumliche Lage bliebe allerdings konstant. Je nach Kippstellung der Mikrospiegel ist dabei die Abbildung der Spiegel mehr oder weniger lichtstark. Bei der Winkelstellung der Mikrospiegel, welche das Licht an der Linse vorbei und auf den Absorber lenkt, wird der gesamte Lichtstrom dort in Wärme umgewandelt. Diese Ansteuerungsvariante des AMD-Chips entspricht dann der eines DMD-Mikrospiegels.

Lichtstrahlen, die für eine optische Abbildung der Lage des AMD-Mikrospiegels sorgen, würden nur einen anderen Lichtweg innerhalb des geometrischen Flusses des Systems wählen, der Ort und die Lage der Abbildung werden allerdings allein durch das dann gewählte Auskoppelobjektiv festgelegt. Demgegenüber wird in der AMD-Anordnung, Abbildung 5.18 mittig, nicht nur das AMD-Array als Ganzes unbeleuchtet abgebildet, sondern jedes divergente Lichtbündel, das von jedem einzelnen AMD-Mikrospiegel individuell abgelenkt wird, trifft auf die Auskoppellinse, deren Linsenkrümmung eine Neuausrichtung des divergenten Strahlenbündels bewirkt und dieses in ein konvergentes Strahlenbündel (im Falle einer Konvexlinse) überführt. Je nach Lage des AMD-Mikrospiegels relativ zur Linse und je nach Einfallswinkel des Lichtstrahlenbündels auf die Linse wird das Lichtbündel nicht nur auf die Straße abgebildet, sondern kann in diesem Fall auch einen anderen Bildpunkt auf der Straße erreichen als das die klassische optische Abbildung könnte. Diese Funktionsweise der mittleren AMD-Anordnung ist nur mit Lichtbündeln einer geringen Divergenz (mit entsprechenden lichttechnischen und optischen Einschränkungen: geringer Lichtstrom und reduzierter Lichtstärke) möglich.

Die Leistungsfähigkeit des AMD-Arrays in Bezug auf die Lichtstromlenkung und den Energietransport wird durch den Flächennutzungsgrad des AMD-Arrays und dessen Reflektivität bestimmt. Wie bei einem Projektionsmodul bildet auch bei einem AMD-Array eine größere Linse bzw. ein größeres AMD-Array einen höheren Lichtstrom ab und bietet dadurch die Möglichkeit zu einer höheren Beleuchtungsstärke im Bildraum. Das AMD-Array könnte dabei als frei adressierbares Mikrospiegelarray die approximierte Form eines Freiform-Spiegels annehmen, der der Lichtstromlenkung dient, aber auch eine optische Abbildung erzeugen kann. Der Lichtstrom kann dabei auf einen Punkt konzentriert werden (im Rahmen der optischen Abbildungsmaßstäbe und der Divergenz des auftreffenden Lichtstrahlenbündels) oder er kann für die gewünschte Lichtverteilung, z.B. Fernlicht mit hohen Lichtstärken im Zentrum oder Lichtverteilungen mit einer hohen Streubreite verwendet werden. Die Vor- und Nachteile des AMD-Arrays sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

abelle 5.8: Vor- und Nachteile des AMD-Arrays

Vorteile des AMD-Arrays:
analoges Schwenken in zwei Koordinatenrichtungen
freie Adressierbarkeit der Mikrospiegel
fast jede beliebige Lichtverteilung programmierbar
keine Energieverluste durch den Verzicht auf Blenden im Strahlengang des Systems
konstant hohe Lichtstrombilanz bei allen Lichtverteilungen, optional dennoch Blendenfunktion möglich.
Nachteile des AMD-Arrays:
Lichtstromverluste durch den begrenzten Flächennutzungsgrad des AMD-Spiegelarrays
hohe Kosten durch Herstellungsprozess, Baugröße und begrenzte Verfügbarkeit
evtl. notwendige Positionserfassung der AMD-Spiegel ist aufwändig / schwierig
Überlagerung der Wendelbilder in unterschiedlicher Größe, Lage und Orientierung erschwert die Darstellung von kleinen Strukturen und Helligkeitskontrasten innerhalb der Lichtverteilung
aufwändige Ansteuerung und Programmierung der AMD-Mikrospiegelarrays

5.4.3 Dimensionierung

Spiegelmaterialien

Als Spiegelarraymaterialien werden folgende eingesetzt:

1. Silizium
2. Aluminium
3. Nickel oder Titan für den Bi-Materialeffekt

Je nach verwendetem Spiegelmaterial lassen sich unterschiedliche Aufbauprozesse und Verfahrensschritte zur Mikrospiegelherstellung anwenden.

Prozessschritte zur Herstellung der Mikrospiegelarrays – Flächennutzungsgrad der AMD-Spiegelarrays und deren Optimierung

Wird Silizium als Spiegelmaterial verwendet, so lassen sich die Mikrospiegel auf einem Siliziumwafer planar herstellen. Das planare Aufbauprinzip hat allerdings zur Konsequenz, dass, je nach Antriebsprinzip die Aktoren, als auch die flexiblen Strukturen der Spiegelhalterung sowie die elektrischen Zuleitungen der Spiegelantriebe in der verspiegelten Ebene der Mikrospiegel geführt werden müssen. Das hat einen deutlich reduzierten Flächennutzungsgrad (Verhältnis der gesamten Spiegelfläche zur Chip-Gesamtfläche) zur Folge. Abhilfe

schaffen folgende Maßnahmen: Gruppierung von Einzelspiegeln, sodass diese Spiegel mit demselben Auslenkwinkel und nur 5 Zuleitungen (bei elektrothermischer Ansteuerung und jeweils 4 Schwenkarmen) gemeinsam angesteuert werden können. Oder es muss ein Mehrebenen-Chip-Layout gewählt werden, bei dem die Stromzuführungen auf der Rückseite des Siliziumwafers verlegt werden bzw. unterhalb der Mikrospiegel-Ebene. Die Verwendung der CMOS-Technologie und die Adressierung der einzelnen Mikrospiegel mit einer Spalten- und Zeilen-Adressierung sind je nach Antriebsprinzip und Chip-Layout weitere Möglichkeiten, den Gesamt-Flächennutzungsgrad des AMD-Mikrospiegelarrays zu steigern und zu optimieren, da die Zahl der elektrischen Zuleitungen auf die Summe der Zeilen- und Spaltenanzahl und eine gemeinsame Masse beschränkt werden kann.

Prozess-Schritte zur Herstellung der AMD-Mikrospiegelarrays

1. Ätzstop bei Siliziumwafern (einseitige hohe Dotierung der Wafer mit Bor)
2. Maskierung und Belichtung der Siliziumsubstrate
3. Aufsputtern der elektrothermisch ausgedehnten, aktiven Bi-Material-Schicht
4. nasschemisches Weg-Ätzen der Maskierungsschicht
5. Maskierung und Belichtung der Siliziumsubstrate
6. Aufdampfen der Leitbahnen
7. Maskierung und Belichtung der Siliziumsubstrate mit dem Spiegel-Layout
8. zweiseitiges Ätzverfahren: Ätzung der Membrandicke
9. Trockenätzen und damit Freilegen der Mikrospiegel
10. Trennen der Siliziumscheiben (Fixierung der Mikrospiegel vorher mit Photolack)
11. Kleben der AMD-Mikrospiegel in ein Chip-Gehäuse
12. elektrische Kontaktierung durch Bonden zwischen AMD-Chip und Chip-Gehäuse

Die Herstellungs- und Prozessschritte der Mikrosystemtechnik in Silizium werden in [8.2, HILLERINGMANN, 1995] und in [8.2, WURMUS, 1999] ausführlich dargestellt.

Die Prozessparameter und die Herstellung der AMD-Mikrospiegelarrays, Abbildung 5.19 Seite 136, sind in der Veröffentlichung [8.2, HILLERINGMANN, 2004] zusammengefasst beschrieben.

AMD-Spiegelaufbau, Spiegelaus- und anlenkung

Bei den zweiachsig analog schwenkbaren Mikrospiegeln werden zwei hauptsächliche Befestigungsprinzipien unterschieden:

1. Torsionsachsen (Abbildung 4.2, S.53, DMD-Array)
2. Biegebalken (Abbildung 5.19)

Zur Erzeugung von zwei Schwenkbewegungen ist bei der Variante mit den Torsionsachsen ein kardanischer Rahmen erforderlich, der beide Freiheitsgrade ermöglicht. Die Torsionssteifigkeit der Torsionsgelenke wird durch die Dicke d, die Breite b und das E-Modul des verwendeten Materials beeinflusst. Je länger, dünner und schmaler die Torsionsbalken sind, umso weniger Kraft ist für ein Schwenken der Mikrostrukturen erforderlich. Dabei ist eine große Länge der Torsionsbalken z.B. in einer diagonalen Anordnung, wie sie von Texas Instruments bei ihren DMD-Chips verwendet wird, sinnvoll, um die auftretenden Torsionsspannungen auch bei höheren Betriebstemperaturen des Chips gering zu halten. Der Nachteil von dünnen Torsionsbalken besteht allerdings auch in ihrer geringeren Haltbarkeit auf Zug- bzw. Scherbeanspruchung bei Beschleunigungs-Schockbelastungen. [8.2, CHEMNITZ, 2004]

$$\tau(x,r) = \frac{M_{tx}(x)}{I_P(x)} r$$

$$I_P = \int r^2 \, dA$$

x = Längsachse des Torsionsbalkens; r = Abstand des Flächenelements zur Torsionsachse; τ = Torsionsspannung; M_{tx} = Torsionsmomentenverlauf entlang der x-Achse; I_P = polares Flächenträgheitsmoment [8.1; ZIMMERMANN, 1994].

Bei der Variante mit den Biegebalken kann der mögliche Hub durch längere Hubbalken, die eine geringere Steifigkeit aufweisen, gesteigert werden. Hierzu müssen diese Hubbalken eine geringe Dicke und eine geringe Breite aufweisen. Auch hier sind dünne Biegebalken eher zerstörungsgefährdet. [8.2, HILLERINGMANN, 2004], Abbildung 5.19.

$$\sigma(x,y) = -\frac{M_{bz}(x)}{I_Z(x)} y$$

$$I_Z = \frac{bh^3}{12}$$

x = Längsachse des Balken, y = vertikale Ausdehnung des Balken; z = horizontale Ausdehnung des Balken; σ = Spannungen im Material; M_{bz} = Biegemomentverlauf um die z-Achse; I_Z = äquatoriales Flächenträgheitsmoment um die z-Achse.; b = Breite des Balkens; h = Höhe des Balkens [8.1; ZIMMERMANN, 1994].

Antriebsprinzipien zur Mikrospiegelauslenkung

Für die Betätigung der Mikrospiegelarrays können unterschiedliche physikalische Effekte genutzt werden:

1. Bi-Materialeffekt (thermoelektrische Auslenkung)
2. elektrostatische Auslenkung (Plattenkondensatoren)
3. MEMS (Kammstrukturen) (elektrostatisch, elektrodynamisch)
4. piezoelektrisch
5. elektromagnetisch [8.2, BÜTTGENBACH, 2004]

Die Effizienz und Skalierbarkeit der Antriebsprinzipien wird in [8.2, SCHENK, 2000] bzw. in [8.2, DOLENEC, 2003] zusammenfassend dargestellt.

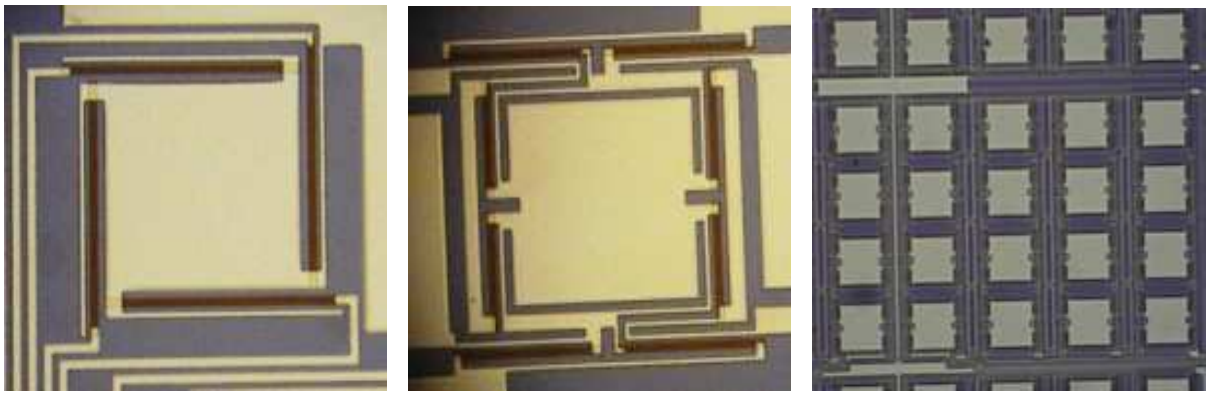


Abbildung 5.19: AMD-Mikrospiegel-Layout 1 (links), AMD-Mikrospiegel-Layout 2(mittig), AMD-Mikrospiegel-Array (rechts), Auslenkung mit Bimaterialeffekt (dunkelgraue Streifen), [8.2, HILLERINGMANN, 2004]

Bi-Materialeffekt (thermoelektrische Auslenkung)

Bei der thermoelektrischen Auslenkung, wie sie bei den oben beschriebenen Mikrospiegeln von Prof. Hilleringmann, Fachgebiet Sensorik, Universität Paderborn, [8.2, HILLERINGMANN, 2004], Abbildung 5.19, erläutert wird, erzielt eine Stromsteuerung die Auslenkung der Mikrospiegel. Je nach Aufheizung der Aktorelemente dehnen sich die Widerstandsschicht (schwarze, dünne Streifen in Abbildung 5.19) auf dem Siliziumgrundsubstrat-Oberseite unterschiedlich stark aus, sodass durch die gezielt variierte Wärmeausdehnung der Materialien eine Verformung eines Biegebalkens nach unten hervorgerufen wird. Diese Auslenkung ist proportional der Aufheizung der Bi-Material-Schichten. Dieser Effekt erlaubt eine Auslenkung der Mikrospiegelelemente nur in eine Richtung. Die Rückbewegung erfolgt durch die Abkühlung der Bi-Material-Schichten, die sich in ihre Ausgangsposition zurückbewegen. Über die gute Wärmeleitfähigkeit der Siliziumschicht, die Wärmeabstrahlung ins Mikrospiegelumfeld und die Wärmekonvektion im Scheinwerfer kann der Abkühlvorgang

beschleunigt werden. Die künstliche Kühlung der Mikrostrukturen wäre theoretisch möglich, ist aber nicht praktikabel.

Elektrostatische Antriebe

Elektrostatische Antriebe sind für die Ansteuerung von Mikrospiegeln ebenfalls gut geeignet, da sie über eine unter den Mikrospiegeln angeordnete Kapazität mit elektrischer Spannung beaufschlagt werden können. Dadurch ist es möglich, die Kapazitäten einzeln mit einem Spannungssignal zu versorgen, wobei eine matrixförmige zeilen- und spaltenweise adressierte Ansteuerung verwendet wird. Diese ermöglicht durch die Adressierung von Transistoren, die eine Aufladung einer Kapazität zur Spiegelauslenkung steuern, die pixelweise, individuelle Ansteuerung der Spiegelpositionen. Die elektrostatische Ansteuerung hat allerdings den Nachteil, dass relativ hohe Spannungen erforderlich sind. Wird die CMOS-Technologie verwendet, so lassen sich allerdings nur Spannungen mit einer Höhe von +/- 30V [8.2, FRAUNHOFER IPMS, 2004] verwenden. In [8.2, HUJA, 2000] wird exemplarisch ein 1D-Mikrospiegelarray gezeigt, das elektrostatisch ausgelenkt wird. Für adaptive Optiken (verformbare Planarspiegel) werden ebenfalls elektrostatische Antriebe eingesetzt.

Größere Schwenkwinkel können bei elektrostatischem Antrieb durch gestufte Elektroden erzielt werden [8.2, FRAUNHOFER, ISIT, 2004], [8.2, TU CHEMNITZ, 2004], die den Abstand der Adresselektroden nahe der Schwenkachse der elektrostatischen Schwenkwinkel deutlich reduzieren.

Da bei elektrostatischen Auslenkungen in vielen Fällen hohe Spannungen (z.B. 500V oder 1000 V) verwendet werden, sind spezielle Maßnahmen gegen unerwünschte Entladung vorzusehen. Dabei können elektrisch isolierende, lokal begrenzte Stopstrukturen vorgesehen werden, die eine zu starke Annäherung der gegenseitigen Elektroden verhindern. Ein Übersprechen zwischen verschiedenen Adresselektroden benachbarter Mikrospiegel muss ebenfalls vermieden werden.

Eine Weiterentwicklung der elektrostatischen Antriebe stellen die MEMS (Kammstrukturen) dar. [8.2, TSAI, 2003] beschreibt eine Mikrospiegelarrayanordnung, bei der die Mikrospiegel mit Kammstrukturen ausgelenkt werden. Bei Spannungen von nur 7V werden mechanische Scan-Winkel von +/- 5° erzielt.

Piezoelektrisch

Anstelle der elektrothermischen und elektrostatischen Antriebsprinzipien können auch Piezoelemente eingesetzt werden, bei denen der inverse piezoelektrische Effekt, d.h. die Längenausdehnung bei angelegter äußerer elektrischer Spannung genutzt wird. Als Piezoelemente werden vor allem Biegebalkenaktoren eingesetzt. Diese haben große Hübe bei geringeren Kräften. Stapelaktoren habe kleinere Hübe bei hohen Kräften. Weitere Details können u.a. [8.2, HEMSEL, 2001] entnommen werden.

Elektromagnetisch

In [8.2, BÜTTGENBACH, 2004] werden mikrotechnische Spulensysteme und deren Anwendung in der Sensorik und Aktorik vorgestellt. Mikrospulen können planar oder parallel zur Substratebene helixförmig aufgebaut werden. Die technologischen Herausforderungen bestehen in der Fertigung tiefenlithographisch in großem Aspektverhältnis hergestellter Strukturen mit hohen Windungszahlen und dem galvanischen Auftragen von Leitungsbahnen und weichmagnetischen Kernen. Ein erster horizontaler Linearaktor wird in der Arbeit vorgestellt. Die bisher geringen Kräfte des lithografisch hergestellten Aktors, die Reibung und die Komplexität der Herstellprozesse verhindern z.Zt. einen Einsatz des Aktors bei AMD-Mikrospiegeln.

Aufbau und Design von AMD-Mikrospiegeln mit thermoelektrischem Bimaterial-Antrieb

Im Falle der Zusammenarbeit des L-LAB mit Herrn Prof. Hilleringmann, Universität Paderborn, Fachgebiet Sensorik, wurden fünf verschiedene Designs von Mikrospiegeln mit thermoelektrischer Auslenkung und deren Aufhängungen untersucht. Ziel war es möglichst große Ablenkwinkel zu erreichen, die quasi-statisch anzusteuern sind. Folgende Designs wurden umgesetzt [8.2, HILLERINGMANN, 2004], [8.2, DOLENEC, 2003], siehe Abbildung 5.20 (Auszug). Bei der Untersuchung der Mikrostrukturen ergaben sich mit dem bisherigen Design Auslenkwinkel von bis zu 0,5° bei Strömen von bis zu 100mA [8.2, DOLENEC, 2003]. Weitere Optimierungen im AMD-Spiegel-Lay-out bei thermoelektrischer Bi-Material-Auslenkung mit größeren Schwenkwinkeln bei geringeren Strömen sind zukünftig daher vorzunehmen und zu erwarten. Ein Auswahlkriterium für die thermoelektrische Ansteuerung der AMD-Mikrospiegel war u.a. die erwartete reproduzierbare, quasi-statische Ansteuerung der AMD-Spiegelstellungen bei einem definierten Temperaturumfeld.

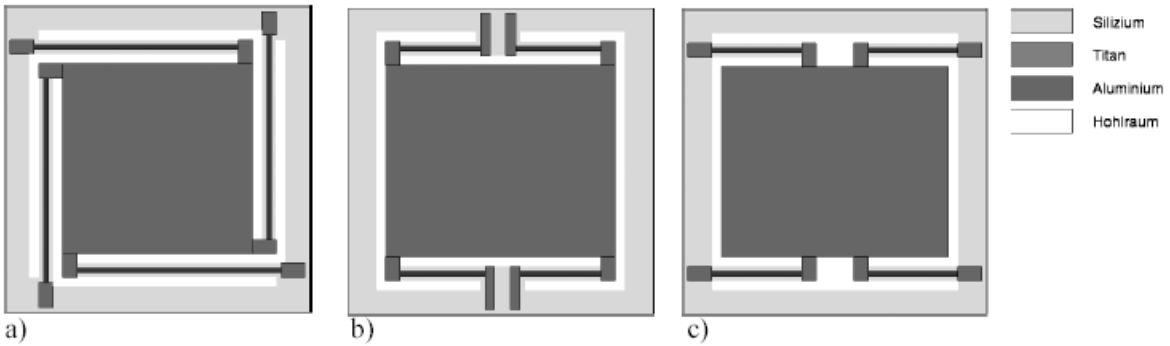


Abbildung 5.20: Drei verschiedene AMD-Spiegeldesigns [8.2, HILLERINGMANN, 2004]

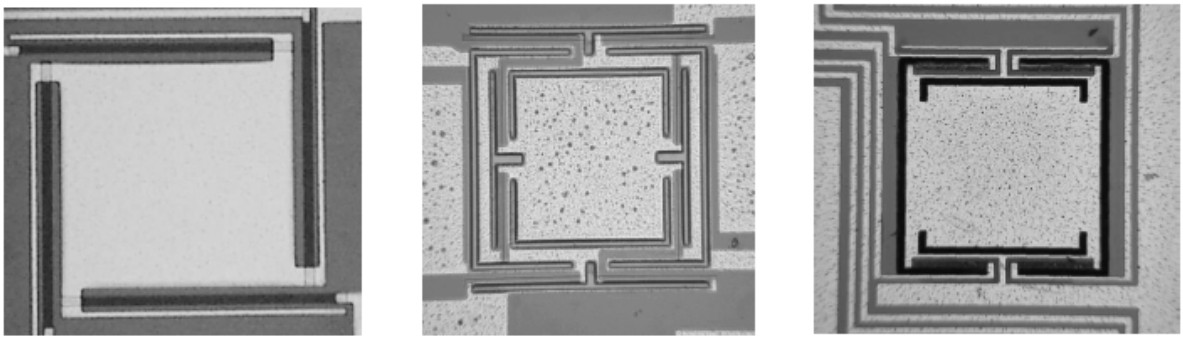


Abbildung 5.21: AMD-Spiegeldesigns geätzt [8.2, HILLERINGMANN, 2004]

AMD-Mikrospiegelarrays, deren Bauformen und die Konsequenzen für die Lichttechnik

Die Lichtstärke des AMD-Scheinwerfers ist gekennzeichnet durch die Größe des AMD-Arrays, die Leuchtdichte der Lichtquelle, die Divergenz des eingekoppelten Strahlenbündels, die Apertur, den Flächennutzungsgrad des AMD-Arrays, dessen Reflektivität und die Winkelstellung der AMD-Mikrospiegel. Vergleiche hierzu auch die optische Abbildung bei Linsensystemen (Kapitel 5.5.3 Scanner-Dimensionierung). Das AMD-Mikrospiegelarray nimmt im ersten Ansatz der Dimensionierung dabei die für eine reflektive, optische Abbildung notwendigen Positionen ein. Es wird ein gestuft „gekrümmter“, aus planen Einzelspiegeln bestehender Mikrospiegelverbund in einer Annäherung einer Frei-Form-Fläche angestrebt.

5.4.4 Konstruktiver Aufbau

Je nach Lage des AMD-Arrays gibt es mehrere sinnvolle Bauformen:

Geometrie

1. ebenes AMD-Array

In einer Projektions-AMD-Scheinwerferanordnung wird mit zweifacher Freiform-Reflexion, bestehend aus Einkoppelreflektor und ebenem beleuchtetem AMD-Array als zweitem Reflektor gearbeitet, Abbildung 5.18 rechts. Das AMD-Array übernimmt dabei die variable Lichtlenkung. Zwischen diesen beiden Reflektoren kann optional eine Feldblende eingesetzt werden. Diese kann statisch sein oder über z.B. eine Vario-Walzen-Projektionsmodulblende variabel sein.

2. gekrümmtes oder gewinkeltes AMD-Array

Dieses wird dazu eingesetzt, den Lichtstrom direkt von der Lichtquelle kommend möglichst vollständig in einer Reflexions-AMD-Scheinwerferanordnung, Abbildung 5.18 links, zu erfassen. Damit ein großer Raumwinkel des ausgesandten Lichtstroms erfasst wird, ist es notwendig, statt einer ebenen AMD-Array-Anordnung eine gekrümmte oder gewinkelte

AMD-Anordnung aus z.B. mehreren AMD-Arrays aufzubauen. Die vollständige Lichtstromlenkung wird dabei ausschließlich durch diesen ersten und einzigen, frei adressier- und schwenkbaren Reflektor gesteuert. Alternativ kann zusätzlich ein Flexprisma, ein Kippspiegel nachgeschaltet sein oder die Gesamtanordnung wird als Ganzes geschwenkt.

Elektrische Ansteuerung der Mikrospiegelarrays

Die Mikrospiegel können von ihrer Ansteuerung her einzeln oder nur in Gruppen beschaltet werden. Eine Zusammenfassung der Mikrospiegel zu Gruppen erleichtert auf der einen Seite die Zuführung der elektrischen Leistung, auf der anderen Seite stellt sich das Problem der reduzierten Auflösung und eingeschränkten Variabilität der Ansteuerbarkeit der Mikrospiegel. Je nach Abbildungsmaßstab kann das ein Problem darstellen.

Die Vorwärtssteuerung kann für die Mikrospiegel nur eingesetzt werden, wenn diese eine exakte, reproduzierbare Winkeleinstellung ermöglicht. Zusätzlich ist dabei die Kontrolle des Spiegelverhaltens unter Vibrationen und der dadurch möglicherweise hervorgerufenen ungewollten Ablenkung der Mikrospiegel kaum möglich. Alternativ kann eine Regelung für die Mikrospiegeleinstellung entworfen werden, die allerdings eine Rückmeldung über die Position der Mikrospiegel im Hauptstrahlengang erfordert. Das könnte über einen zweiten Strahlengang erfolgen, bei dem z.B. ein schräg einfallendes Lichtbündel die Mikrospiegel trifft und deren Rückreflexion auf eine CCD-Matrix fällt. Je nach Lage der Rückreflexion auf der CCD-Matrix kann auf die Spiegelpositionen der Mikrospiegel zurückgeschlossen werden.

Die unterschiedlichen Antriebsprinzipien der Mikrospiegel erfordern unterschiedliche Konzepte für deren elektrische Energieversorgung. Thermoelektrische Mikrospiegelantriebe erfordern relativ hohe Ströme für die Auslenkung der Mikrospiegel, wodurch eine zusätzliche thermische Belastung der Mikrospiegel erzeugt wird. Eine weitere thermische Belastung der Mikrospiegel wird durch die einfallende optische Strahlung hervorgerufen, die bedingt durch Reflexions- und Absorptionsverluste ebenfalls zu einer Aufheizung der Mikrospiegel führt. Durch die geringen Spiegelabmessungen kann von einer gleichmäßigen Erwärmung der Mikrospiegel bzw. deren Aktoren durch Umgebungstemperatureinflüsse ausgegangen werden, wodurch die daraus resultierende Auslenkung der Mikrospiegel als konstant angesehen werden kann. D.h. die allgemeine thermische Belastung durch die Bestrahlung und der Umgebungstemperatureinfluss überlagert sich mit den gezielt eingebrachten thermischen Signalen für die Spiegelauslenkung an den Spiegelaktoren. Thermoelektrische Antriebe haben die Anforderung, dass sie für eine konstante Auslenkung permanent mit Strom versorgt werden müssen. Das hat zur Folge, dass für jeden Aktor pro Einzelspiegel (4 Aktoren mit 4 Zuleitungen) und ein Masseanschluss notwendig sind. Die Herausforderung stellt dabei die Zahl der Zuleitungen von jedem Mikrospiegel dar, da diese bei einem Uni-Layer-Layout den Flächennutzungsgrad der Einzelspiegelflächen an der Gesamtspiegelfläche mit zunehmender AMD-Chip-Größe deutlich reduzieren.

Bei der Verwendung von Multi-Layer-Aufbautechnologien oder bei der CMOS-Technologie lässt sich der Flächennutzungsgrad steigern, da die elektrischen Zuleitungen der Einzelspiegel unterhalb der jeweils einzeln schwenkbaren Spiegelebene angeordnet werden können.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass zwischen den mikrolithografischen Mikrospiegelelementen und den makroskopischen Zuleitungen der Ansteuerungsschaltung die elektrische Verbindung mittels Bondverbindungen hergestellt werden muss. Diese erfordern sowohl auf der mikrolithografischen, als auch auf der makroskopischen Chip-Gehäuse-Seite Bond-Pads mit einer gewissen Mindestgröße. Das hat zur Folge, dass nur eine begrenzte maximale Anzahl an Bondpads in einer Reihe um den AMD-Chip gelegt werden können. Auch bei z.B. jeweils zwei parallelen Bond-Pad-Reihen ist die Zahl der herausführbaren Leitungen begrenzt, da auch Computer-Mikroprozessor-Chip-Gehäuse, die für die AMD-Prototypen angewendet wurden, nur eine begrenzte Zahl an Kontaktstiften und internen Bond-Pads aufweisen.

Alternativ könnten zwei Transistoren unter jedem Mikrospiegel angeordnet werden, wobei der erste die Leistungssteuerung über eine permanente Spannungsversorgung regelt, und der zweite die Adressierung über eine zeilen- und spaltenweise Adressierung regelt. Die Höhe der zugeführten Ströme bzw. der angelegten Spannung am Transistor wird über eine Kapazität geregelt, die auf die Gate-Spannung wirkt. Dadurch würde die Zahl der Zuleitungen von 5 pro Mikrospiegel auf jeweils eine gemeinsame Spannungsversorgung und Masse und die matrixförmig angeordneten Zeilen- und Spaltenadressleitungen reduziert werden. Insgesamt ergibt sich folgende Leitungsanzahl, Tabelle 5.9:

Tabelle 5.9: Zahl der Ansteuerungsleitungen für ein AMD-Array

	Zahl der Zuleitungen bei einem Array von 200 x 240 Spiegeln	
bisheriges Design:	Zeilenanzahl x Spaltenanzahl + Masse	48001
neues Design mit 2 Transistoren und einer Kapazität pro Spiegel	Zeilenanzahl + Spaltenanzahl + Spannungsversorgung + Masse	442

Testaufbau für AMD-Mikrospiegelarrays

Im Rahmen einer Studienarbeit [8.7, THIES, 2002] ist ein Testaufbau entstanden, mit dem AMD-Spiegelarrays validiert werden können. Grundsätzliche Fragen der Ansteuerung, der Toleranzen und der Funktionsstruktur der AMD-Testplattform werden dort behandelt.

Bisherige Probleme der Mikrospiegel (Fremdmuster und eigene AMD-Spiegelarrays)

Die Auflösung der Chips ist begrenzt auf bisher 200 x 240 Spiegel beim IPMS [8.2, FRAUNHOFER IPMS, 2004]. Die zeilen- und spaltenweise Adressierung der aktiven Matrix

fördert einen hohen Flächennutzungsgrad des Spiegelarrays. Jede Pixelzelle ist aus zwei Schalttransistoren und einer Speicherkapazität aufgebaut. Die Auslenkung der jeweiligen Einzelzellen erfolgt durch Anlegen einer analogen Spannung von max. 30 V an den adressierten Dateneingängen und dem Durchschalten der Spannung zu den Pixelzellen mit jedem CLK-Takt. (clock). Bei den IPMS-Flächenlichtmodulatoren (Mikromechanische Spiegelarrays (Mikro mechanical devices MMD)) gibt es Arrays mit bis zu 1024 x 2048 Aluminiumspiegeln, die auf einer aktiven CMOS-Ansteuerung aufgebracht sind. Jeder 16 x 16µm² große Spiegel kann individuell mit bis zu 2 kHz ausgelenkt werden. Die Spiegelarrays werden in der optischen Mikrolithografie als Phasen-shift-Arrays eingesetzt.

Thermik

Eine thermische Belastung erfolgt durch die Bestrahlung der AMD-Spiegelfläche, durch Reflexionsverluste an der Spiegelfläche, durch Transmissionsverluste an der AMD-Spiegelabdeckung und durch die thermoelektrische Ansteuerung der Einzelspiegel.

Beim verwendeten thermoelektrischen Auslenkungsprinzip wird dabei auch bei einer statisch konstanten Auslenkung der Einzelspiegel elektrische Leistung für deren Auslenkung eingesetzt. Die Wärmeabfuhr erfolgt dabei durch die Haltestrukturen der AMD-Einzelspiegel.

Kosten

Kostentreiber für den AMD-Chip sind die Silizium-Wafer-Fläche, die Anzahl der Prozessschritte und deren Dauer, die Chip-Vereinzelung und die Chip-Montage innerhalb des elektrischen Chip-Gehäuses sowie die elektrische Kontaktierung der Einzelspiegel. Die reproduzierbare Beherrschung der Prozessschritte und das Entwerfen sowie Anfertigen der Wafer-Masken sind weitere Kostentreiber der Entwicklung von AMD-Chipdesigns.

Mikrospiegelarrayaufbau

Die Spiegel haben nur eine kleine Masse; es wird daher vom IPMS eine Resonanzfrequenz von 1 MHz angegeben. Schockbelastungen durch hohe Beschleunigungen stellen durch die geringe Massen kein Problem dar. Die Aluminiumstrukturen sind relativ hoch temperaturstabil bis ca. 200°C, bevor es zu Auswölbungen auf den Aluminiumspiegeloberflächen kommt [8.2, SCHENK, 2004]. Die Ansteuerung des Mikrospiegelarrays ist noch auf einer relativ großen Platine untergebracht, die ca. 300 x 400 mm² groß ist. Die Ansteuerung erfolgt über eine Fire-Wire-Schnittstelle.

Beim Fraunhofer ISIT werden die Adresselektroden galvanisch abgeformt. Damit lassen sich größere Felder und eine stärkere Auslenkung der Spiegelstrukturen erzielen. Die Adresselektroden sind gestuft angeordnet. Zusätzlich wird von einem Projektor in Form eines ersten Laborprototypen berichtet, der mit einem beweglichen Spiegel von 1,5mm Durchmesser und einem Laserstrahl ein Bild mit einer Auflösung von 320 x 240 Bildpunkten projizieren kann. Durch schnelles Ändern des Kippwinkels wird das Bild pixelweise aufgebaut [8.2, FRAUNHOFER, ISIT, 2004].

Untersuchung der Mikrospiegelintegrationsstufen beim Fraunhofer IPMS

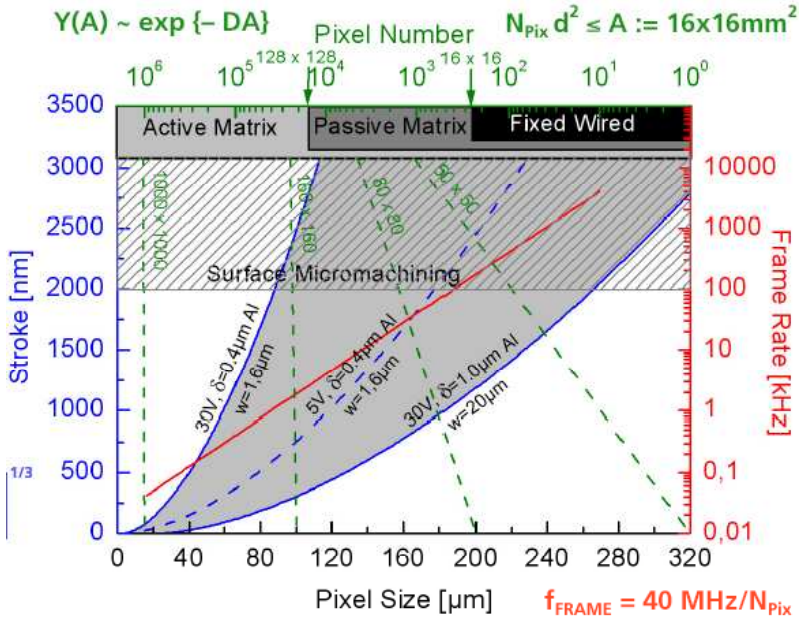


Abbildung 5.22: Technologie-Eigenschaftsdiagramm von Mikrospiegel-Arrays [8.2, SCHENK, 2004]

In Abbildung 5.22 werden die festverdrahteten Bond-Verbindungen als „fixed wired“ bezeichnet. Der Übergang von den festverdrahteten Chips zu den passiv adressierten Matrizen wird mit 16 x 16 angegeben. Mit „Stroke“ wird der maximale Hub in Nanometer angegeben. Die Pixelgröße sinkt mit steigender Spiegelanzahl. Mit der „Frame Rate“ wird die Wiederholrate des Bildaufbaus beschrieben. Die vertikal gestrichelten Linien geben mögliche Chip-Designs an. Die („diagonalen“) Kurven stellen bei einer gegebenen elektrostatisch angelegten Spannung und bei einem Aluminium-Hebelarm von der Dicke δ und der Breite w die Auslenkung in Abhängigkeit von der Einzelspiegelgröße dar. Die Spannungsobergrenze von 30V wird bedingt durch die in CMOS-Technologie hergestellte Adressierung der Einzelspiegel vorgegeben. Demgegenüber werden Einzelspiegel mit bis zu 1000V [8.2, DOLENEC, 2003; 8.2, CHEMNITZ, 2004] elektrostatisch ausgelenkt, da sich bei diesen nicht oder weniger das Problem der jeweiligen Einzelspiegel-Adressierung stellt. Dennoch sind auch hier besondere Vorkehrungen gegenüber Kurzschlüssen durch direkten „Kondensatorplattenkontakt“ zu treffen. Der grau unterlegte Bereich ist der Bereich, in dem mit praktikablem Aufwand elektrostatische Mikrospiegelarrays sich herstellen lassen, die mit einer CMOS-Adressierung ausgestattet sind. Der schraffierte Bereich zeigt den Bereich der Mikrospiegel an, der nicht mehr mit mikrolithografischen Prozessen, sondern nur noch mit „Surface-Mikromachining“ hergestellt werden kann.

Zusammengefasst lassen sich bei der Anwendung der AMD-Mikrospiegel-Arrays 3 Hauptanwendungen unterscheiden, Tabelle 5.10: Der Einsatz des AMD-Arrays als variabler Reflektor zur Lichtlenkung (Konzept 1) oder der Einsatz des AMD-Arrays als Ersatz für eine

„variable Reflexions-Linse“ (Konzept 3), bei dem als variablem Freiform-Reflektor die mehr oder weniger optisch ähnliche „Abbildung“ eines Objektes, d.h. der Blendenebene im Vordergrund steht. In der dritten Anordnung kann der AMD-Chip anstelle der Blende eingesetzt werden (Konzept 2). Dessen Lichtlenkung erfolgt durch eine Frei-Form-Linse.

Tabelle 5.10: Konstruktive Varianten des AMD-Scheinwerfers

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Bauart	Reflexions-AMD-Scheinwerfer	Projektions-AMD-Scheinwerfer	
Auskoppel-optik	keine	mit FF-Linse zur „Abbildung“	mit AMD-FF-Reflektor-„Linse“
Lichtstrom erzeugen	Lampe z.B. D2S kurz	Lampe z.B. D2S kurz	Lampe z.B. D2S kurz
Lichtstrom sammeln	Konv. FF-Reflektor und AMD-Chip	Konv. FF-Ellipsoid-Reflektor	Konv. FF-Ellipsoid-Reflektor
HDG formen	Nur über Reflektor (s.o.) und eine Strahlblende der Lampe	AMD-Chip und Umfeldverspiegelung	Vario-Xenon-FF-Konturwalze, Feld-blende (rechteckig) oder keine Blende
Lichtstrom bündeln / LSV formen	Über FF-Reflektor und AMD-Chip (s.o.)	FF-Linse zur Lichtlenkung („Abbildung“)	AMD-FF-Reflektor-„Linse“ zur Abbildung der Blendenebene (wenn eine Blende vorhanden ist, sonst nur Lichtstromlenkung)

5.4.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit AMD

Optische Leistungsfähigkeit der Mikrospiegelarrays

Kennzeichen der Mikrospiegelarrays ist neben dem Flächennutzungsgrad α auch die Reflektivität ρ der Mikrospiegel, die in ihrem Produkt die optische Effizienz der Mikrospiegel beschreiben.

$$\eta_{Ges} = \alpha \cdot \rho$$

Geometrisch-optische Einbindung der AMD-Mikrospiegel in das Scheinwerfergehäuse – Lichttechnisch-optische Grundlagen der AMD-Mikrospiegel

Die analog ansteuerbaren optischen Mikrospiegel legen zusammen mit der Einkoppeloptik die Möglichkeiten der Lichtverteilungs-Intensitätssteuerung fest. Die Lichtintensität, die über das AMD-Spiegelarray gelenkt werden soll, wird auf dem Chip konzentriert, wobei die Divergenz des Einkoppelstrahlenbündels, bedingt durch das Reflexionsgesetz, erhalten bleibt. Eine Divergenz des Strahlenbündels ist erforderlich, da sonst die Chip-Abmessungen bei einem

parallelen Strahlenbündel erhalten blieben. Die Lücken zwischen den Mikrospiegeln würden bei einem parallelen Strahlenbündel und der Nichtauslenkung der Mikrospiegel beibehalten werden. Treffen divergente Teillichtbündel auf die Mikrospiegel, so werden diese, je nach Schwenkstellung der Mikrospiegel, auf der Straße miteinander überlagert.

Als Spiegelauslenkpositionen sind folgende denkbar: Die Teillichtbündel werden lückenlos aneinander gereiht, wodurch eine maximale Streubreite der Ausleuchtung bei relativ geringen Lichtstärkewerten erzielt wird. Die Leuchtdichte der Lichtabstrahlung der AMD-Spiegel bestimmt dabei die Lichtstärke der Lichtstärkeverteilung und die resultierende Beleuchtungsstärke auf der Straße. Da die Blendung für den entgegenkommenden Verkehr nicht höher sein soll als bei heutigen Projektionssystemen, sollte die Lichtaustrittsöffnung und damit die Größe des AMD-Spiegelarrays mindestens der von heutigen Projektionslinsen entsprechen. Die Leuchtdichtegradienten auf den AMD-Mikrospiegeln und deren Lichtlenkung bestimmt die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze. Die Divergenz der Strahlenbündel sollte daher in vertikaler Orientierung minimal sein. Für die Erzeugung einer Hell-Dunkel-Grenze werden diejenigen Spiegel, deren Lichtbündel oberhalb der HDG liegen würden, in den Bereich unterhalb der HDG gelenkt und z.B. für eine größere Streubreite der Scheinwerfer verwendet. Durch die Überlagerung der Wendelbilder bzw. der AMD-Teillichtbündel können höhere Lichtstärken und schmälere Lichtstärkeverteilungskurven erzielt werden. Die Breite des Intensitätsgradienten eines Spiegels kann dabei nicht unterschritten werden. Dabei wird die gewünschte Lichtverteilung auf einer virtuellen 10m bzw. 25m Wand durch die Überlagerung der Teillichtbündel eingestellt. Vor und nach dieser Wand bleibt die Divergenz der Teilstrahlbündel erhalten.

Dennoch sind der AMD-Lichtverteilungsauslegung Grenzen gesetzt: Die Leuchtdichte der Lichtquelle kann nicht auf dem AMD-Chip gesteigert werden. Die Leuchtdichte der Lichtquelle reduziert sich, da das Licht in den zweiten Brennpunkt eines Ellipsoidreflektors gelenkt wird, in dem sich der AMD-Chip befindet. Durch die Abbildung im Ellipsoidreflektor hat sich wegen der Abbildungsgesetze das Abbild der Lichtquelle bereits geweitet. Ursache dafür ist das Etendué, das nur bei einer erhöhten Strahlquerschnittsfläche eine reduzierte Divergenz des Lichtbündels ermöglicht. Werden die Teillichtbündel der Mikrospiegel so gelenkt, dass alle sich überlagern, so wird die maximale Intensität als die Summe aller Teillichtbündel, abgeschwächt durch die mit den optischen Abbildungsmaßstäben aufgeweiteten Lichtquellenabbildungen.

Das AMD-Mikrospiegel-Array kann im Strahlengang als flexible, reflektive „Linse“ bzw. variabler Reflektor bzw. als segmentierter „Membran-Spiegel“ eingesetzt werden. Durch die Überlagerung der unterschiedlich großen Wendelbilder kann die gewünschte Lichtverteilung wie bei einem konventionellen Reflektor erzeugt werden. Folgende Voraussetzungen sind dabei einzuhalten:

1. Bedingt durch die Spalte zwischen den AMD-Spiegeln muss die Reflektorfläche der AMD-Chip-Fläche größer sein als bei stetigen Reflektorsegmenten ohne Spalte.

2. Die seitlichen Kanten der AMD-Chip-Flächen müssen nach Möglichkeit durch benachbarte gekippte AMD-Spiegelflächen verdeckt werden, damit keine unnötiges Streulicht entsteht, das zur Eigen- oder Fremdblendung führen könnte (vgl. strömungsgünstiges „Fischschuppen-Prinzip“).

3. Der Raumwinkel der von der Lichtquelle erfassten Lichtstärkeverteilung muss sogar etwas größer sein, da sich Spalte zwischen den AMD-Einzelspiegeln befinden. Je nach Lage und räumlicher Ausrichtung der AMD-Einzelspiegel werden von diesen unterschiedlich große Teillichtbündel mit unterschiedlicher Divergenz und unterschiedlicher Wendelbildlage und Wendelbildgröße abgelenkt. Die Auflösung der AMD-Chip-Fläche ist bei einer AMD-Reflektorlösung eher von untergeordneter Bedeutung.

Gesamtsystem

Beim Aufbau eines AMD-Scheinwerfers lassen sich – wie beschrieben – drei prinzipiell unterschiedliche Aufbaukonfigurationen unterscheiden. Diese stellen jeweils unterschiedliche Anforderungen an den AMD-Chip. Nur in einer Konfiguration, die mit einer „Feldlinse“ bzw. einer Freiform-Linse arbeitet (Konzept 2), wird der AMD-Chip als solches abgebildet. Bei der Verwendung einer konventionellen Sammellinse nach dem AMD-Chip für dessen Abbildung auf die Straße wird das Potenzial der Lichtlenkung des AMD-Chips nicht ausgenutzt. Der AMD-Chip wird dabei auf die Funktion des DMD-Chips reduziert. Insbesondere an den Flächennutzungsgrad werden bei dieser „vierten“ Konfiguration hohe Anforderungen gestellt, da hierbei der AMD-Chip mit dem Abbildungsmaßstab der Linse auf die Straße abgebildet wird, vgl. Abbildung 5.18.

1. Reflexionsanordnung: AMD-Chip ist Teil des Reflektors und lenkt die Wendelbilder der Lampe frei innerhalb der Lichtverteilung mit der vorhandenen Wendelbildgröße und Wendelbildorientierung innerhalb der Lichtverteilung um; Abbildung 5.18 links.

2. Projektionsanordnung: AMD-Chip als Ersatz für die Projektionslinse in einem Projektionsmodul; freie Lichtstromumverteilung möglich; Abbildung 5.18 rechts.

3. Projektionsanordnung: AMD-Chip mit FF-Linse auf die Straße „abgebildet“; in gewissen Grenzen freie Lichtstromumverteilung möglich; Abbildung 5.18 mittig.

4. Projektionsanordnung: DMD-Funktion mit AMD-Chip und Konvexlinse nachgebildet, wobei diese das AMD-Array abbildet (vgl. Abbildung 5.18 mittig)

Vergleich des DMD mit einem AMD-Aufbau

Tabelle 5.11: Vergleich der DMD- und AMD-Arrays

Vergleich der Systeme	DMD	AMD
Kategorie	digitale Spiegelschwenkstellungen um eine diagonale Schwenkachse, +/-10° bzw. +/-12°	analoge Spiegelschwenkstellungen mit zwei orthogonalen Schwenkachsen, >= +/-12°
konventionelles Vergleichskonzept	Totalreflexionsprisma mit lokaler Aufhebung der Totalreflexion durch Kontakt	Membranspiegel
Auskoppellinse	ja	nein, nur FF-Linse; meist nicht
Abbildung	notwendig, da Abbildung einer schaltbaren „Spiegel"-Blende auf die Straße	nicht sinnvoll, Energie- / Lichtstromlenkung statt Abbildung
Systemanordnung	nur Projektionslösung sinnvoll	Projektions- und Reflexions-Lösungen möglich mit jeweils anderen Anforderungen
Ausleuchtung des DMD / AMD-Chips	Jeweils inhomogen, um die Kfz-Anforderungen nach großer Reichweite zu erzielen	
Dynamisches Kurvenlicht	Jeweils Komplettsystem gedreht oder Flexprisma oder Schwenkspiegel nachgelagert	

Wie in Tabelle 5.11 gezeigt wird, besteht der Hauptunterschied zwischen einem DMD- und einem AMD-Scheinwerfer und ihren DMD- bzw. AMD-Arrays in der Lage und Zahl der Schwenkachse(n), den möglichen Winkelstellungen und –positionen und dem bzw. den maximalen Schwenkwinkeln. Beim DMD-Array wird diagonal um bis zu +/-12° geschwenkt. Das AMD-Array hat zwei, senkrecht zu einander stehende Schwenkachsen, die horizontal und vertikal orientiert sind und deren Schwenkwinkel können größer als +/-12° sein. Ein weiterer Hauptunterschied besteht in der Auskoppeloptik der beiden Mikrospiegel-Konzepte. Das DMD-Array muss durch eine Abbildungsoptik auf die Straße projiziert werden. Beim AMD-Array sollte und kann auf die Auskoppeloptik verzichtet werden. Im Gegenteil, eine Auskoppeloptik schränkt die Funktionalität des AMD-Scheinwerfers nur auf ein Minimum ein. Diese Tatsache wird in den Zeilen Auskoppellinse, Abbildung und Systemanordnung dargestellt. Eine Gemeinsamkeit beider Systeme besteht darin, dass die Mikrospiegelarrays gezielt inhomogen ausgeleuchtet werden, wodurch die zentralen Mikrospiegel, die eine höhere Lichtstärke umlenken, einen höheren Einfluss auf die aktive Scheinwerferlichtverteilung haben. Die Art der Formung des dynamischen Kurvenlichts ist ebenfalls identisch.

5.5 Scannender Scheinwerfer

5.5.1 Funktionssynthese

Nachdem in Kapitel 3.8 die Funktionsstruktur zukünftiger aktiver Scheinwerfersysteme beschrieben wurde, ist in Abbildung 5.23 die Funktionsstruktur eines scannenden Scheinwerfers wiedergegeben.

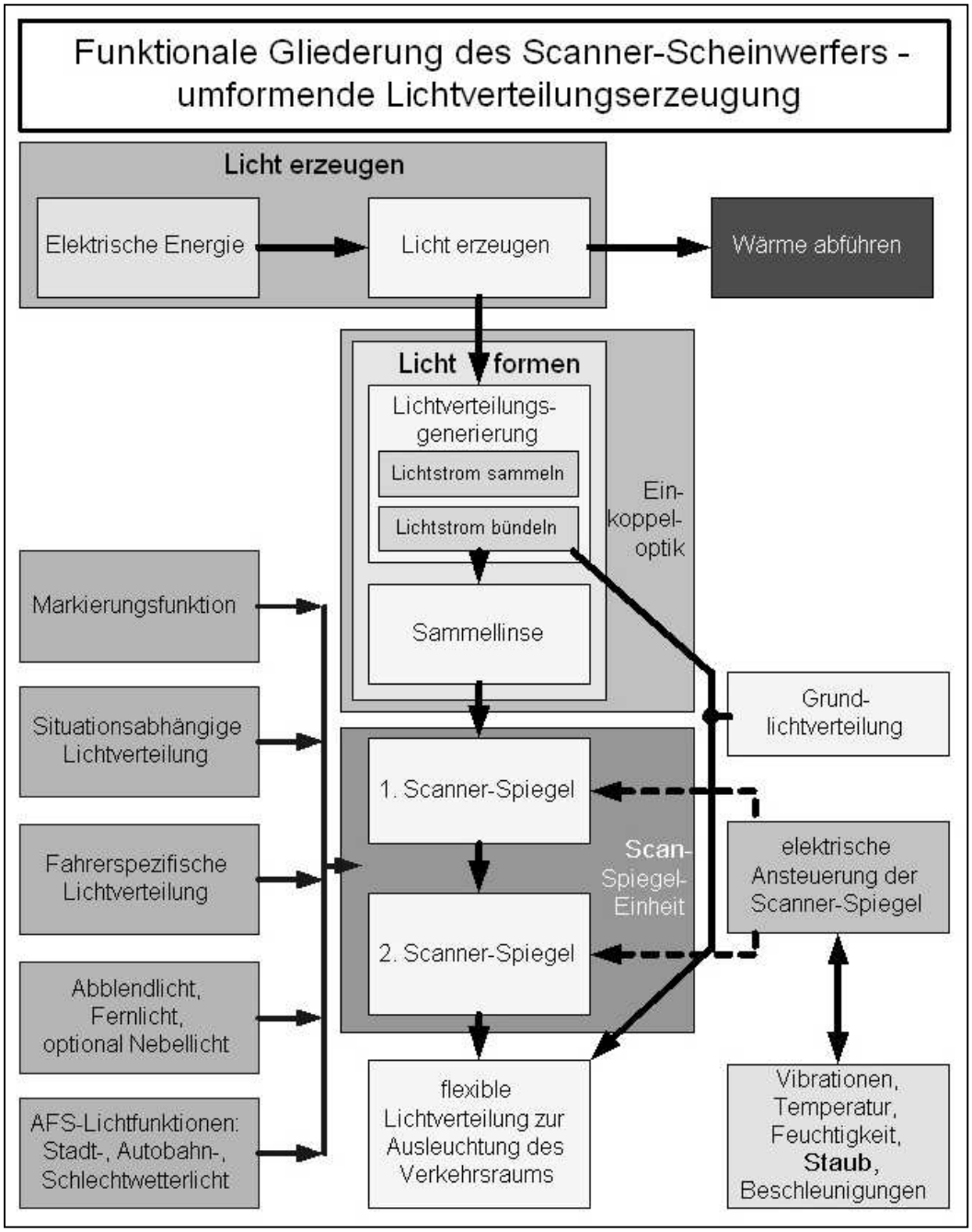


Abbildung 5.23: Funktionsstruktur eines scannenden Scheinwerfers

Der scannende Scheinwerfer weist eine lichtstromerzeugende Lampe und eine Einkoppeleinheit, die ein über zwei Scannerspiegel einer Scan-Spiegel-Einheit, Abbildung 4.19 S.79, abgelenktes Lichtstrahlenbündel formt, auf. Zusätzlich wird eine statische Grundlichtverteilung geformt. Diese wird mit dem scannend abgelenkten Lichtstrahlenbündel zu einer flexiblen, aktiven Lichtverteilung überlagert. Da die Dynamik der Scannerspiegel physikalisch limitiert ist und da das scannende Lichtstrahlenbündel eine begrenzte Lichtstärke hat, kann bei einem homogenen Lichteindruck nicht jede beliebige aktive Lichtverteilung erzeugt werden. Die Dimensionierung des scannenden Scheinwerfers und dessen gegenseitige Abhängigkeiten werden in Kapitel 5.5.3 beschrieben werden.

Allgemein wird in der Literatur [8.6, BASS, 1995] bei Scannern zwischen zwei Funktionen unterschieden:

1. Die Translation der Apertur relativ zum Informationsmedium. Das kann die Translation von Linsen oder Objekten oder beidem beinhalten. Sie werden in der Objekt-Scan-Region eingesetzt.

2. Die Winkeländerungen relativ zum Informationsmedium. Das kann entweder vor oder nach dem Objektivraum erfolgen.

5.5.2 Modularisierung

Bei der Modularisierung der Scanner soll zunächst eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Scannerarten vorgenommen werden, bevor deren Spiegelachsenanordnung, Dynamik und allgemeiner Optikaufbau aufgegliedert werden.

1. Galvanometerscanner: Der Galvanometerscanner erfordert Anstrengungen in Systemgeschwindigkeit, Auflösung und Linearität. Er kann beliebige Scanbewegungen innerhalb ihrer Reaktionszeiten durchführen. Der Galvanometerscanner ist ein Breitband-Scanner, der bis knapp unter seiner mechanischen Resonanzfrequenz betrieben werden kann. Seine Winkelauslenkung wird elektromagnetisch erzeugt. Der Galvanometerscanner wird als Scanner mit geringem Trägheitsmoment bezeichnet. [8.6, BASS, 1995]

2. Resonanzscanner: Diese haben durch ihre Wirkungsweise nur sehr große Auslegungen nahe der eigenen Resonanzfrequenz des schwingfähigen Systems. Die Resonanzscanner haben definierte größere Winkelablenkungen bei höheren Frequenzen mit einer sinusförmigen Anregung. Sie erlauben keine beliebigen Stellbewegungen und die Scanbewegung lässt sich nicht beliebig formen.

Bei der Gestaltung der Lager ist bei beiden Scannern besondere Aufmerksamkeit auf die Dauerfestigkeit und die Lebensdauer zu legen, da jeweils nur geringe Drehintervalle durchgeführt werden, die der Lagerlebensdauer abträglich sind.

3. Polygonscanner mit Pyramidalprismen oder prismatischen Polygonscannern: Die Pyramidalprismen erlauben engere Bauformen, da der einfallende und der abgelenkte Strahl

räumlich getrennt, d.h. z.B. zueinander senkrecht stehen. Diese Prismenform weist allerdings keine Winkelverstärkung auf, da die Spiegelnormale trotz Rotation stets im gleichen Winkel zum einfallenden Lichtbündel orientiert ist. Auf das Rotieren des Strahlenbündels ist bei diesem axialen Lichteinfall zu achten.

Reduziert sich die Anzahl der Facetten zu der Anzahl eins, so spricht man von Monogon-Scanner.

4. Holografische Scanner sind in den meisten Fällen Polygonscanner, die an Stelle von Spiegeln Hologramme einsetzen, um das Licht abzulenken.

5. Akusto-optische Ablenkung erfordert einen engen Strahl mit einer definierten Wellenlänge und ein durchstimmbares dickes optisches Gitter, das dafür sorgt, dass alle höheren Ablenkordnungen der ersten Ordnung effizient zugeordnet werden. Das Gitter wird in einem elastischen Medium durch Schall- bzw. Druckwellen erzeugt, welches seinen Brechungsindex periodisch verändert.

6. Elektro-optische Gradientenscanner arbeiten mit einer Änderung des Brechungsindex in Abhängigkeit des angelegten elektrischen Feldes. Da die elektrooptischen Koeffizienten sehr gering sind, werden hohe elektrische Felder benötigt. Sie sind sehr schnell im Vergleich zu akusto-optischen Zellen, haben aber ebenfalls eine geringe Auflösung.

7. Des weiteren gibt es noch **Karussell-Prismenscanner** (Polygonscanner), optisch brechende Prismenscanner und axial rotierende Prismenscanner.

In Tabelle 5.12 wird eine Systematik zu den scannenden Scheinwerfern vorgestellt. Angefangen von den Grundtypen der Scanner, der Zahl der Scannerachsen, deren Orientierung werden mehrere Spiegelorientierungen aufgezeigt. Beim optischen Multiplikator ist es erforderlich, dass das Lichtbündel vom flexiblen (winkelvariablen) Spiegel (1. Winkelverdopplung) auf einen räumlich starr angeordneten Spiegel (Winkelkonstanz) fällt, bevor das Lichtbündel erneut auf den flexiblen Spiegel (2. Winkelverdopplung) trifft und dann ein zweites Mal abgelenkt wird. In diesem Beispiel wird das Lichtbündel mit der vierfachen Winkelgeschwindigkeit des flexiblen Spiegels (bzw. dessen Spiegelnormale) abgelenkt. Dann werden die Dynamikanforderungen und deren Randbedingungen aufgezeigt. Die Orientierung und Anordnung der Spiegel, des eingekoppelten Scanlichtbündels mit dessen Einkoppeloptik, der Zwischen- und Endoptik bestimmen das optische System scannender Scheinwerfer. Die Lampe, deren Orientierung, die Wendellage der Lampe und die Divergenz des Strahlenbündels runden die Systematik ab.

Tabelle 5.12: Systematik zu scannenden Scheinwerfern – Teil 1

1.	Grundtypen an Scanner				
1.1	Galvanometerscanner		1.4	holografische Scanner	
1.2	Polygonscanner		1.5	akustooptische Scanner	
1.3	prismatische Scanner		1.6	elektrooptische Scanner	
2.	Scannerachsen				
2.1	einachsig		2.2	zweiachsig	
3	Spiegelachsenstellung				
3.1	senkrecht zur Lichteinfallsrichtung: Winkelverstärkung (zweifach)		3.2	parallel zur Lichteinfallsrichtung keine Winkelverstärkung	
4.	Spiegelorientierung: 1. Spiegel				
4.1	Ablenkung	horizontal	vertikal		
4.2	Spiegelform	plan	konvex	konkav	Freiform FF
4.3	relative Orientierung	parallel	spitzer Winkel	rechter Winkel	stumpfer Winkel
	Spiegelorientierung: 2. Spiegel				
4.4	Ablenkung	horizontal	vertikal		
4.5	Spiegelform	plan	konvex	konkav	FF
4.6	Höhenversatz	ohne	mit		
4.7	relative Orientierung	parallel	spitzer Winkel	rechter Winkel	stumpfer Winkel
4.8	Gesamtanordnung	„L“	Dreieck „4“	„Z“	

Tabelle 5.12: Systematik zu scannenden Scheinwerfern – Teil 2

5.	Optischer Multiplikator					
5.1	2x über flex. Spiegel - sehr große Spiegel + Winkelverdopplung	in → flex → out ↑ ↓ starr				
5.2	- keine zusätzliche Winkelverstärkung	in → flex → out	in→ flex → starr → out	in → starr → flex → out		
6.	Dynamikanforderungen					
6.1	Winkel optisch: horiz. +/-10°, besser +/-25°		1.Spiegel (horiz.): klein-mittlere Größe	große Ablenkungen → großer 2. Spiegel	2.Spiegel gering geschwenkt (vert.) → insgesamt höhere Dynamik	
6.2	Winkel optisch: vert. +/- 5°		1.Spiegel (vert.): kleine Größe	geringe Ablenkungen → mittelgroßer 2. Spiegel	2.Spiegel, groß geschwenkt (horiz.) → insgesamt etwas geringere Dynamik	
6.3	Bedingungen:	Anordnung	Abstände	Geometrie		
		Material	Trägheit	Verwindungssteife	Resonanzfrequenz	
7.	Lichttechnische Dimensionierung, siehe Kapitel 5.5.3					
8.	Allgemeine Orientierung					
8.1	Einkopplung des Scanlichtbündels				8.2	Auskopplung
	relativ zur Auskopplung	seitlich (+/- x) / schräg	hinten (-z)	oben / unten (+/- y)	vorn (+z)	vorn (+z) in +z-Richtung

Tabelle 5.12: Systematik zu scannenden Scheinwerfern – Teil 3

9.	Einkopplungs-Lichtbündel-Erzeugung					
9.1	„Reflektor“form	Paraboloid	Ellipsoid	Linsen-Abbildung		
9.2	Abbildungsart	einstufig	Konvexe Linse	konkave Linse		
		zweistufig	Kepler-Anordnung (astronomisches Fernrohr)	Galilei-Anordnung (terrestrisches Fernrohr)	Spiegelteleskop-Anordnung	
9.3	Abbildungsmethode	Linsenoptik	Spiegeloptik			
10.	Zwischen- oder Endoptik (starre Optikelemente)					
10.1	Lage	Vor-Spiegel	Mittel-Spiegel	Nach-Spiegel		
10.2	Spiegelform	plan	optisch (konvex, konkav, FF)	Brennpunkt verschiebt sich		
10.3	Funktion	Feldlinse	Zylinderlinse	kein optisches Element		
11.	Lampe					
11.1	Lichtquelle	D2S (4,2mm)	Kurzbogenlampe (2,1mm)	UHP (1,3mm)	H7 / H1 (4,2mm)	Keramikbrenner
11.2	Kenngrößen	Leuchtdichte	Lichtstrom	Lebensdauer	elektr. Leistung	
12.	Lampenorientierung					
12.1	Orientierung	in z-Achse	in x-Achse	(in y-Achse)		
13.	Wendelbildlage					
13.1	Wendelorientierung	horizontal	vertikal			
14.	Divergenz					
14.1	Divergenzeinflüsse	Lampengeometrie	Reflektorabstände / Abb.-Maßstäbe	Linsenabstände / Abb.-Maßstäbe		

[8.8, KAUSCHKE, 2004-4; 8.8, KAUSCHKE, 2004-5]

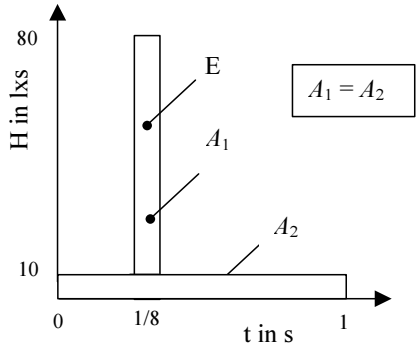
5.5.3 Dimensionierung

Bei der Scannerdimensionierung kann nach folgendem Schema vorgegangen werden:

Lichttechnische Berechnung:

1. Belichtung:

Tabelle 5.13: Berechnung der Belichtung und der Beleuchtungsstärke, Index s = scannend

Lichttechnische Auslegung:	konventionell	scannend
Visualisierung	A_{2ges}= gesamte Lichtverteilung auf der Zielprojektionsfläche A_2 (z.B. A_{2ges} = 80m²) A_2 = beleuchtete Teilfläche	 A_{S2} = scannend beleuchtete Zielprojektionsfläche A_2 im Zeitintervall T_{S2}
Belichtung H	$H = \int E\, dt\,;\; H = \int \frac{d\Phi}{dA_2} dt$	
Lichtstrom ϕ	1000 lm auf Gesamtfläche A_2	1000 lm auf Teilfläche A_{S2}
Belichtungsdauer dt	dauernd, keine Unterbrechungen $\frac{A_2}{A_{2ges}} = \frac{\Phi_2}{\Phi_{2ges}} = 0{,}125$	unabhängig (!) von der Scanwiederholfrequenz f; abhängig (!) von dem Flächenanteil A_{S2} an A_2 $\frac{A_{S2}}{A_{2ges}} = \frac{T_{SA2}}{T_{2ges}} = 0{,}125$
Bildwiederholrate f	entfällt (f = 0 Hz)	f = 50 – 100 Hz
Beleuchtungsstärke E	$E = \frac{\Phi_{ges}}{A_{2ges}} = \frac{\Phi_2}{A_2} = 12{,}5$ lx	$E_S = \frac{\Phi_{ges}}{A_{S2}} = 100$ lx
Belichtung H_{A2} der Teilfläche A2		$H_{SA2} = \frac{1}{A_{S2}} \int_{T_{SA2}} d\Phi_{ges}\, dt = 12{,}5$ lxs
Belichtung H der Gesamtfläche	$H = E \cdot T = 12{,}5$ lxs	$H = H_S = \int_A H_{SA2}\, dA$ $H_S = \frac{\Phi_{ges}}{A_{S2}} \cdot T_{SA2} = 12{,}5$ lxs

Lichttechnische Größen einer Linsenoptik / Scanneroptik:

A_1 ist eine kleine leuchtende Fläche mit konstanter Leuchtdichte in alle Richtungen.

A_2 ist ein Flächenelement einer Empfängerfläche. Von A_1 aus gesehen erscheint dA_2 in der Größe $dA_2 = \cos\varepsilon_2$ und damit unter dem Raumwinkel. [8.6, BASS, 1995; 8.6, SCHRÖDER, 1998][DIN 4522, Bl.1; DIN 4521], Index 1: leuchtende Fläche; Index 2: beleuchtete Fläche

$$d\Omega = \frac{dA_2 \cdot \cos\varepsilon_2}{r^2}\Omega_0 \tag{1}$$

In Richtung r wirkt die Leuchtfläche in der Größe $A_1 \cdot \cos\varepsilon_1$. Daher ergibt sich für die Lichtstärke $I = L \cdot A_1 \cdot \cos\varepsilon_1$ und in den Raumwinkel dΩ gelangt der Lichtstrom $d\Phi = I \cdot d\Omega$. Damit erhält die Fläche dA_2 den Lichtstrom.

$$d\Phi = L \cdot \frac{dA_1 \cdot \cos\varepsilon_1 \cdot dA_2 \cdot \cos\varepsilon_2}{r^2} \cdot \Omega_0 . \tag{2}$$

Als Beleuchtungsstärke an der Fläche dA_2 ergibt sich $E = d\Phi / dA_2$.

Einstufige Abbildung des Lichtstroms und der Beleuchtungsstärke

Durch den Einsatz einer Linse kann ein größerer Lichtstrom Φ aufgefangen werden, der durch die Eintrittspupille EP einer Linse begrenzt wird. Dieser Lichtstrom wird geschwächt durch die Transmissionsverluste τ der Linse: $\Phi' = \tau \cdot \Phi$. Als leuchtende Fläche wird A_1 als Eintrittsluke EL durch die Linse abgebildet. Als Lichtstrom ϕ wird bei der Abbildung folgendes aufgefangen:

$$\Phi = \pi \cdot L \cdot A_{EL} \cdot \sin^2 u \cdot \Omega_0 \tag{3}$$

Der Lichtstrom ist proportional dem Quadrat der objektseitigen Apertur.

Die Beleuchtungsstärke E in der kleinen Bildfläche A_{AL} (AL = Austrittluke) wird dann:

$$E = \frac{\tau \cdot \Phi}{A_{AL}} \tag{4}$$

Für den Abbildungsmaßstab zwischen den Eintritts A_{EL}- und Austrittsluken A_{AL} gilt dann:

$$\frac{A_{EL}}{A_{AL}} = \frac{1}{\beta'^2} \tag{5}$$

Ebenfalls gilt für den Abbildungsmaßstab β':

$$\beta' = \frac{a'}{a} = \frac{y'}{y} \tag{6}$$

Daher gilt für die Beleuchtungsstärke aus (3), (4) und (5):

$$E = \pi \cdot L \cdot \tau \cdot \frac{\sin^2 u}{\beta'^2} \cdot \Omega_0 \tag{7}$$

Bei Erfüllung der Sinusbedingung für weit geöffnete Bündel wird dies aber:

$$E = \pi \cdot L \cdot \tau \cdot \sin^2 u' \cdot \Omega_0 \tag{8}$$

Die Beleuchtungsstärke ist proportional dem Quadrat der bildseitigen Apertur.

Für die Leuchtdichte bei abbildenden Systemen gilt:

$$L' = \tau \cdot L \tag{9}$$

Daher kann die Leuchtdichte innerhalb eines optischen Systems niemals größer werden als die Leuchtdichte der Lampe.

Werden die geometrischen Faktoren aus (3) zusammengefasst, so kann der geometrische Fluss G, d.h. das Etendué, [8.6, GALL, 2004] definiert werden:

$$G = \pi \cdot A_{EL} \cdot \sin^2 u \cdot \Omega_0 \tag{10}$$

Damit gilt für den Lichtstrom

$$\Phi = L \cdot G \tag{11}$$

Mit dem geometrischen Fluss kann man die Brauchbarkeit eines optischen Systems zur Weiterleitung von Lichtenergie quantitativ beschreiben, wobei G auch als Lichtleitwert oder als Etendué bezeichnet wird.

In Tabellen 5.14 wird der scannende Scheinwerfer exemplarisch dimensioniert.

Tabelle 5.14: Anwendung auf scannende Scheinwerfer – Teil 1

	Objektweite	Bildweite	Abbildungsmaßstab β’
	a = 50 mm	a’= 25.000 mm	β’ = 500
Laterale Ausdehnung	y = 2,4 mm	y’= 1.200 mm	$\beta' = \frac{a'}{a} = \frac{y'}{y}$
Brennweite der Linse	Linsen-∅ = 50 mm	f’ = 50,1 mm f = 50 mm	$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}$
numerische Apertur	sin u = 0,447	sin u’= 0,001	

Tabelle 5.14: Anwendung auf scannende Scheinwerfer – Teil 2

Linsendaten	Linsen-∅	Brennweite f	numerische Apertur
	EP = 50 mm	f = 50 mm	$A = n \cdot \sin u$
Wendelbildgröße	2,4 mm Breite	1,4 mm Höhe	$A_{EL} = 2{,}4 \cdot 1{,}4 mm^2 = 3{,}36$ mm²
sonstige Daten	L >= 65 Mcd / m²		τ = 0,96
Lichtstrom Φ	$\Phi = \pi \cdot L \cdot A_{EL} \cdot \sin^2 u \cdot \Omega_0$ (3)		137,22 lm
Beleuchtungsstärke E	$E = \pi \cdot L \cdot \tau \cdot \frac{\sin^2 u}{\beta'^2} \cdot \Omega_0$ (7)		156,83 lx
	$E = \pi \cdot L \cdot \tau \cdot \sin^2 u' \cdot \Omega_0$ (8)		196,03 lx (gleich mit (7) bei erfüllter Sinusbedingung)
A_{AL} (Wendelbild-größe)	y' = 1,2 m; x' = 0,7 m A_{AL} = 0,84 m²		E = Φ/ A_{AL} = 163,36 lx
Variation im Lichtstrom bei neuer Linse (1. Alternative)			
Linsen-∅ = 50 mm	f = 30 mm		β' = 833,333
numerische Apertur	sin u = 0,64		
Lichtstrom Φ	$\Phi = \pi \cdot L \cdot A_{EL} \cdot \sin^2 u \cdot \Omega_0$		281,20 lm
Beleuchtungsstärke E	$E = \pi \cdot L \cdot \tau \cdot \frac{\sin^2 u}{\beta'^2} \cdot \Omega_0$		115,69 lx
A_{AL} (Wendelbildgröße)	y' = 2,0 m; x' = 1,167 m A_{AL} = 2,334 m²		E = Φ/ A_{AL} = 120,48 lx
Variation im Lichtstrom bei neuer Linse (2. Alternative)			
Linsen-∅ = 50 mm	f = 80 mm		β' = 312,5
numerische Apertur	sin u = 0,298		
Lichtstrom Φ	$\Phi = \pi \cdot L \cdot A_{EL} \cdot \sin^2 u \cdot \Omega_0$		61,0 lm
Beleuchtungsstärke E	$E = \pi \cdot L \cdot \tau \cdot \frac{\sin^2 u}{\beta'^2} \cdot \Omega_0$		178,59 lx
A_{AL} (Wendelbildgröße)	y' = 0,75 m; x' = 0,438 m A_{AL} = 0,328 m²		E = Φ/ A_{AL} = 185,90 lx

Bei gleichem Lichtstrom Φ' (gleiche Eintritts-Numerische Apertur) nimmt

mit zunehmendem Abbildungsmaßstab β'

die Beleuchtungsstärke E mit β'² ab,

die Lichtstärke I mit β'² zu,

während die Leuchtdichte L eines Bildes im Medium Luft konstant bleibt.

Für einen Scheinwerfer mit einem Aperturwinkel von u, einem Reflexionsgrad ρ und einer Fläche mit der Entfernung r, und wenn

$$r \geq D_{EP} \cdot \frac{\overline{f}}{2y} \tag{12}$$

gilt, so kann man den gesamten Scheinwerfer als frei strahlende Fläche auffassen, dessen Lichtstrom in den kleinen Winkelbereich 2w abgestrahlt wird (siehe Divergenz). Es handelt sich dabei um eine runde strahlende Fläche und einen runden Querschnitt D_{EP} des Scheinwerfers. A_2, die Messfläche ist dabei: $A_2 = \pi \cdot r^2 \cdot w^2$. Für die Beleuchtungsstärke im Abstand r gilt:

$$E = \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{r^2} \cdot \sin^2 u \cdot \overline{f^2} \tag{13}$$

Verringert man bei konstantem D_{EP} die Brennweite, so werden sin u und damit der Lichtstrom größer. Dieser Lichtstrom verteilt sich aber auf einer größeren Fläche, weil sich der Divergenzwinkel 2 w vergrößert.

Die Lichtstärkeverteilung des Scheinwerfers hängt von der Form der Reflektorfläche ab. Sie wird durch Messungen ermittelt. Insgesamt wirkt der Scheinwerfer wie eine Leuchtfläche der Größe A_{EP} mit der Leuchtdichte.

$$L' = \rho \cdot L \tag{14}$$

Daher ergibt sich auf der optischen Achse eine Lichtstärke von

$$I = \rho \cdot L \cdot A_{EP} \tag{15}$$

(Maximallichtstärke des Scheinwerfers). Die Lampe hat allein nur eine Lichtstärke von

$$I_{Lampe} = L \cdot A_{EL} \tag{16}$$

(A_{EL}= Leuchtfläche). Abgesehen von Verlusten wird die Lichtstärke im Verhältnis der Flächen Scheinwerferöffnung / Leuchtfläche erhöht.

Im Reflexionsgrad ρ sollen hier die übrigen Verluste (u.a. Abschattung der Spiegelfläche durch die Lampe selbst, Absorption und Streuung in der Luft) einbezogen sein.

Divergenz:

Es liegt keine punktförmige Lichtquelle vor, d.h. mit jeder Abbildung oder Reflexion des Objektes wird das Bild mit dem Abbildungsmaßstab multipliziert.

Das hat zur Folge, dass das Verhältnis zwischen Objektweite und Bildweite möglichst gleich groß sein sollte. Das ist in einem Ellipsoidreflektor an seinem Reflektorrand gegeben. Dieser weist allerdings einen großen Öffnungswinkel auf, wodurch die nachfolgende Linse sehr groß sein muss.

Hat die Lichtquelle eine Ausdehnung y (Gesamtausdehnung), so tritt bei einem Scheinwerfer eine Divergenz von

$$\tan w = \frac{y}{2\overline{f}} \tag{17}$$

auf. Hierbei ist w der halbe Divergenzwinkel ($\overline{f}$ ist hier positiv).

Helmholtz-Lagrange-Invariante / Etendué:

$$y \cdot n \cdot \sigma = y' \cdot n' \cdot \sigma' \tag{18}$$

Das aus der Strecke in der Abbildungsebene, der Brechzahl und dem Strahlwinkel mit der Achse (Aperturwinkel) gebildete Produkt ist für den paraxialen Objektraum und Bildraum eines beliebigen Systems gleich.

Für die Abbe'sche Sinusbedingung gilt:

$$\frac{n_1 \cdot \sin \tilde{\sigma}_1}{n'_k \cdot \sin \tilde{\sigma}_k} = \beta' \tag{19}$$

Mit der Abbildungsmaßstab (6) lässt sich für das nicht paraxiale Bündel die Helmholtz-Lagrange-Invariante / Huygens-Helmholtzsche Gleichung / Etendué, schreiben:

$$y \cdot n \cdot \sin \tilde{\sigma} = y' \cdot n' \cdot \sin \tilde{\sigma}' \tag{20}$$

In englischer Literatur wird das Etendué als: throughput, (luminosity), light grasp, acceptance or étendue bezeichnet [8.6, BASS, 1995; 8.6, SCHRÖDER, 1998; 8.6 GALL, 2004; u.a.]

Fernrohr / Spiegelteleskopanordnungen:

Fernrohre dienen dazu den Sehwinkel von Objekten zu vergrößern.

Die Vergrößerung des Fernrohrs Γ'_F ergibt sich als Produkt aus den Eigenvergrößerungen von Objektiv Γ'_{Ob} und Okular Γ'_{Ok}:

$$\Gamma'_F = \Gamma'_{Ob} \cdot \Gamma'_{Ok} \tag{21}$$

$$\Gamma'_F = -\frac{f'_{Ob}}{f'_{Ok}} \cdot \frac{a}{a + f'_{Ob}} \tag{22}$$

z.B. f'_{Ob}= 100 mm, f'_{Ok} = -50 mm; a = 10000 mm folgt: Γ'_F = 1,98.

Folgen für die Divergenz: Tritt vor dem Fernrohr Divergenz auf (siehe oben), so wird diese durch das Fernrohr noch um die Fernrohr-Vergrößerung multipliziert. Daher sind Einkoppeloptiken in „Fernrohr-Anordnung“ nur zum Teil für scannende Scheinwerfer einsetzbar.

Anordnung der Spiegel:

Bei den Spiegeln gibt es folgende Untersuchungskriterien, siehe Abbildung 5.24:

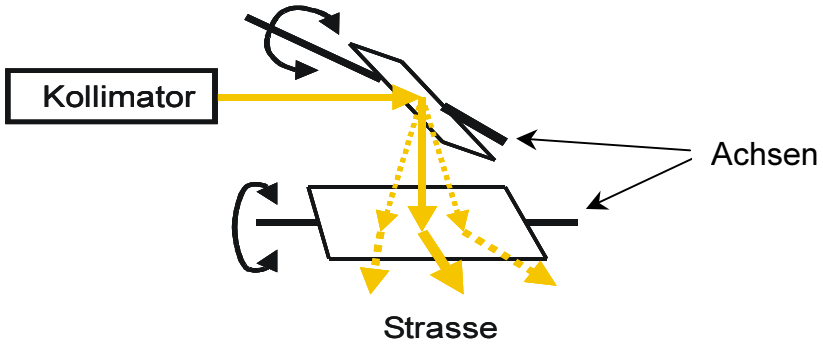


Abbildung: 5.24: Exemplarische Anordnung einer Scan-Spiegel-Anordnung

Material:

Ein Galvanometer-Scanner besteht aus einer Drehachse, an deren einem Ende ein Spiegel angebracht ist. Die Lagerung der Achse erfolgt mit Torsionsgelenken oder mit Spezial-Rillenkugellagern mit freilaufendem Zwischenläufer-Ring. Ein Permanentmagnet auf der Achse erzeugt ein Magnetfeld, das durch die äußere Anregung der Galvanometer-Spulen mit einem Drehmoment beaufschlagt wird. Die Position der Scanner-Spiegel wird über einen kapazitiven Sensor erfasst. [8.2, GSI Lumonics, 2003]

Das verwendete Material der Spiegel beeinflusst die Verwindungssteife und das Massenträgheitsmoment der Spiegel. Als Materialien werden Glas, Aluminium, Beryllium und faserverstärkte Kunststoffe eingesetzt.

$$\Theta_{xx} = \frac{m}{12} \cdot \left(b^2 + h^2\right) \tag{24}$$

$$m = \rho \cdot V \tag{25}$$

Neben der Masse m, der Dichte ρ und dem Volumen V der Spiegel, bestimmt deren Breite b und deren Höhe h das rotatorische Trägheitsmoment Θ_{xx} der Scannerspiegel, Abbildung 5.26. Mit zunehmender Scan-Geschwindigkeit wirkt die Luft als Dämpfungswiderstand für die Drehbewegungen der Spiegel. Das Massenträgheitsmoment des Spiegels und dessen Verformung unter hohen Beschleunigungsumkehrungen sorgen neben der Masse und dem Massenträgheitsmoment des Galvanometer-Permanentmagnet-Kerns für eine mechanische Torsion innerhalb der Achse. Der Galvanometer-Scanner stellt ein mechanisch schwingfähiges

System dar, das geregelt mit einer sensorgesteuerten Feedback-Schleife die Zielposition anfährt.

Beim Resonanz-Scanner wird die Resonanzschwingung von Scannerspiegel, tordierter Scannerachse und Permanentmagnet für eine große Auslenkung des Scannerspiegels verwendet. Das schwingfähige System erreicht nur in der Resonanzfrequenz seine maximale vordefinierte Auslenkung und schränkt somit die Flexibilität in Auslenkwinkel und Wahl der Scanfrequenz ein. Beliebige Stellbewegungen und ein statisches Verharren in einer Auslenkstellung sind ebenfalls nicht möglich, wodurch die Wahl auf einen Galvano-Meter-Scanner gefallen ist.

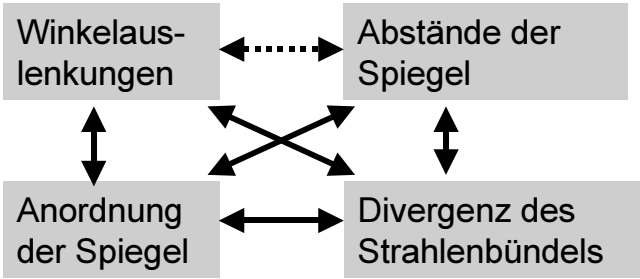


Abbildung 5.25: Abhängigkeiten der Geometriebeziehungen

Geometrie:

Neben dem Material beeinflussen die Spiegelgeometrie, die Spiegelfläche, das Volumen und die Verrippung die Verwindungssteifigkeit der Spiegel.

Die Spiegelfläche wird durch die relative Position der Spiegel zueinander, deren zulässiger Schwenkwinkel und hauptsächlich durch den Strahldurchmesser beeinflusst, Abbildung 5.25.

Ideal wäre ein Brennpunkt zwischen den beiden Spiegeln, damit die Spiegelflächen minimal wären. Die Divergenz des Strahles kann allerdings dann nicht mehr oder nur sehr aufwändig durch eine f-Θ-Linse geändert werden, wie sie bei Laserbeschriftung eingesetzt wird. Diese f-Θ-Linse sorgt bei der Laserbeschriftung für eine lineare Ablenkbewegung des Laserstrahls.

Ein optischer Multiplikator mit einem zwischengeschalteten starren Spiegel reduziert die Schwenkwinkelanforderungen an einen Scannerspiegel. Der optische Multiplikator funktioniert bei sehr kleinen optischen Lichtbündeln gut, da diese mehrmals auf den bewegten Spiegel zurückgelenkt werden muss, damit eine Winkelverstärkung eintreten kann. Bei ausgedehnten Lichtbündeldurchmessern (∅ > 50 mm) ergeben sich sehr große Spiegelabmessungen, die eine schnelle Spiegelverstellung fast unmöglich machen. Vgl.[8.8, KAUSCHKE, 2004-5, Bilder des optischen Multiplikators, Figur 5, 6, 6.1, 6a – 6f]

Wird ein konvexer Spiegel nachgeschaltet, so kann zwar eine stärkere Ablenkung des kollimierten Lichtstrahls erreicht werden, allerdings nur durch ein gleichzeitig geweitetes Abbild der Lichtquelle. Bei einem nachgeschalteten konkaven Spiegel könnte bei geeigneter Auslegung ein divergierender Strahl parallelisiert werden. Wird der Krümmungsmittelpunkt des konkaven Spiegels nicht in den Drehpunkt des vorgeschalteten Spiegels gelegt, so tritt auch hier eine Winkeländerung auf.

Die Anordnung der Spiegelachsen von 2 Scannerspiegeln und deren Minimum bei der lateralen Strahlversetzung auf dem zweiten Scanner-Spiegel wird in [8.2, RICHTER, 2004] vorgestellt. Die Verzeichnungen durch die Scanspiegelauslenkung werden dort ebenfalls kurz dargestellt.

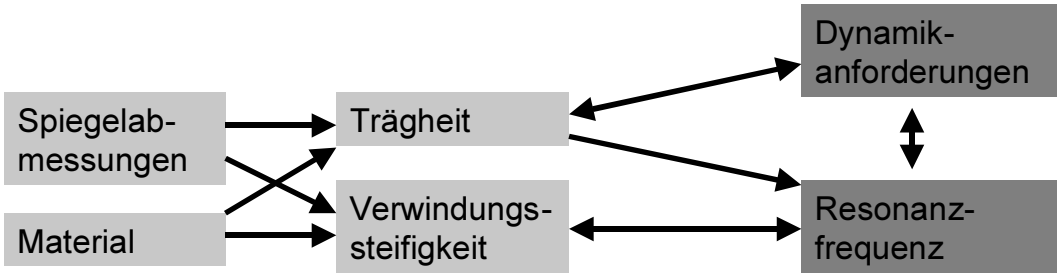


Abbildung: 5.26: Abhängigkeiten der Spiegelabmessungen, des Materials, der Steifigkeit und der dynamischen Eigenschaften des Systems

In der folgenden Aufzählung werden die Einflußgrößen zur Spiegeldimensionierung nochmals kompakt zusammengefasst.

Einflussgrößen bei der Spiegeldimensionierung:

1. Divergenz / Konvergenz / Parallelität des Strahlbündels
2. Strahlbündeldurchmesser
3. Ablenkwinkel der Scannerspiegel
4. Abstand der Spiegel von einander
5. Einfalls- und Ausfallswinkel der Lichtstrahlen (spitze, rechte- oder stumpfe Winkel)
6. Orientierung der Spiegeldrehachsen

Tabelle 5.15: Vergleich Polygon-Scanner und Galvanometerscanner

Scanner-Art	Polygon-Scanner:	Galvanometer-Scanner	2-Achsen-Scan-Spiegel
Drehachse	eine	eine	zwei
Drehrichtung	konstante Drehrichtung	zyklisch wechselnd	zyklisch wechselnd
Geschwindigkeit	ω = konst. (sehr hoch)	$\omega = f(\varphi, t)$ (mittel)	$\omega = f(\varphi, t)$ (gering)
Beschleunigung	$\alpha = 0$ (im Betrieb)	$\alpha = f(\omega, t)$ (hoch) geringe Abstände zwischen Rotor und Stator	$\alpha = f(\omega, t)$ (mittel), große Abstände zwischen Spiegel und Aktoren
Winkelablenkung	$\Delta\varphi$ = konst. (hoch)	$\varphi = f(t)$ (1 Achse) (hoch)	$\varphi = f(t)$ (2 Achsen) (gering)
Bewegte Massen	hoch	gering	mittel
Maßnahmen für einen dreieckigen Zielraum	Blenden oder Dunkel-tasten der Lichtquelle erforderlich	Programmierung, Anordnung der Scanner-achsen	Programmierung
2-Ablenkung (vert.)	Galvanometerscanner	2. Galvanometer-Scanner	entfällt

Scan-Strategien der Lichtablenkung:

Tabelle 5.16: Scan-Strategien für 2 Galvanometer-Scanner (vert. und horiz. Ablenkungen)

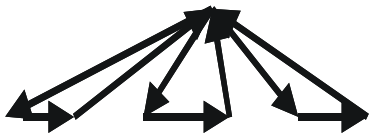
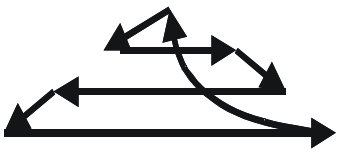
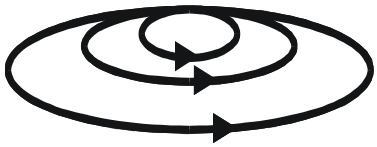
Scan-Strategie (1)	Scan-Strategie (2)	Scan-Strategie (3)
 Strahlenförmig	 Mäanderförmig	 Elliptisch

Tabelle 5.16 beschreibt unterschiedliche Scan-Strategien, wie eine aktive Scannender Scheinwerfer-Lichtverteilung mit einem Scan-Strahlenbündel geschrieben werden kann. Die Scan-Strategie (1) zeichnet sich durch eine Überlagerung der Strahlenbündel im HV-Punkt aus, wodurch dort die höchste Lichtstärke erzielt wird. Scan-Strategie (2) ist mäanderförmig aufgebaut. Hierbei wird die Lichtverteilung zeilenweise geschrieben. Die hohen Lichtstärken nahe des HV-Punktes werden durch geringere Verfahrgeschwindigkeiten bzw. engere Zeilenabstände erzielt. Die Scan-Strategie (3) zeichnet sich durch elliptische Bahnen aus, wodurch Beschleunigungsspitzen bei der Bewegungsumkehr der Scan-Galvanometer-Motoren reduziert werden können. Vergleiche hierzu auch [8.2, RICHTER, 2004].

5.5.4 Konstruktiver Aufbau

In den meisten Fällen weist der scannende Scheinwerfer, Abbildung 5.27, einen Reflektor für eine statische Grundlichtverteilung und eine Scan-Spiegel-Konfiguration auf. Die Scan-Spiegel-Konfiguration kann mit einem Schwenkspiegel, der zwei orthogonalen Schwenkachsen besitzt, realisiert sein. Hierbei werden die Freiheitsgrade durch eine kardanische Aufhängung ermöglicht. Alternativ lassen sich zwei Galvanometerscanner einsetzen, die jeweils eine Schwenkachse aufweisen und in ihrer Kombination ein Ablenken des Strahlenbündels in zwei Freiheitsgraden, horizontal und vertikal, ermöglichen. Der scannende Lichtanteil (kollimierter Lichtstrahl) wird beispielsweise durch die Abbildung der Lichtquellenwendel ins Unendliche erzeugt.

Für den konstruktiven Aufbau des scannenden Scheinwerfers sind Grundsatzüberlegungen zu folgenden drei Anordnungen vorzunehmen:

Die ersten beiden Anordnungen haben eine seitliche Lichtauskopplung, wobei bei der ersten Anordnung das durch die Linse abgebildete Wendelbild direkt auf einen ersten Schwenkspiegel gelenkt wird, der für eine horizontale Auslenkung des Wendelbildes zuständig ist. Seine Schwenkachse steht annähernd senkrecht. Mit einem zweiten, etwas größeren Schwenkspiegel wird die vertikale Strahlablenkung realisiert. Dessen Schwenkachse liegt horizontal im Raum. Über die Kombination der beiden Schwenkbewegungen kann das seitlich ausgekoppelte und abgebildete Wendelbild sowohl horizontal und als auch vertikal innerhalb der Lichtverteilung bewegt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Orientierung dieses Wendelbildes auch nach der Strahlablenkung durch die Scannerspiegel weiterhin möglichst horizontal verläuft. Diese erste Anordnung der scannenden Spiegel neben dem Grundlichtreflektor hat den Nachteil, dass der Scheinwerfer relativ breit baut.

Dieser Nachteil kann mit der zweiten Anordnung, Abbildung 5.27, vermieden werden, bei der sich ein starrer Umlenkreflektor zwischen der Auskoppellinse und den beiden Scanspiegeln befindet. Dieser faltet den Strahlengang zusätzlich, sodass die Lichtaustrittsfläche der statischen Grundlichtverteilung über dem Lichtauskoppelbereich der Schwenkspiegel liegt [8.7, HÄRMENS, 2003; 8.8, KAUSCHKE, 2004-5; 8.2, GÖTZ, 2004]

Die dritte Anordnung, die hier kurz vorgestellt werden soll, besteht aus einem Projektions-Scheinwerfer, bei dem die Blende durch einen starren Spiegel ersetzt wurde. Dieser wirft das Licht auf eine scannende Schwenkspiegelkonfiguration, die den scannenden Lichtverteilungsanteil ablenkt. Durch diese Anordnung kann das Gesamtsystem relativ kompakt gestaltet werden.

Bei konventionellen Lichtquellen ist die Leuchtdichte und die Ausdehnung der Lichtquelle die bestimmende Größe. Diese beiden Ausgangsgrößen werden in dem Etendué und dem geometrischen Fluss zusammengefasst. Da das Etendué einer Lichtquelle in einem Strahlengang nicht verringert werden kann, im Gegenteil dieses sich im Laufe des Strahlenganges

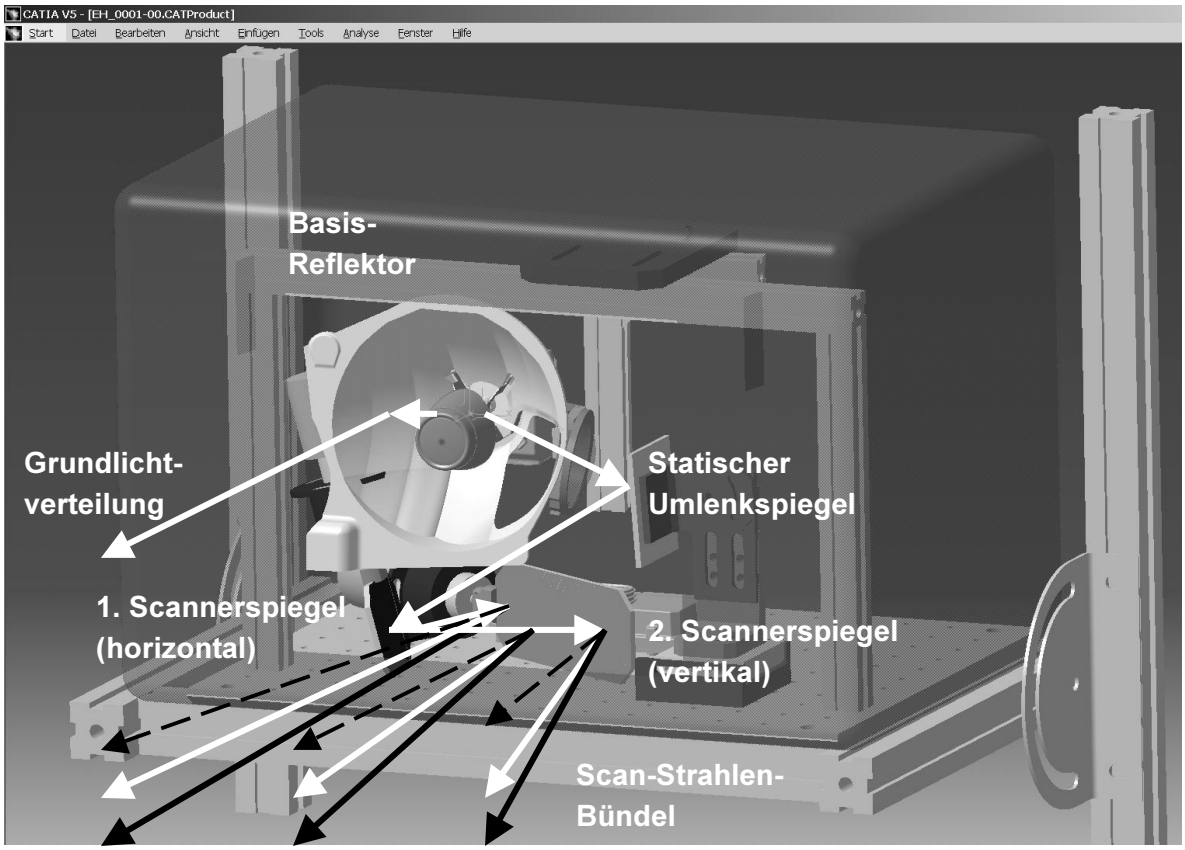


Abbildung 5.27: Scanner-Scheinwerfer, 1.Prototyp [8.7, HÄRMENS, 2003]

eines optischen Gerätes eher erhöht, ist es erforderlich eine Punktlichtquelle mit sehr hoher Leuchtdichte anzustreben. Der eingefangene Lichtstrom ist abhängig von der Leuchtdichte der Lichtquelle und dem Öffnungswinkel der Linse, vgl. auch [8.2, HOSTEIN, 2004], d.h. der numerischen Apertur bzw. der halben Blendenzahl bzw. dem Verhältnis aus Linsendurchmesser und deren Brennweite. Ausgehend von der Brennweite der Einkoppellinse und dem Objektabstand (Wendelposition zur Hauptebene der Linse) wird die Bildentfernung festgelegt, die mit 10m bzw. 25m angenommen wird. Je nach Wahl der Brennweite wird das Abbildungsverhältnis und damit die Größe des Wendelbildes festgelegt. Nach diversen Optiksimulationen der Scanstrahlanordnung und der Einkoppeloptik wurde eine Einlinsenlösung ausgewählt, die einen Kompromiss darstellt zwischen maximal eingefangenem Lichtstrom, Abbildungsmaßstab und maximalem Durchmesser des scannenden Strahlenbündels. Bei vorgegebener Leuchtdichte wird damit die resultierende maximale Lichtstärke des Scanstrahlenbündels bzw. die resultierende maximale Beleuchtungsstärke in 25m Entfernung bestimmt. Diese sollten so hoch wie möglich sein, um größere Variationsmöglichkeit in der flexiblen Gestaltung der Lichtverteilung zu haben.

Mit einem optischen Multiplikator [8.1, SCHILLING, 1999; 8.8, KAUSCHKE, 2004-5; vgl. Tab. 5.12, Zeile 5] können die dynamischen Anforderungen für die scannenden Spiegel erheblich reduziert werden, da mit diesem Multiplikator eine Winkelverstärkung der Scanbewegung um wenigstens den Faktor zwei erfolgt, zusätzlich zu der einfachen Winkelverdopp-

lung bei jedem geschwenkten, konventionellen Spiegel und einem Lichteinfall in der Schwenkebene der Spiegelnormalen. Dafür ist es erforderlich, dass das erste abgelenkte Scanstrahlenbündel auf einen statischen Referenzspiegel trifft, der das Licht auf den geschwenkten Scanspiegel erneut zurückreflektiert. Da der zum zweiten Mal auf den geschwenkten Spiegel treffende Scanstrahlenbündel jetzt bereits den doppelten Schwenkwinkel durch die erste Reflexion auf dem Schwenkspiegel aufweist, tritt eine erneute Winkelverdopplung durch die zweite Reflexion auf dem Schwenkspiegel ein. Die gewünschte Lichtlenkung des Scanstrahlenbündels kann daher in dieser Anordnung mit dem halben Schwenkwinkel des Schwenkspiegels erzielt werden. Bedingt durch die Lichtlenkung des Scanstrahlenbündels und das erneute Auftreffen dieses Bündels auf den Schwenkspiegel muss dieser relativ groß sein. Dieser Nachteil kann über eine geschickte Gestaltung der Form des Schwenkspiegels oder dem Zusammensetzen aus mehreren Teilspiegelflächen entgegengewirkt werden. Eine sägezahnförmige Anordnung von Spiegelflächen kann den Gesamtflächenbedarf reduzieren, in dem die Abbilder der Spiegelflächenstreifen jeweils auf einen zweiten Spiegelflächenstreifen trifft, der die zweite Lichtauslenkung hervorruft. Eine windschiefe Anordnung der Spiegelflächen zueinander ist ebenfalls von Vorteil. Anstelle eines planen starren Zwischenspiegels kann eine zylinderförmige oder kugelförmige Zwischenspiegelfläche verwendet werden, die die Lichtbündelorientierung in sich umkehrt, aber dafür einen wesentlich kleineren Schwenkspiegel des optischen Multiplikators ermöglicht, da der erneut einfallende Lichtstrahl annähernd dieselbe Orientierung hat wie der von der ersten Reflexion ausgesandte Lichtstrahl. Bei einem ausgedehnten Strahlenbündel steigt dabei gleichzeitig durch die Reflexion an der gekrümmten Spiegelfläche die Divergenz des Strahlenbündels unvorteilhafterweise an. Dennoch ist dieser Ansatz bei einer Laserlichtquelle theoretisch einsetzbar [8.8, KAUSCHKE, 2004-5].

In der Nachfolge-Diplomarbeit von [8.2, HOSTEIN, 2004] wurde auf die optische Verbesserung des fahrfähigen Scanner-Aufbaus von [8.7, HÄRMENS, 2003] besonderen Wert gelegt. Neben einer neuen Lampe mit höherer Leuchtdichte, kürzerem Elektrodenabstand und einer höheren elektrischen Leistung wurden die Kollimations-Linse in ihrer Apertur erhöht und größere Spiegeldurchmesser verwendet, Tabelle 5.17, 2.Prototyp. Das Gesamtbauvolumen konnte weiter reduziert werden. Mit diesem Verbund an Maßnahmen konnten die lichttechnischen Werte um 21 bis 59% bei Lichtstrom und Beleuchtungsstärke weiter gesteigert werden, Tabelle 5.17.

Verbesserungspotenzial besteht in der verwendeten Lampe, dem geometrischen Lay-out der Spiegel, der Flächenreduktion der zwei Scanner-Spiegel und unter Verzicht auf einen statischen Umlenkspiegel sowie der Verbesserung der Reflexionsbeschichtung und der Verwindungssteifigkeit der Spiegel. Die Dynamik der Galvanometer-Scanner und die maximal erzielte Beleuchtungsstärke des scannenden Lichtbündelanteils sind wichtige Kenngrößen für die flexiblen Möglichkeiten der Lichtverteilungsprogrammierung und scannenden LSV-Erzeugung. Die Fernlichtverteilung stellt dabei die anspruchsvollste Lichtverteilung dar, da sie die größten Scan-Bewegungen und die höchsten Lichtwerte erfordert.

Einsatzszenarien wären dabei ein Zusatzfernlicht oder ein Hauptfernlicht in konventioneller Halogen- oder LED-Lichttechnik, die das scannende Fernlicht unterstützen oder nur für das Fernlicht eingesetzt werden. Der scannende Scheinwerfer würde dann ausschließlich die Abblend-, Autobahn-, Schlechtwetter-, Fahrerspezifische- und Markierungslichtfunktionen übernehmen. Scannende Scheinwerfersysteme, die nur einen scannenden Anteil und nicht gleichzeitig eine Grundlichtverteilung formen, ermöglichen eine deutliche Reduktion des Gesamtbauraums, wobei die Grundlichtverteilung und das Fernlicht mit einem separaten Bi-Xenon-System z.B. geformt werden könnte. Die neue AFS-Gesetzgebung ab 2006 würde eine unsymmetrische Lichtverteilungskombination ermöglichen, sodass evtl. nur ein scannender Scheinwerfer pro Fahrzeug erforderlich wäre, welcher die Kosten und das Gesamtbauvolumen erheblich senken würde.

Die Kombination von scannendem Scheinwerfer und Reflexions-Grundlichtverteilung ist sehr platzintensiv und ist für zukünftige Prototypen aus Bauraumgründen zu vermeiden. Die Leuchtdichte der Lichtquelle und eine effiziente Kollimationsoptik sind die Hauptstellgrößen für eine lichtstärkeren scannenden Lichtverteilungsanteil. Ein Projektionssystem mit idealem Ellipsoid-Reflektor, einer evtl. sogar variablen Scan-Strahl-Rechteckblende und einer asphärischen Linse wäre optimal für einen scannenden Projektions-Scheinwerfer. Das Massenträgheitsmoment der Scan-Spiegel muss dabei minimal sein, die Beschleunigungswerte der Galvanometer-Motoren und der Reflexionsgrad der Scan-Spiegel müssen jedoch maximiert werden.

5.5.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit scannender Scheinwerfer

Im L-LAB wurde in der Diplomarbeit von [8.7, HÄRMENS, 2003] ein erster scannender Scheinwerfer aufgebaut. Dieser wurde in der Optikforschung der Hella KG im Rahmen einer Diplomarbeit von [8.2, HOSTEIN, 2004] optimiert. Ein Vergleich der Leistungswerte der beiden scannenden Scheinwerfer ist in Tabelle 5.17 vorgenommen.

Tabelle 5.17: Vergleich der Leistungsfähigkeit der scannenden Scheinwerfer-Prototypen

Kategorie	Scanner-Scheinwerfer (I)	Scanner-Scheinwerfer (II)	Vgl. von (II) mit (I) in %
Lichtverteilung	scannend abgelenkter Spot	scannend abgelenkter Spot	
Erhöhung des Gesamt-Wirkungs-grades / Zusatzlicht-Funktionen	Xenon 35 W, D2R modifiziert	Xenon 50 W, D2R modifiziert, Kurzbogen	
Diplomarbeiten von	[8.7, HÄRMENS, 2003]	[8.2, HOSTEIN, 2004]	
Streubreite	ca. +/-30°	ca. +/-35°	+ 17 %
Leistungsbedarf der Lampe [W] (Lampenlichtstrom [lm])	35 W (bei 3.200 lm)	50W (bei 3.900 lm)	+ 43 % (+22 %)
maximaler Lichtstrom	984 lm	1193 lm	+ 21 %
E_{max} des Spot (Scannender Anteil)	80,5 lx (bei 66 lm)	198,5 lx (bei 240,2 lm)	+147 %
E_{max} Grundlichtverteilung (GLV)	43 lx (bei 910 lm)	48,6 lx (bei 747,3 lm)	+ 13 %
E_{max} Abblendlicht (LB)	79,2 lx (bei 976 lm)	118,7 lx (bei 1.193 lm)	+50 %
E_{max} Autobahnlicht (ML)	100 lx (bei 976 lm)	126,1 lx (bei 1.155 lm)	+26 %
E_{max} Fernlicht (HB)	49,6 lx (bei 976 lm)	78,7 lx (bei 1.147 lm)	+59 %
Kontrast	HDG aufgeweitet	HDG stärker aufgeweitet	ca.+33 %
Wirkungsgrad-Gesamtsystem (HB)	27,9 lm / W bei jeder LSV	23,86 lm / W bei jeder LSV	-14,5 %
Bauraum ca. (h x b x t)	200 x 216 x 250	(216+90) x 185 x 250	ca. +31%

E_{max} = maximale Beleuchtungsstärke [lx](bei Lichtstrom [lm]) in 25m Entfernung.

Kennzeichen des scannenden Scheinwerfers ist sein konstanter Lichtstrom in allen Lichtverteilungen. Dieser Lichtstrom wird neben einer konstanten, statischen Grundlichtverteilung (GLV) für einen scannenden Lichtverteilungsanteil (SLV) verwendet, der flexibel verteilt werden kann. Beim ersten Prototypen (I) hat dieser SLV-Anteil eine maximale Beleuchtungsstärke von 80,5 lx bei einem Lichtstrom von 66 lm. Der Lichtstrom des SLV-Anteils der Lichtverteilung ist ein maßgeblicher, limitierender Faktor für die maximale Lichtstärke und die daraus resultierende maximale Beleuchtungsstärke der scannend geformten Lichtverteilungen. Dieser Lichtstrom kann je nach Ansteuerung der Scannermotoren und damit je nach gewünschter Scheinwerferlichtverteilung über einen kleineren oder größeren Raumwinkel

verteilt werden, sodass die maximale Beleuchtungsstärke in der Messentfernung von 25m maximal der des SLV-Anteils (additiv zum winkelpositionsabhängigen GLV-Anteil) betragen kann (bei einem ruhenden SLV-Anteil). Beim ersten scannenden Scheinwerfer-Prototypen wird in der Autobahnlichtverteilung der SLV-Anteil nicht bewegt und hat daher die höchste resultierende maximale Beleuchtungsstärkesumme aus SLV und GLV, Tabelle 5.17. Bei der Abblendlichtverteilung und insbesondere bei der Fernlichtverteilung muss ein größerer Raumwinkel durch den SLV-Anteil abgedeckt werden, sodass die resultierende maximale Beleuchtungsstärke geringer ausfüllt. Bisher ist die maximale Beleuchtungsstärke in der Fernlichtverteilung beim scannenden Scheinwerfer noch zu niedrig.

Beim zweiten scannenden Scheinwerfer-Prototypen (II), der bei der Optikforschung der Hella KG aufgebaut wurde [8.2, HOSTEIN, 2004], konnte auf die Vorarbeiten von [8.7, HÄRMENS, 2003] zurückgegriffen werden. Hierbei wurden die lichttechnischen Eigenschaften des Scanners weiter optimiert. Eine Anhebung der Lampenleistung der Gasentladungslampe, die zu einem erhöhten Lichtstrom und einer erhöhten Leuchtdichte führte, ermöglichte neben einem größeren Linsendurchmesser und einer kleineren Blendenzahl k = (f / D) (Brennweite / Durchmesser der Linse) einen erheblich erhöhten Lichtstrom bei einer merklich gestiegenen resultierenden Beleuchtungsstärke des SLV-Anteils. Durch diese geänderte Linsenauswahl konnte die relative Öffnung (1 / k) der Linse vergrößert und damit der in den SLV-Anteil eingekoppelte Lichtstrom deutlich gesteigert werden. Die Grundlichtverteilung GLV hat eine etwas höhere maximale Beleuchtungsstärke bei einem etwas reduzierten Lichtstrom. Die Lichtwerte der Abblendlicht- und Autobahnlichtverteilung sind vergleichbar oder besser als heutige Projektionsscheinwerfer (gesetzliche Vorgaben werden z.T. überschritten). Die resultierende Beleuchtungsstärke der Fernlichtverteilung muss noch gesteigert werden. Durch die Leistungserhöhung der Lampe ist der Lichtbogen weniger scharf begrenzt, sodass der Kontrast an der Hell-Dunkel-Grenze etwas abgenommen hat. Der Wirkungsgrad der Lampe ist durch die Leistungserhöhung reduziert worden. Die Konsequenzen der bisher nur kurzzeitigen Leistungserhöhung auf die Lebensdauer der Elektroden und der Lampe sind in Zukunft noch zu untersuchen. Das Hauptbauvolumen ist für die beiden Prototypen des scannenden Scheinwerfers weitestgehend konstant geblieben, wenn vom Bauvolumen des Scanner-Motors des zweiten, für die horizontale Lichtablenkung zuständigen Scanner-Spiegels des zweiten Prototypen abgesehen wird. Bei beiden scannenden Scheinwerfer-Prototypen wurde bei den Mehrfachreflexionen an den statischen und scannenden Spiegeln darauf geachtet, dass das Wendelbild des SLV-Anteils stets horizontal orientiert ist und dass die Reflexionsverluste an den Spiegeln minimiert werden.

Zusammengefasst hat die Optikoptimierung des scannenden Scheinwerfers und die Anpassung der Lampengeometrie und -leistung dessen Leistungspotenzial erheblich gesteigert. Die etwas kleineren Spiegelabmessungen und das geänderte Scanner-Spiegelmaterial sind für die Dynamik der Scannerspiegel förderlich. Der etwas größere Beschnitt des Reflektors für die Grundlichtverteilung hat kaum Konsequenzen auf die resultierende Lichtverteilung, da die Lampenleistung angehoben wurde.

5.6 Flexprisma

5.6.1 Funktionssynthese

Ausgehend von den allgemeinen Grundlagen des Flexprismas in Kapitel 4.6.5 wird hier die Funktionsstruktur des Nebenkonzepts Flexprismas aufgegliedert in Hauptfunktionen HF und Störfunktionen SF. Hauptfunktion des Flexprismas ist die Lichtlenkung eines Strahlenbündels, wobei Prismenkörper bzw. prismenähnliche Optikaufbauten verwendet werden sollen. Dadurch stellt das Flexprisma eine Alternative dar zu analog bewegten Spiegeln (vgl. Messemuster Audi Avantissimo), welche die gesamte Lichtverteilung ablenken. Eine weitere Möglichkeit konventionelle Lichtverteilungen abzulenken bzw. neu gemäß dem Straßenverlauf auszurichten, besteht in dem Schwenken der gesamten Scheinwerfereinheit, wie es bei Projektions- oder Reflexionsschwenkmodulen durchgeführt wird.

1. HF: Lichtlenkung eines Strahlenbündels mit variabel geneigten, überwiegend ebenen Optikflächen
2. HF: Neigung / Rotation / Translation einer (geneigten) ersten optisch wirksamen Optikfläche
3. HF: Neigung / Rotation / Translation einer (geneigten) zweiten optisch wirksamen Optikfläche
4. HF: Antrieb für die erste Optikfläche
5. HF: Antrieb für die zweite Optikfläche bzw. Kopplung der Neigungen der wirksamen Optikkörper
6. HF: Regelung der Treiberstufen der Antriebe in Abhängigkeit der Position der wirksamen Optikflächen und der Zielwinkelvorgaben der Regelung
7. SF: Dispersion (chromatische Aberration) an einer optischen Prismengeometrie, Lichtstromverluste, Fresnel'sche Reflexionen, Verkrümmung der Lichtverteilung, geringe Neigung der Lichtverteilung
8. SF: Vibrationen, Temperatur, Feuchtigkeit, Staub, konstante bzw. unregelmäßige, spektral gespreizte Beschleunigungen („Breitband-Rauschprüfung")

Die Funktionsstruktur des Flexprisma ist in Abbildung 5.28 dargestellt.

Ausgehend von der ersten Idee zur Lichtablenkung über ein Flexprisma in der Anfangsphase dieser Promotion sind zwei Diplomarbeiten zu diesem Thema entstanden. In der ersten Diplomarbeit von [8.7, BERHEIDE, 2004] wurden diverse Möglichkeiten zur Lichtverteilungsbeeinflussung aufgezeigt und ein erstes Muster eines Rotationsflexprismas aufgebaut, das mit Gleichstrommotoren und Servo-Ansteuerungselektronik betrieben wurde. In einer zweiten Diplomarbeit von [8.7, KOCH, 2005] wurde die Programmierung und Ansteuerung über Schrittmotoren, sowie eine Referenzierungs-Sensorik umgesetzt, sodass nun eine Punkt-

zu-Punkt-Ansteuerung der Lichtablenkung mit frei programmierbaren Verfahrwegen möglich wurde. Die Steuerung der Schrittmotoren stellt im Falle der Referenzierung einen Regelkreis dar (Referenzierungs-Sensorik). Anschließend wird durch den Einsatz von Schrittmotoren anstelle eines Regelkreises eine „Vorwärts"-Steuerung eingesetzt. Teile der hierbei entstandenen Abbildungen und der Theorie zum Flexprisma werden aus der Diplomarbeit von Koch zitiert.

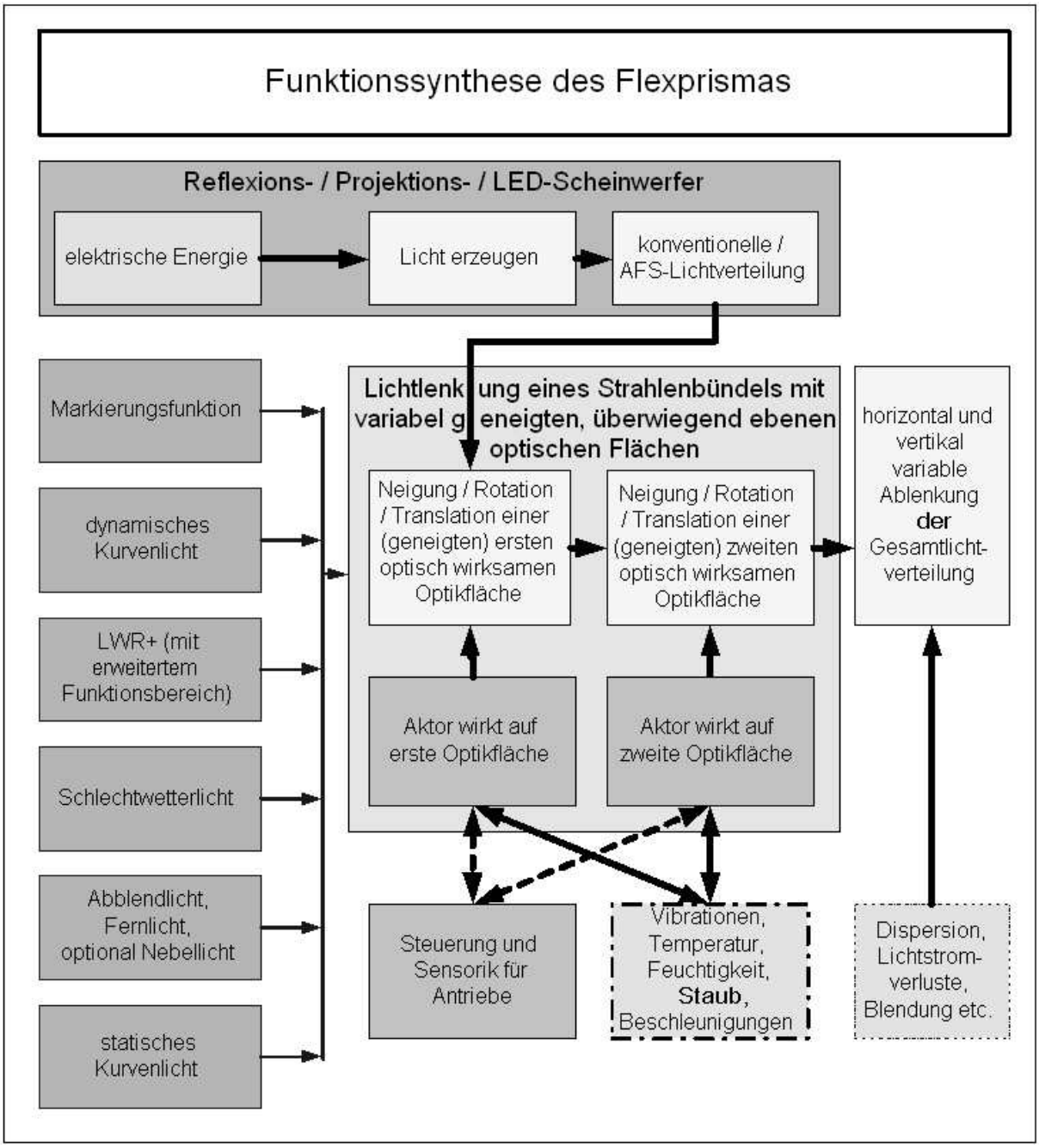


Abbildung 5.28: Funktionsstruktur des Flexprismas

In der Ausführungsform des Flexprismas als Rotationsflexprisma kann eine Hebelanalogie herangezogen werden, um die funktionalen Eigenschaften des Flexprismas besser erläutern zu können, Tabelle 5.18. Dabei werden die resultierenden Lichtablenkungen eines Lichtbündels

der optisch wirksamen Flächen durch die Hebelarmlängen eines Doppelarm-Roboters ersetzt. Die Lichtablenkungen sind mit einander gekoppelt in Analogie zu den Hebelarmen eines Doppelarm-Roboters.

Tabelle 5.18: Hebelanalogie zwischen Rotationsflexprisma und 2Hebel-Rotations-Roboter

	Rotationsflexprisma	2-Hebel-Rotations-Roboter (Doppel-arm-Roboter, Doppelpendel)
1. Hebelanalogie	1. Lichtablenkung über 1.Prismenwinkel	1. Hebelarmlänge
2. Hebelanalogie	2. Lichtablenkung über 2. Prismenwinkel	2. Hebelarmlänge
Ursprung	Optische Achse des Systems	Rotations-Ursprung des 1. Hebelarms
Drehachse der Hebel	Optische Übertragungsfunktion zwischen 1. optisch wirksamer Fläche und 2. optisch wirksamer Fläche	Drehachse zwischen 1.Hebelarm und 2. Hebelarm
Resultierende Hebelposi-tion	Superposition der optischen Hebellängen	Superposition der mechanischen Hebellängen
Maximaler Aktionsradius (Aktionsfeld)	gleiche Winkelstellungen der optischen Flächen bzw. optischen Prismenwinkelvektoren	gleiche Winkelstellungen der mechanischen Hebelarme
Ursprungsrotation	Optische Rotation der beiden Prismen mit gleicher Geschwin-digkeit bei keiner resultierenden Lichtablenkung („Nachbar-Showmodus“)	Mechanische Rotation des 1. Hebelarms, wobei der 2. Hebelarm exakt in die entgegengesetzte Richtung zeigt (keine bzw. nahe dem Ursprung geringe Absolutgeschwin-digkeit bei hoher Relativrotation des ersten Hebelarms)
Resultierende Geschwin-digkeit	Vektorielle Addition der optischen Prismen-Lichtablenkungs-Vektoren bzw. deren Ableitungen nach der Zeit	Vektorielle Addition der Hebelarm-längen bzw. Verfahrgeschwindigkei-ten
Maximale Geschwindig-keit	durch Prismenrotationsgeschwin-digkeit und relative Lage im Aktionsfeld bestimmt.	Durch Hebelarmrotationsgeschwin-digkeit und relative Lage im Aktionsfeld bestimmt.

Wie aus Abbildung 5.29 ersichtlich, gibt es mehrere Prismenstellungen, mit denen die gewünschte Zielposition der optischen Lichtablenkung erzielt werden kann.

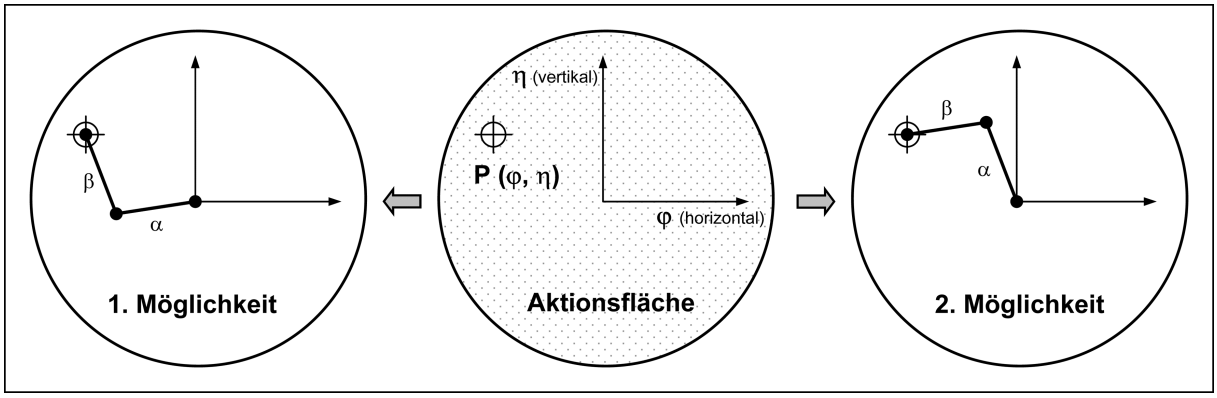


Abbildung 5.29: 2 Winkelstellungen für die gleiche Zielposition in der Aktionsfläche [8.7, KOCH, 2005]

Sehr anschaulich sind die Konsequenzen ungleicher Prismenwinkel, die Abbildung 5.30 darstellt. Dadurch werden Teilbereiche innerhalb der Aktionsfläche nicht mehr erreichbar.

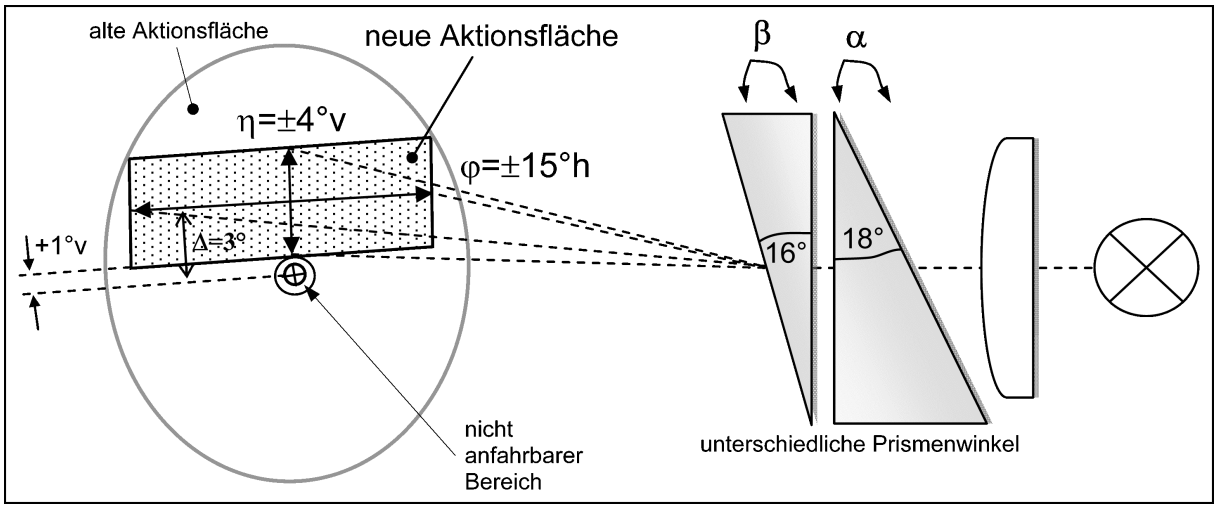


Abbildung 5.30: Ungleiche Prismenwinkel führen zu einem zentralen, nicht anfahrbaren Bereich [8.7, KOCH, 2005]

Da die absolute Verfahrgeschwindigkeit der Lichtverteilung eines Flexprismas nahe dem Ursprung der Aktionsfläche merklich absinkt (Ursache ist die begrenzte relative Verfahrgeschwindigkeit der Rotationsprismen, siehe Abbildung 5.31 und 5.32), kann als eine Abhilfemaßnahme auf einen geänderten Aktionsbereich oberhalb bzw. unterhalb des Ursprungs der Aktionsfläche zugegriffen werden. In diesen Anwendungsfällen lässt sich bei geeigneter Dimensionierung der Prismen ebenfalls ein horizontaler Schwenkbereich von +/-15° bzw. ein vertikaler Kippbereich von +/-4 ° realisieren.

Eine Gegenmaßnahme gegen das Absinken der absoluten Verfahrgeschwindigkeit nahe dem Ursprung ist eine Verlagerung des aktiv genutzten Bereichs, d.h. oberhalb oder unterhalb des Ursprungs, siehe Abbildung 5.32 bzw. Abbildung 5.30.

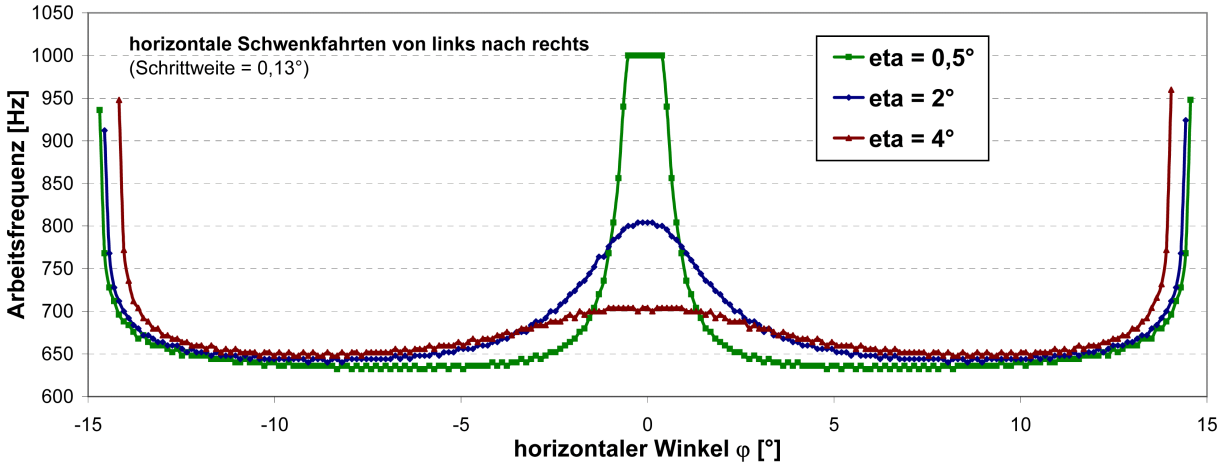


Abbildung 5.31: Relative Verfahrgeschwindigkeit bei unterschiedlichen vertikalen Winkeln eta. Deutlicher relativer Geschwindigkeitsanstieg nahe dem Ursprung (eta = 0,5°, phi im Intervall[–1,5°; +1,5°], vgl. Abb. 5.32) [8.7,KOCH, 2005]

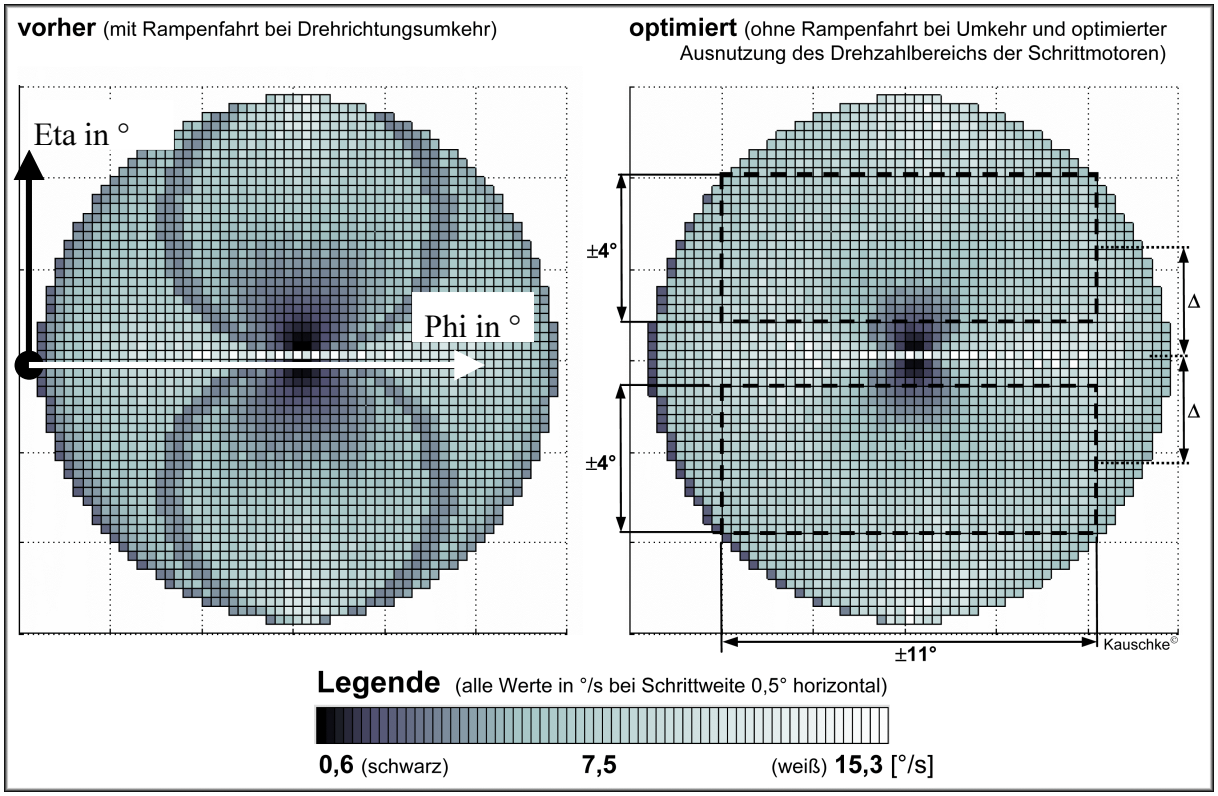


Abbildung 5.32: Absolute Verfahrgeschwindigkeit innerhalb der kreisförmigen Aktionsfläche des durch 2 optisch wirksame Flächen abgelenkten Lichtbündels. Eta: vertikaler Absolutwinkel; Phi: horizontaler Absolutwinkel [8.7, KOCH, 2005]

Die Lichtlenkung ist gekennzeichnet durch variable Teilsysteme, bei der das Gesamtsystem als Ganzes geschwenkt werden kann. Unterabarten sind davon nur geschwenkte Linsen, z.B. von Zizala. Die geschwenkten Gesamtsysteme teilen sich in Projektions- und Reflexionssysteme auf. Insbesondere im japanischen Markt wurde der Weg des Schwenken von nur Teilen der Lichtverteilung begangen. Da das Schwenken des Gesamtsystems einen erhöhten Platzbedarf benötigt, wurde der Weg eines Kipp- bzw. Schwenkspiegels z.B. im Audi Avantissimo Prototypen aufgezeigt, bei dem ein dem Gesamtsystem vorgelagerter, variabel kipp- und schwenkbarer Spiegel die Gesamtlichtverteilung ablenkt. Eine interessante Alternative dazu stellt das Flexprisma dar, das mit einem variablen Prismenwinkel durch Refraktion ein Ablenken des Gesamtstrahlenbündels bewirkt. Ebenso wie beim vorgelagerten Spiegel wird auch durch das Flexprisma ein gänzlich neues Erscheinungsbild erzielt. Eine vierte Möglichkeit eine variable Lichtlenkung zu erzielen besteht in der variablen Ansteuerung von mehreren Lichtquellen, die durch ihre Anordnung im optischen System eine Lichtverteilung mit variierter Abstrahlcharakteristik und / oder in unterschiedlichen Abstrahlrichtungen ausgerichtet sind. Durch das sequentielle Auf- und Abdimmen der in sich statischen Lichtverteilungen kann für den Betrachter eine scheinbar geschwenkte Lichtverteilung geformt werden.

Die Topologie der Lichtablenkungsmöglichkeiten werden in Abbildung 5.33 visualisiert.

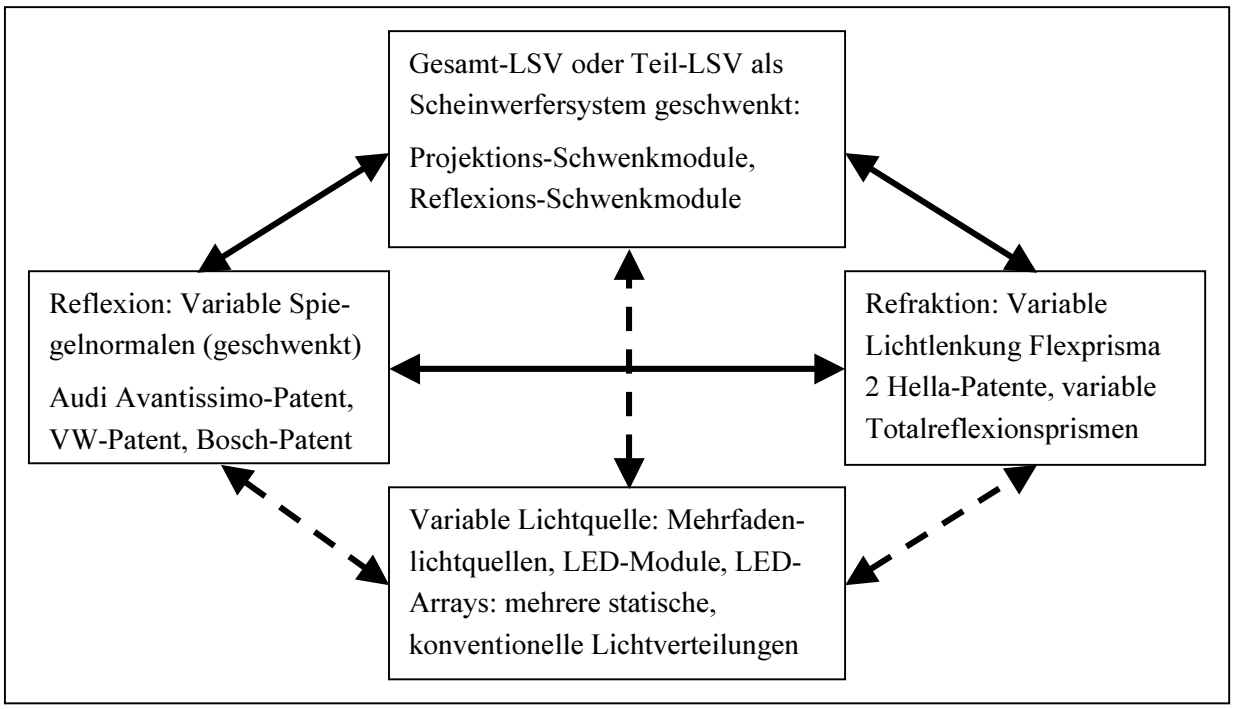


Abbildung 5.33 Topologie der variablen Lichtlenkungsmodule und –funktionsbaugruppen

Mischformen aus den in Figur 5.33 erwähnten Lichtlenkungsmodulen sind ebenfalls interessante Varianten einer neuartigen Lichtlenkeinheit. Eine Übersicht dazu kann Tabelle 5.19 liefern.

Lichtverteilung	eigenständig, statisch	subtraktiv	additiv	umgelenkt
Systemansatz	Gesamtsystem	Teilsystem		
Vorsatzoptik	Reflektor / Spiegel	Reflektor / Spiegel geschwenkt, gekippt	Prisma statisch	Prisma variabel / Flexprisma
Flexprisma	Prismenkeile	Halbzylinder / Zylinderwanne	Halbkugel / Kugelpfanne	Ebene Platten mit Gel- / Wassermasse
Bewegungsrichtung	Rotation	Translation		
Drehachsen	Parallel zur optischen Achse	Senkrecht zur optischen Achse	Schief zur optischen Achse	Kardanisches Schneiden der Achsen
Anzahl	einfach	zweifach	mehrfach	
Hybrid	Gesamtsystemschwenken mit optischer (Rand-) Verstärkung (konkaves Prisma)	eine horizontale Kippbewegung und ein Rotationsflexprisma	eine vertikale Kippbewegung und ein Rotationsflexprisma	Verschmelzen von Linse und erstem Rotationsprisma
Hybrid	LED-Arrays mit variablen Reflektoren, Prismenelementen oder als Gesamtsystem geschwenkt			

Tabelle 5.19: Systematik zur optisch variablen Lichtlenkung: Morphologischer Kasten

Hybride Schwenkmodule lassen sich durch die Kombination aus einer optischen Verstärkung eines mechanischen Schwenkens definieren, bei der die Lichtverteilung zu den Rändern des mechanischen Schwenkintervalls über ein optisches Prisma zusätzlich verstärkt werden.

5.6.2 Modularisierung

Das Flexprisma kann in vier Hauptmodule gegliedert werden:

1. Variables Lichtlenkungsmodul

   1.1 Erster Flexprismaoptikkörper

   1.2 Zweiter Flexprismaoptikkörper

2. Antriebsmodul

   2.1 erste Elektromotor-Getriebegruppe für ersten Flexprismaoptikkörper

   2.2 zweite Elektromotor-Getriebegruppe für zweiten Flexprismaoptikkörper

3. Sensormodul

   3.1 Sensor zur Erfassung der Absolut- bzw. Relativposition des ersten Flexprismaoptikkörpers

   3.2 Sensor zur Erfassung der Absolut- bzw. Relativposition des zweiten Flexprismaoptikkörpers

4. Ansteuerungsmodul mit Mikrocontroller zur Auswertung der Sensorinformationen und zur Ansteuerung der beiden Antriebsmodule des ersten und zweiten Flexprismaoptikkörpers gemäß vorgegebener Kurvenscharen

Zur Kostenoptimierung können das erste und zweite Sensormodul miteinander kombiniert werden, indem z.B. mit einer Lichtschranke beide Prismen sequentiell positionserfasst werden und nach dieser absoluten Positionserfassung eine relative Schrittzählung über zwei Schrittmotoren erfolgt [8.7, KOCH, 2005]. Die Elektromotor-Getriebegruppen werden daher als Schrittmotoren ausgeführt, deren Ansteuerparameter, Geschwindigkeits- und Dynamikverhalten leichter als bei Gleich- oder Wechselstrommotoren kontrolliert werden kann. Über eine geeignete Getriebeübersetzung (Untersetzung, Verstärkung des unbestromten bzw. höheren bestromten Haltemoments des Schrittmotors) wird eine Selbsthemmung der Flexprismaoptikkörper unter Vibration erzielt. Dennoch darf die Getriebeübersetzung nicht zu hoch gewählt werden, da sonst Dynamikeinschränkungen bei den maximal möglichen Beschleunigungen und den maximalen Endgeschwindigkeiten der Flexprismaverfahrgeschwindigkeiten bestehen. Beim Einsatz von Schrittmotoren liegt eine offene Steuerkette vor. Werden Gleichstrommotoren und eine permanente Positionserfassung eingesetzt, so liegt ein geschlossener Steuerkreis vor. Über die Wahl der Systemkomponenten des Steuerkreises und deren Systemverhalten kann die Genauigkeit oder die Dynamik des Regelkreises beeinflusst werden.

Wird die Systemgrenze des Flexprismas weiter gefasst, so kann der erste Flexprismaoptikkörper mit der Linse eines Projektionsmoduls kombiniert werden. Hierzu ist eine aufwändige Freiformberechnung der Kombination aus asphärische Linse und erstem Flexprismaoptikkör-

per erforderlich. Durch die Kombination der Optikkörper wird die Zahl der lichtstromverlustbehafteten Grenzflächen der Optikkörper um zwei Grenzflächen gesenkt. Gleichzeitig kann die Gesamtmasse des optischen Systems reduziert werden. Die Blendwerte durch Streulicht und Fresnel'sche Reflexionen werden ebenfalls positiv beeinflusst.

Die Form der Optikkörper des Flexprismas erfordern eine Anpassung der mechanischen Aufhängung und Lagerung der Prismenkörper und eine Anpassung der Antriebs- und Sensormodule.

Wird der Freiheitsgrad geänderter Materialpaarungen hinzugezogen, so kann bzw. könnte über ein optisch neutrales Gel zwischen den Optikkörpern der Brechzahlunterschied zwischen den beiden benachbarten Grenzflächen der Flexprismaoptikkörper und dem dazwischenliegenden Luftspalt reduziert werden, wodurch die Lichtverluste im Flexprisma ebenfalls absinken würden. Das optisch neutrale Gel müsste durch seine Konsistenz, Dickflüssigkeit bzw. durch eine Dichtung am Herauswandern bzw. Herausfließen aus dem Spalt zwischen den beiden Flexprismaoptikkörpern gehindert werden.

Alternativ könnte das Flexprisma aus einer Flüssigkeits- oder Gelblase aufgebaut werden, wobei die Flüssigkeit oder das Gel in einer transparenten, elastischen Folientüte eingeschweißt sein könnte. Da die optischen Flächen des Flexprismas eben sein müssen, werden die optisch aktiven Flächen der Folientüte durch ebene Glas- oder Kunststoffplatten in ihrer Form, selbst unter Vibration, gehalten. Neben dieser ebenen Formen der Glas- und Kunststoffplatten, die optiklos ausgeführt sein können, sind auch integrierte Optikelemente denkbar, die eine konstant vorgegebene Lichtlenkung bewirken und z.B. für eine erhöhte Streubreite des Scheinwerfersystems oder eine vorgegebene Abstrahlrichtung sorgen. Die Glas- oder Kunststoffplatten sind so gelagert, dass sie Drehbewegungen um eine oder zwei zur optischen Achse senkrechte Achsen durchführen können. Neben mindestens einer vertikalen Achse für das dynamische Kurvenlicht sind auch mindestens eine horizontale Achse für die Leuchtweitenregelung erforderlich. Durch eine geeignete Gestaltung von seitlich bzw. oben und unten angeordneten Flächen wird verhindert, dass die Folientüte mechanisch aus ihrer Solllage herauswandert. Als Flüssigkeiten sind z.B. Wasser, Salzlösung, Silikon oder Ethanol, Pentanol oder Frostschutzmittel einsetzbar.

Wie in Tabelle 5.20 beschrieben, können die Achsen des Flexprismas mehrere Orientierungen, z.B. parallel, senkrecht (radial) oder schräg zur optischen Achse einnehmen. Teilweise sind deren Bewegungen auch mit gleichzeitigen Bewegungen des vorgelagerten Scheinwerfersystems kombinierbar. Je nach Konfiguration des Flexprismas und der gewünschten Schwenk- und Lichtfunktionen können die mechanischen Bewegungen mechanisch funktional durch ein Getriebe, z.B. Viergelenkkette, Zahnradgetriebe etc., gekoppelt werden, wodurch die Zahl der Antriebe auf einen reduziert werden kann.

Beim Flexprisma liegt der klassische Aufbau eines mechatronischen Systems vor [vgl. 8.1,WALLASCHEK, 2002; 8.2, BÖRNCHEN, 2001].

5.6.3 Dimensionierung

In der Diplomarbeit von Berheide [8.7, BERHEIDE, 2004] wurden Möglichkeiten der Lichtverteilungsbeeinflussung aufgezeigt. Nach einer Bewertungsmatrix hat sich das Rotationsflexprisma mit festen Prismenwinkeln, die um die optische Achse rotiert werden, als konstruktiv einfachste und technisch beste Lösung herausgestellt. Für dessen Dimensionierung gilt: Als Prismenmaterial wurde PMMA („Plexiglas“) mit dem Brechungsindex von n=1,49 eingesetzt. Die Prismen sind als Prismen mit Planflächen bzw. ein Prisma ist als Fresnel-Scheibe mit z.B. neun Zahnungen, verteilt über einen Durchmesser von 90mm ausgeführt. Der einfallende Lichtstrom fällt unter dem Winkel α_1 auf die erste Prismengrenzfläche, wird gebrochen und fällt dann unter dem Winkel α_2 auf die zweite Prismengrenzfläche, an der er ein zweites Mal gebrochen wird. Das Brechungsgesetz wird daher an jedem Prisma zweimal angewendet:

$$\sin\alpha_1 = n \cdot \sin\beta_1 \; und \; \sin\alpha_2 = n \cdot \sin\beta_2 \qquad \text{n = Brechungsindex}$$

Werden die geometrischen Zusammenhänge für die Winkelbeziehungen der Dreiecksflächen eines Prismas berücksichtigt, so gilt bei kleinen Winkeln mit der Vereinfachung $\sin\alpha \approx \alpha$ und damit $\alpha_1 \approx n \cdot \beta_1$ als Strahlablenkung δ am Prisma:

$$\delta \approx (n-1) \cdot \gamma \qquad \delta = \text{Ablenkungswinkel}, \gamma = \text{Prismenwinkel}$$

Der exakte Zusammenhang ist nichtlinear. Der Vorteil der Vereinfachung ist, dass der Ablenkungswinkel δ unabhängig vom Einfallswinkel α_1 ist. Exakt kann die Strahlablenkung δ über eine Taylor-Reihe, je nach Zahl der Glieder, exakt berechnet oder nur approximiert werden:

$$\delta = (n-1) \cdot \sin\gamma \Rightarrow \delta = (n-1) \cdot \left(\gamma - \frac{\gamma^3}{3!} + \frac{\gamma^5}{5!} - \frac{\gamma^7}{7!} + \ldots \right)$$

Das Rotationsflexprisma entspricht im Aufbau einem sogenannten Drehkeilpaar, das für optische Justageaufgaben üblicherweise eingesetzt wird. Innerhalb einer kreisförmigen Aktionsfläche kann jeder Punkt bzw. jede Lichtablenkung stufenlos eingestellt werden [8.6, HAFERKORN, 2003].

Beim Rotationsflexprisma gibt es zwei Sonderfälle der Positionierung:

Bei paralleler Ausrichtung der geneigten Prismenflächen tritt keine Lichtablenkung auf, sondern das Lichtbündel wird nur parallelversetzt, ähnlich dem Durchstrahlen einer geneigten Glasplatte. Dieser erste Sonderfall der Prismenorientierung ist bemerkenswert, da bei einer Bewegung beider Prismen mit gleicher Geschwindigkeit und gleichem Drehsinn keine optische Ablenkung des Strahlenbündels auftritt (unendlich viele Rotationsstellungen der Rotationsflexprismen bei parallelen Prismenebenen-Normalen), obwohl die Prismenkörper sich gut sichtbar für den Nutzer drehen. Dadurch kann selbst bei stehendem Fahrzeug die lichttechnische Gesetzgebung erfüllt werden, obwohl die Prismendynamik gut für den Fahrzeugbesitzer oder dessen Nachbarn sichtbar gemacht werden kann.

Der zweite Sonderfall besteht in der Orientierung der Prismenkörper derart, dass die Prismenbasen benachbart sind. In dieser Prismenstellung wird das Strahlenbündel maximal in Richtung der Prismenbasis abgelenkt. Werden auch hier die Prismen mit gleicher Geschwindigkeit und Drehsinn bewegt, so wird der maximale Aktionsradius der Aktionsfläche abgefahren. Mit den hier ausgewählten Prismenwinkeln von 15° ist dabei ein dynamisches Kurvenlicht von horizontal ca. +/-15° und eine Leuchtweitenregelung von vertikal ca. +/-15° möglich.

Der große optische Verstellbereich des Rotationsflexprismas in jede beliebige Richtung der Aktionsfläche ermöglicht den Verzicht auf die horizontale und die vertikale Scheinwerfergrundeinstellung, sodass der Scheinwerfer direkt auf Block in ein Scheinwerfergehäuse geschraubt werden kann.

Die maximale Ablenkung δ_{max} (= maximaler Aktionsradius der Aktionsfläche) des Strahlenbündels lässt sich mit der folgenden Formel exakt berechnen:

$$\delta_{\max} = 2 \cdot (n-1) \cdot \gamma \cdot \sin\alpha = 2 \cdot (1{,}49-1) \cdot 15° \cdot \sin 90° = 14{,}7°$$

Dabei liegen folgende Daten zugrunde: 2 Prismen, Brechungsindex n = 1,49 (PMMA), Einzelprismenwinkel von 15°, Gesamtprismenwinkel von 30°, Orientierung der Prismenvektoren jeweils 90° zu einer Bezugsfläche. Die Prismenbasen sind benachbart, sowie fluchtend und die beiden Prismenbasennormalen weisen eine Vektorkomponente senkrecht zur optischen Achse auf, sie sind geneigt und liegen zusammen mit der optischen Achse in einer Ebene. Für die Prismenwinkellage gilt: sin 90° = 1 (maximale Ablenkung) und sin 0° = sin 180° = 0 (Nullstellung = planparallele Platte). Der Winkel α bezieht sich dabei auf eine gemeinsame Referenzebene, z.B. eine vertikale Ebene, welche die optische Achse umfasst.

Die Prismenwinkelabhängigkeit der Lichtablenkung ist nichtlinear. Sie kann folgendermaßen beschrieben werden [8.6, HAFERKORN, 2003] bzw. [8.6, LITFIN, 2001]:

$$\sin\varepsilon_1' = \frac{1}{n}\sin\varepsilon_1$$

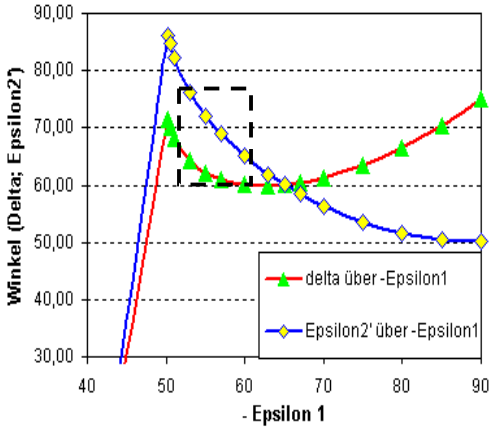
$$\varepsilon_2 = \gamma - \varepsilon_1'$$

$$\sin\varepsilon_2' = n\sin\varepsilon_2$$

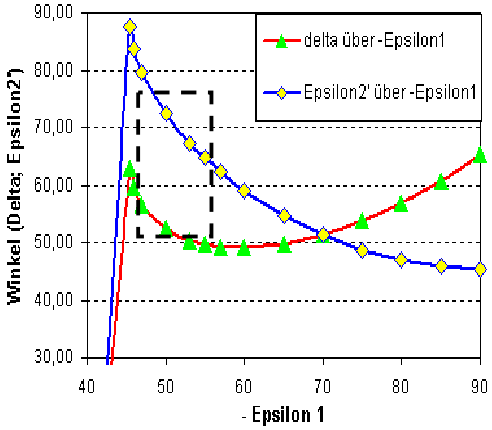
$$\delta = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2' - \gamma$$

Der Ablenkwinkel δ und des Ausfallswinkels ε_2 in Abhängigkeit vom Einfallswinkel ε_1 und des Prismenwinkels γ ist den Abbildungen 5.35 aufgetragen.

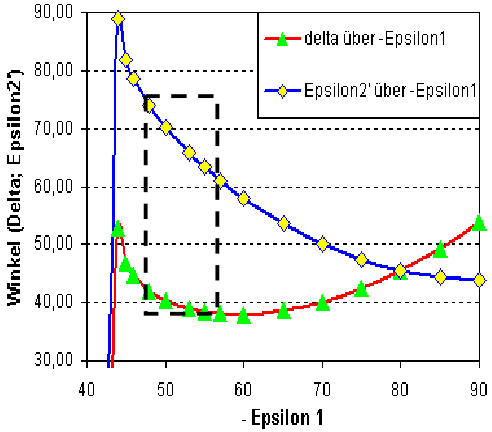
Prisma mit Gamma = 65° (!) Prismenwinkel, n = 1,65



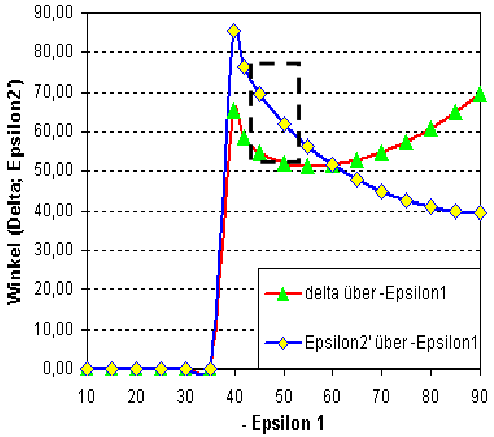
Prisma mit Gamma = 70° (!) Prismenwinkel, n = 1,5028



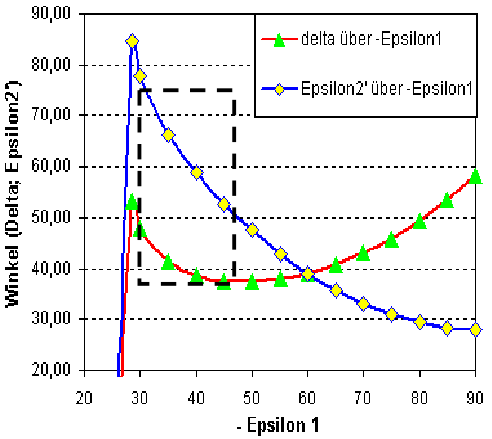
Prisma mit Gamma = 80° (!) Prismenwinkel, n = 1,333



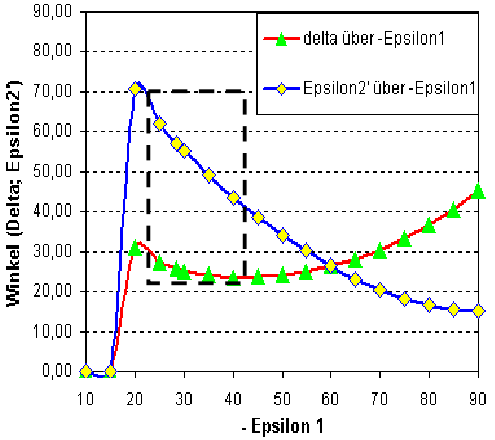
Prisma mit Gamma = 60° Prismenwinkel, n = 1,65

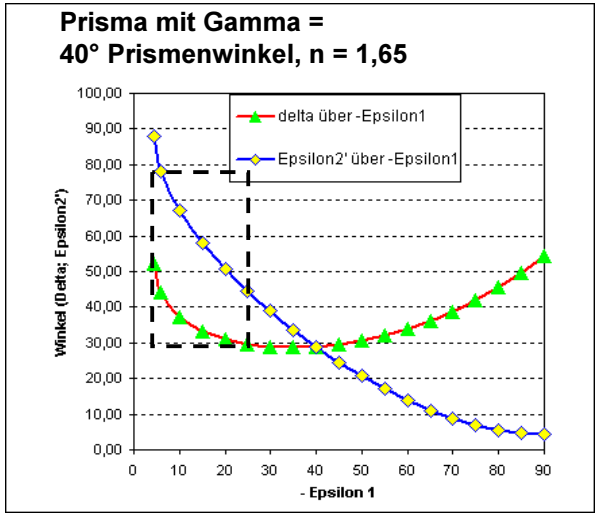


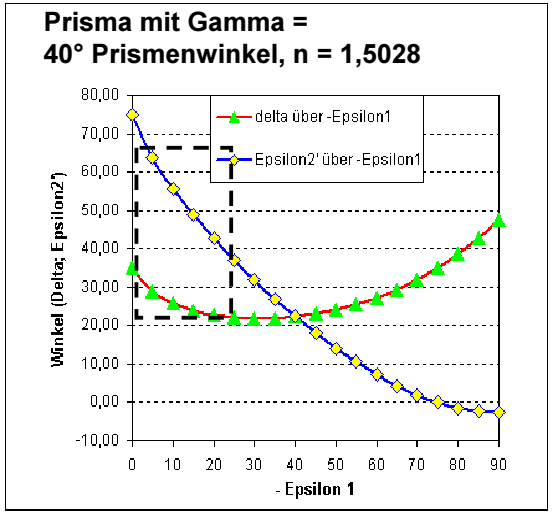
Prisma mit Gamma = 60° Prismenwinkel, n = 1,5028

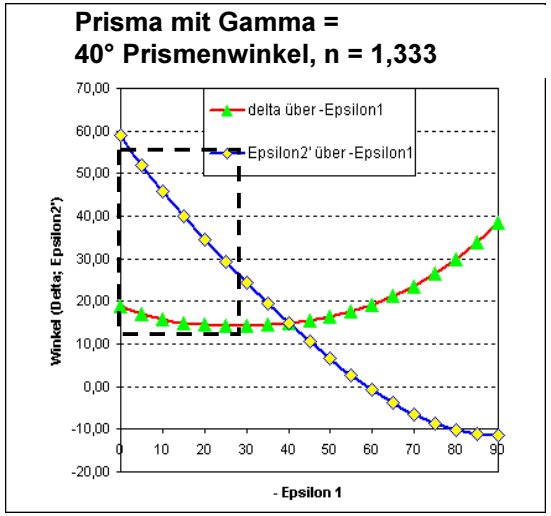


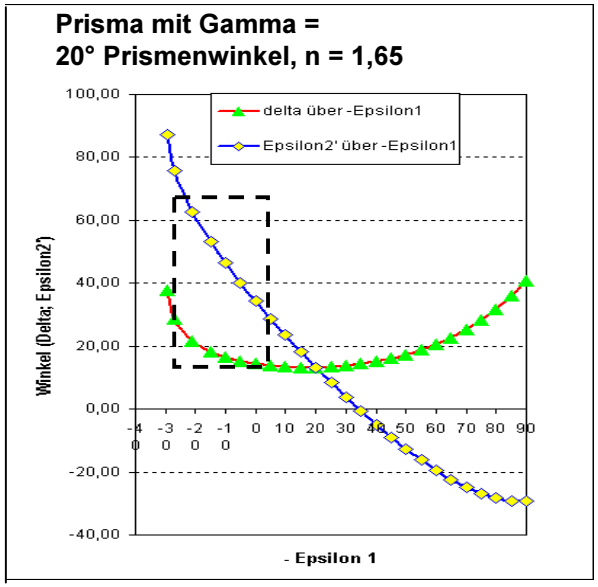
Prisma mit Gamma = 60° Prismenwinkel, n = 1,333

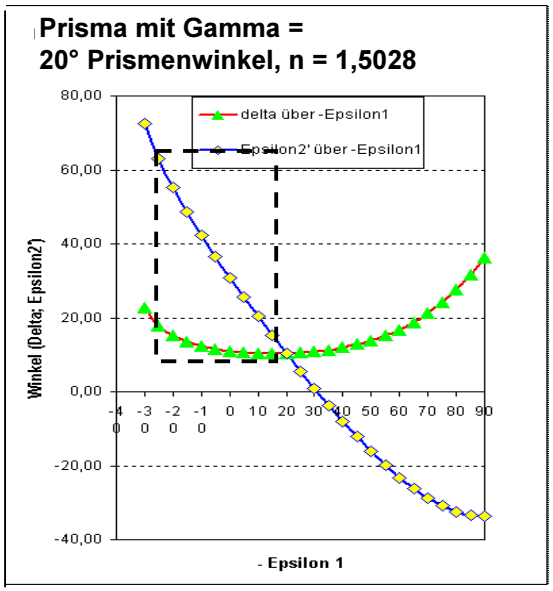


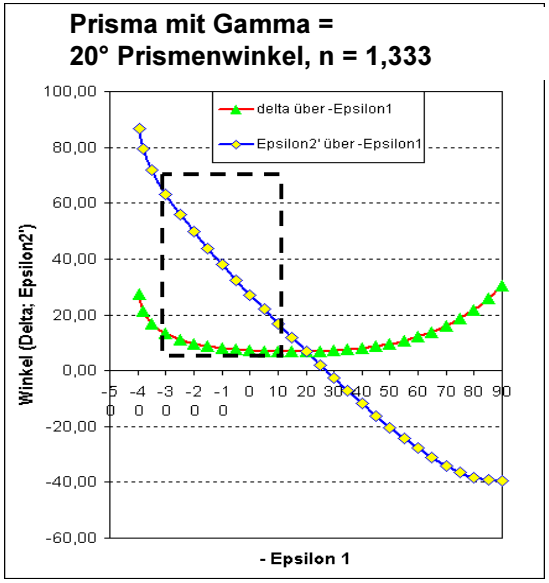

Prisma mit Gamma =
40° Prismenwinkel, n = 1,65
delta über -Epsilon1
Epsilon2' über -Epsilon1
Winkel (Delta; Epsilon2')
- Epsilon 1


Prisma mit Gamma =
40° Prismenwinkel, n = 1,5028
delta über -Epsilon1
Epsilon2' über -Epsilon1
Winkel (Delta; Epsilon2')
- Epsilon 1


Prisma mit Gamma =
40° Prismenwinkel, n = 1,333
delta über -Epsilon1
Epsilon2' über -Epsilon1
Winkel (Delta; Epsilon2')
- Epsilon 1


Prisma mit Gamma =
20° Prismenwinkel, n = 1,65
delta über -Epsilon1
Epsilon2' über -Epsilon1
Winkel (Delta; Epsilon2')
- Epsilon 1


Prisma mit Gamma =
20° Prismenwinkel, n = 1,5028
delta über -Epsilon1
Epsilon2' über -Epsilon1
Winkel (Delta; Epsilon2')
- Epsilon 1


Prisma mit Gamma =
20° Prismenwinkel, n = 1,333
delta über -Epsilon1
Epsilon2' über -Epsilon1
Winkel (Delta; Epsilon2')
- Epsilon 1

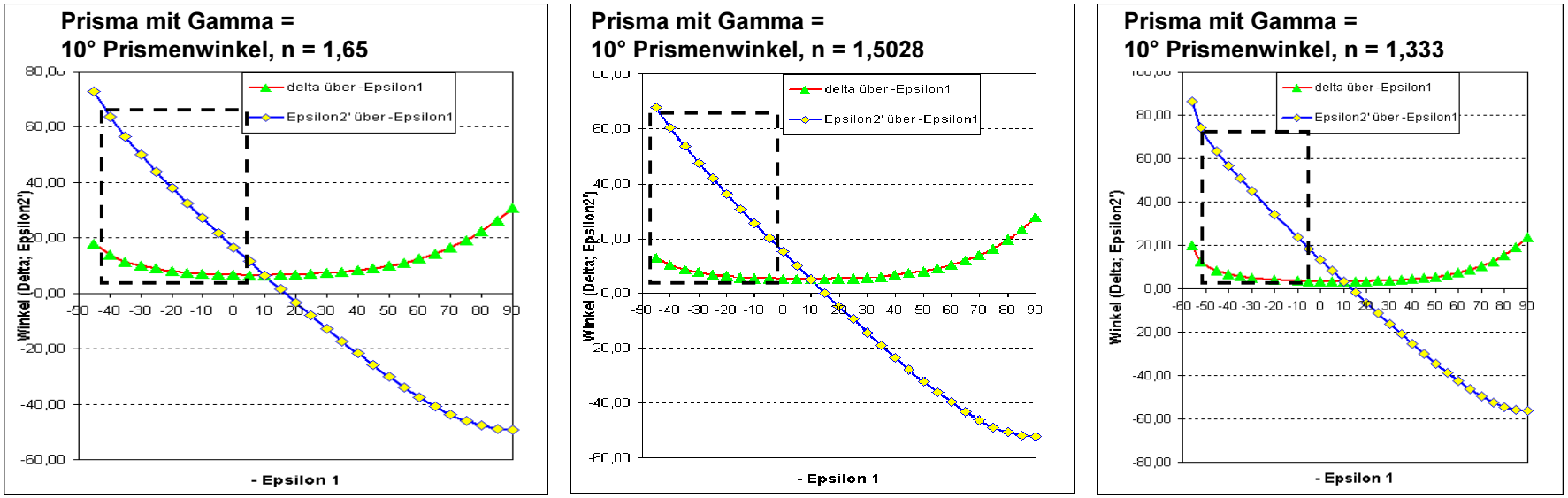


Abbildung 5.35: Ablenkwinkel δ und Ausfallswinkel ε_2 über Einfallswinkel ε_1, jeweils zum Lot gemessen, in Abhängigkeit vom Prismenwinkel γ

Die Anwendung der Nichtlinearität des Ablenkwinkels δ kann in einem Kippprisma erfolgen, das für die optische LWR-Regelung eingesetzt wird. Hierzu ist ein Prisma mit festem Prismenwinkel γ erforderlich, das um eine horizontale Achse gekippt wird. Da der Ablenkwinkel δ vom Einfallswinkel ε_1 abhängig ist, ist dieser Effekt für eine optische LWR einsetzbar. Dabei ist zu beachten, Abbildung 5.35, dass der Kippwinkel $\beta = f(\delta; \varepsilon_1; n)$ nichtlinear angesteuert werden muss, damit die gewünschte optische Soll-Ablenkung δ erzielt wird. Gleichzeitig darf der Auslenkwinkel ε_2 nicht zu groß (<70-75°) [8.6, HAFERKORN, 2003; 8.6, HECHT, 2001, S.181f] werden, da sonst die Fresnel´schen Reflexionen innerhalb des Prismas zu hoch werden. Der Prismenwinkel γ des Kippprismas soll möglichst klein sein, damit dieses wenig Bauraum im Scheinwerfer benötigt. Das Kippprisma kann nur für die LWR eingesetzt werden, da der nichtlineare Ablenkeffekt für das dynamische Kurvenlicht nicht ausreichend groß ist. Die für das Kippprisma nutzbaren Funktionsbereiche sind in den Diagrammen der Abbildung 5.35 mit gestrichelt gezeichneten Rechtecken dargestellt, wobei dessen Kanten die Grenzen des nutzbaren Funktionsbereichs darstellen. Aus den Teilabbildungen kann abgelesen werden, dass mit größer werdendem Brechungsindex n und Prismenwinkel γ eine stärkere Abhängigkeit des Ablenkwinkels δ vom Einfallswinkel ε_1 auftritt.

Limitierend sind dabei die Fresnel`schen Reflexionen, insbesondere beim Auslenkwinkel ε_2 und der maximal mögliche Prismenwinkel γ des Kippprismas. Ein Prismenwinkel γ zwischen 20° und 40°, z.B. 30° bei einem Brechungsindex von n = 1,65 stellt ein Optimum für das maximal nutzbare Intervall des Ablenkwinkels δ in Abhängigkeit vom Einfallswinkel ε_1 dar.

Die Dispersion am Kippprisma ist dabei noch zu untersuchen. Im Gegensatz zum Rotationsflexprisma kann von einem horizontalen Aufheben der Dispersion nicht ausgegangen werden. Die Dispersion kann zu einem größeren Farbsaum an der Hell-Dunkel-Grenze führen.

Nach dem kurzen Exkurs zum Kippprisma (horizontale, senkrecht zur optischen Achse stehende Kippachse), soll nur das Rotationsflexprisma (horizontale, parallel zur optischen Achse stehende Rotationsachse) weiter beschrieben und diskutiert werden.

Für die Ansteuerungsalgorithmen, die Verfahrgeschwindigkeit und die Kurvenscharen der Ansteuerung der Rotationsflexprismen und deren Berechnung wird auf die Diplomarbeit von Koch [8.7, KOCH, 2005] verwiesen. Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die absolute Verfahrgeschwindigkeit der Rotationsflexprismen nicht im gesamten Aktionsbereich konstant ist. Das liegt daran, dass die maximalen relativen Verfahrgeschwindigkeiten der beiden Rotationsflexprismen durch deren Schrittmotoren und die Getriebeübersetzung begrenzt sind. Da das Verhältnis der Verfahrgeschwindigkeiten relativ zueinander durch die geometrischen Anforderungen (Hebelverhältnisse und deren Winkelstellungen zueinander) vorgegeben sind, treten lokale Minima in der Topologie der Verfahrgeschwindigkeiten auf, die in Abbildung 5.32 dargestellt sind.

Wie Abbildung 5.32 zeigt, sinkt die absolute Verfahrgeschwindigkeit des Rotationsflexprismas nahe dem Ursprung ab, da für eine geringe Absolutverfahrbewegung relativ hohe Verfahrgeschwindigkeiten (diese sind physikalisch begrenzt) der einzelnen Rotationsflexprismen notwendig sind. Die beiden kleineren Ringe nahe der vertikalen Symmetrieachse sind die Bereiche, in der eines der beiden Rotationsflexprismen eine Bewegungsrichtungsumkehr durchläuft, wodurch die Absolutverfahrgeschwindigkeit des Strahlenbündels ebenfalls etwas absinkt.

Eine Konsequenz des relativen Absinken der absoluten Verfahrgeschwindigkeit liegt in der Nutzung von Teilbereichen innerhalb des Aktionsbereichs des Rotationsflexprismas, siehe Abbildung 5.30 bzw. Abbildung 5.33. Dadurch können die Bereiche mit minimaler absoluter Verfahrgeschwindigkeit weitestgehend vermieden werden. Das ist möglich, da für den vertikalen Verstellbereich eines Scheinwerfers nur ca. 6-8° erforderlich sind. Um den markierten Bereich in Abbildung 5.30 vollständig (insbesondere für das dynamische Kurvenlicht) nutzen zu können, werden die Prismenwinkel des Rotationsflexprismas so vergrößert, dass der Gesamtaktionsradius größer ist als der tatsächlich benötigte horizontale Verstellbereich des dynamischen Kurvenlichts. So wird ein seitlicher Beschnitt des horizontalen Verstellbereichs des dynamischen Kurvenlichts vermieden.

Die lichttechnische Auslegung, die lichttechnischen Herausforderungen und deren Korrekturmaßnahmen werden in Kapitel 5.6.5 genauer dargestellt.

5.6.4 Konstruktiver Aufbau

Neben dem Rotationsflexprisma, siehe Kapitel 5.6.1, und dem Kippprisma, siehe Kapitel 5.6.3, gibt es noch die Bauformen des Halbzylinder-, des Kugelabschnitts- und als Mischform der vorhergehenden Flexprisma-Varianten die Bauform des Tonnen-Flexprismas. Neue, in optischen Systemen eher unübliche Materialien ermöglichen weitere Bauformen des Flexprismas.

Die Flexprismen sind in der Schutzrechtsveröffentlichung, [8.8, KAUSCHKE, 2003-4] beschrieben.

Beim Rotationsflexprisma [8.7, BERHEIDE, 2004; 8.7, KOCH, 2005] werden die zwei Rotationsprismen mit konstantem Prismenwinkel um die optische Achse rotiert. Bei den nachfolgend beschriebenen Ausführungsformen wird der resultierende Prismenwinkel des Gesamtprismas variiert. Dabei sind fast ausschließlich die äußeren Prismenflächen optisch aktiv, die für die gewünschte Strahlbündelablenkung sorgen.

Beim Halbzylinderprisma bzw. Zylinderabschnittsprisma und dessen Gegenprisma der Zylinderwanne rotieren die beiden Prismen um eine gemeinsame, vertikale Drehachse, die Mittelachse des Zylinders. Damit kann der geringe Luftspalt zwischen den Optikkörpern konstant gehalten werden, der nur eine leichte Aufweitung des Strahlenbündels bewirkt (vgl. Zylinderlinse und Zylinderwannen-Gegenstück). Durch die Gelenkpaarung Halbzylinder und Zylinderwanne ist nur die Drehung um eine Achse möglich, sodass diese Flexprismaanordnung sich insbesondere für das dynamische Kurvenlicht eignet.

Beim Kugelabschnittprisma und dessen Gegenprisma der Kugelpfanne können die beiden Prismen gegeneinander um zwei senkrecht stehende Achsen gedreht und gekippt werden. Für diese Freiheitsgrade ist eine kardanische Aufhängung wenigstens eines Prismas erforderlich. Der Luftspalt zwischen Kugelabschnitt und Kugelpfanne wird auch hier konstant gehalten, sodass das Strahlenbündel nur leicht geweitet bzw. gestaucht wird, sich in seiner Strahlorientierung aber nicht ändert. Nur die äußeren, meist ebenen Flächen des Kugelabschnitts und der Kugelpfanne sind optisch aktiv. Optional können diese mit einer Vorsatzoptik, Prismen oder einer optischen (Freiform-) Krümmung versehen werden.

Das Tonnenprisma ist eine Mischform (Hybrid) aus Halbzylinder-Flexprisma und Kugelabschnitts-Flexprisma. Hierbei ist ebenfalls eine kardanische Aufhängung erforderlich, jedoch schneiden sich in diesem Fall die Drehachsen nicht mehr. Diese sind windschief.

Neben den Flexprismen aus Optikkörpern mit festem Aggregatzustand gibt es noch Flexprismen, die mit einem flüssigen, gallert- oder gelartigen oder einem gasförmigen Medium mit einem höheren Brechungsindex als die umgebende Luft gefüllt sein können. Hierzu ist eine

elastische, optisch inaktive Hülle erforderlich oder das Volumen muss über Dichtungen abgeschlossen sein. Der Aufbau eines solchen Flüssigkeits-Flexprismas wird in Kapitel 5.6.2 beschrieben.

Nähere Details zum Aufbau des Rotationsflexprismas, der Motor-Getriebe-Ansteuerung und Getriebeübersetzung, der Ansteuerkarte und der Prismenpositionserfassung ist der Diplomarbeit von Koch zu entnehmen [8.7, KOCH, 2005].

5.6.5 Lichttechnische Leistungsfähigkeit Flexprisma

Wie bei jedem Optikkörper in einem Strahlengang treten auch an den Optikkörpern des Flexprismas Lichtstromverluste durch Transmissionsverluste im Prismenmaterial und durch Fresnel'sche Reflexionen an den Grenzflächen der Prismenkörper auf. Das führt zu einer Reduktion des nutzbaren Gesamtlichtstroms des optischen Systems. Messungen des Gradienten der Lichtverteilung haben gezeigt, dass dieser in seiner Steigung nur geringfügig abgeschwächt wird. Zu beobachten ist eine leichte Anhebung der Blendbeleuchtungsstärke um ca. 10 % durch Streulicht an den Grenzflächen des Flexprismas und eine Reduktion der maximalen Beleuchtungsstärke um ca. 25 %. Die Beleuchtungsstärke sinkt in den Randbereichen und bei einem weiten Schwenken der Lichtverteilung stärker ab, da Lichtstromverluste an den künstlich aufgerauhten senkrechten Flanken der Fresnelprismen (auch der Prismenkeile) auftreten. Eine Abhilfemaßnahme für die Lichtstromverluste ist die Minimierung der Zahl der optischen Grenzflächen des optischen Systems bzw. der Einsatz von Anti-Reflexionsbeschichteten Optikkörpern. Die Reduktion der optischen Grenzflächen kann durch die Kombination aus Projektionslinse und erstem Rotationsprisma erfolgen, wobei hierzu ein neuer Freiform-Rotations-Linsenprismen-Verbund berechnet werden muss. Die scharfe Abbildung der Feldblenden-Ebene des Projektionsmoduls durch den Linsenprismen-Verbund muss dabei in allen Rotationsstellungen sichergestellt werden.

Messungen der Leuchtdichte aus der Richtung des entgegenkommenden Fahrzeugs zeigen, dass an den Kanten des Fresnel-Prismas Leuchtdichtesprünge auftreten, die zu einer höheren Blendbeleuchtungsstärke führen. Die senkrechten Flanken des Fresnel-Prismas verursachen durch Totalreflexion Streulicht, das als „Streulichtfahne" zur Eigenblendung des Fahrers bei Nebel führen kann. Ursache dafür ist der nicht parallele Strahlengang der Lichtstärkeverteilung des Projektionsmoduls nach der Linse, der das Flexprisma durchstrahlt. Da die relative Orientierung des Fresnel-Prismas im Raum und damit auch im Strahlengang des Projektionsmoduls sich ändert, kann eine Ausrichtung der Flanken des Fresnelprismas an der Hauptabstrahlrichtung des Projektionsmoduls im jeweiligen Strahlengang-Bereich nur zu einer geringen Verbesserung der Streulichtfahne führen. Der Einsatz von Optikkörpern mit Planflächen oder nur in äußeren Bereichen gestuften Fresnel-Prismen wurde als größeres Verbesserungspotenzial identifiziert.

Weitere Effekte des Rotationsflexprismas bestehen in einer leichten Verkippung der Gesamtlichtverteilung des Projektionsmoduls um max. ca. 2° und bei großen Ablenkungen der

Lichtverteilung in vertikaler Richtung eine Wölbung der Hell-Dunkel-Grenze der Lichtverteilung. Die Wölbung der Lichtverteilung kann eingegrenzt werden, wenn der Leuchtweitebereich auf das bei Scheinwerfern übliche Maß beschränkt wird. Die Verkippung der Lichtverteilung könnte theoretisch durch eine Korrektur-Zwischenscheibe kompensiert werden [8.2, RODENKIRCHEN, 2005]. Diese hätte allerdings den Nachteil, dass diese nur für eine Rotationsstellung optimiert werden könnte und zu zusätzlichen Lichtstromverlusten an den Grenzflächen führen würde. Die Korrektur nur einer Planfläche eines Rotationsflexprismas hätte zur Folge, dass die lichttechnische Korrektur (vgl. Hebelanalogie) an den „lichttechnischen Hebel“ dieses Rotationsflexprismas in dessen relativer Orientierung fest gekoppelt ist und somit mit gleicher Winkelgeschwindigkeit dieses Rotationsflexprismas mitbewegt wird. Ursache für die Wölbung der Lichtverteilung und die leichte Verkippung der Lichtverteilung ist der räumliche Abstand zwischen der ersten wirksamen, geneigten Prismengrenzfläche und der zweiten wirksamen, geneigten Prismengrenzfläche am Ende des lichttechnischen Durchlaufs des Flexprismas. Da die Lichtstrahlen beim Auftreffen auf das Rotationsflexprisma nicht parallel sondern divergent ausgerichtet sind, hat das zur Folge, dass die Lichtstrahlen eine unterschiedliche Wegstrecke im optischen dichteren Rotationsflexprisma durchlaufen, sodass diese unterschiedlich stark abgelenkt werden, insbesondere die Randstrahlen der Lichtverteilung sind davon betroffen.

Die zu erwartende Dispersion an Prismen, bedingt durch die Wellenlängenabhängigkeit der Brechkraft von Glas und insbesondere von Kunststoffen (vgl. Abbe-Zahl), tritt auch beim Flexprisma auf. Jedoch werden die Dispersionseffekte durch die beiden Rotationsflexprismen weitestgehend kompensiert, sodass die spektrale Auftrennung an der Hell-Dunkel-Grenze sich mit anderen Bereichen der Lichtverteilung überlagert. Dadurch ist der Farbsaum des Flexprismas vergleichbar mit dem nicht korrigierter Projektionsmodule.

Bei der Bauform des Kippprismas, des Halbzylinder-, Halbkugel- und Halbtonnen-Flexprismas sind die Fresnel’schen Reflexionen zu beachten, da hier äußere (Kippprisma) oder interne optische Grenzflächen mit Ihren örtlichen Oberflächennormalen relativ zum Strahlengang teilweise relativ große Winkel einnehmen, wodurch die Fresnel’sche Reflexionen verstärkt auftreten. Teilweise kann dieser Effekt bis zur Totalreflexion erhöht werden. In Lichtleitern findet die Totalreflexion Anwendung. Wird der Strahlengang durch Abarten dieser Prismen in seiner Ausrichtung über Totalreflexion umgelenkt, so treten dort keine Lichtstromverluste auf, wenn der lichttechnische Grenzwinkel relativ zur Oberflächennormalen für alle Strahlen des Strahlenbündels überschritten bleibt.

In Tabelle 5.20 werden die lichttechnischen Kenngrößen des Rotationsflexprismas in zwei verschiedenen Prismenkonfigurationen miteinander verglichen.

Aus Tabelle 5.20 ist ersichtlich, dass die zweite Optikkörper-Kombination mit zwei Planflächen der Prismenkörper beim Rotationsflexprisma erhöhte Beleuchtungsstärkewerte ermöglicht. Das liegt an den geringeren Streulichtverlusten, da hierbei keine senkrechte Kanten mit,

fertigungstechnisch bedingten, etwas verrundeten Fresnelzahn-„Tälern“ und etwas verrundeten Fresnelzahn-„Spitzen“ in den Planflächen der Rotationsflexprismen enthalten sind.

Tabelle 5.20: Lichttechnische Leistungsfähigkeit des Rotationsflexprisma

	Rotationsflexprisma (I)	Rotationsflexprisma (II)	Veränderung (I) vs. (II)
Prismenkeile	Ein Planflächen- und ein Fresnel-Prisma	Zwei Planflächen-Rotationsprismen	
Diplomarbeiten von:	[8.7, BERHEIDE, 2004]	[8.7, KOCH, 2005]	
Lampe	D2S, 35 W	D2S, 35 W	0 %
Maximaler Lichtstrom (LB) 0°	703 lm	1.088 lm	(+54,8 %)
Maximaler Lichtstrom (LB) +15°	671 lm	1.081 lm (h+14°,v+4°)	(+61,1 %)
E_{max} der Lichtverteilung (LB) 0°	58,6 lx	73,7 lx	+25,7 %
E_{max} der Lichtverteilung (LB)+15°	51,7 lx	66,7 lx (h+14°,v+4°)	+29 %
Schärfe der HDG	in etwa identisch mit Projektionsmodul	identisch mit Projektionsmodul (gemessen nach AK 31 [8.3, POLLACK, 1998])	0 %
Streulicht	etwas erhöht durch Fresnel-Zahnscheibe	gering erhöht durch Prismenkörper	-10 %
Wirkungsgrad-Gesamtsystem	68%(+15°) bis 78% (0°)	70%(+14°) bis 75%(0°)	+/- 0 %
Bauraum ca. (h x b x t)	155 x 130 x 200 mm³		0 %

Die starken Lichtstromzuwächse sind in Realität deutlich geringer, da der Messbereich der Lichtverteilung im zweiten Fall auf +/-50° horizontal erweitert wurde. Daher sind diese eingeklammert. Vorteilhaft ist der Zuwachs in den maximalen Beleuchtungsstärken, je nach Schwenkwinkel um bis zu 29%. Die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze bleibt unverändert. Diese wurde bei [8.7, KOCH, 2005] nach dem AK31-Verfahren [8.3, POLLACK, 1998] nachgemessen. Das Streulicht konnte weiter um ca. 10% reduziert werden. Dennoch ist dieses um ca. 10% gegenüber einem Projektionsmodul erhöht. Eine leichte LSV-Rotation und eine Wölbung der Lichtverteilung bei sehr großen vertikalen Ablenkungswinkeln ist zu beobachten. Für die Zukunft ist eine weitere Erhöhung der Aktivwerte (E_{max}, 75R, 50R, 50V, u.a.) und eine Erhöhung des Wirkungsgrades anzustreben. Das kann über eine Entspiegelung der Prismen z.B. erfolgen. Diese Entspiegelung wäre auch für eine Reduktion der Streulichtverluste vorteilhaft.

Zusammengefasst ist das Flexprisma ein attraktives optisches System, das keinen zusätzlichen Schwenkraum benötigt, ein völlig neues Design ermöglicht und mit unterschiedlichen Scheinwerfersystemen (z.B. Projektion, Reflexion) kombiniert werden kann.

5.7 Funktionsanalyse der Hauptkonzepte

Die in Kapitel 5.1 bis 5.6 vorgestellten aktive Scheinwerfer Konzepte, d.h. des LCoS-Scheinwerfers, des DMD-Scheinwerfers, des AMD-Scheinwerfers, des Scannenden Scheinwerfers und des Flexprismas unterscheiden sich in der Art und Weise ihrer Beeinflussung der Lichtverteilung.

Die Projektoren bilden ein variables, räumlich aufgelöstes „Lichtventil“, das in Transmission oder Reflexion arbeitet und über eine Abbildungsoptik auf eine Straße bzw. eine Leinwand abgebildet wird. Mit einer Einkopplungsoptik wird dieses Lichtventil möglichst nahe der gewünschten Gesamtlichtverteilung beleuchtet, damit die Lichtstromverluste an dem Lichtventil minimiert werden können. Über eine Mitteloptik werden die Strahlengänge des Einkoppelstrahlenganges und des Auskoppelstrahlenganges aufeinander angepasst, d.h. das Etendué und dessen Steigerung von der Lichtquelle über das Lichtventil und die Abbildungsoptik auf die Straße wird minimiert, damit die Größe der optischen Elemente und damit die Kosten des optischen Systems minimiert werden können. Zusammenfassend lassen sich die Projektoren den subtraktiven „Lichtverteilungs-Formern“ zuordnen, da das DMD-Array, das LCD-Array und das LCoS-Array jeweils den Gesamtlichtstrom je nach gewünschter Lichtverteilung begrenzen. Begrenzende Faktoren für die subtraktiv erzeugten Lichtverteilungen sind der maximale Einkopplungslichtstrom und der Wirkungsgrad des „Lichtventils“ sowie der abbildenden Optik des Auskopplungsstrahlenganges. Die Leuchtdichte auf dem Lichtventil muss dabei lokal maximal sein, wodurch die thermischen Anforderungen an das Lichtventil hoch sind. Mit einer lokal konzentrierten Leuchtdichte kann eine hohe Lichtstärke des Projektors durch eine kompakte Abbildungsoptik erzielt werden. Voraussetzung für eine hohe Leuchtdichte auf dem Lichtventil ist eine hohe Leuchtdichte der Lichtquelle, die über einen möglichst günstigen, d.h. kleinen Abbildungsmaßstab auf das Lichtventil abgebildet wird. Hierzu ist eine geringe räumliche Entfernung zwischen Lichtquelle und Lichtventil wünschenswert, vgl. [8.2, TESCHKE, 2005]. Die Einkopplungsoptik muss auch hier das Etendué des Strahlenbündels möglichst klein „konservieren“, damit die jeweiligen Abmessungen und Kosten der optischen Elemente minimiert werden können.

Das AMD-Array nimmt dabei eine Sonderstellung ein, da es auf der einen Seite räumlich aufgelöst ist, auf der anderen Seite sowohl für die subtraktive Lichtverteilungs-Formung, als auch für die statische Lichtverteilungs-Umformung eingesetzt werden kann. Dabei lassen sich bei ihm Bautypen in Reflexions- und in Projektionstechnik unterscheiden, Abbildung 5.18. Bei der Reflexions-AMD-Anordnung wird der Lichtstrom direkt auf die Straße gelenkt. Bei der Projektions-AMD-Anordnung wird der Lichtstrom mittelbar über eine Abbildungs- bzw. Auskoppellinse auf die Straße abgebildet. Diese Abbildungslinse kann eine sphärische, eine asphärische oder eine Freiformlinse bzw. ein Freiformprisma sein.

Die Scannenden Scheinwerfer lassen sich ebenfalls den „Lichtverteilungs-Umformern“ zuordnen, da diese den Lichtstrom in Teilen oder den Gesamtlichtstrom über mindestens

einen variablen, d.h. kipp- bzw. schwenkbaren Spiegel in hoher Frequenz ablenken. Die hochfrequente Lichtstromumverteilung ist der Unterschied zur statischen bzw. quasi-statischen Lichtstrom-Umverteilung der AMD-Scheinwerfer. In dieser Arbeit wird der Lichtstrom des Scannenden Scheinwerfers aufgeteilt. Einer statischen Grundlichtverteilung wird ein variables, scannendes Lichtstrombündel überlagert, das über zwei einachsig kippbare Scannerspiegel abgelenkt wird. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Anforderungen an die Scannerspiegel und deren Dynamik sowie Positionserfassung gesenkt werden können. Dennoch sind die Anforderungen an die Leuchtdichte der Lichtquelle und deren Abbildung bzw. Bündelung in einem kollimierten, möglichst parallelen Strahlenbündel sehr hoch. Das Etendué ist auch hier der begrenzende Faktor für die Kollimierung des Strahlenbündels. Die räumliche Ausdehnung der Lichtquelle, deren Leuchtdichte und die dynamischen Grenzen der Scannerspiegel und damit die Begrenzung des maximalen Strahldurchmessers des Scanstrahlbündels sind die limitierenden Faktoren des scannenden Lichtstrom-Umverteilungsprinzips.

Die variablen Spiegel (Membranspiegel bzw. Adaptive Optiken [8.2, MOSIS, 2001]; [8.2, FRAUNHOFER IPMS, 2004]) sind bei den „Lichtverteilungs-Umformern“, der Vollständigkeit wegen ebenfalls erwähnt. Diese sind jedoch technologischen Schwierigkeiten unterworfen, da der Membranspiegel starke Variationen in der Krümmung aufweisen müsste, und dessen verspiegelte (bedampfte) Oberfläche zusätzlich elastisch ausgeführt sein sollte. Stetigkeitssprünge sind im Membranspiegel ebenfalls nur schwer bzw. nicht zu realisieren. Die Verformung des Membranspiegels muss möglichst definiert und vibrationsrobust erfolgen, wobei auf eine Positionserfassung bei den Verformungsaktoren möglichst verzichtet werden sollte, um die Kosten für das Gesamtsystem zu minimieren. Bisherige adaptive Optiken haben Verformungsbereiche bis zu ca. 10µm-Bereich.

Das Flexprisma mit dessen verschiedenen Bauformen ist ebenfalls den Lichtumformern zuzuordnen, allerdings ist dessen Dynamik minimal, da die Lichtstromablenkung quasi-statisch bzw. mit relativ geringer Dynamik im Falle des dynamischen Kurvenlichts abgelenkt werden soll. Ein weiterer Unterschied zum scannenden Scheinwerfer und dem Membranspiegel besteht darin, dass hier die Gesamtlichtverteilung über das Flexprisma abgelenkt wird. Anordnungen mit mehreren Flexprismen, insbesondere in Kombination mit LEDs bzw. LED-Arrays sind ebenfalls vorteilhaft. Der Hauptunterschied zum scannenden Scheinwerfer und zum Membranspiegel besteht in der transmittiven, variablen Lichtstromlenkung. Diese wird durch einen variablen Prismenwinkel erzielt, der ein- oder zweiachsig variiert werden kann. Begrenzender Faktor beim Flexprisma sind die Lichtstromverluste an den optischen Grenzflächen des variablen Flexprisma-Systems.

Bei der Funktionsstruktur der vier Hauptkonzepte, LCoS-, DMD-, AMD- und Scannender Scheinwerfer, und dem Nebenkonzept, Flexprisma, lassen sich folgende Gemeinsamkeiten und Unterschiede zusammenfassen, siehe Abbildungen 5.1; 5.15; 5.23; 5.29: Nach der Lichterzeugung wird außer beim Flexprisma eine Lichtstrom formende Einkopplungoptik angegliedert, die den Lichtstrom sammelt und bündelt. In der Mitteloptik unterscheiden sich die vier Hauptkonzepte, in dem die subtraktiven Lichtverteilungs-Formungs-Systeme, das

LCoS- , das DMD- und in Teilen das AMD-Array als räumliche „Lichtventile“ sich anschließen. Die Auskoppeloptik ist beim LCoS-, beim DMD- und zum Teil beim AMD-Scheinwerfer durch eine das räumliche „Lichtventil“ abbildende Optik gekennzeichnet. Im Unterschied dazu haben der scannende Scheinwerfer und das Flexprisma die Gemeinsamkeit von zwei lichtstromumformenden Teilmodulen, die jeweils in einer räumlichen Achse den Lichtstrom umverteilen. Der Unterschied zwischen dem Scannenden Scheinwerfer und dem Flexprisma besteht darin, dass der Scannende Scheinwerfer einen hochdynamischen Lichtstrom-Umformer besitzt und nur Teile der Lichtverteilung dynamisch beeinflusst, während das Flexprisma statisch, quasi-statisch bzw. in geringer Dynamik die Gesamtlichtverteilung in horizontaler und zum Teil auch vertikaler Richtung ablenkt. Beide Systeme sind sehr energieeffizient, da sie immer denselben Energiestrom auf die Straße lenken. Eine Besonderheit des Scannenden Scheinwerfers besteht in der separat vorbeigeführten Grundlichtverteilung, Abbildung 5.28, welche den Gesamtwirkungsgrad erhöht und die Dynamik-Anforderungen reduziert. Die weiteren Hauptkonzepte, LCoS-, DMD- und AMD-Scheinwerfer können ebenfalls mit einer Grundlichtverteilung ausgestattet werden, wie in Abbildung 5.9 dargestellt, wodurch der Gesamtwirkungsgrad der ersten beiden subtraktiven Lichtverteilungs-Former erhöht wird, da kein Element mit einem begrenzten Flächennutzungsgrad im Strahlengang des optischen Systems zwischengeschaltet wird. Der gleiche Vorteil kommt auch beim AMD-Scheinwerfer zur Anwendung, da auch hier Lücken zwischen den einzelnen AMD-Spiegeln den Flächennutzungsgrad des AMD-Arrays reduzieren. Vorteilhaft ist beim AMD-Array dessen Lichtstrom-Umverteilung, welche die Gesamtenergiebilanz unabhängig von der Art der erzeugten Lichtverteilung auf der Straße gestaltet (z.B. kein Unterschied wie bei Projektionsmodulen mit Blendengruppen zwischen Fernlicht (hoher Wirkungsgrad) und Abblendlicht (geringerer Wirkungsgrad)).

Die Eigenschaften der vier Hauptkonzepte, LCoS-Scheinwerfer, DMD-Scheinwerfer, AMD-Scheinwerfer, Scannender Scheinwerfer (Membranspiegel) und dem Nebenkonzept Flexprisma sind in der Tabelle 5.21, ergänzt durch deren Abarten, verwandte Anwendungen, Lichtformer, Grundlichtverteilung, Prinzipien, Lichtquelle, Prototypenstatus, Gesamturteil sowie Vor- und Nachteile, zusammengefasst.

Tabelle 5.21: Übersicht der Haupt- und Nebenkonzepte aktiver Scheinwerfer, deren Eigenschaften, Vor- und Nachteile

Art:	1.Hauptkonzept	2. Hauptkonzept	3. Hauptkonzept	4. Hauptkonzept	Nebenkonzept
Bezeichnung / Kapitel	LCoS-Scheinwerfer Kapitel 5.2	DMD-Scheinwerfer Kapitel 5.3	AMD-Scheinwerfer Kapitel 5.4	Scannender Scheinwerfer Kapitel 5.5	Flexprisma Kapitel 5.6
Abarten	LCD-Scheinwerfer, elektrochrome Schichten, Einsatz in Scheinwerfern und in Leuchten,			Membranspiegel, Totalreflexionsspiegel, Scannender Scheinwerfer mit / ohne Grundlicht-verteilung, einachsig, zweiachsig scannend, Polygonspiegelzylinder (einfach, mehrfach)	Rotationsflexprisma, Halbzylinderflexprisma, Halbkugelflexprisma, Halbtonnenflexprisma, Kippflexprisma
verwandte Anwen-dungen der Technologie	Head-up-Displays, Video-Projektoren, TV-Rückprojektoren	Head-up-Displays, Video-Projektoren, TV-Rückprojektoren	Adaptive Optics, Weltraum-teleskope, Laser-Materialbearbeitung und optische Satelitten- und optisch terrestische Nahbereichs-Nachrichten-übertragung, optische Lichtleiter-Relais-Stationen	Barcode-Scanner, Laserdrucker, Fotopapier-belichtung, Laser-TV, Planetarien-Beleuchtung u.a.	Justageprismen in optischen Triangulations-Entfernungsmessern
Lichtformen-des Prinzip	subtraktiv, reflektiv (LCoS) transmittiv(LCD)	subtraktiv, reflektiv	umformend, reflektiv, (subtraktiv)	umformend, reflektiv	umformend, transmittiv
Grundlicht-verteilung	optional (vgl. teils parallel)	optional (vgl. teils parallel)	optional (vgl. teils parallel)	meist vorhanden (Dyna-mik-Anforderungs-Reduktion)	optional (meist nicht parallel)

Bezeichnung / Kapitel	LCoS-Scheinwerfer Kapitel 5.2	DMD-Scheinwerfer Kapitel 5.3	AMD-Scheinwerfer Kapitel 5.4	Scannender Scheinwerfer Kapitel 5.5	Flexprisma Kapitel 5.6
Prinzipien	Projektions-LCoS-Prinzip	Projektions-DMD-Prinzip (Reflexions-DMD-Prinzip (wenig sinnvoll)	Reflexions-AMD-Prinzip, Projektions-AMD-Prinzip	Reflexions-Scanner (Projektions-Scanner wenig sinnvoll)	Transmissions-Flexprisma (Totalre-flexions-Flexprisma)
Lichtquelle	UHP-Lampe (D2S kurz, LED-Arrays)	UHP-Lampe (D2S kurz, LED-Arrays)	UHP-Lampe (D2S kurz, D2S, LED-Arrays)	D2S-Lampe (D2S kurz)	D2S-Lampe, LED, LED-Arrays
Prototypen-status (März 2005)	Tischmuster	2 fahrbare Demon-stratoren, einer davon in Scheinwer-fergehäuse integriert	Prinzip-Demonstrator als Tischmuster	1 fahrbarer Demonstrator, 1 optimierter, statischer Demonstrator [8.2, HOSTEIN, 2004]	1 Tischmuster mit Ansteuerung (Rotati-onsflexprisma)
Gesamturteil	Mittel mit Potenzial	Gut	Mittel mit Potenzial	Mittel	Sehr gut
Vorteile					
Flexibilität	hoch	hoch	mittel	gering	gering
Dynamik	hoch	sehr hoch	Noch gering	hoch	gering
Kontrast	mittel	hoch	Noch gering	mittel	mittel
Lichtfkt.	Aktive LSV	Aktive LSV	Aktive LSV	LB, HB, ML, AWL, MKL	dyn. BL, LWR+
Prinzip	subtraktiv	subtraktiv	umformend	umformend	umformend
Nachteile					
Kosten	hoch	hoch	sehr hoch	mittel	gering
WKG	sehr gering	gering	noch sehr gering	mittel	mittel
Szenarien	Forschungsstand	Zusatzscheinwerfer	Forschungsstand	Zusatzscheinwerfer	Zusatzscheinwerfer

5.8 Grob-Risikoanalyse der Hauptkonzepte

Als Risiken für die aktiven Scheinwerfer können die folgenden Punkte erwähnt werden:

Bei den aktiven Scheinwerfer-Prototypen, d.h. DMD- und LCoS-Scheinwerfer, sind UHP-Lampen eingesetzt worden, die für den automobilen Einsatz nicht freigegeben sind. Das liegt u.a. an ihrem relativ langsamen Zündverhalten und dem bisher fehlenden Bedarf an solchen Hochleistungslichtquellen im Kfz-Einsatz. Das Verhalten des Lichtbogens unter Vibration ist dabei noch genauer zu untersuchen, da durch die Abbildungsmaßstäbe ein Springen des Lichtbogens an den Elektroden einen größeren Versatz der Ausleuchtung im optischen System bewirkt.

Da die bisherigen Musteraufbauten noch nicht wirkungsgradoptimiert sind und teilweise die Scheinwerfersysteme prinzipbedingt einen niedrigeren Wirkungsgrad als z.B. Projektionsscheinwerfer haben, siehe hierzu auch Kapitel 6.5.1, ist die Leistungsaufnahme der aktiven Scheinwerfer höher als bei konventionellen Scheinwerfersystemen. Ursache dafür ist die hohe Flexibilität in der Gestaltung der Lichtverteilung. Selbst bei aktiven Scheinwerferprinzipien, die den Lichtstrom umverteilen, wie der AMD-Scheinwerfer, verursachen die räumlichen Abstände zwischen den Einzelspiegeln Lichtstromverluste und erfordern daher einen zusätzlichen Leistungsbedarf. Der Scannende Scheinwerfer hat einen erhöhten Energieverbrauch gegenüber einem konventionellen Scheinwerfersystem durch seine Scannerspiegelansteuerung. Beim Flexprisma treten Energieverluste durch die Lichtstromverluste an den optischen Grenzflächen auf.

Da teilweise die „Lichtventile“, wie DMD-Array, LCoS-Array und AMD-Array, zum Teil auch der Scannende Scheinwerfer thermisch limitierte Bauteile enthalten, sind geeignete Kühlmaßnahmen und Luftströme in diesen aktiven Scheinwerfern vorzusehen.

Die Verfügbarkeit der DMD-Arrays, LCoS-Arrays, AMD-Arrays, Polarisatoren und Strahlteilern muss ebenfalls geklärt werden, da die Scheinwerfer-(Umgebungs-)Anforderungen höhere sind als die in der Unterhaltungselektronik-Branche. Die Produkthaftung bei Versagen der „Lichtventile“ oder der UHP-Lampe muss geklärt werden, wobei durch die Redundanz der beiden Scheinwerfer, links und rechts, immer noch ein funktionierendes Scheinwerfersystem erhalten bleiben sollte, um ein sicheres Führen des Fahrzeugs zur nächsten Werkstatt zu ermöglichen.

Neben den technologischen Risiken, wie Lichtquelle, Wirkungsgrad, Energieverbrauch und Thermik bestehen noch betriebswirtschaftliche und makroökonomische Risiken, der Marktakzeptanz und des erhöhten Gesamtsystempreises des bisherigen aktiven Scheinwerfersystems. Die Akzeptanz wird jedoch erhöht, wenn das aktive Scheinwerfersystem mit zahlreichen Sensoren des Fahrzeugs zur Detektion des Fahrzeugvorfeldes gekoppelt wird, da dann die Vorteile der aktiven Lichtfunktionen, wie Markierendes Licht und kollektive Verkehrsraumausleuchtung bzw. blendfreie Ausleuchtung des Verkehrsraums [8.2, ROSLAK, 2005]

besonders gut eingesetzt werden können. Eine Kopplung mit dem Navigationssystem für die Displaylichtfunktion wäre möglich, vorausgesetzt die Gesetzgebung lässt diese Lichtfunktion zu.

Wie bereits erwähnt, muss die Gesetzgebung für aktive Scheinwerferlichtfunktionen wenigstens teilweise angepasst werden. Das Fahrerspezifische Licht könnte innerhalb der bisherigen Gesetzgebung eingesetzt werden, wenn die Minimal- und Maximalwerte der Lichtverteilung nicht unter- bzw. überschritten werden. Dennoch sollte der lichttechnisch unerfahrene Nutzer vor einer unbewussten Selbstgefährdung durch ungünstige Scheinwerferlichtverteilungen bewahrt werden, indem für ihn nur physiologisch sinnvolle bzw. noch akzeptable Ausprägungen der Lichtverteilung auswählbar sind.

Die Marktakzeptanz, die Wettbewerbstechnologie LED und die möglichen Einführungsszenarien und deren Risiken werden in Kapitel 7 zusammenfassend und im Ausblick erläutert.

5.9 Bewertung der Hauptkonzepte

Die vier Hauptkonzepte, LCoS-Scheinwerfer, DMD-Scheinwerfer, AMD-Scheinwerfer und Scannender Scheinwerfer, sollen hier miteinander verglichen und bewertet werden. Das Nebenkonzept Flexprisma muss von diesem Vergleich separiert werden, da es deutlich weniger Freiheitsgrade hat die Lichtverteilung zu beeinflussen und da von ihm die gesamte Lichtverteilung nur horizontal oder sowohl horizontal als auch vertikal als Ganzes abgelenkt werden kann.

Neben der Bewertung der Hauptkonzepte in diesem Kapitel wird in Kapitel 6.5 eine lichttechnische Bewertung vorgenommen. In Kapitel 6.9 findet eine abschließende Gesamtbewertung der aktiven Scheinwerferkonzepte statt und in Kapitel 6.10 wird deren Mehrwert kritisch den zukünftigen, in 2006 in den Markt eingeführten AFS-Scheinwerfern gegenübergestellt.

In Tabelle 5.22 sind die wichtigsten Merkmale der Hauptkonzepte zusammengefasst. Wie aus der Tabelle abzulesen ist, haben die Hauptkonzepte in manchen Merkmalen Gemeinsamkeiten. Dennoch wird durch die Merkmalskombination die Besonderheit des jeweiligen Hauptkonzepts hervorgehoben. Ausgehend von diesen Merkmalen lässt sich durch Abstraktion von den konkret realisierten aktiven Scheinwerfer-Varianten ein idealer Scheinwerfer theoretisch definieren, der die Vorteile aller untersuchten aktiven Scheinwerfer-Prototypen vereint. Dieser soll als Vergleichsbasis für die als Prototypen aufgebauten aktiven Scheinwerfer dienen. Der ideale aktive Scheinwerfer kann als theoretische Vergleichsbasis herangezogen werden, wobei dieser ideale aktive Scheinwerfer das technologische Optimum darstellt. Bisher konnte dieser Scheinwerfer noch nicht aufgebaut werden, da technologische Hürden hierzu erst überwunden werden müssen. Diese bestehen in einem Aufbau eines analogen Mikrospiegelarrays, das große Schwenkwinkel besitzt. Gleichzeitig aber sind diese Spiegel räumlich auf einer (Asphäre) Sphäre angeordnet, damit ein möglichst hoher Lichtstrom der Lichtquelle und ein großer Raumwinkel des auftreffenden Strahlenbündels aufgefangen wird.

Die Ansteuerung der Spiegel kann dabei sowohl statisch in beliebigen Winkelstellungen, als auch oszillierend erfolgen. Die Positionserfassung der analogen Mikrospiegel sollte über eine geschlossene Steuerkette erfolgen, damit die Spiegelposition auch unter Vibration und bei Beschleunigungen sichergestellt werden kann. Die Positioniergenauigkeit der Mikrospiegel muss mit einer Genauigkeit von mindestens +/-0,025° erfolgen, damit das resultierende Lichtbündel eine optische, vertikale Winkelgenauigkeit von +/-0,05° aufweist. Die horizontale Winkelpositioniergenauigkeit kann deutlich größer gewählt werden, da dort die Anforderungen an den Lichtstärke-Gradienten innerhalb der Lichtverteilung, nahe der Hell-Dunkel-Grenze deutlich geringer sind. Damit eine gesetzliche Zulassungsfähigkeit des idealen aktiven Scheinwerfers nach heutigen gesetzlichen Regelungen möglich ist, sollte als Lichtquelle eine D2S-Lampe eingesetzt werden. Alternativ kann ein ebenes LED-Array, ein sphärisches LED-Array oder wenigstens eine Hochleistungs-LED eingesetzt werden. Ideal wäre eine Lichtquelle mit hoher Leuchtdichte und einem scharf begrenzten Wendelbild. Die Gesamtkosten des idealen, sphärischen AMD-Mikrospiegelarrays und des dazu notwendigen Scheinwerfer-Systemumfeldes sollen gering sein, damit dieses Scheinwerferprinzip eine möglichst breite Anwendung in der Scheinwerferserie findet. Wie aus Tabelle 5.22 abzulesen ist, basieren die LCoS- und die DMD-Scheinwerferprinzipien auf einer subtraktiven Lichtverteilungserzeugung. Eine Lichtstrom-Umverteilung, wie diese bei dem AMD-, dem Scannenden und beim idealen aktiven Scheinwerfer erfolgt, ist aus energetischen Gesichtspunkten von Vorteil, da stets ein gleich hoher Lichtstrom für unterschiedliche Lichtverteilungen Verwendung findet. Die analogen (analog diskreten) Stellgrößen sind den digitalen (0 oder 1) vorzuziehen, wenn diese mindestens eine Auflösung von z.B. 256 Stufen bzw. Winkelstellungen besitzen. Die Variabilität ist bei einer analogen Winkelstellung mit großen Schwenkspiegelwinkeln am Größten, da dann eine Polarisierung des Lichtstroms bzw. ein Absorber als Lichtstrom„falle“ nicht mehr notwendig sind. Die Auflösung ist bei einem Spiegelarray am Höchsten. Eine z.B. sphärische Anordnung der analogen Mikrospiegel wirkt sich positiv auf den maximal umlenkbaren Lichtstrom aus. Die Freiheitsgrade werden als Produkt aus Auflösung (Zahl der Mikrospiegel), Zahl der Schwenkachsen, deren wechselweise Beeinflussung durch deren räumliche Anordnung und deren Ansteuerung gebildet. Eine statische und alternativ eine oszillierende Ansteuerung bei, für das menschliche Auge nicht mehr auflösbarer Scanfrequenz, stellt den Idealzustand der Ansteuerung dar. Dieser wird beim scannenden Scheinwerfer erzielt. Die Positionserfassung ist beim scannenden Scheinwerfer und seinen windschiefen Schwenkachsen mit einachsigen Freiheitsgraden bereits gut gelöst. Die Weiterentwicklung besteht nun darin, zweiachsige Freiheitsgrade mit analogen Schwenkwinkel, vgl. AMD-Array, mit einer zweiachsigen Winkelpositionserfassung zu kombinieren. Evtl. ist auch nur eine einachsige Winkelpositionserfassung in vertikaler Richtung ausreichend, da dort die Winkeltoleranzen am Geringsten sind. Die D2S-Lampe mit einem verkürzten Lichtbogen wird bereits beim scannenden Scheinwerfer eingesetzt. Aus Kostengesichtspunkten und aus technologischer Reife ist das DMD-Scheinwerferkonzept zu bevorzugen. Es ist zwar energetisch weniger vorteilhaft, da es auf einem subtraktiven LSV-Erzeugungsprinzip basiert, allerdings hat es auch eine der höchsten Auflösungen, eine ausgereifte Winkelpositionsansteuerkette und es benötigt keine Winkelpositionserfassung, da es nur digitale, bistabile

Winkelstellungen aufweist. Dadurch kann in diesem Fall eine offene Steuerkette, wie beim LCoS-Scheinwerfer, eingesetzt werden. Die Verlustleistung lässt sich beim DMD-Scheinwerfer leicht vom Absorber ableiten. Der geringere Flächennutzungsgrad des DMD-Chips im Vergleich zum LCoS-Chip ist geometrisch bedingt und kann kaum weiter optimiert werden.

Tabelle 5.22: Vergleich der Hauptkonzepte des aktiven Scheinwerfers

Kategorien	LCoS, Kapitel 5.2	DMD, Kapitel 5.3	AMD, Kapitel 5.4	Scanner, Kapitel 5.5	Idealer aktiver Scheinwerfer
LSV-Erzeugung	subtraktiv	subtraktiv	Umverteilung	Umverteilung	Umverteilung
Stellgrößen	analog	digital	analog	analog	analog
Art der Variabilität	Spannung, Polarisationsrichtung	bistabile Winkellage	bisher noch kleine Winkel	mittlere Schw.-Winkel	große Schwenkwinkel
mechanischer Aufbau	Drehen von Flüssigkristallen	Schwenken von Spiegeln	Schwenken von Spiegeln	Schwenken von Spiegeln	Schwenken von Spiegeln
Auflösung / Anordnung	LCoS-Array / Matrix, eben angeordnet	Spiegelarray / Matrix, eben angeordnet	Spiegelarray / Matrix, eben angeordnet	ein / zwei / wenige Spiegel, windschief orientiert	Spiegelarray / Matrix, sphärenförmig angeordnet
Freiheitsgrad(e)	Graustufen, räumliche Anordnung	Spiegelstellung, räumliche Anordnung	Spiegelstellung, räumliche Anordnung	Scanwinkel pro Spiegel	statische Spiegelstellungen, räumliche Anordnung bzw. Scangeschwindigkeit
Ansteuerung	statisch, Pulsweiten-Modulation	statisch, Pulsweitenmodulation	statisch / oszillierend	statisch / oszillierend	statisch / oszillierend
Positionserfassung der variablen Elemente	keine, Drehstellung der Flüssigkristalle über angelegte Spannung	keine, nur 2 digitale Schaltstellungen	keine, elektrothermische, offene Steuerkette	kapazitiver Sensor mit geschlossener Steuerkette	geschlossene Steuerkette mit Sensorpositionserfassung
Lampe	UHP	UHP	vgl. Tab 5.21	D2S(kurz)	D2S
Kosten	hoch	mittel	sehr hoch	hoch	gering
Prototypenstadium	Tischfunktionsmuster	fahrbarer Prototyp	Tischprinzipmuster	fahrbarer Prototyp	theoretischer Idealzustand

Der hohe Kontrast des DMD-Scheinwerferprinzips ist ein weiteres wichtiges Kriterium für den DMD-Scheinwerfer.

Zusammenfassend ist eine erste Bewertung der Hauptkonzepte bereits in der Diplomarbeit [8.7; MÜLLER, 2004] durchgeführt worden. Dabei fand eine Bewertung nach lichttechnischen, technologischen, physiologischen, wirtschaftlichen und gesetzlichen Kriterien statt. Exemplarisch und zusammenfassend werden hier die wichtigsten Ergebnisse dargestellt.

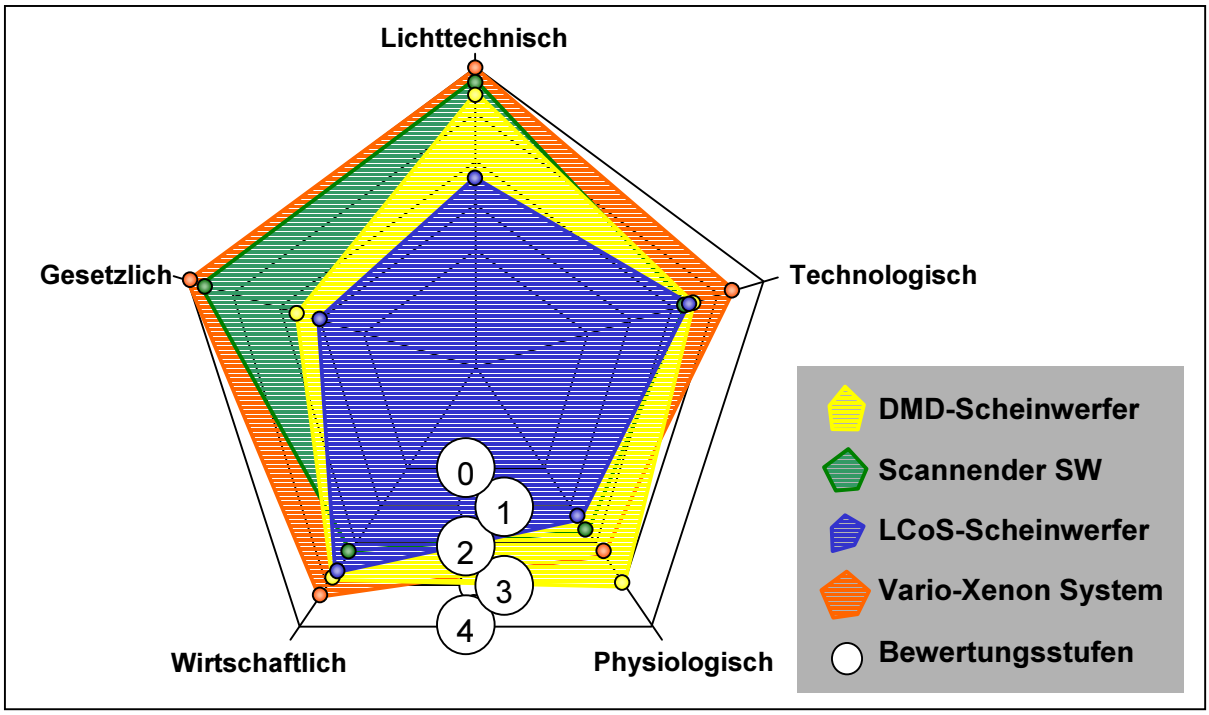


Abbildung 5.36: Zusammenfassende Bewertung des DMD-, des Scannenden und des LCoS-Scheinwerfers nach lichttechnischen, technologischen, physiologischen, wirtschaftlichen und gesetzlichen Kriterien in Form eines Radialdiagramms [8.7, MÜLLER, 2004]

Die Detailbewertung der drei Hauptkonzepte kann im Anhang 9.1 nachgelesen werden. Das vierte Hauptkonzept, der AMD-Scheinwerfer, wurde in dieser Bewertung nicht berücksichtigt, da dieses Scheinwerferkonzept bisher nur als ein Technologie-Demonstrator realisiert wurde. Für Abbildung 5.36 dient als Vergleichsbasis ein Vario-Xenon-System. Dieses kann als Maßstab für die aktiven Scheinwerfersysteme angesehen werden. Nur durch den DMD-Scheinwerfer wird dieses System physiologisch übertroffen, da der DMD-Scheinwerfer deutlich mehr Freiheitsgrade in der Gestaltung der Lichtverteilung besitzt. In gesetzlicher Sicht zeigt der scannende Scheinwerfer seine Vorteile, da bei ihm eine D2S(kurz) Lampe eingesetzt werden kann. Die DMD- und LCoS-Scheinwerfer sind wirtschaftlich gut bewertet, da sie im Prototypenstadium auf relativ kostengünstigen Großserien-Videoprojektoren basieren. Außer bei der gesetzlichen Zulassungsfähigkeit (Ursache Einsatz einer UHP-Lampe) ist der DMD-Scheinwerfer überdurchschnittlich gut bei den 5 Kriterien bewertet. Der scannende Scheinwerfer folgt fast ebenbürtig mit leichten physiologischen und wirtschaftlichen Schwächen. Der LCoS-Scheinwerfer ist in seinem Entwicklungsstadium geringer bewertet.

6 Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Prototypen

6.1 Einbindung des Scheinwerfers in das Kfz-Umfeld

Nachdem die Hauptkonzepte für aktive Scheinwerfer in ihrer Funktionsweise beschrieben und einer ersten Bewertung unterzogen wurden, soll nun dargestellt werden, welches Scheinwerferumfeld für deren Ansteuerung erforderlich ist.

6.1.1 Lichtfunktionen und deren Sensorik

6.1.1.1 Fahrerspezifisches Licht

Bei dieser Gruppe der Lichtverteilungen soll auf die Wünsche und Bedürfnisse des Fahrers eingegangen werden. Dieser soll im Rahmen seiner Sehgewohnheiten und seines Fahrkomfortempfindens entscheiden können, welche Ausprägungen oder Merkmale einer Lichtverteilung für ihn besonders förderlich sind.

Die gewählten Einstellungen innerhalb der Lichtverteilung könnten in Zukunft ebenfalls wie die Sitz-, Spiegel- und Fahrkomfortmerkmale, wie Radio-, Klima-, Fahrwerks-Einstellungen des Fahrzeugs, fahrerindividuell auf einem elektronischen Speicherplatz abgelegt sein. Sobald der Fahrer sich dem Fahrzeug nähert, werden die Merkmale der Lichtverteilung ebenfalls aktiviert, wie z.B. die Einstellungen der Fahrerbedien-Ergonomie-Schnittstellen. Könnten diese gewünschten Lichtverteilungseinstellungen portabel gestaltet werden, so hätte der Fahrer die Möglichkeit, bei vergleichbar ausgestatteten Fahrzeugen seine Lichtverteilung wieder vorzufinden.

6.1.1.2 Straßensituationsabhängiges Licht

Seit 2003 sind die ersten Lichtverteilungen in Richtung von adaptiven Lichtverteilungen zugelassen:

Das dynamische Kurvenlicht wird in Abhängigkeit von dem Lenkwinkel, der Geschwindigkeit und der Gierrate analog um bis zu +/-15° horizontal geschwenkt, wobei es dem Kurvenverlauf nachgeführt wird.

Das statische Kurvenlicht ist für Kreuzungen, Abbiegungen und Kurven mit einem kleinen Kurvenradius vorgesehen. Es wird meist als Zusatzreflektor im Scheinwerfergehäuse integriert und wird bei Blinkerbetätigung oder großen Lenkwinkeln aktiviert.

Die AFS-Lichtfunktionalitäten, die ab 2006 zulässig sein werden, stellen einen weiteren Schritt in Richtung situationsabhängige Lichtverteilung dar. Als Anforderungen an die Sensorik sind bei den AFS-Lichtverteilungen neben der Überwachung der Geschwindigkeit, der Größe und Häufigkeit der Lenkbewegungen auch die Auswertung der Umfeld- und Vorfeldhelligkeit des Fahrzeugs sowie die Auswertung der GPS-Daten wünschenswert und sinnvoll. Da die Datenpunkte der GPS-Karten nicht so eng abgespeichert sind, dass sie jeden Fahrbahnverlauf erfassen würden, sind prädiktive Algorithmen [8.2, SEUBERT, 2002]

erforderlich, die über den zukünftigen Fahrbahnverlauf Voraussagen machen können, welche mit gewissen Wahrscheinlichkeiten behaftet sind. Diese prädiktiven Algorithmen sollten durch weitere fahrzeugeigene Sensorik unterstützt werden, die z.B. mit einem videobasierten Kamerasystem den Fahrbahnverlauf bis ca. 30 m [8.2, SEUBERT, 2002] vor dem Fahrzeug erfassen können. Die Erfassung des Fahrbahnverlaufs wird bei „kooperativen" Straßen durch Fahrbahnmarkierungen unterstützt. Nicht „kooperative" Straßen sind dagegen in ihrem Verlauf schwieriger zu erfassen. Die fahrzeugeigene Sensorik sollte für das Schlechtwetterlicht auch Aussagen über die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche, die Witterungsbedingungen, z.B. über das Scheibenwischer-Wischintervall, treffen können. Die Einschaltkriterien der AFS-Lichtverteilungen sind der aktuellen Gesetzgebung zu entnehmen.

6.1.1.3 Berg- und Talfahrlicht, LWR+

Das Berg- und Talfahrlicht ist eine Lichtverteilung, die der Topologie des Fahrbahnverlaufs angepasst ist. Dabei wird versucht die Lichtverteilung und deren Reichweite je nach Krümmungsradius der Kuppe oder der Wanne zu maximieren, indem die Scheinwerfer in einem über den bisherigen Schwenkbereich der Scheinwerfer-Leuchtweitenregelung hinausgehenden Bereich abgesenkt bzw. angehoben wird. Die bisherige fahrzeugeigene Sensorik kann dabei nur eine geringe Aussage über das zukünftige Höhenprofil der Straße liefern. Über eine Bildauswertung oder eine optische Triangulation könnte die Topologie der Straße ermittelt werden. [8.2, KUHL, 2004]

6.1.1.4 Verkehrssituationsabhängiges Licht

Die kollektive Verkehrsraumausleuchtung [8.2, ROSLAK, 2005] geht über die bisher aufgezählten Lichtverteilungen des situationsabhängigen Lichts hinaus, indem es die Lichtverteilung auf die anderen Verkehrsteilnehmer anpasst. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Vorausfahrende Fahrzeuge mit ähnlicher Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit: Durch eine Anpassung der eigenen Lichtverteilung an vorausfahrende Fahrzeuge kann die Blendung für diese reduziert werden. Dennoch stellt sich die Frage, ob dieses Ziel nicht auch schon durch jetzt in den Markt eingeführte, automatisch sich selbst abblendende Rückspiegel und Seitenspiegel erreicht wird.

2. Entgegenkommende Fahrzeuge mit hoher Relativgeschwindigkeit zum eigenen Fahrzeug: Die Fahrer der entgegenkommenden Fahrzeuge werden bisher durch die Wahl der Lichtverteilung und deren Form der Hell-Dunkel-Grenze in ihrer Blendung begrenzt. Bei der kollektiven Verkehrsraumausleuchtung wird das sonst beim Passieren entgegenkommender Fahrzeuge durch deren Scheinwerferlichtverteilungen angehobene Adaptationsniveau der Fahreraugen deutlich weniger angehoben, wodurch eine frühere Wahrnehmung der Gefährdungspotenziale auf der eigenen Fahrbahn möglich ist. Der Nutzen der geringeren Adaptationsleistung für den eigenen Fahrer und damit die zeitliche Homogenität der Lichtverteilung muss dabei für den Benutzer im Begegungsverkehr deutlich werden. Dem Ziel, die Hell-Dunkel-Grenze weiter anzuheben, um die geometrische Reichweite der Scheinwerfer weiter

zu erhöhen, kommt die kollektive Verkehrsraumausleuchtung sehr nahe. Dazu ist es erforderlich, dass die Fahrbahngeometrie und die Position der entgegenkommenden Fahrzeuge erfasst wird. Das ermöglicht einen überzeugenden Sichtweitegewinn durch eine zonal abgeblendete Fernlichtverteilung im Idealszenario, die dem Fahrer eine dem Fernlicht vergleichbare Lichtverteilung belässt, ohne den Gegenverkehr durch übermäßige Blendung zu gefährden. Ähnliche Ansätze wurden von [8.2, GENTEX, 2004] untersucht. Eine Zwischenstufe könnte es darstellen, wenn ein automatisches Umschalten zwischen den verschiedenen Lichtverteilungen der AFS-Lichtfunktionen bzw. zunächst zwischen dem Abblend- und dem Fernlicht [8.2, BMW 5er Reihe, 2005] erfolgt.

In der Phase der Markttransformation der aktiven Scheinwerfer mit einer kollektiven Verkehrsraumausleuchtung könnte die einseitige Anpassung der eigenen Lichtverteilung an den Begegnungsverkehr sowie die geringere Adaptationsleistung des Fahrers (durch die aktive Fernlichtverteilung mit ausgespartem Gegenverkehr) für mehr Sichtweitegewinn und damit mehr Fahrkomfort sorgen.

Sensorik für kollektive Ausleuchtung

Hauptschwierigkeit stellt dabei die Reichweite und das Auflösungsvermögen heutiger Sensorik dar, siehe auch Kapitel 3.5. Die Sensorik hat die Aufgabe, einen breiten Erfassungsbereich für Kurven und gekrümmte Straßen aufzuweisen, gleichzeitig aber auch eine hohe Auflösung des nahen und insbesondere des fernen Umfeldes zu ermöglichen, damit Objekte in größerer Entfernung in anzuleuchtende oder auszublendende kategorisiert werden können. Die Verarbeitung und Auswertung der Sensorsignale in Echtzeit und die Sensorfusion, d.h. die Kombination der Erfassungs- und Auswerteergebnisse der unterschiedlichen Sensorsysteme stellen eine weitere Herausforderung dar. Im Falle der kollektiven Verkehrsraumausleuchtung ist dabei die Unterscheidung zwischen statischer Straßenbeleuchtung und entgegenkommenden Fahrzeugen eine Schwierigkeit: Ein erster Ansatz wäre die Detektion der Bewegung der entgegenkommenden Scheinwerferpunkte. Haben diese eine Relativgeschwindigkeit relativ zum Hintergrund und erhöht sich die Distanz zweier Scheinwerferpunkte eines Fahrzeugs voneinander, so kommt ein Fahrzeug dem eigenen entgegen. Im Falle einer geraden Straße ist dieser Ansatz allerdings nur begrenzt tauglich, da sich die Lichtpunkte des entgegenkommenden Fahrzeugs nur relativ gering bewegen. Bei leicht gekrümmten Straßen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Lichtpunkte zeitweise durch andere im Verkehrsraum stehende Objekte, z.B. Bäume, abgedeckt werden. Ein zweiter Ansatz besteht in der Bestimmung der eigenen Blendbeleuchtungsstärke im Fahrzeug. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Fahrer des entgegenkommenden Fahrzeugs mit derselben Blendbeleuchtungsstärke geblendet wird, wie sie die Sensorik im eigenen Fahrzeug detektiert hat. Dieser Ansatz setzt allerdings voraus, dass die LKW-, Kfz- und Motorrad-Scheinwerfer sich in ihrer Lichtstärke nicht wesentlich unterscheiden und die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeugs korrekt eingestellt sind. Die Lichtstärkeunterschiede von Halogen- und Xenon-Scheinwerfern sind dabei auch mit zu berücksichtigen. Im Falle der Kombination von eigenem Fernlicht und entgegenkommendem Abblendlicht würde die eigene blendbeleuch-

tungsstärkeabhängige Sensorik zu spät von Fernlicht auf Abblendlicht umschalten (da die Sensorik das entgegenkommende Fahrzeug in größerer Entfernung lokalisiert, als es tatsächlich ist), wodurch der entgegenkommende Fahrer erheblich geblendet würde. Die aufgezeigten Schwächen der beiden rein lichttechnischen bzw. optischen Sensorprinzipien zeigt den Bedarf einer Sensorfusion auf, die Fehlentscheidungen der Einzelsysteme verhindert. Die Kombination mit RADAR- oder LIDAR-Systemen erhöht zusätzlich die Reichweite des Systems, wodurch eine möglichst frühzeitige Reaktion der eigenen Lichtverteilung auf den entgegenkommenden Verkehr erst möglich wird.

6.1.1.5 Markierendes Licht

Tabelle 6.2: Vergleich der Markierungslichtfunktion mit der kollektiven Verkehrsraumausleuchtung

Vergleich	Markierungslicht	kollektive Verkehrsraumausleuchtung
Basislichtverteilung	Abblendlicht	Fernlicht
Objekte	kurzzeitiges Beleuchten von meist unbeleuchteten Objekten (Pulsieren der Beleuchtung)	Ausblenden vor allem von Augenpunkten anderer Verkehrsteilnehmer (selbstleuchtende Objekte werden zuerst erkannt)
geblendete Objekte	Gefährdungsobjekte	Fußgänger und Radfahrer
Aktivität	sowohl ober- als auch unterhalb der HDG	nur oberhalb der Abblendlicht-HDG (Hell-Dunkel-Grenze)
Vorteile	frühere Detektion von Gefahrenquellen, Reaktion des Fahrers darauf	Erhöhung der Nutzungsdauer des Fernlichts außerhalb von Ortschaften, insbesondere auf Autobahnen
Nachteil: Folgen einer begrenzten Sensorleistungsfähigkeit	keine Markierung des Gefahrenobjekts – Objekte werden erst im Abblendlicht sichtbar	Blendung durch Fernlicht bzw. gefährdete Objekte werden zu lange ausgeblendet – Objekte werden erst (wie bisher auch) in der Abblendlichtverteilung sichtbar
Nutzung	nur in Gefährungssituationen	höherer Nutzanteil des Fernlichts
Gesetzgebung	zonale Lichthupenfunktion – zur Zeit in Prüfung	bisher gesetzlich nicht zulässig, da die Lichtwerte des Fernlichts erfüllt werden müssen

Neben den tabellarisch aufgezeigten Unterschieden zwischen der Markierungslicht- und der kollektiven Verkehrsraumausleuchtungsfunktion (Tabelle 6.2) besteht die Gemeinsamkeit der beiden Lichtverteilungen in der erforderlichen frühzeitigen Detektion von Verkehrsobjekten. Das Markierungslicht erfordert, je nach Einsatzfall, d.h. Fernzonenmarkierung und/oder breite Vorfeldmarkierung, zusätzlich noch einen Informationsbedarf im unmittelbaren Vorfeld der Lichtverteilung. Eine Sensorik in Abhängigkeit von der Blendbeleuchtungsstärke lässt sich beim Markierenden Licht nicht einsetzen.

6.1.1.6 Displaylicht

Die Sensoranforderungen an das Displaylicht sind gering, da fahrzeugeigene Informationen, z.B. die des Navigationssystems, auf der Straße dargestellt werden. Eine vorfeld- und umfeldabhängige Anpassung der Leuchtdichte und des Kontrastes der Displayinformationen während Nachtfahrten würde den Fahrkomfort steigern und für weniger Eigenblendung durch zu hell dargestellte Informationen sorgen.

6.1.2 Sensorik - CAN-Bus-Ansteuerung und dessen Auswertung

Aus den bisherigen Ausführungen zur Ansteuerung der aktiven Scheinwerfer-Funktionen wird deutlich, dass die zukünftigen adaptiven Lichtverteilungen eng mit der fahrzeugeigenen Sensorik verknüpft werden müssen und im Falle der kollektive Verkehrsraumausleuchtung teilweise von der Ausstattung anderer Verkehrsteilnehmer abhängig ist. Daher ist es für die Markteinführung der aktiven Scheinwerfer unabdingbar, dass auch deren Ansteuerung und die erforderliche Sensorik weiterentwickelt werden. Diese wird in Zukunft nur teilweise zur Standardausstattung von Fahrzeugen gehören. Daher müssen möglichst große Schnittmengen in der gemeinsam genutzten Sensorik herausgearbeitet werden, damit zusätzliche Sensorik und damit die Kosten auf ein absolutes Minimum beschränkt bleiben.

Bei dieser Vielzahl von Lichtfunktionen sollte der Nutzen für den Fahrer und für andere Verkehrsteilnehmer im Vordergrund stehen. Wichtiges Entscheidungskriterium für die Zukunft wird auch sein, inwieweit der Nutzer, in den meisten Fällen ein lichttechnischer Laie, die Vorteile der Lichtverteilung und den damit erzielten Zugewinn an Fahrkomfort und Fahrsicherheit wahrnimmt, damit er im Vorfeld der Nutzung, also schon bei seiner Kaufentscheidung bereit ist, den voraussichtlichen Aufpreis für die Zusatzausstattung zu bezahlen. Teilweise wird heute bei der Unterscheidung zwischen Abblendlicht und dem Autobahnlicht von dem Kunden bereits kritisiert, dass sich nur wenig an der Lichtverteilung ändert. Die geringe Anhebung der Hell-Dunkel-Grenze in einem begrenzten Maße wird nur teilweise wahrgenommen und geschätzt.

6.2 Aufbau eines statischen Lichtverteilungsdemonstrators

Bei dem aktiven Scheinwerfer sind zwei Entwicklungsstufen vorgesehen:

1. der statische Lichtverteilungsdemonstrator
2. die Umsetzung ins dynamische Fahrzeugumfeld

In dieser Arbeit sind statische Lichtverteilungsdemonstratoren für den LCoS-Scheinwerfer, den DMD-Scheinwerfer, den AMD-Musteraufbau, den scannenden Scheinwerfer und das Projektionsmodul mit Flexprisma aufgebaut worden. Statische Demonstratoren haben den Vorteil, dass sie geringere Anforderungen an die Vibrations-, Temperatur-, Feuchtigkeits- und Staubempfindlichkeit als im Fahrzeug erfüllen müssen. Ein höherer elektrischer Leistungsbedarf statischer Demonstratoren ist in diesem Umfeld noch tolerabel. Eine strikte Anpassung

an gesetzliche Rahmenbedingungen war für die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Scheinwerferprototypen noch nicht erforderlich. Zukünftig können diese Prototypen im Lichtkanal der Hella KGaA eingesetzt wurden, um die vom Kunden gewünschten Lichtverteilungen mit einem universellen Prototypen darzustellen und per Software flexibel ändern zu können. Eine Anbindung an das Umfeld über CAN-Bus und mögliche Sensorsignale ist in diesem Stadium ebenfalls noch nicht erforderlich. Tabelle 6.3 zeigt die Anforderungen an einen statischen Lichtverteilungsdemonstrator im Vergleich zu einem aktiven Scheinwerfer im Kfz-Einsatz.

Tabelle 6.3: Vergleich der Anforderungen zwischen dem statischen Lichtverteilungsdemonstrator und dem aktiven Scheinwerfer

Anforderungen	statischer Lichtverteilungs-demonstrator	Aktiver Scheinwerfer im Kfz
Lichtstrom	> 1.000 lm	> 1.000 lm
modellierte Lichtstärkeverteilung für ECE und SAE-Normen	ist zu erfüllen	ist zu erfüllen
Kontrast	1 : 100	1 : 100
Vorneigung	0,57° (0°)	0,57°
Energieeffizienz	eher untergeordnet	sehr wichtig
Preis	höherer möglich	klein, angemessen
Schaltzyklen Mechatronik	100.000	100.000
Korrosionsschutz	geringe Anforderungen	Automotive Spezifikation
Betriebsspannungsbereich	12 V oder 230 V	9,0 – 17,0 V
maximale Schaltfrequenz	1 Hz	1 Hz
System Schaltzeit	< 60 ms	< 60 ms
Temperaturbereich Betrieb	0°C – +40°C	-40°C – +85°C
max. Lagertemperatur	-10°C – +50°C	-40°C – +115°C

6.3 Umsetzung der Konzepte ins dynamische Fahrzeugumfeld

Bei der Überführung der Optikkonzepte in ein Fahrzeug sind an das aktive Scheinwerfersystem die erhöhten Anforderungen der automotive Spezifikation zu stellen. Eine Anbindung an das CAN-Bus-System des Fahrzeugs ist erforderlich zur Auswertung der fahrzeugeigenen Sensorsignale. Ebenfalls sind zusätzliche Sensorsignale notwendig, welche z.B. entgegenkommende Fahrzeuge detektieren oder Gefahrenquellen vor der menschlichen Wahrnehmung erfassen und auswerten können.

Je nach Konzept und erzeugter Lichtverteilung sind bestehende gesetzliche Regelungen für eine zukünftige Markteinführung einzuhalten bzw. sind zukünftig, gesetzliche Anforderungen an Anbauort und erzeugte Lichtverteilungen anzupassen.

Im Rahmen der Umsetzung der aktiven Scheinwerfer-Prototypen ins dynamische Umfeld wurden der DMD-Scheinwerfer und der Scanner-Scheinwerfer an ein Versuchsfahrzeug montiert, siehe Abbildung 6.1. Damit lassen sich Versuchsfahrten und eine Evaluation der erzeugten aktiven Lichtverteilungen unter dynamischen Bedingungen durchführen. Die zweite Generation DMD-Scheinwerfer mit vorbereitetem dynamischen Kurven-licht ist in ein 5er BMW-Schein-werfergehäuse integriert worden, siehe Abbildung 6.2. Ein erster Schritt der Weiterentwicklung des DMD-Scheinwerfer-Konzepts zu einem Serienscheinwerfer wurde damit bereits vollzogen.

Abbildung 6.1: Versuchsfahrzeug mit Frontreck, an dem der scannende Scheinwerfer (links) und der DMD-Scheinwerfer (Mitte und rechts)montiert sind.

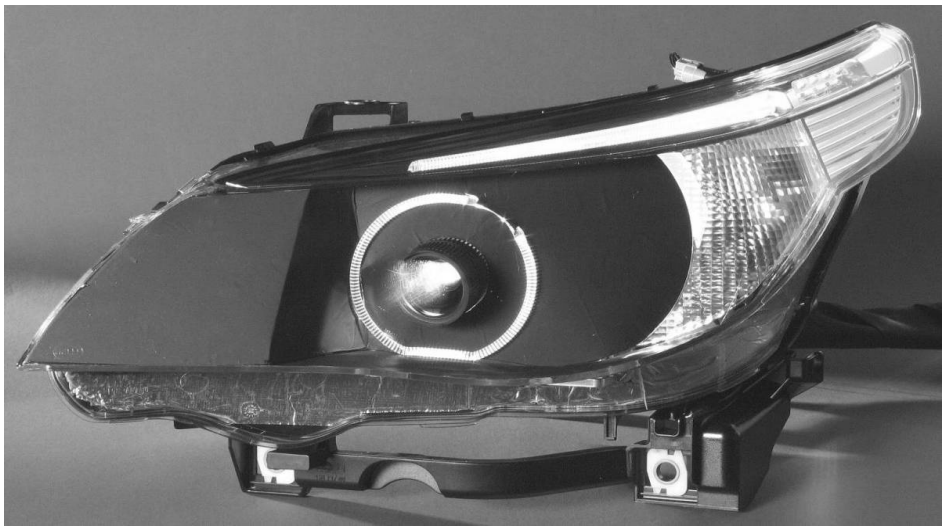


Abbildung 6.2: DMD-Scheinwerfer im 5er BMW-Seriengehäuse

Bei der Umsetzung von Scheinwerferkonzepten ins dynamische Fahrzeugumfeld lassen sich allgemein folgende Entwicklungslinien und Konfigurationsmöglichkeiten unterscheiden:

1. Aufbau eines Pixelarray-Scheinwerfers als Entwicklungstool für unterschiedliche Scheinwerfer-Lichtverteilungen, mit denen der aufwändige Prototypenbau für zukünftige Serienscheinwerfer in konventioneller Ausführung auf ein Minimum reduziert werden kann.

2. Aufbau eines dynamischen aktiven Scheinwerfers, der die gesamte Lichtverteilung in zahlreichen Freiheitsgraden variieren kann.

3. Zwei Scheinwerfer übernehmen den vollen Funktionsumfang aller aktiven Lichtverteilungen

4. Ein Scheinwerfer übernimmt alle aktiven Lichtfunktionen und der 2. Scheinwerfer wird nur zur Kennzeichnung der Fahrzeugbreite verwendet. Um ein gleiches Erscheinungsbild für entgegenkommende Fahrzeuge zu erhalten, sollte der 2. Scheinwerfer eine ähnlich hohe Leuchtdichte aufweisen. Er könnte auch für die Erzeugung einer Grundlichtverteilung verwendet werden, die mit den aktiven Lichtverteilungen überlagert wird. Der 2. Scheinwerfer kann in konventioneller Scheinwerferlichttechnik ausgeführt sein. Teilweise könnte eine gewisse Grundlichtverteilung auch vom aktiven Scheinwerfer selbst erzeugt werden.

5. Ein Zusatzscheinwerfer überlagert die beiden konventionellen Lichtverteilungen mit den aktiven Lichtfunktionen. Dabei übernimmt dieser die Markierungs- und Displayfunktion. Der Zusatzscheinwerfer dient als Pointer und ermöglicht teilweise „Augmented Reality“, in dem er die Objekte der Fahrsituation durch zusätzliche Darstellungen und Markierungen ergänzt. Durch diesen Aufbau ist die Leuchtdichte der Basis-Scheinwerferlichtverteilung die niedrigste Leuchtdichte, wodurch der Kontrast der Darstellungen geringer ist als beim ersten Aufbaukonzept.

Die erste Variante, der Einsatz des Pixelscheinwerfers als Entwicklungstool, kann heute bereits eingesetzt werden, da dieser Scheinwerfer entweder unter statischen Bedingungen in einem Lichtkanal oder unter geringen Anforderungen hinsichtlich Bauraumoptimierung und Energieeinsatz an einem Frontreck eines Versuchsfahrzeugs montiert werden kann. Bei letzterem ist es möglich, frei programmierte Lichtverteilungen direkt unter dynamischen Bedingungen zu betrachten. Das kann dazu eingesetzt werden, um dem Kunden mehrere Lichtverteilungen gezielt vorzuführen, damit dieser aus Wunschlichtverteilungen seine Ziellichtverteilung für einen konventionellen Scheinwerfer aussuchen kann. Die Ziellichtverteilung muss sich dabei allerdings innerhalb der physikalischen und energetischen, lichttechnischen und optischen Grenzen eines konventionellen Scheinwerferaufbaus befinden, da sonst die Ziellichtverteilung unrealistisch und unerreichbar bleibt. Ziellichtverteilungen würden dann noch weiter erhöhte Anforderungen an die Auslegung von Scheinwerferlichtverteilungen stellen. Eine weitere OEM-Kunden-Lichtverteilungsindividualisierung wäre damit möglich. Diese Ziellichtverteilungen ließen sich am einfachsten und kostengünstigsten mit

FF-Reflexionstechnik realisieren. Der Variabilität innerhalb dieser konventionellen Lichtverteilungen sind im späteren optischen System, d.h. im Betrieb, allerdings bisher und auf nähere Zukunft enge technologische Grenzen gesetzt.

Innerhalb der frei programmierbaren Lichtverteilung sind neben der Form und Lage der Hell-Dunkel-Grenze sowie deren Ausprägung, d.h. deren Schärfe oder Lichtstärkegradient, auch Variationen innerhalb der Vorfeldleuchtdichtegradienten, sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung möglich. Die Untersuchung von eingeblendeten Informationen der Displayfunktion, deren Lage, Form, Kontrast und Dauer der Darstellung sind ebenfalls durchführbar. Mit einem solchen Pixelarray-Scheinwerfer als Entwicklungstool lässt sich die Markierungsfunktion anhand von dargestellten Objekten, deren Größe, Form, Lage und Zahl innerhalb der Lichtverteilung untersuchen. Untersuchungen zur Sichtweite und Blendung im Normalbetrieb, den Konsequenzen aus der Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze, der softwaretechnischen vertikalen Nachregelung dieser Grenze und der erzeugten Blendung bei den AFS- und bei den aktiven Scheinwerferlichtfunktionen lassen sich ebenfalls vornehmen. Daher ist die Anschaffung eines derartigen Pixelarray-Scheinwerfer als Entwicklungstool jedem Kfz-Zulieferer und Kfz-Hersteller zu empfehlen, damit für zukünftige Scheinwerferprojekte kostengünstig Zielgrößen durch Softwareanpassungen definiert und umfangreiche physiologische Untersuchungen durchgeführt werden können.

In realen, dynamischen Fahrsituationen wurden, vgl. 2. Variante, sowohl der DMD- als auch der Scanner-Scheinwerfer untersucht. Dabei wurden diese jeweils einzeln für die Erzeugung der kompletten Lichtverteilung eingesetzt. In weiteren Fahrversuchen wurden Kombinationen aus einer DMD-Scheinwerferlichtverteilung und Gasentladungs-Abblendlichtverteilung geprüft. Auf eine gezielte Ausblendung des DMD-Scheinwerferprojektionsbereiches wurde dabei verzichtet. Mit der Kombination der DMD-Lichtverteilung und der Gasentladungs-Abblendlichtverteilung sind die neuen gesetzlichen AFS-Regelungen von 2006 umgesetzt mit denen es zulässig ist, zwei unterschiedliche Lichtverteilungen miteinander zu kombinieren. Durch die Verwendung eines Gasentladungs-Abblendlicht-Scheinwerfers als zweiten Scheinwerfer wird darüber hinaus eine hohe Fail-Safe-Sicherheit erzielt, da dieser eine bewährte hohe Zuverlässigkeit hat. Anstelle der Gasentladungs-Abblendlichtverteilung könnte auch nur eine Nebellichtverteilung verwendet werden.

In der dritten Variante werden anstelle eines aktiven Scheinwerfers zwei aktive Scheinwerfer eingesetzt. Diese Variante soll hier nicht genauer erläutert werden.

Wird, wie in der vierten Variante beschrieben, mit nur einem leistungsfähigen DMD-Scheinwerfer die gesamte Lichtverteilung erzeugt, so muss, um die gesetzlichen Regelungen des paarweisen Scheinwerferbildes zu erfüllen, eine zusätzliche Leuchtdichte-Attrappe eingesetzt werden. Diese hat dieselbe Leuchtdichte wie der eigentliche DMD-Scheinwerfer, trägt allerdings nur geringfügig zu der Gesamtlichtverteilung durch ihre Abstrahlcharakteristik bei. Die Erfordernisse der Redundanz und der Failsafe-Sicherheit wären mit diesem Aufbau allerdings nicht erfüllt.

Bei der fünften Variante, dem additiven Erzeugen der Lichtverteilung mit einem frei programmierbaren Zusatzscheinwerfer, zusätzlich zu den beiden konventionellen, z.B. Kurven-

Licht-Bi-Xenon-Scheinwerfern, können neben den AFS-Lichtverteilungen noch die aktiven Scheinwerferlichtfunktionen frei programmiert und dargestellt werden. Diese Scheinwerferkombination ist eine additive aus mehreren Einzelscheinwerfern, die sich in ihren Lichtverteilungen überlagern. Eine hohe Failsafesicherheit und der höchste Wirkungsgrad wird mit dieser Systemkonfiguration erzielt. Das liegt daran, dass immer nur diejenigen Scheinwerfer eingesetzt werden, die für die jeweilige Lichtverteilung benötigt werden. Zusätzlich kann der Zusatzscheinwerfer für die Modellierung der Hell-Dunkel-Grenze und z.B. die Markierungs- und Displayfunktion gezielt optimiert werden, sodass die Lichtstromverluste durch Dunkelblenden minimal sind. Es ist zu erwarten, dass aktive Scheinwerfer anfangs als Zusatzscheinwerfer in die Kfz-Frontbeleuchtung eingeführt werden, da diese die geringsten Anforderungen haben und am kostengünstigsten zunächst als Zusatzausstattung bei hochpreisigen Fahrzeugen eingeführt werden können. Diese Scheinwerfervariante ermöglicht auch am leichtesten die Verwendung der bisherigen für den Kfz-Einsatz zugelassenen Gasentladungslampen, da die Anforderungen an maximal benötigten Lichtstrom, maximale Lichtstärke und erforderliche Breite der Ausleuchtung eher begrenzt sind.

6.4 Gesetze

Bei den aktiven Scheinwerfern sind für deren Einsatz im realen Straßenverkehr neben technologischen Fragen auch gesetzliche Fragen zu klären, da zusätzlich zu den eher unproblematisch erfüllbaren Anbauvorschriften die gesetzlichen Regelungen für aktive Scheinwerferlichtverteilungen und der Einsatz von UHP-Kurzbogenlampen noch nicht geregelt sind.

Die bisherigen gesetzlichen Regelungen für Kfz-Scheinwerfer beschränken sich auf die Definierung der Art der Lichtquelle, die Art der verwendeten Scheinwerfer und deren Anordnungen zueinander. Mit der neuen Gesetzgebung im Rahmen der AFS-Scheinwerfer werden dagegen Wirkvorschriften für die Lichtverteilungen erlassen, wodurch es möglich wird, diese mit unterschiedlichen, auch in ihrer Lichtverteilung asymmetrischen Systemen zu erfüllen.

Bei den gesetzlichen Regelungen werden die Richtlinien der ECE und die der FMVSS, die teilweise auf dem Industriestandard SAE basieren, unterschieden. Die ECE-Regelungen werden auch in Japan, in Australien, in weiteren Bereichen Asiens, in Afrika und zum Teil in China angewendet.

Im Rahmen des internationalen EUREKA-Forschungsprojektes 1403 „Advanced Frontlighting Systems“ [8.2, KALZE / DAMASKY 1999] wurden die Grundlagen für ein zukünftiges, funktionsorientiertes Reglement der Lichtverteilung in Europa gelegt. Aus dem Verbund der AFS-Lichtverteilungen wurde das statische und das dynamische Kurvenlicht herausgelöst, sodass diese beiden Lichtfunktionen seit 2003 als „Pre-AFS“ zulässig sind. Weitere Lichtfunktionen, d.h. die situationsabhängigen Lichtverteilungen wie Stadt-, Landstraßen- und Autobahnlicht, sowie das Schlechtwetterlicht (Adverse weather and wet road lighting) und ein Überkopf-Sehzeichenlicht zur Beleuchtung von Schilderbrücken (Overhead sign lighting) wurden untersucht und in ihren gesetzlichen Anforderungen festgelegt, damit diese ab 2006 in

den Markt eingeführt worden sind. Mit diesen Lichtverteilungen ist ein erster Schritt in Richtung sich selbständig den jeweiligen Verkehrssituationen anpassenden Lichtverteilungen getan.

Für die Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen wird eine Beleuchtungsstärkemessung verwendet, bei der der Scheinwerfer über ein Photogoniometer um seine vertikale und seine horizontale Achse gekippt wird und die resultierenden Beleuchtungsstärken auf einem Photoempfänger in 25m Entfernung ermittelt werden. Die für die Zulassung notwendigen Messpunkte und Messbereiche lassen sich auch auf einem ebenen Messschirm in 25m Entfernung darstellen, wobei die Lage der Messpunkte und damit die zugehörigen Winkel des Photogoniometers je nach Lichtfunktion genau festgelegt sind.

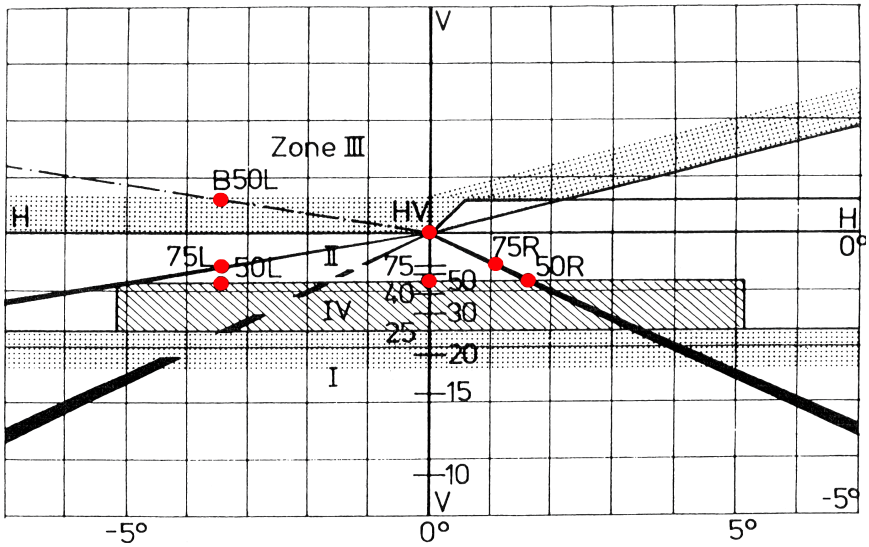


Abbildung 6.3: Messpunkte einer ECE-Lichtverteilung (Ausschnitt am Beispiel des Abblendlichts) [vgl. GRE-Internet]

6.5 Lichttechnische Analyse der aufgebauten Konzepte

6.5.1 Effizienzbetrachtung

Wirkungsgradvergleich aus der Literatur

Einen Vergleich der unterschiedlichen technischen Systeme von Video-Projektoren zeigt die Tabelle 6.3., die der Literatur entnommen wurde [8.2, WU, 2001].

Tabelle 6.3: Übersicht über die Gesamteffizienz der Video-Projektions-Technologien [8.2, WU, 2001]

Display	Apertur	Polarisation	Reflektivität	Optik	Gesamt-Effizienz
p-Si-LCD	60	70 (80)	---	90	38
c-Si-LCoS	90	70 (80)	90 (FNG = 93%)	90	51
DMD	90	---	90 (FNG = 68%)	85	69

Die Zahlenwerte der Tabelle 6.3 lassen sich folgendermaßen interpretieren: Bei beiden LC-Technologien wurde eine Polarisationskonversion angenommen, wodurch der Polarisationswirkungsgrad auf 70% gesteigert werden konnte. In der Optikkategorie wurde die f-Nummer nicht berücksichtigt. Dieser Vergleich basiert auf Zahlen von 1996 und einer Auflösung von SVGA (800 x 600). Die Aperturraten von LCD, LCoS und DMD-Chip sind 65%, 84% und 77%. Bei einer Steigerung der Auflösung sinkt die Aperaturrate von LCDs auf 45%. Bei LCoS- und DMD-Chips kann die Aperturrate konstant gehalten werden, wenn mit steigender Auflösung die Chipgröße anwächst. Mit einem Mikrolinsenarray [8.2, HAMADA, 1995] kann der Aperturratennachteil von LCD-Chips überwunden werden. Beim LCoS-Chip kann die Aluminium-Reflexionsschicht (90% Reflektivität) mit 2 bis 4 dielektrischen Schichten auf eine Gesamtreflektivität von 97% gesteigert werden [8.2, WU, 2001].

Ausgangswerte der Video-Projektoren

Werden die Wirkungsgrade der aufgebauten Scheinwerferprinzipien verglichen, so muss zunächst von den Wirkungsgraden von Video-Projektoren ausgegangen werden, wie sie im Büroeinsatz und im Home-Entertainment eingesetzt werden.

Die Ausgangswerte der Video-Projektoren, die als Basis für die aktiven Scheinwerfer mit subtraktiver Lichtverteilungserzeugung gedient haben, sind in Tabelle 6.4 aufgetragen.

Tabelle 6.4 zeigt die Leistungs- und ANSI-Lumenwerte von handelsüblichen Video-Projektoren. Deren Lichtleistung wurden auf einem Photogoniometer mit einem weißen, homogenen Vollbild nachgemessen. Bei einem Vergleich des Projektionsmoduls mit den Videoprojektoren muss das weiße Vollbild der Videoprojektoren mit dem Fernlicht des Projektionsscheinwerfers verglichen werden. Aus den Lampenleistungswerten wird ersichtlich, dass die Videoprojektoren deutlich mehr Lampenlichtstrom einsetzen müssen, um denselben Nutzlichtstrom auf der Zielbildfläche zu erhalten. Daher ist ihr Wirkungsgrad (Nutzlichtstrom / Lampenlichtstrom) deutlich schlechter als der Wirkungsgrad des Projektionsmoduls. Dieses ist auf die Straßenausleuchtung spezialisiert. Das Projektionsmodul hat nur zwei Lichtfunktionen und ist damit den sehr flexiblen Video-Projektoren klar unterlegen. Aufgabe dieser Promotion war es unter anderem, die Vorteile beider Systeme mit einander zu vereinen.

Tabelle 6.4: Ausgangswerte für die aktiven Scheinwerfer-Dimensionierung (vgl. Tabelle 6.5)

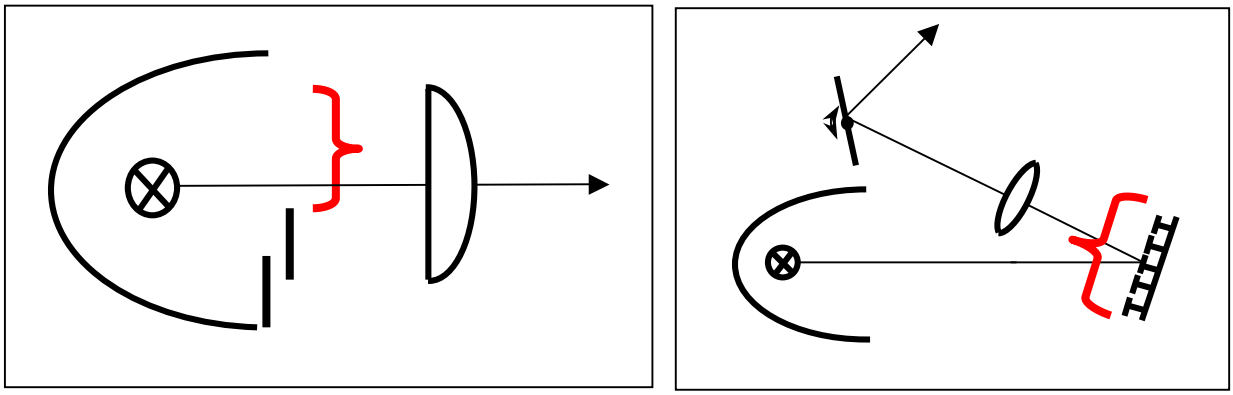
	DMD-Beamer 1	DMD-Beamer 2	DMD-Beamer 3	LCoS-Beamer	Projektions-scheinwerfer
Wirkungsgrad („HB“, weißes Vollbild)	4,3 %	3,95 %	7,5 %	5,06 %	56,3 %
Lampenleistung	270W	220 W	145 W	220 W	35W
Lampenlichtstrom	27.000 lm	22.000 lm	14.000 lm	22.000 lm	3.200 lm
Nutzlichtstrom auf der Zielbildfläche	1.164 lm	870 lm	1.052 lm	1.113 lm	1.800 lm (HB) 1.200 lm (LB)
E_{max} in 25m	12,1 lx	11,7 lx	9,7 lx	11,9 lx	130 lx (HB) 75lx (LB)
ANSI-Lumen	2000	Keine Angabe	Keine Angabe	1800	entfällt
Kontrast (Hersteller-Angaben)	1:300 (1:800)	1:580	1:580	1:88 (1:600)	1:150

Um den Wirkungsgrad der Videoprojektoren zu steigern, wurde das Farbrad und der Integrator entfernt. Zusätzlich wurde die Zahl der Linsen deutlich reduziert. Zur Minimierung der Lichtstromverluste im System wurde durch eine Anpassung der Mitteloptik das Etendué der Auskoppeloptik auf das der Einkoppeloptik abgestimmt. Mit einer gezielt inhomogenen, vormodulierten Einkoppel-Lichtverteilung, die einen Brennpunkt nahe des DMD-Chips bzw. des LCoS-Chips hervorruft, konnte die Leuchtdichte auf der Chipfläche deutlich gesteigert werden. Diese erhöhte Leuchtdichte führt zu einer deutlich gesteigerten Lichtstärke des aktiven Scheinwerfers. Hierzu war es erforderlich die Kühlung des „Lichtventils“ DMD bzw. LCoS, den erhöhten Lichtströmen (keine Farbrad- und Homogenisator-Verluste) und den erhöhten Temperaturgradienten auf dem Chip anzupassen. In der weiteren Optimierung der aktiven Scheinwerfer ist eine Freiform-Einkoppeloptik oder ein Freiform-Umlenkspiegel anstelle des ebenen Kaltlichtspiegels, Abbildung 5.14, S.121, vorzusehen, damit die Wirkungsgradverluste innerhalb der Einkoppeloptik weiter gesenkt werden können. Die Einkoppeloptik beeinflusst auch die Divergenz des eingekoppelten Strahlenbündels, die auf dem reflektierenden DMD-Chip erhalten bleibt. Durch eine Freiform-Einkoppeloptik ist es evtl. möglich auf eine Aspektverhältnis-verändernde, aufwändigere Auskoppeloptik zu verzichten. Diese Maßnahme trägt auch dazu bei die Zahl der optischen Elemente im Strahlengang zu reduzieren und kann damit den Wirkungsgrad des Gesamtsystems DMD-Scheinwerfer erhöhen.

Wirkungsgradvergleich: konventionelles Projektionsmodul und DMD-Scheinwerfer

Der Vergleich des Wirkungsgrades eines DMD-Scheinwerfers mit einem konventionellen Projektionsmodul hat folgende Teilaspekte: Beim konventionellen Projektionsscheinwerfer, z.B. einem Vario-Xenon- oder Bi-Xenon-Modul, sind 100% Transmission für den Lichtstrom

realisiert, der oberhalb der Blende des Projektionsmoduls vom FF-Ellipsoidreflektor auf die Linse gelenkt wird. Das gilt sowohl für das Abblendlicht, als auch für das Fernlicht, da hier jeweils der Lichtstrom oberhalb der jeweiligen Blendenstellung betrachtet wird. Demgegenüber wird beim DMD-Scheinwerfer bei jeder Lichtfunktion der gesamte Lichtstrom (oder nur Teile davon bei einer Kombination aus einer DMD-Lichtverteilung mit einer statischen Grundlichtverteilung) auf den DMD-Chip gelenkt, der nur einen Gesamtwirkungsgrad von 68% aufweist. Daher muss bei jedem DMD-Scheinwerfer ohne eine statische Grundlichtverteilung oder einen Schaltspiegel, der Teile des Lichtstroms oder den gesamten Lichtstrom am DMD-Chip vorbeilenkt, mindestens ca. 50% mehr elektrische Leistung zur Lichtstromerzeugung eingesetzt werden, um denselben Lichtstrom nach der Auskoppeloptik auf der Straße zu erhalten.



100% Energieverbrauch
35 W (D2S-Lampe); 55W (H7-Lampe)

150% Energieverbrauch
53 W (theoretisches Minimum)

Abbildung 6.4: Vergleich der Wirkungsgrade Projektionsscheinwerfer (links) vs. DMD-Scheinwerfer (rechts)

Wirkungsgradvergleich des LCoS-Prototypen und des DMD-Scheinwerfers

Nach den bisherigen Messungen der DMD-Scheinwerferprototypen und des LCoS-Prototypen und deren Ausbaustufen ergeben sich die folgenden Wirkungsgrade und Lichtstromverläufe, Abbildung 6.5. Dabei soll auf die prinzipielle Aussage mehr Wert gelegt werden als auf die endgültige Optimierung, die bei einer Umsetzung in ein potenzielles zukünftiges Serienprodukt erfolgen könnte.

Die bisherigen Vergleiche der Wirkungsgrade von LCD-, LCoS- und DMD-Scheinwerfer beruhen alle auf dem Prinzip der subtraktiven Lichtverteilungserzeugung. Dabei werden von der maximal möglichen Lichtverteilung, z.B. Fernlicht, und einer maximalen Streubreite, Teile der Lichtverteilung „weggeschnitten“. Dieser Lichtstrom wird durch die „Lichtventile“, LCD-, LCoS- oder DMD-Chip ausgeblendet, d.h. direkt absorbiert (LCD) oder indirekt (über Mehrfachreflexion beim LCoS) in Wärme gewandelt oder auf einen Absorber (DMD) gelenkt. Kennzeichen jeder subtraktiv erzeugten Lichtverteilung ist der sinkende Wirkungsgrad, je tiefer die Hell-Dunkel-Grenze liegt und je dunkler das Vorfeld innerhalb der Lichtverteilung durch den Benutzer ausgewählt wurde. Dieses Verhalten wird exemplarisch am

DMD-Scheinwerfer in Abbildung 5.13, S.118 dargestellt. Dieser Wirkungsgradeffekt kann nur durch eine „zonal“ aufschaltbare Lichtquelle, z.B. 2 D2S-Kurzbogenlampen oder einzeln ansteuerbare LEDs innerhalb eines LED-Arrays reduziert werden. Hierbei wird jeweils nur die benötigte Lichtquelle betrieben, die für die Lichtverteilungserzeugung erforderlich ist. Dafür ist eine örtliche Trennung der Ausleuchtbereiche der jeweiligen Lichtquellen einzuhalten.

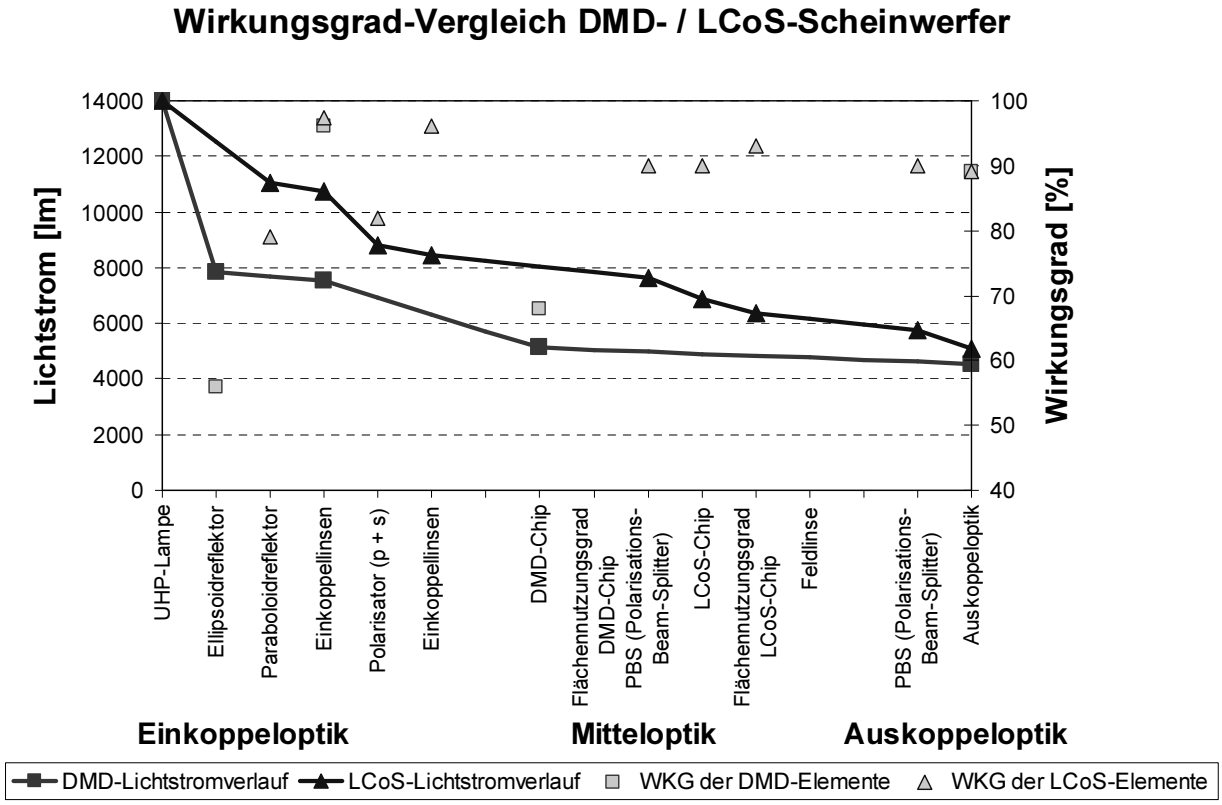


Abbildung 6.5 Wirkungsgrad-Vergleich des DMD-Scheinwerfers und des LCoS-Scheinwerfers

In Abbildung 6.5 ist auf der linken Ordinate der Lichtstromverlauf innerhalb des optischen Systems aufgetragen. Die rechte Ordinate stellt den Wirkungsgrad des jeweiligen Bauelements dar, das auf der Abzisse der Einkoppel-, der Mittel- und der Auskoppeloptik zugeordnet wird. Wie Abbildung 6.5 zeigt, reduziert sich der Lampenlichtstrom innerhalb des optischen Systems durch Transmissions- und Reflexionsverluste an den optischen Bauelementen. Da vom Lampenreflektor nur ein Teil des Lampenlichtstroms, der in den Raumwinkel von 4π abgestrahlt wird, genutzt werden kann, sinkt der Lichtstrom schon zu Beginn des optischen Systems merklich ab. Beim DMD-Scheinwerfer liegen die größten Lichtstromverluste beim Ellipsoidreflektor und beim DMD-Chip. Beim LCoS-Scheinwerfer sind die Lichtstromverluste über eine höhere Anzahl an Bauelementen verteilt. Dennoch lässt sich in dieser Abschätzung ein etwas höherer nutzbarer Lichtstrom als beim DMD-Scheinwerfer erwarten, da u.a. der LCoS-Chip deutlich effizienter den Nutzlichtstrom reflektiert.

Wirkungsgrad des scannenden Scheinwerfers

Wird dagegen der scannende Scheinwerfer betrachtet, so ist dessen Wirkungsgrad stets konstant, da der scannend verteilte Lichtstromanteil immer gleich bleibt. Dieser Lichtstromanteil wird nur je Lichtfunktion in einen anderen Bereich der Lichtverteilung gelenkt, sodass der Fahrer eine unterschiedliche Form der Hell-Dunkel-Grenze und eine unterschiedliche Lichtstärkeverteilung wahrnimmt. Je nach Ausführungsform besteht auch die Möglichkeit Teile des scannenden Lichtstromanteils auf einen Absorber zu lenken. Kenngröße des scannenden Scheinwerfers ist dessen maximale Höhe des Lichtstroms, der scannend umverteilt werden kann, da die Leuchtdichte der Lampe begrenzt und die Größe der scannenden Spiegel aus Dynamikgründen beschränkt ist. Die maximalen Schwenkwinkel und die Anordnung der Spiegelachsen zueinander, Abbildung 5.27, haben großen Einfluss auf die notwendigen Spiegelgrößen. Diese Spiegelauslenkposition und die Spiegelgrößen haben wiederum Einfluss auf die maximalen Scanbeschleunigungen und Scanfrequenzen und damit die erreichten Wiederholraten des scannend erzeugten Lichtbildes. Kenngröße auf der Straße sind die Belichtung H und die resultierende Beleuchtungsstärke E. Der limitierende Faktor für den maximal bündelbaren Lichtstrom durch die Einkoppeloptik (Sammeloptik) ist auch hier das Etendué.

Wirkungsgrad-Vergleich des Scannenden Scheinwerfers und des AMD-Arrays

Der Wirkungsgrad des scannenden Scheinwerfers ist durch seine Lichtstrom-Umverteilung mittels variabler optischer Elemente sehr vorteilhaft. Alternativ kann das durch ein variables Mikrospiegelarray realisiert werden, das mit kleinen Mikrospiegeln, die jeweils einzeln mit einer oder zwei Schwenkachsen drehbar gelagert sind, aufgebaut ist. Bei zwei Schwenkachsen kann auf weitere umlenkende Elemente verzichtet werden. Nachteilig gegenüber dem scannenden Scheinwerfer ist der geringere Flächennutzungsgrad des AMD-Spiegel-Arrays. Von Vorteil ist die hohe Variabilität des AMD-Arrays, die das gleichzeitige Lichtstromverteilen mit unterschiedlichen Strahlenpfaden ermöglicht. In der Ansteuerung kann das AMD-Array statisch oder scannend betrieben werden. Auch im statischen Fall treten bei geeigneter Ansteuerung und einer entsprechenden Wahl der Lichtstrom-Einkopplung auf den AMD-Chip keine Lücken im resultierenden Abbild der Spiegelflächen auf. Die einzelnen Lichtbündel der Einzelspiegel können aneinandergereiht oder teilweise oder vollständig überlagert werden. Dennoch ist es in einem zweiten Brennpunkt möglich nur eine um den Flächennutzungsgrad und den Reflexionsgrad des AMD-Arrays reduzierte Leuchtdichte zu erzielen im Vergleich zu der Leuchtdichte, die durch eine transmittive, optische Abbildung einer Linse erzeugt wird. Es ist allgemein zu sagen, dass eine Lichtstrom-Umverteilung energetisch gesehen das Optimum für Scheinwerfer darstellt. Problematisch und aufwändig sind nur die Art und der Aufbau des dazugehörigen optischen Systems bzw. die technologischen Schwierigkeiten in der Herstellung und Ansteuerung des AMD-Arrays.

Optimierung des AMD-Scheinwerfers

Möchte man ein Optimum in dem globalen Wirkungsgrad der AMD-Anordnung erzielen, so kann das nur durch einen Membranspiegel oder eine adaptive Optik in Form einer Spiegelmembran erzielt wird. Diese hat allerdings den Nachteil der geringen Variabilität, da es sich zumeist um eine stetige Membran handelt. Ist diese segmentiert, so können diese Membransegmente in ihrer Gesamtform moduliert werden. Die Verspiegelung der Membranen, deren Dauerfestigkeit und die Formstabilität bei Vibrationen sind interessante Herausforderungen für die Zukunft.

Wirkungsgrad- vs. Thermikeinfluss auf die lichtlenkenden Elemente

Ein hoher Wirkungsgrad ist nicht nur als Selbstzweck anzustreben. Vielmehr ermöglicht er einen geringeren Energieeinsatz bei der Lichtstromerzeugung und vereinfacht wesentlich die Energieabfuhr der Verlustwärme bzw. die Reduktion von Energiekonzentrationen im System. Außerdem verringert ein hoher Wirkungsgrad Schwierigkeiten mit temperaturbegrenzten Bauteilen und er erleichtert die Herausforderung eines erhöhten Temperaturumfeldes am Rand des (Kfz-) Motorraums.

Wendelbildlage- und Lichtquellenanforderungen für einen hohen Wirkungsgrad

Neben dem Wirkungsgrad bei jeder Spiegeloptik, insbesondere bei den Lichtstromumverteilenden Konzepten, d.h. dem AMD-, Scanner- und Membranspiegel, ist auf die Lage der Wendelbilder zu achten. Das ist erforderlich, da keine nachgeschaltete Blende (reale Blende oder ein LCD, LCoS- oder DMD-Array) vorhanden ist, welche die auf die Spiegel auftreffenden Wendelbilder beschneiden könnte, und da die Divergenz der abgebildeten Wendelbilder durch die Abbildungen erhalten bleibt bzw. sich vergrößert (vgl. Konservierung bzw. Erhöhung des Etendué im optischen System). Vorteilhaft ist dabei ein möglichst kurzer, scharf begrenzter Lichtbogen mit sehr hoher Leuchtdichte, weil hierdurch die Abbildung und die Lichtstärke der Abbildung vereinfacht bzw. erhöht werden kann.

Wirkungsgrad-Vergleich der im L-LAB aufgebauten aktiven Scheinwerfer-Prototypen

Nachdem die Voraussetzungen für einen hohen Wirkungsgrad erklärt wurden, kann in Tabelle 6.5 die Steigerung des Wirkungsgrades des nutzbaren Lichtstroms und der maximalen Beleuchtungsstärke gegenüber den Ausgangswerten der Video-Projektoren, Tabelle 6.4, abgelesen werden. In der Tabelle 6.5 wurde neben dem LCoS-Scheinwerfer und dem DMD-Scheinwerfer auch der scannende Scheinwerfer in den Vergleich aufgenommen. Da der AMD-Aufbau nur einen ersten Technologie-Demonstrator darstellt, ist dieser in der Tabelle nicht enthalten.

Tabelle 6.5: Lichtleistungswerte der aktiven Scheinwerfer im Vergleich zu konventionellen Projektionsscheinwerfern.

	LCoS-Scheinwerfer	1.DMD-Scheinwerfer (I)	2. DMD-Scheinwerfer (II)	Scannender-Schein-werfer (I)	konventioneller Projektions-Scheinwerfer
Freiheitsgrad	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	mittel	gering
Wirkungsgrad (LB)	<4%	8,2 %	4,6%	30,5 %	37,5 %
Wirkungsgrad (HB)	6,1%	12,6 %	9,8%	30,5 %	56,3 %
Lampenleistung	220 W	220 W	145 W	35 W	35 W
Lampenlichtstrom	22.000 lm	22.000 lm	14.000 lm	3.200 lm	3.200 lm
Abblend-Lichtstrom auf der Straße (LB)	entfällt	1.150 lm	642 lm	910 lm + 66 lm (Scan Anteil)	1.200 lm
Fern-Lichtstrom auf der Straße (HB)	850 lm	1.760 lm	1.370 lm	910 lm + 66 lm	1.800 lm
E_{max}	16 lx (LB)	109 lx (LB)	46 lx (LB)	79 lx (LB)	75 lx (LB)
E_{max}, maximale Beleuchtungsstärke	16 lx (HB)	106 lx (HB)	53 lx (HB)	100 lx (ML) 50 lx (HB)	130 lx (HB)
Kontrast der Schein-werfer-Prototypen	1:13	1:800	1:72	nicht gemessen	1:150
Basiskontrast des Video-Projektors	1:88	1:585	1: 575	nicht definiert	entfällt, da Serie

Tabelle 6.5 zeigt gegenüber Tabelle 6.4, dass insbesondere die nutzbaren Lichtströme und die maximalen Beleuchtungsstärken erheblich gesteigert wurden. Der Wirkungsgrad der DMD-Scheinwerfer konnte ebenfalls deutlich gesteigert werden. Insbesondere der 1. DMD-Scheinwerfer zeigt hohe maximale Beleuchtungsstärken bei sogar noch gesteigertem Kontrast. Der Wirkungsgrad des scannenden Scheinwerfers ist deutlich höher als bei den subtraktiv erzeugten Lichtverteilungen, da dieser auf die „Lichtventile“ des DMD- und LCoS-Scheinwerfers verzichtet. Dadurch fallen auch nicht die Wirkungsgradverluste an diesen „Lichtventilen“ an. Darüber hinaus hat der scannende Scheinwerfer weniger, lichtstromverlustbehaftete, optische Bauelemente. Das Kennzeichen des konstanten, innerhalb der Lichtverteilung umverteilten Lichtstroms wird auch hier für den scannenden Scheinwerfer deutlich. Da die Leuchtdichte der D2R(modifizierten) Lampe deutlich geringer ist als die der UHP-Lampen der DMD- und LCoS-Scheinwerfer, sind die maximalen Beleuchtungsstärken, insbesondere beim Fernlicht deutlich geringer. Das ist auch bedingt durch die geringere Lampenleistung. Der hohe Wirkungsgrad des Projektionssystems wird, bedingt durch die gewünschte Flexibilität in der Formung der Lichtverteilung und der Hell-Dunkel-Grenze, bei

den aktiven Scheinwerfern nicht erreicht werden können, wie auch der vorangegangene Vergleich zwischen DMD-Scheinwerfer und Projektionsmodul gezeigt hat. Insgesamt kann festgestellt werden, dass deutliche Steigerungen im Wirkungsgrad und in der lichttechnischen Leistungsfähigkeit der aktiven Scheinwerfersysteme erzielt werden konnten.

6.5.2 Lichtverteilungen

Stand der Technik zu Hell-Dunkel-Grenzen, zu lichttechnischen Anforderungen und zur Definitionen von Lichtverteilungen

In [8.3, POLLACK, 1998] werden unterschiedliche Verfahren zur Charakterisierung der Lage und Ausprägung der Hell-Dunkel-Grenze vorgestellt. Die Lage der Hell-Dunkel-Grenze und ihre Schärfe werden nach der folgenden Formel ermittelt: $G(a) = \log E(a) - \log E(a + 0{,}1)$ mit $E(a)$ als der Beleuchtungsstärke entlang eines vertikalen Schnittes durch die Hell-Dunkel-Grenze und a als vertikaler Winkel. Das Maximum von G ergibt die Position a der Hell-Dunkel-Grenze. Der Absolutwert a von G ist ein Maß für die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze an der Position a. Zu der Bewertung der Hell-Dunkel-Grenze sind u.a. Arbeiten von [8.3, SCHMIDT-CLAUSEN, 1995] durchgeführt worden.

In der Literatur sind mehrere Arbeiten zu den lichttechnischen Anforderungen an Scheinwerfer bekannt [8.3, DAMASKY, 1995; 8.3, HUHN, 1999].

[8.3, DAMASKY, 1995] zitiert WICHERT, der bereits 1970 den Vorschlag machte, Kfz-Lichtverteilungen in Stadt-, Landstraßen-, Autobahn- und Fernlicht aufzuteilen. Die Reichweite des Abblendlichtes wurde bei Fahrten mit erhöhter Geschwindigkeit als nicht ausreichend erachtet. Zusätzlich ist die Blendung durch Abblendlicht im Stadtverkehr unnötig hoch.

Lichttechnische Forschungsergebnisse zu aktiven Scheinwerferlichtverteilungen

Im Rahmen der Diplomarbeiten von Thomas Müller [8.7, MÜLLER, 2004] und Mario Reinsdorf [8.7, REINSDORF, 2004] wurden Vergleiche der mit den bisherigen aktiven Scheinwerferkonzepten erzielbaren Lichtverteilungen durchgeführt.

In der Diplomarbeit von Mario Reinsdorf [8.7, REINSDORF, 2004] ist eine Ansteuerungsumgebung entstanden, die es erlaubt, die Lichtverteilung des DMD-Scheinwerfers in weiten Grenzen zu variieren. Die maximal mögliche Lichtverteilung stellt dabei die Fernlichtverteilung dar. Mit der Software lassen sich neben dem Funktionsumfang des Gesamtsystems verschiedene Lichtverteilungen, d.h. konventionelle, AFS- und aktive Scheinwerferlichtverteilungen, darstellen. Darüber hinaus kann der Gradient der Hell-Dunkel-Grenze, deren vertikale und horizontale Position und die Variation des Scheinwerfervorfeldes vorgenommen werden. Dazu lassen sich mehrere Vorfeldgradienten einblenden, die es erlauben, die Beeinflussung auf den Fahrer zu untersuchen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte das nur teilweise durchgeführt werden.

Mit Hilfe von Zusatzfunktionen können die Eigenschaften des DMD-Chips, d.h. maximaler Kontrast, Zahl, Lage und Darstellung der Graustufen, mögliche Defektpixel auf der Chipfläche und eine mögliche Beschneidung der Chipfläche, untersucht werden. Als Beschneidung werden dabei Bereiche auf dem DMD-Chip bezeichnet, die mit größeren Defektpixelgruppen oder ganz ausgefallen sein könnten. Die Aufweitung der Toleranzgrenzen erlaubt die Kosten für den Gesamtchip zu senken. Wichtig ist dabei allerdings, dass DMD-Chips mit Defekten keine losen Mikrospiegelelemente enthalten dürfen, da diese die anderen funktionsfähigen Mikrospiegel blockieren könnten.

Die Funktionen der Lichtverteilungen sollen im nächsten Kapitel, zusammen mit ihrer Ansteuerung genauer beschrieben werden.

Mit der Software-Ansteuerungsumgebung ist es möglich, unterschiedliche Vorfelder innerhalb der Lichtverteilung zu untersuchen. Der Verlauf der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit vom Abstrahlwinkel des Scheinwerfers ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Die Breite der Hell-Dunkel-Grenze ist in Abbildung 6.5 und in Abbildung 6.6 zu sehen.

Die adaptiven Scheinwerfer müssen in ihrer Ausleuchtung einen Kompromiss verfolgen zwischen maximaler Erkennbarkeitsentfernung und minimaler Blendung für den Gegenverkehr bzw. markierte Sehobjekte im Verkehrsraum. Eine kurzzeitige Blendung durch eine blinkende Markierung kommt dabei dem Kompromiss aus maximalem Sicherheitsgewinn durch eine gezielte Ausleuchtung des Sehobjektes und der dabei resultierenden, kurzzeitigen, unerwünschten Blendung des markierten Objektes entgegen. Kurzzeitiges Blinken hat dabei eine höhere Attraktivität für das menschliche Auge, sodass die Aufmerksamkeit des Betrachters dorthin gelenkt wird. Die Dauer, Intensität und Frequenz der Markierungslichts gilt es noch zu untersuchen.

Im Rahmen der Diplomarbeit von [8.7, REINSDORF, 2004] ist eine softwaretechnische Ansteuerungsumgebung für einen aktiven Scheinwerfer entstanden, die für erste Probandenbewertungen eingesetzt wurde. Diese erlaubt die in weiten Grenzen freie Programmierung der Lichtverteilung des aktiven Scheinwerfers. Dabei wird der Datenverarbeitungspfad von bisherigen Videoprojektoren verwendet, d.h. das VGA-Bild des Monitors wird über den Videoeingang des Videoprojektors in ein Ansteuersignal des DMD- oder LCoS-Chips umgesetzt. Bei der Ansteuerung der Lichtverteilungen, in einer Auflösung von 1024 x 768 Pixel, wird ein Grauwertebild in 255 Graustufen erzeugt. Die Ansteuerungsumgebung bietet die Variations- und Austeuermöglichkeiten, die in Tabelle 6.6 aufgezählt sind.

Die Ansteuerungssoftware ermöglicht es den Leuchtdichtegradient der Lichtverteilung im Vorfeld des aktiven Scheinwerfer-Kfzs einzustellen. Die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze und dessen Gradient lässt sich ebenfalls variieren. Neben den AFS-Lichtverteilungen und deren Variationsmöglichkeiten in Höhe und Breite der Hell-Dunkel-Grenzen-Anhebung (für das Autobahnlicht) kann innerhalb der Lichtverteilungen eine Displaylicht-Information eingeblendet werden, die sich in Schrift, Form, Lage und Kontrast variieren lässt. Die Markierungs-

lichtfunktion ist ebenfalls darstellbar, wobei Lage, Größe, Kontrast, Zeitdauer und Ausprägung der Markierung (vollflächig oder nur eingerahmt) flexibel einstellbar sind.

DMD-Aufbau – Videoprojektor-Testfunktionen:

Die in der Ansteuersoftware von [8.7, REINSDORF, 2004] umgesetzten Videoprojektor-Testfunktionen bieten folgende weitere Möglichkeiten, siehe auch Tabelle 6.6. Es können alle Mikrospiegel- oder LCoS-Pixelelemente, auf komplett weiß, schwarz, Graustufenverläufe oder Schachbrettmuster zu Kontrastbestimmung gesetzt werden. Zusätzlich lässt sich untersuchen, ob einzelne oder mehrere Defektpixel einzeln oder in Gruppen vom Fahrer unter statischen oder dynamischen Bedingungen nur in lokalen Bereichen oder in der gesamten Lichtverteilung wahrgenommen werden können. Die Abdunklung der oberen Ecken der Lichtverteilung bzw. der unteren Ecken des DMD-Chips ermöglicht festzustellen, ab welcher Defektgröße eine Beeinträchtigung der Ausleuchtung der Fahrbahn und damit einer reduzierte Wahrnehmung des Fahrers festgestellt werden kann.

Tabelle 6.6: Übersicht über die Ansteuermöglichkeiten der aktiven Scheinwerfer-Software

Taste	Licht-funktion	Kennzeichen	Aktive Licht-funktionen	Parameter der Ansteuerung
F1	LB Rechts-verkehr	15° Anstieg	Fahrerspezi-fisches Licht	Wahl des Vorfeldgradienten in Stufen
F2	Autobahn-licht	angehobene zentrale HDG		freie Wahl des Vorfeldgradienten
F3	Fernlicht	keine HDG		freie Wahl der Schärfe der HDG in Bereichen
F4	Stadtlicht	niedrige horizontale HDG		freie Wahl der Neigung des HDG-Anstiegs
F5	LB Links-verkehr	15° Anstieg	Display-funktion	freie Texteingabe
F6	Dyn. Kurvenlicht	softwaretechni-sche Animation		vordefinierte Pfeile, Zahlen und Symbole
F10	Beamertest-funktionen	Test der Beamer-Ansteuerung	Markierungs-funktion	unterschiedliche Lage und Größe der definierten Markierungsfunktion
				Pulsfrequenz der Markierung
	Verschieben der HDG in der Höhe	Verschieben der Displayposition in Höhe + Breite	Beamertest-funktionen	Defektpixelgröße und Positionswahl
	Verschieben der HDG teils seitlich	Daten Import, Export der Parameter		Wahl der Größe des oberen Beschnitts der Lichtverteilung

Untersuchungen zur Hell-Dunkel-Grenze und deren Schärfe

Bei der Ansteuerungssoftware und deren Lichtfunktionen orientiert sich die Lage und die Position der Hell-Dunkel-Grenzen an denen von bisherigen und zukünftigen AFS-Lichtfunktionen. Die Lichtverteilungen, der Vorfeldgradient und der Gradient der Hell-Dunkel-Grenze wurden beide in vertikaler Richtung bestimmt und mit dem von zukünftigen Vario-Xenon-Systemen verglichen. Beispiele für mögliche Gradientenverläufe werden in Abbildung 6.4 gegeben.

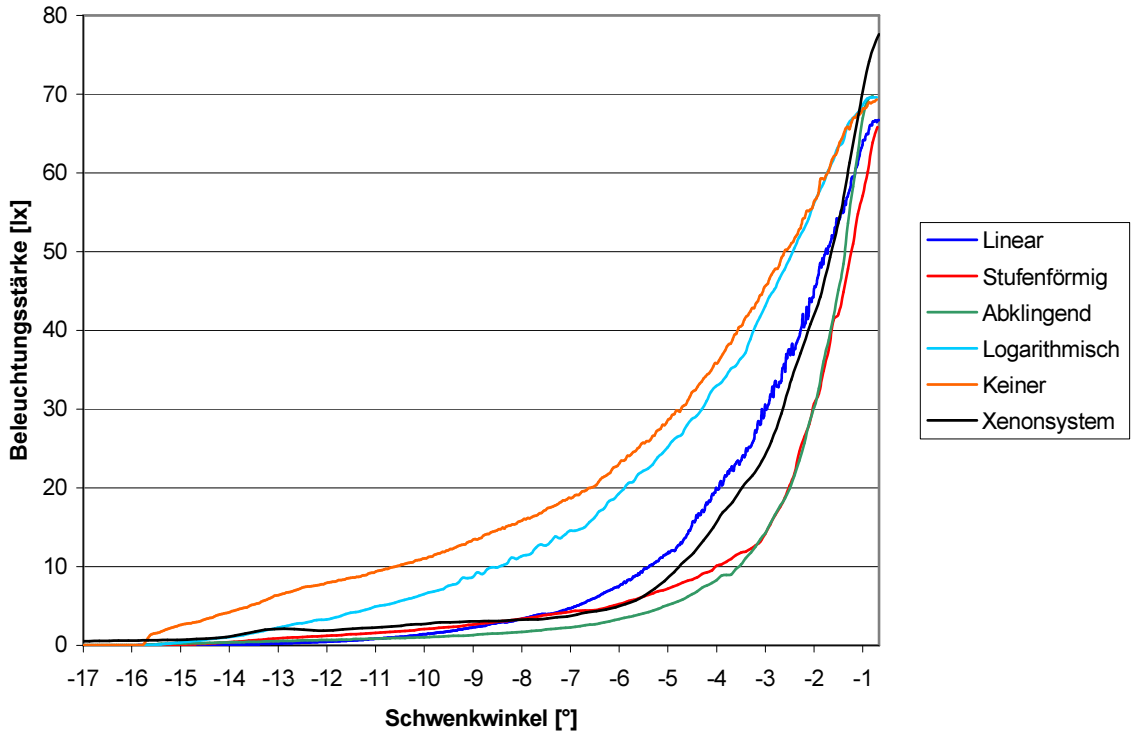


Abbildung 6.4: Gradientenverlauf des Scheinwerfervorfeldes [8.7, REINSDORF, 2004]

In Abbildung 6.4 wird deutlich in welchen weiten Grenzen der Beleuchtungsstärkegradient mit dem DMD-Scheinwerfer (1. Prototyp) variiert werden kann. Das Xenonsystem dient dabei als Referenz für bisherige Scheinwerfersysteme. Der Schwenkwinkel stellt dabei den vertikalen Winkel des aktiven DMD-Scheinwerfers auf einem Photogoniometers dar, der für einen vertikalen Schnitt durch eine Beleuchtungsstärkemessung in 25m Entfernung entsprechend geneigt wurde. Abbildung 6.5 zeigt die Möglichkeiten der variierten Steilheit des Hell-Dunkel-Gradienten auf. Dessen Steigung kann maximal sein bei einem Übergang von einem hellen, weißen Bildpunkt zu einem schwarzen Bildpunkt (1 Pixel). Eine sehr weiche Hell-Dunkel-Grenze wird mit 40 Pixeln Breite des Graustufenübergangs erzielt. Heutige Xenon-Projektions-systeme haben eine Hell-Dunkel-Grenzen-„Breite“ von ca. 25 Pixeln. Abbildung 6.6 stellt die Lage der Hell-Dunkel-Grenze, bestimmt nach dem ATN-Verfahren dar [8.3, POLLACK, 1998]. In Tabelle 6.7 sind die jeweiligen Zahlenwerte des ATN-Verfahrens aufgetragen.

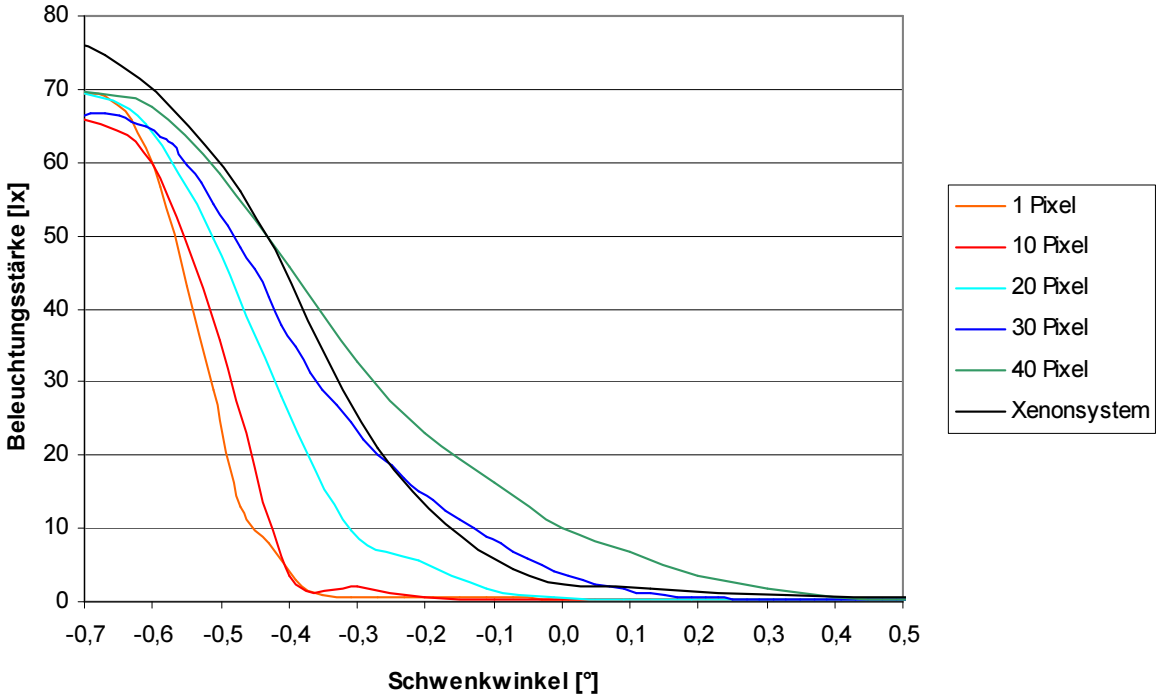


Abbildung 6.5: Gradientenverlauf der Hell-Dunkel-Grenze [8.7, REINSDORF, 2004]

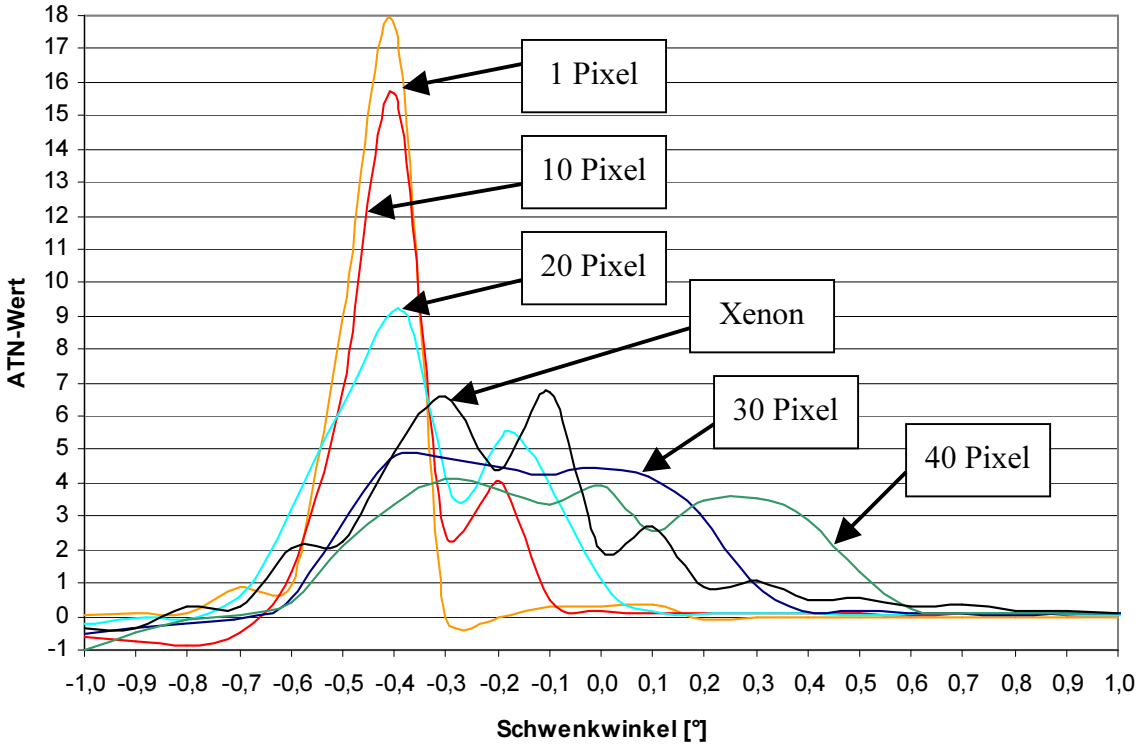


Abbildung 6.6.: Lage der Hell-Dunkel-Grenze und ATN-Werte in Abhängigkeit von der Pixelzahl der HDG [8.7, REINSDORF, 2004]

Tabelle 6.7: ATN-Werte für die gemessenenen Hell-Dunkel-Grenzen [8.7, REINSDORF, 2004]

Anzahl der Pixel	Maximalwert der ATN	Winkelposition [°]
1	17,757	-0,41
10	15,635	-0,40
20	9,148	-0,39
30	4,783	-0,36
40	4,099	-0,29
Xenonsystem	6,701	-0,30

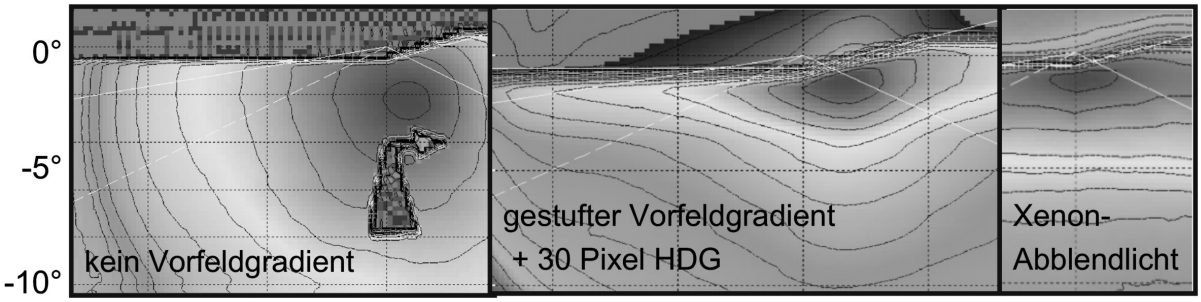
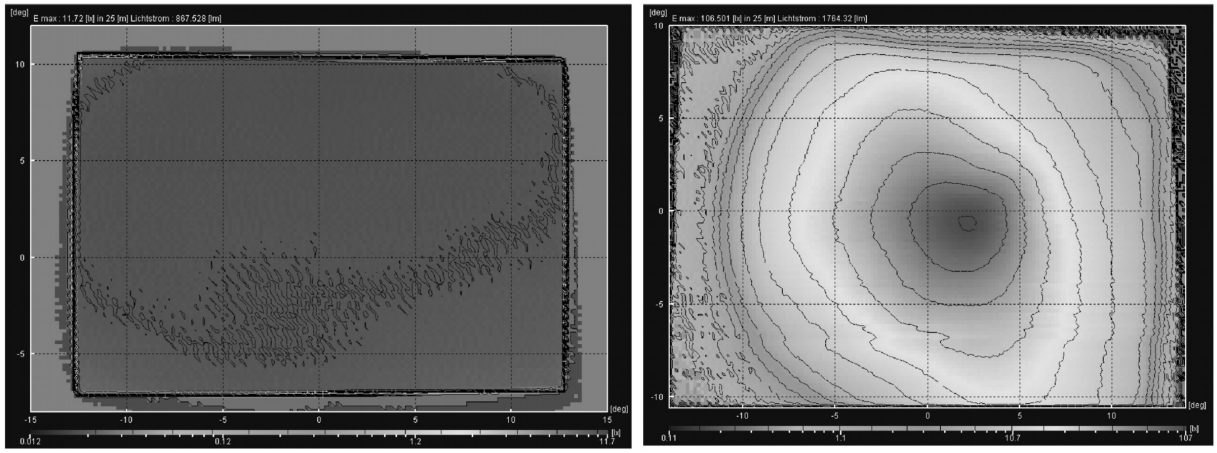


Abbildung 6.7: Vergleich der Lichtverteilungen, scharfe HDG mit Displaypfeil und weicher HDG mit dunklem, linearen Vorfeld. Vergleich mit einer konventionellen Abblendlichtverteilung als Falschfarbendarstellung [a.u.]



Emax = 11,7 lx Φ = 867 lm **Emax > 100 lx Φ > 1700 lm**

Abbildung 6.8: Vergleich der Lichtverteilungen Ausgangs-Video-Projektor mit homogener Lichtverteilung und der modifizierten Fernlichtverteilung des aktiven Scheinwerfers

In Abbildung 6.7 werden die 2 DMD-Lichtverteilungen mit unterschiedlich scharfer Hell-Dunkel-Grenze und unterschiedlich starkem Vorfeld-Gradienten einer konventionellen Xenon-Lichtverteilung gegenübergestellt. Deutlich zu sehen ist die Variabilität der DMD-

Lichtverteilung. In Abbildung 6.8 werden die Lichtverteilungen eines DMD-Video-Projektors mit der modifizierten Fernlichtverteilung des aktiven DMD-Scheinwerfers verglichen, wobei dieselbe UHP-Lampe, dasselbe Auskoppelobjektiv eingesetzt und derselbe Öffnungswinkel der Lichtverteilung verwendet wurde. Dieser Vergleich verdeutlicht den massiven Unterschied zwischen einer Lichtverteilung eines konventionellen DMD-Videoprojektors und der aktiven DMD-Lichtverteilung, wobei dieselbe technologische Basis verwendet wurde.

Neben dem Einsatz des aktiven DMD-Scheinwerfers in der Großserie kann dieser auch als Entwicklungswerkzeug („Pixel-Light-Distribution-Rapid-Prototyping-Tool“) eingesetzt werden. Mögliche Einsatzfelder sollen hier exemplarisch aufgezählt werden:

1. Definition der Anforderungen für zukünftige Scheinwerferentwicklungen unter statischen und dynamischen Bedingungen

2. Definition der Markierungsfunktion (Lage, Intensität, Dauer, Kontrast, Gradient am Rand, evtl. Lichtfarbe)

3. Definition der Displayfunktion (positiver oder negativer Kontrast, Verzerrung, Größe und Lage der Darstellung, Art der Information etc.; Untersuchung bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen, Akzeptanzuntersuchungen des Fahrers, entgegenkommender Fahrer, Risikokompensation etc.; Definition der Lage und Größe der Fahrerinformation für Head-up-Displays mit einfachen Mitteln des aktiven Scheinwerfers)

4. Definition der fahrerspezifischen Ausleuchtung für maximalen Fahrkomfort, für minimale Eigen- und Fremdblendung und maximale Erkennbarkeitsentfernung

5. Definition der straßensituationsabhängigen Lichtverteilungen, z.B. der Ausleuchtung in Abhängigkeit vom Fahrbahnverlauf (nicht nur Kurven) oder der Topologie (vertikale Straßenkrümmung)

6. Definition der verkehrssituationsabhängigen Lichtverteilungen, z.B. der kollektiven Ausleuchtung, über Winkelbereich, Lichtstärken, zeitliche und räumliche Konstanz

7. Definition der Geschwindigkeit und des Verstellwegs der Leuchtweitenregelung. Zusätzlich können auch die Geschwindigkeit und in Grenzen der Verstellweg des dynamischen Kurvenlichts untersucht werden.

8. Validierung von verschiedenen vermessenen Lichtverteilungen existierender Scheinwerfer, wobei diese identisch mit dem aktiven DMD-Scheinwerfer nachmoduliert werden, um per Software sekundenschnell von der Lichtverteilung eines ersten Scheinwerfers auf eine andere Lichtverteilung eines zweiten Scheinwerfers umzuschalten, damit die beiden Lichtverteilungen im Paar-Vergleich miteinander verglichen und bewertet werden können.

9. Mit dem aktiven DMD-Scheinwerfer lassen sich sehr einfach Untersuchungen zur Erkennbarkeitsentfernung von Scheinwerfern und den benötigten Erfordernissen an die Lichtverteilung vornehmen, wobei Änderungen per Software möglich sind. Ebenfalls

lassen sich mit dem Scheinwerfer Blendungsuntersuchungen vornehmen, wobei die Lichtverteilung und die Lichtstärke in weiten Grenzen variiert werden kann.

Bei der Ansteuerungsumgebung des Beamer-Scheinwerfers sind, wie schon erwähnt, nur insgesamt 255 Graustufen möglich. Dieses Graustufenbild wird mit dem Lichtstärkegradienten der Fernlichtverteilung des Beamer-Scheinwerfers überlagert, sodass insgesamt eine Dynamik von deutlich mehr als 255 Lichtstärkewerten erzielt wird. Dabei entspricht derselben Graustufe bzw. demselben Weiß-Farbton, je nach Lage innerhalb der Einkoppellichtverteilung bzw. auf dem DMD-Chip, einem Lichtstärkeanteil (Graustufe, pulsweitenmodulierte Dunkeltastung) oder dessen Maximallichtstärke (Weiß, keine Dunkeltastung). Durch die Einkoppeloptik wird für den Kfz-Einsatz gezielt eine inhomogen Lichtverteilung geformt, bei der derselben Graustufe, je nach Position innerhalb der Lichtverteilung, eine andere Lichtstärke zugeordnet wird. D.h. innerhalb einer homogenen Lichtverteilung bedeutet eine Graustufe einen anderen Lichtstärkewert, als das bei der Zuordnung derselben Graustufe zu einer inhomogenen Lichtstärkeverteilung, unterschiedlich je nach Lage auf dem DMD-Chip, der Fall ist. Bei der Kombination der Softwareumgebung mit der vorgeformten Lichtverteilung wird eine relative Abstufung in 255 Stufen vorgenommen, wobei deren Spreizung je nach LSV-Position unterschiedlich ist. Mathematisch wird dabei eine Faltung des Graustufenbildes mit der Lichtstärkeverteilung der Einkoppeloptik auf dem DMD-Chip vorgenommen.

Die maximale Lichtstärke und die maximale Breite der Fernlichtverteilung kann bei einer softwaretechnischen Ansteuerung nicht überschritten werden, da eine subtraktive Art der Lichtverteilungserzeugung bei dem DMD- und dem LCoS-Scheinwerfer vorliegt. Die maximale Lichtstärke wird durch den Fokussierungsgrad der Einkoppeloptik, den Gradienten und die Lichtstärkeverteilung innerhalb der Einkopplung beeinflusst. Die maximale Streubreite der Lichtverteilung wird durch die Auskoppeloptik und deren Öffnungswinkel, Abbildungsmaßstab und Apertur bestimmt. Die Auskoppeloptik hat dabei stets die Funktion der Abbildung des DMD- und LCoS-Chips auf die Straße. Da die Aspektverhältnisse der DMD- und LCoS-Chips meistens 4:3 sind, die Straßenausleuchtung jedoch ein Verhältnis von z.B. 9:2 erfordert, muss zur Anpassung eine Zylinderlinsen-Abbildungsoptik vorgesehen werden. Diese Zylinderlinsenoptik hat allerdings die Folge der „Verschmierung“ von Lichtstärkeintensitäten, sodass die maximal mögliche ausgekoppelte Lichtstärke absinkt. Eine Verzerrung in der Abbildung und mögliches Streulicht können weitere Folgen dieser Art der Auskopplung sein. Um die Lichtstromeffizienz innerhalb des optischen Systems möglichst hoch zu halten, ist eine Anpassung der Strahlengänge zwischen der Einkopplung und der Auskopplung notwendig. Das geschieht über eine Feldlinse, die in der Nähe des DMD-Chips angeordnet ist. Damit wird ein möglichst geringes Absinken des Etendué bzw. des geometrischen Flusses innerhalb des optischen Systems angestrebt.

Die Tiefenschärfe der Scheinwerfer stellt in der Anwendung soweit kein Problem dar, da dieser so eingestellt wird, dass die Hell-Dunkel-Grenze in einem Bereich zwischen 10m bzw. 25m Entfernung und insbesondere die im Vorfeld dargestellte Information scharf auf der Fahrbahn abgebildet werden.

Der sehr flache Lichteinfall des aktiven Scheinwerfers ist auch Kennzeichen der bisherigen konventionellen Scheinwerferlichttechnik. Ein annähernd senkrechter Lichteinfall oder eine schräge Beleuchtung der Fahrbahn wie bei einer stationären Straßenbeleuchtung wäre von Vorteil, ist allerdings bei dynamisch bewegten Verkehrsteilnehmern unter geometrischen und unter aerodynamischen Bedingungen nicht möglich.

6.6 Lichtfunktionsanalyse

Grafik der Hauptlichtfunktionen / „Bausteine der Lichtfunktionalitäten“

↑ steigende Adaptivität / Aktivität der Lichtfunktionen

Schritte der Licht-funktionen	Klassen / Lichtfunktionsbausteine				
Aktiver Scheinwerfer High-end-Lösung	Markierendes Licht	Verkehrssituationsab-hängiges Licht („blend-freies Fernlicht“)	Kommunikations-funktion		
Aktiver Scheinwerfer Economy-Lösung	Fahrerspezifisches Licht	Straßensituations-abhängiges Licht	Display-Lichtfunktion		
AFS-Lichtfunktionen (ab 2006)	Stadtlicht	Autobahnlicht	Schlechtwetter-licht	Landstraßenlicht	
„Pre-AFS“-Licht-funktionen (seit 2003)	statisches Kurvenlicht	dynamisches Kurvenlicht			
Basislichtfunktionen	Abblendlicht	Fernlicht	Positionslicht	Tagfahrlicht	Nebellicht

Abbildung 6.10: „Bausteine der Scheinwerferlichtfunktionen“

In Abbildung 6.10 werden die „Bausteine der Scheinwerferlichtfunktionalitäten“ dargestellt. Angefangen vom „Fundament“, gebildet durch bisherige Scheinwerferlichtfunktionen, wird, durch die Erweiterung bestehender Gesetzgebung und die Erarbeitung neuer Zulassungsvorschriften, es möglich, weitere Lichtfunktionen hinzuzufügen bzw. aufzusetzen. Neben den „Pre-AFS“- und AFS-Lichtfunktionen könnte es z.B. zwei Ausbaustufen der aktiven Scheinwerferfunktionen geben. Eine Economy-Lösung und eine High-end-Lösung. Mit wachsender Anzahl an Bausteinen der Lichtfunktionen kommt man dem Ziel einer optimalen Ausleuchtung des Verkehrsraums bei minimaler Blendung anderer Verkehrsteilnehmer stetig näher.

Die aktiven Scheinwerferlichtfunktionen werden hier im Anschluss in ihrer Lichtfunktion beschrieben und analysiert.

Fahrerspezifisches Licht

Die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze am horizontalen Ast, die Schärfe der HDG am 15° Anstieg und die Leuchtdichteverteilung des Lichtverteilungs-Vorfeldes, die Betonung der eigenen Verkehrsraumausleuchtung, die Betonung der Randausleuchtung, eine Variation der Breite der Ausleuchtung, das Maß der Gleichmäßigkeit der Helligkeit, die örtliche Homogenität, die zeitliche Homogenität im Begegnungsverkehr oder bei Tunnelein- und Ausfahrten, allgemein das Gesamterscheinungsbild der Lichtverteilung kann über die fahrerspezifischen Lichtfunktionen variiert werden. Erste Ergebnisse der Bewertung der fahrerspezifischen Lichtverteilungen sind in [8.7, REINSDORF, 2004] nachzulesen. Dennoch sind hier in Zukunft noch weitere Untersuchungen in einem statischen und dynamischen Umfeld erforderlich.

Situationsabhängiges Licht

Die bisherigen Scheinwerferlichtverteilungen (Abblendlicht, Fernlicht, Nebellicht), die „Pre-AFS“-Lichtverteilungen (statisches und dynamisches Kurvenlicht), die AFS-Lichtverteilungen (Autobahnlicht, Landstraßenlicht, Stadtlicht, Schlechtwetterlicht), die dynamische Leuchtweitenregelung und ihre Erweiterung zum Berg- und Talfahrlicht sind in Kapitel 6.1.1 vorgestellt worden, ebenso die kollektive Verkehrsraumausleuchtung.

Markierendes Licht

Markieren kann von einzelnen Objekten oder von mehreren Objekten erfolgen. Dabei lässt sich die Form der Markierung variieren. Die Begrenzung der Markierung im Vergleich zum Umfeld erfolgt scharf in hohem Kontrast. Das Markieren kann durch ein gezieltes Beleuchten (positiver Kontrast) oder durch ein gezieltes Abschatten (negativer Kontrast) oder durch Blinken (variierende Leuchtdichte bzw. Leuchtdichtesprünge in der Übergangszone der Tarnung) umgesetzt werden.

Bei der Markierungsfunktion ist eine sehr gute Sensorik erforderlich, die besser sehen und auswerten kann als der Mensch. Dadurch wird der Nutzen durch eine gezielte Markierung und Anleuchtung und damit der erzielbare Sichtweite- und Verkehrssicherheitsgewinn maximiert. Die Latenzzeit der Sensorobjekterkennung, die Auswertung und Ansteuerung der Scheinwerfereinheit muss möglichst kurz sein, damit eine Verkürzung des Anhalteweges durch eine reduzierte Reaktionszeit und eine frühzeitige Reaktion auf Gefahrensituationen erfolgen kann. Für eine Klassifizierung der Objekte ist es erforderlich, eine Unterscheidung vorzunehmen zwischen relevanten und irrelevanten Sehobjekten. Ein zu häufiger Fehlalarm verärgert den Fahrer und lässt an der Zuverlässigkeit des Systems zweifeln, wodurch eine verspätete Reaktion des Fahrers mit fatalen Unfallfolgen die Konsequenz sein kann. Die rechtlichen Fragen und eine gesetzliche, potentielle Schadensabsicherung, insbesondere für den US-Markt ist dabei unerlässlich. Unterscheidungskriterium für die Relevanz von Sehobjekten kann deren Lage relativ zur eigenen Fahrspur, sowie die eigene Fahrzeugbewegungstrajektorie und gleichzeitig die Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeit und Relativrichtung der Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer sein. Stehende Objekte oder Objekte mit einer

geringeren negativen bzw. einer positiven Relativgeschwindigkeitsdifferenz zum eigenen Fahrzeug (Objekte sind etwas langsamer oder schneller als man selbst) werden nicht markiert. Insbesondere von Objekten, die stehen (verlorene Ladung, Felsbrocken, umgestürzte Bäume etc.) oder eine hohe negative Geschwindigkeitsdifferenz zum eignen Fahrzeug haben (auf der Autobahn, in Nebelsituationen, Fahrradfahrer und Fußgänger am Fahrbahnrand, etc.) oder die eigene Fahrzeugtrajektorie annähernd zeitgleich in naher Zukunft schneiden (Kreuzungen, spielende Kinder, unaufmerksame Fahrradfahrer etc.) sind von der fahrzeugeigenen Sensorik zu detektieren und möglichst schnell zu markieren.

Displaylicht

Bei der Displayfunktion kann die Darstellungsart der Objekte (Pfeile, Buchstaben, Text), deren Ort und Lage, Kontrast und Ablesbarkeit untersucht werden.

Die dargestellte Displayfunktion kann in positivem und in negativem Kontrast dargestellt werden. Alternativ sind auch ein Blinken relativ zum Umfeld oder zwischen der maximalen und minimalen Intensität möglich. Je nach verwendetem Vorfeldgradienten kann eine Darstellung in positivem oder in negativem Kontrast sinnvoll sein. Bei positivem Kontrast, d.h. heller Schrift innerhalb eines dunkleren Umfelds, können keine Objekte durch die sonst erforderliche lokale Dunkeltastung verdeckt werden. Im Normalfall der Darstellung ist eine lokale Dunkeltastung eigentlich von untergeordneter Gefahr bezüglich des Verdeckens, da das Fahrzeug sich im Normalfall relativ zur Fahrbahnoberfläche bewegt, sodass statische Objekte oder Objekte mit einer geringen Absolutgeschwindigkeit nur kurzzeitig verdeckt werden. In der Kombination des DMD-Scheinwerfers mit konventionellen Scheinwerfern ist auch ein positiver Kontrast zu empfehlen, da dieser besser ablesbar ist. Der negative Kontrast in der Displaydarstellung hat auch den Nachteil, dass sich der Fahrer aufgrund eines relativ hellen Vorfeldes an eine erhöhte Adaptationsleuchtdichte anpasst.

Die Displayfunktion ist auch abhängig von den Eigenschaften der Projektionsfläche, d.h. dem Reflexionsgrad der Fahrbahnoberfläche. Je nach Einstrahlwinkel des eigenen Lichtes wird es unterschiedlich gut an den Flanken der Körnung der Asphaltdecke zurückgeworfen oder an einer annähernd diffus streuenden Betonschicht reflektiert. Dadurch ist auch zu erklären, warum die Displayfunktion bei Nacht so gut sichtbar ist (u.a. auch wegen der geringen Umfeldhelligkeit durch die Sterne und den Mond). Bei einer Straßenbeleuchtung wird der Kontrast reduziert, da Teile des annähernd senkrecht oder unter relativ großen Winkeln einfallenden Lichtes der Straßenlaternen auch in Richtung des Fahrers reflektiert werden und so zu einer Kontrastverflachung der dunkel dargestellten Information durch eine erhöhte Objektleuchtdichte (bei negativem Kontrast) führen. Bei Gegenverkehr wird das Licht des entgegenkommenden Fahrzeugs eher zu diesem zurückreflektiert, wenn es sich um eine trockene, nicht glänzende Fahrbahnprobe handelt.

Bei sehr schlechtem Wetter, d.h. bei einem geschlossenen Wasserfilm auf der Fahrbahn, ist die Information nicht mehr sichtbar, da praktisch das gesamt Licht der Displaydarstellung vom eigenen Fahrzeug wegreflektiert wird, und evtl. in die Augen des entgegenkommenden

Fahrers trifft. Dieser Effekt tritt bei diesen Witterungsbedingungen allerdings auch bei konventionellen Scheinwerfern auf.

Bei hohen Umfeldhelligkeiten, d.h. bei Tag- und Dämmerungssituationen, ist die Displayfunktion ebenfalls nicht ablesbar, da die Umfeldhelligkeit zu groß ist und die Lichtstärke des Scheinwerfers nicht ausreicht, um einen erkennbaren positiven (helles Objekt) oder negativen Kontrast (aufgehelltes Umfeld) darstellen zu können. Daher sind Displays innerhalb des Fahrzeugs in den Ausführungsformen Head-up- oder Head-down-Display wenigstens für die Tagfahrten erforderlich.

Vorteile der bei Nacht mit dem aktiven Scheinwerfer erzeugten Displayfunktion sind neben dem größeren Gesichts- und Darstellungsfeld, der fast identischen Blickrichtung zwischen normaler Sehaufgabe und der Darstellung der Displayinformationen geringe Adaptations- und Akkommodationserfordernisse und eine minimale Ablenkung des Fahrers durch die Informationsflut auf den Cockpit-Displays. Dadurch können der Fahrkomfort und die Verkehrssicherheit erheblich gesteigert werden.

6.7 Vergleich mit Konkurrenztechnologien – Head-up-Display

Beim Head-up Display von BMW schwebt eine virtuelles Bild in einer Projektionsentfernung von ca. 2,20m vor dem Fahrer, wobei die projizierte Bildgröße ca. 180 x 90 mm² (Breite x Höhe) beträgt [8.2, GUNNAR, 2004]. Die Baugröße des Projektors ist mit 28 x 18 x 18 cm³ relativ groß, da der Strahlengang mehrfach gefaltet werden muss, um die gewünschte Projektionsentfernung zwischen Betrachter und LCD-Display zu erzielen. Als Display wird ein transmittives Low-Temperature-p-Si-TFT-Farb-LCD mit 360 x 180 Bildpunkten und einer 1,6 Zoll-Diagonale eingesetzt. Das LC-Display wird mit einem Array von 128 LEDs hinterleuchtet. Diese werden in Abhängigkeit von einem Vorfeldsensor und dessen detektierter HUD-Hintergrund-Bildhelligkeit in ihrer Leuchtdichte automatisch nachgeregelt. Die Maximalhelligkeit des HUD-Displays wird mit ca. 7000 cd/m² (für die Standardfarbe gelb) angegeben und ist damit für fast alle existierenden Lichtbedingungen ausreichend. Als Farben werden gelb, orange, grün und rot dargestellt. Über 3 asphärische Spiegel wird die Wölbung der Windschutzscheibe ausgeglichen, sodass der Betrachter ein verzerrungsfreies Bild wahrnehmen kann. Die Vorteile des HUD werden mit einem ca. auf ein Drittel reduzierten Blickwinkel von dem vorausfahrenden Fahrzeug auf eine konventionelle Instrumententafel angegeben. Die Akkommodierung des Auges (Fokussieren des Auges) ist wesentlich geringer, da das HUD-Bild in 2,2m Entfernung vom Betrachter steht. Die Adaptierung des Auges (Anpassung der Augenempfindlichkeit auf die Bildhelligkeit) ist wesentlich geringer, da die Bildhelligkeit des HUD nachgeregelt wird und der Helligkeitsunterschied zwischen der relativ hellen Fahrbahn und dem relativ dunklen Armaturenbrett entfällt. Diese ergonomischen Vorteile werden mit einer reduzierten Ablesezeit von 2s auf 1s im Vergleich zu konventionellen Instrumenten angegeben. Das entspricht ca. 17m zurückgelegte Distanz bei 60km/h Fahrtgeschwindigkeit. Die Fahrsicherheit und der Fahrkomfort können durch das System entsprechend gesteigert werden. Gegenüber dem HUD hat der aktive Scheinwerfer mit seiner Displayfunktion folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile:

1. Sehr großes Bildfeld möglich.
2. Zusatzlichtfunktion der aktiven Scheinwerfer ohne weitere Hardware.
3. Es ist kein Bauraum im Fahrzeugarmaturenbrett vorzusehen.
4. Die Akkommodierung und Adaptierung des Fahrers ist ideal auf Fernsicht und die Fahrbahnhelligkeit eingestellt. Ein Abwenden des Blickes von der Fahrbahn ist nicht mehr erforderlich, da alle wesentlichen Informationen in der Lichtverteilung dargestellt werden.
5. Die dargestellten Informationen sind auch bei Gegenverkehr und in gewissen Grenzen bei allgemeiner Straßenbeleuchtung gut zu erkennen.
6. Die dargestellte Information muss nicht aufwändig optisch korrigiert werden, um verzerrungsfrei über die Windschutzscheibe dargestellt werden zu können.
7. Verkehrsobjekte werden durch die dargestellte Information nicht verdeckt, da diese direkt auf der Fahrbahnoberfläche bzw. dem Objekt dargestellt wird.
8. Es treten keine Parallaxe-Fehler auf und der Fahrer kann unter keinen Umständen das Darstellungsfeld der Displayfunktion verlassen.

Nachteile:

1. Die gesetzliche Zulassungsfähigkeit der Displayfunktion ist als kritisch einzustufen, da durch sie andere Verkehrsteilnehmer wegen der auf die Straße projizierte Information abgelenkt werden könnten (Kreuzungssituation, Missbrauch als Fernseh- / Internet-Projektionsfläche)
2. Die Displayfunktion ist auf Nacht- und Dämmerungsfahrten beschränkt, da sonst der zur Ablesung der Information erforderliche Kontrast durch die aktiven Scheinwerfer nicht erzeugt werden kann.
3. Die Displayfunktion ist bei Regenfahrten, insbesondere bei geschlossenen Wasserfilmen, Einschränkungen unterworfen, da das Scheinwerferlicht auf dem Wasserfilm totalreflektiert und vom Fahrer weggelenkt wird und daher nicht oder kaum ablesbar ist
4. Die Displayfunktion variiert in ihrer dargestellten Bildhelligkeit je nach Fahrbahnbelagfarbe und –Rauhigkeit (grob gilt: je rauer, desto besser ist die Rückreflexion)

Eine genauere Betrachtung der Displayfunktion ist in [8.8, KAUSCHKE 2003-8] nachzulesen.

6.8 Temperaturuntersuchungen der Konzepte

Bei den aktiven Scheinwerfern sind thermische Randbedingungen einzuhalten. Neben den Kurzbogenlampen, d.h. UHP-Lampen, Ultra High Performance-Lampen, sind die „Lichtventile“ bei subtraktiven Lichtverteilungserzeugungsarten temperaturkritische Bauteile.

Bei den UHP-Lampen muss durch die Umgebungstemperatur neben dem Lampenkolben und der Elektrodenenden auch der an den Lampenkolben gekittete Reflektor gekühlt werden. Die Temperatur des Lampenkolbens hat maßgeblichen Einfluss auf den in weiten Grenzen variierenden Lampenkolbenfülldruck und das Kalt- bzw. Warm-Zündverhalten der UHP-Lampe. Kritisch ist das Warm-Zündverhalten von UHP-Lampen, bei denen durch eine Zusatzspule freie Elektronen von der Kathode zur Anode gelenkt werden, damit ein Lichtbogen gezündet werden kann. Innerhalb des Lampenkolbens muss ein thermodynamischer Kreisprozess stattfinden, damit die Schwärzung des Lampenkolbens minimal gehalten und der Elektrodenabtrag ebenfalls gering gestaltet werden kann. Da die Elektroden nahe an ihrem Schmelzpunkt betrieben werden, hat die Einhaltung der Lampenumgebungstemperatur einen positiven Einfluss auf die Lebensdauer der Lampe. Die Lampenzündungen sind eher schädlich für die Lebensdauer der Lampe, da diese zu einem Elektodenabtrag führen.

Bei den „Lichtventilen“ DMD-Array, LCoS-Array bzw. LCD-Array muss ein Teil der zugeführten Lichtleistung abgeführt werden, da das Licht in den Spiegel-Arrayspalten des DMD- und des LCoS-Arrays absorbiert und in Wärme gewandelt wird. Das LCoS-Array ist thermisch günstiger, da es einen höheren Flächennutzungsgrad (Ansteuerelektronik und Zuleitungen liegen hinter den Spiegelelektroden) als ein LCD-Display hat und den Lichtstrom dunkelgeschalteter Pixel nicht absorbiert, sondern in den Einkoppelstrahlengang zurückreflektiert. Bei allen Lichtventilen ist ein geringer Wärmeübergangskoeffizient vom Array zum Gehäuse bzw. zur umgebenden Luft wünschenswert, damit die Array-Temperatur unter 65°C gehalten werden kann. Insbesondere beim DMD-Array kann dessen Lebensdauer bei erhöhter Temperatur und ungünstig gewähltem Duty Cycle, d.h. Hell- bzw. Dunkeltastung, negativ beeinflusst werden, da dann die Torsionsgelenke der Mikrospiegel sich dauerhaft verformen können [8.2, TI, 2001-2]. Durch Temperaturmessungen in den als Ausgangsprodukten dienenden Videoprojektoren und in den aufgebauten Versuchsträgern wurde sichergestellt, dass die Soll-Betriebstemperatur der Lichtventile möglichst nicht überschritten wird. Die Temperaturmessungen im Betrieb und bei den Versuchsträgern erfolgt mit Temperatursensoren vom Typ K (NiCr-Ni). In der Nähe der UHP-Lampe wurden Temperaturen von ca. 160°C gemessen. Um genauere Aussagen über die Verteilung der Temperatur im Versuchsaufbau zu erhalten, wurde eine Thermografie-Kamera im kurzwelligen Infrarot-Bereich eingesetzt. Teile der Temperatur-Messung sind in Abbildung 6.11 zu sehen. Nachteil der Kurzwellen-Infrarot-Thermografie-Kamera ist die Erfassung der Temperatur nur auf der Außenseite des verglasten DMD-Chips, der in einer Schutzgasatmosphäre betrieben wird, da das Glasfenster für kurzwellige Infrarotstrahlung nicht transmittiv ist. Dadurch ist nur eine Temperaturaussage über die Oberfläche des DMD-Chip-Gehäuses möglich. Die DMD-Chip Temperatur im Innern wäre interessant gewesen, da in den aktiven Scheinwerferversuchsträgern gezielt mit einer inhomogenen Ausleuchtung gearbeitet wurde, wobei einer der Brennpunkte des optischen Systems nahe der DMD-Chip-Oberfläche gelegt wurde, damit die erforderlichen hohen Leuchtdichten auf dieser für die weitere optische Abbildung erzielt werden konnten. Daher wurden in den Versuchsaufbauten relative, indirekte Temperaturaussagen zu handelsüblichen, seriendimensionierten und praxiserprobten Original-Videoprojektoren herangezo-

gen, um die temperaturkritischen Komponenten des Versuchsaufbaus nicht zu schädigen, zu überlasten bzw. nicht außerhalb der spezifizierten Grenztemperatur zu betreiben. Neben der IR-Strahlungs-Undurchlässigkeit des Glasfensters des DMD-Chips ist das Glasfenster interferenzbeschichtet, sodass auch UV-Strahlung nicht auf den DMD-Chip gelangen kann, wodurch dessen Lebensdauer erhöht und dessen thermische Belastung reduziert wird. Zusätzlich zum Temperaturmanagement im Versuchsaufbau musste der Wärmeaustausch zur Umgebungsluft des Scheinwerfers gewährleistet sein, damit es zu keinem Wärmestau oder einer Überhitzung kam. Feuchtigkeits- und Partikeleintrag ist bei den Kühlluftströmen dabei zu vermeiden. Außer dem DMD-Array stellen die UHP-Lampe, das LCoS- bzw. LCD-Array, das AMD-Array, aber auch die Scannermotoren temperaturempfindliche Bauelemente dar.

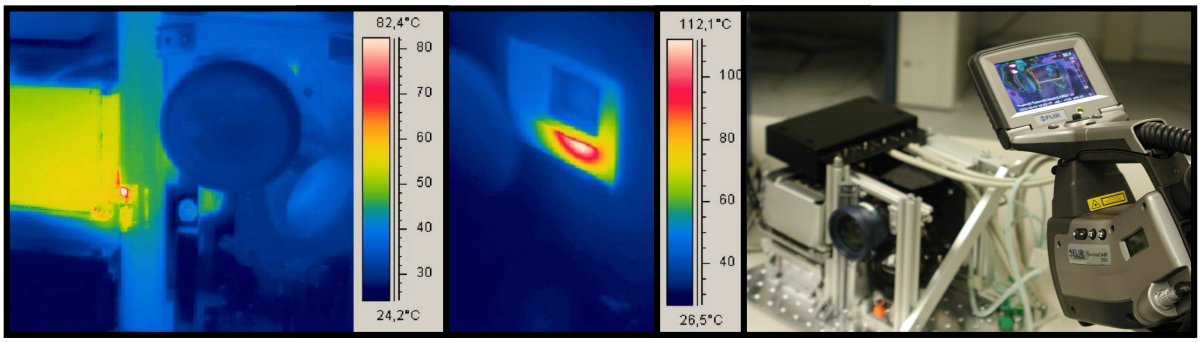


Abbildung 6.11: Aufnahme der UHP-Lampe und der Temperaturverteilung auf dessen Gehäuse bzw. im Gesamtaufbau; Mitte: Umfeld des DMD-Arrays

6.9 Vibrationsanalyse des DMD-Scheinwerferkonzepts

Aus der Literatur [8.2, TI, 2001-1], [8.2, TI, 2001-2] sind Vibrationsuntersuchungen bekannt. Dabei werden die Mikrospiegel, bedingt durch ihre geringe Masse, auch gegen mechanische Schockbelastungen als sehr vibrationsrobust bezeichnet. Die geringe Masse der Mikrospiegel wird durch zwei Torsionsfeder-Gelenkbänder gehalten, sodass eine gefederte Masse vorliegt, die in ihren Endlagen durch Micro-tipps abgefedert wird. Die Mikrospiegel werden durch ein äußeres elektrostatisches Feld ausgelenkt.

Die in den Fahrversuchen aufgetretenen Unsauberkeiten des DMD-Scheinwerfers (Grizzeln im Vorfeld der Lichtverteilung) durch stärkere Erschütterungen (Schläge durch Löcher und Vertiefungen in der Fahrbahn) konnten auf dem Schwingungsmessstand nicht nachvollzogen werden. Als erste Gegenmaßnahme wurde eine zusätzliche mechanische Abstützung des DMD-Kühlkörpers vorgenommen. Möglicherweise traten dadurch kleinere Unsauberkeiten im Vorfeld der Lichtverteilung beim Vibrationsmessversuch auf. Interferenzerscheinungen mit der Bildwiederholrate und der Fahrbahnbewegung könnte eine weitere mögliche Ursache für die in den Fahrversuchen aufgetretenen Lichterscheinungen sein. Dennoch sind diese Unsauberkeiten nur von geringem Ausmaß, da sie u.a. im Mittel- und Fernfeld der Lichtverteilung durch den Fahrer nicht mehr aufgelöst werden können bzw. dort nicht auftreten. Bei

einer Kombination des DMD-Scheinwerfers mit einem konventionellen Scheinwerfer sind diese Effekte nicht mehr wahrnehmbar.

Zur Untersuchung der Unsauberkeiten in der Lichtverteilung wurde der erste DMD-Scheinwerfer auf dem Schwingungsprüfstand der Hella KGaA Vibrationsuntersuchungen unterzogen. Der DMD-Spiegelarray-Scheinwerfer wurde auf einen elektromagnetisch angeregten Schwingungsprüfstand gestellt, wobei die Resonanzfrequenzen der Teilkomponenten des Aufbaus von 0 Hz bis 200 Hz ermittelt wurden. Bei dem Versuchsaufbau wurde darauf geachtet, dass eine ähnliche Vorneigung des Scheinwerfers wie später am Fahrzeug eingestellt war. Der Aufbau wurde mit 0,5 g beschleunigt.

Die Resonanzen sind stark von den Einzelkomponenten des Systems, deren steife oder elastische Aufhängung und deren relative Position des Schwerpunktes zur Aufhängung abhängig. Wurde das Auskoppelobjektiv z.B. durch die Feldlinse abgestützt, so änderten sich die Schwingungsformen des Aufbaus. Ein Schwingen der Komponenten konnte über eine Blitzlichtlampe teils visualisiert werden. Das Scanning-Laser-Vibrometer könnte bei zukünftigen Messungen eingesetzt werden.

Nachdem die UHP-Lampe und alle Linsen entfernt waren, wurde anstelle der UHP-Lampe ein roter Laser mit 632nm Wellenlänge als Lichtquelle eingesetzt. Sein Licht wurde über den Kaltlichtspiegel auf den DMD-Chip gelenkt. Durch das kohärente Licht des Lasers treten an den Mikrospiegeln Interferenzen auf, sodass ein Beugungsgitter erzeugt wird. Dennoch ist das Maximum der Lichtintensität relativ gut zu erkennen. Mit der Laser-Lichtquelle wurde der Aufbau mit 1g im Frequenzband von 0 – 100 Hz beschleunigt. Folgende Schwingungsmoden traten auf:

Tabelle 6.7: Schwingungsmoden und deren Ursache beim DMD-Scheinwerferprototyp (I)

Anregungs-frequenz	Schwingungsform	mögliche Ursache
22,2 Hz	diagonal	DMD-Mikrospiegel?, kein steifer Aufbau von Laser und Gesamtanordnung?
27 Hz	horizontal	seitliches Verwinden der DMD-Mikrospiegelhalterung
86 Hz	parallelogrammförmig	Überlagerung von DMD-Mikrospiegel und DMD-Mikrospiegelhalterung-Horizontalschwingungen?

Die Lagerung des Lasers könnte noch nicht ideal gewesen sein, da auch hier Schwingungen auftreten können. Die Einflüsse des Kaltlichtspiegels sind ebenfalls weiter einzugrenzen.

Bei Serien-Scheinwerfern wird die Resonanzsuche mit 1g durchgeführt. Die Scheinwerferhersteller beschränken sich immer mehr auf die Prüfung eines Frequenzbereichs von 0 bis 100 Hz (teils bis 200 Hz) bei neuen Scheinwerfergehäusen. Dabei wird der Bereich von 20 bis 40 Hz als kritisch angesehen.

Aufgabe für weitere Vibrationsuntersuchungen ist die zusätzliche Versteifung des Aufbaus, damit mögliche Fehlerquellen, die durch den Messaufbau hervorgerufen werden, ausgeschlossen werden können. Die Vibrationsuntersuchungen des DMD-Chips ist dabei von besonderem Interesse [8.2, TI 2001-2]. Vom Fraunhofer Institut in Oberpfaffenhofen wurden hierzu Simulationen im Auftrag der BMW AG durchgeführt, aber nicht veröffentlicht [8.2, ENDERS, 2001]. Erst im zweiten Schritt sind die Untersuchungen für das gesamte optische System weiter zu verfolgen. Um die Messergebnisse und Bewegungen besser verfolgen zu können, sollte statt der Blitzlichtlampe eine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt werden, damit die Bewegungen des Aufbaus und der Komponenten leichter analysiert werden können. Bei einer gezielten Auswertung der DMD-Mikrospiegelbewegung sind erhöhte Anforderungen an den Abbildungsmaßstab, die Blendenzahl und die Ausleuchtung des Mikrospiegelarrays zu stellen, damit die Mikrospiegel und deren Beschleunigungen und Bewegungen im Mikrometerbereich in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz aufgelöst werden können.

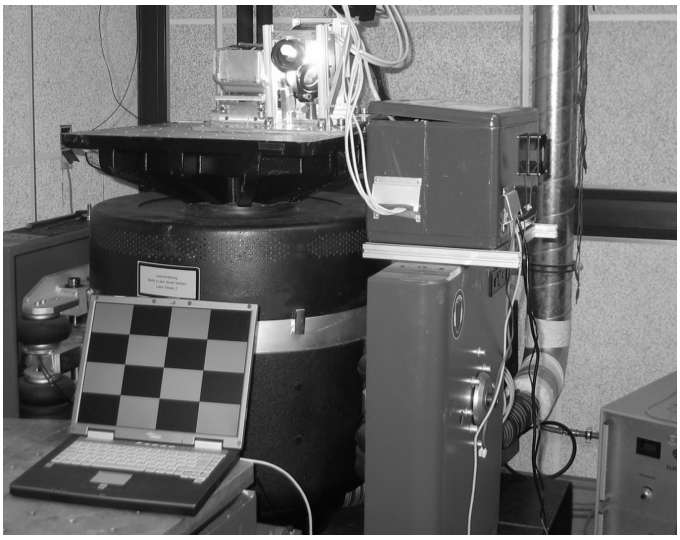


Abbildung 6.12: Vibrationsuntersuchung – Messstand

Abbildung 6.13: Vibrationsuntersuchung mit einem Laser, mit dem Umlenkspiegel der Einkopplung und dem DMD-Ständer (ohne Einkopplung und ohne Auskopplung)

Ein steiferer Gesamtaufbau, eine robustere DMD-Chip-Aufhängung und eine vibrationsstabilere Auskoppeloptik wären hierzu erforderlich. Die Verformung und ein mögliches Springen des Lichtbogens ist dann ebenfalls zu untersuchen. Vorab muss allerdings sichergestellt werden, dass der Lampenkolben, die Elektroden, die Zündspule, die Kittung zwischen Lampenglaskolben und Glasreflektor den erhöhten Beschleunigungen standhalten und dass der Glaskolben bei Betriebstemperatur-Lampenkolbendruck für die Anforderungen einer Resonanzuntersuchung und einer Vibrationsschockbelastung ausreichende Reserven besitzen.

6.10 Aufbau und Fertigung der innovativen Optikkonzepte

Für die Umsetzung der Prototypen des aktiven Scheinwerfers in großserientaugliche Produkte ist eine Toleranzuntersuchung der Positions- und Winkelabhängigkeiten des Scheinwerferaufbaus, sowie von deren Abhängigkeiten vorzunehmen. Der Abstimmungs- und Justageaufwand für die Serienausführung muss dabei auf ein Minimum reduziert werden. Die Fertigungstechnologie für den mechanischen Aufbau und die optischen Komponenten sind im Rahmen einer Untersuchung der Kostenschwerpunkte der Einzelteile, der Fertigung und Montage des Aufbaus zu optimieren. Die Risiken des Kapitels 5.8 sind dabei u.a. zu beachten und zu minimieren. Nähere Details zur Konstruktion und Dimensionierung der aktiven Scheinwerfer sind den Unterkapiteln der Kapitel 5.2 bis 5.5 zu entnehmen.

6.11 Gesamtbewertung der aktiven Scheinwerferkonzepte

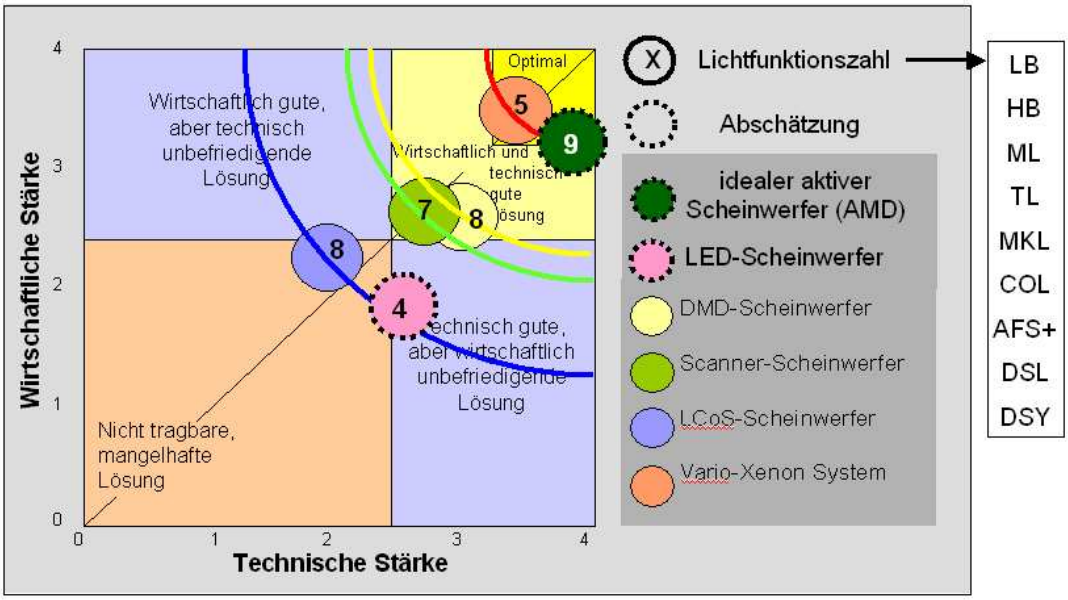
Nachdem die Bewertung der aktiven Scheinwerfer nach lichttechnischen, technologischen, physiologischen, wirtschaftlichen und gesetzlichen Kriterien in der Diplomarbeit [8.7, MÜLLER, 2004] und in Abbildung 5.36, S.198, beschrieben wurden, soll hier zusammenfassend, auch basierend auf den Ergebnissen der Diplomarbeit von [8.7, REINSDORF, 2004], eine Gesamtbewertung vorgenommen werden.

Neben den Kriterien aus Tabelle 5.22, S.197, kann eine wirtschaftlich-technische Bewertung, Abbildung 6.14, vorgenommen werden. Als Bewertungskriterien werden wirtschaftliche und technische Kriterien herangezogen, wobei die Bewertung 4 die beste und die Bewertung 0 die schlechteste Bewertung darstellt. Bei der wirtschaftlichen Stärke sind wirtschaftliche und gesetzliche Kriterien herangezogen worden [vgl. 9.1 Anhang A.1]. Bei der technischen Stärke sind technologische, lichttechnische und physiologische Kriterien zugrunde gelegt worden. Oben rechts ist das Optimum aus wirtschaftlicher und technischer Sicht dargestellt. Diesem Optimum kommt das Vario-Xenon-System mit der Einschränkung von „nur“ 5 Lichtverteilungen und seiner technologischen Reife als Serienprodukt am Nächsten.

Über die Viertel-Kreis wird angedeutet, wie nahe die einzelnen Lösungen dem Optimum in wirtschaftlicher und technischer Sicht kommen.

Mit den aktiven Scheinwerfersystemen wird eine neue Klasse von Scheinwerfersystemen begründet, die bis zu z.B. 9 Lichtverteilungen erzeugen können bzw. per Software frei

(innerhalb maximal möglicher Lichtverteilungen: Fernlicht mit Streubreite des Nebellichts) programmierbar sind. Der DMD-Scheinwerfer hat dabei aus technischer Sicht einen deutlichen Vorsprung vor dem scannenden Scheinwerfer, der aus wirtschaftlicher Sicht etwas mehr überzeugt. Da die wirtschaftlichen und technischen Kriterien gleichgewichtet wurden, kann der DMD-Scheinwerfer insgesamt mehr überzeugen. Das bestätigen auch die bisherigen Prototypen, wobei der DMD-Scheinwerfer sich als einziger bereits im A-Muster-Stadium in ein Serienscheinwerfergehäuse integrieren lässt. In Kombination mit einer konventionellen Xenon-Lichtverteilung würde der DMD-Scheinwerfer das Optimum mit bisher verfügbarer Technologie darstellen. Dadurch verbessert sich auch dessen Position in wirtschaftlicher Hinsicht, da die konventionellen Xenon-Lichtverteilungen eine Grundlichtverteilung energieeffizient auf die Straße projizieren und die relativ kostengünstigen und lampenwirkungsgradeffizienten D2S-Lampen einsetzen. Der LCoS-Scheinwerfer ist in dem bisher aufgebauten Konzeptstadium durch seine geringe Beleuchtungsstärke, den geringen Kontrast und den relativ hohen optischen Aufwand weniger überzeugend.



gesetzlich, wirtschaftlich vs. technologisch, lichttechnisch und physiologisch

Abbildung 6.14: Wirtschaftlich-technische Bewertung der aktiven Scheinwerferprinzipien im Vergleich zu einem Vario-Xenon-AFS-Scheinwerfersystem [nach 8.7, MÜLLER, 2004]

Zusammenfassend wurde mit dem DMD aktiven Scheinwerfer ein neuer Meilenstein in der Scheinwerferlichttechnik der Zukunft gesetzt, wobei insbesondere dessen Variabilität, dessen hohe Zahl an Lichtfunktionen, dessen lichttechnische Leistungsfähigkeit, dessen technologische Reife und die mögliche Integration in ein Serien-Scheinwerfergehäuse zu überzeugen wissen. Über das AMD-Array und die Variabilität des scannenden Scheinwerfers konnten neue, energieeffiziente Ansätze der Lichtstrom-Umverteilung aufgezeigt werden. Das theoretische Optimum des idealen aktiven Scheinwerfers ist in dieser Arbeit beschrieben, wodurch ein Leitbild für zukünftige Scheinwerferentwicklungen herausgearbeitet wurde. Eine Abschätzung seiner Bewertung ist in Abbildung 6.14 vorgenommen worden. LED-

Scheinwerfer (in dieser Arbeit weitestgehend ausgeklammert (noch relativ geringe Leuchtdichte)) wurden in ihrem jetzigen Entwicklungsstand (09.2006) auch in ihrer technischen und wirtschaftlichen Stärke bewertet und eingeordnet.

6.12 Bewertung der aktiven Scheinwerfer im Vergleich zu AFS-Scheinwerfern

Scheinwerferlichtverteilungen sind gekennzeichnet durch die widersprechenden Anforderungen nach maximaler eigener Erkennbarkeitsentfernung und optimaler Ausleuchtung. Diese stehen der minimalen Blendung und Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer gegenüber. Konventionelle Scheinwerfer lösen diesen Widerspruch durch die bi-funktionalen Lichtfunktionen Abblendlicht und Fernlicht, wobei sich deren Nutzungsanteile aufgrund des relativ hohen Verkehrsaufkommens in Deutschland bzw. in Europa zu Gunsten des Abblendlichts (ca. 95% relative Zeitdauer) verschoben hat. AFS-Scheinwerfer, vgl. Tabelle 6.8, verbessern die Sichtweite für den Fahrer, da sie über weitere Lichtfunktionen, wie dynamisches und statisches Kurvenlicht, Stadtlicht, Autobahnlicht, Landstraßenlicht, Schlechtwetterlicht verfügen und das einen Kompromiss darstellende Abblendlicht, je nach Straßen-, Fahr- und Witterungssituation in Richtung des Fernlichts erweitern. Dennoch sind diese AFS-Scheinwerfer weiterhin vom Optimum einer für andere Verkehrsteilnehmer blendfreien Fernlichtausleuchtung entfernt. Aktive Scheinwerfer, ebenfalls Tabelle 6.8, lösen diesen Zielkonflikt indem sie hohe Freiheitsgrade in der Modellierung der Lichtverteilung aufweisen. Neben zusätzlichen Lichtfunktionen, wie Berg- und Talfahrlicht oder straßensituationsabhängiger Ausleuchtung, bieten sie Lichtfunktionen, die gekoppelt mit der fahrzeugeigenen, zukünftigen oder teilweise bereits existierenden Sensorik, dem Navigationssystem oder adhoc-Netzwerken [8.4, ROSLAK, 2005], einer optimalen Ausleuchtung sehr nahe kommen. Dabei kann dieses Optimum mit zwei Ansätzen verfolgt werden, dem Markierenden Licht, basierend auf dem Abblendlicht, das zonal erweitert wird, oder alternativ der kollektiven Verkehrsraumausleuchtung, die zonal andere Verkehrsteilnehmer in einer aktiven Fernlichtausleuchtung ausspart und dadurch deren Blendung minimiert. Beide Ansätze werden in Kapitel 6.1.1 mit einander verglichen und diskutiert.

Hauptvoraussetzung für eine optimale Nutzung dieser aktiven Lichtfunktionen ist eine genaue und weitreichende Erfassung des Fahrzeugvorfeldes durch mehrere Sensoren, die über Sensorfusion vereint, ausgewertet und über das Fahrzeugbordnetz dem aktiven Scheinwerfer zur Verfügung gestellt wird. Zusätzliche Lichtfunktionen, die nur mit einem aktiven Scheinwerfer realisiert werden können sind das fahrerspezifische Licht und die Displayfunktion, wobei letztere starken gesetzlichen Restriktionen und gewissen Einschränkungen bei den Umfeldbedingungen unterworfen ist bzw. sein wird; vergleiche hierzu auch Kapitel 6.1.1 und 2.11.3 bzw. 3.3.5.

Zusammengefasst stellt der aktive Scheinwerfer eine neue, deutlich gegenüber bisheriger Scheinwerfertechnik verbesserte Lichtverteilungs-Formungseinheit dar, deren Potenziale des

Sicherheitsgewinns und der Komfortsteigerung in hohem Maße von der fahrzeugeigenen Sensorik und Vernetzung im Fahrzeug abhängt.

Tabelle 6.8: Vergleich der AFS-Scheinwerfer mit dem aktiven DMD-Scheinwerfer

Bewertungskriterien	AFS-Scheinwerfer	Aktiver Scheinwerfer (am Beispiel des DMD-Scheinwerfers)
Markteinführung	ab 2006	ab ca. 2012
Lichtquelle	D1S, D2S (D3S; D4S)-Lampe	UHP-Lampe; D2S kurz, LED-Array
konventionelle Lichtfunktionen	Abblendlicht / Fernlicht, Nebellicht, Tagfahr- u. Positionslicht	Abblendlicht / Fernlicht, Nebellicht, Tagfahrlicht und Positionslicht
Lichtfunktionen	AFS-Lichtfunktionen, d.h.: dynamisches und statisches Kurvenlicht / Abbiegelicht [„ Pre-AFS“] Autobahnlicht [AFS] Schlechtwetterlicht [AFS] Landstraßenlicht [AFS] Stadtlicht [AFS] Links- / Rechtsverkehr (Touristenlösung)	AFS-Lichtfunktionen und zusätzliche Aktive Lichtfunktionen, d.h.: Markierendes Licht [HF] Kollektive Verkehrsraumausleuchtung [HF], Berg- und Talfahrlicht [HF], Fahrerspezifisches Licht [HF], Displaylicht [NF], Kommunikationsfunktion [NF]
Sensorkopplung	Geschwindigkeit, Lenkwinkel, Regensensor, Umgebungslichtsensor etc.	LIDAR, RADAR, Video-Kamera (s), Echtzeitbildverarbeitung, Navigationssystem, GPS+
Kosten	gering bis mittel	hoch
Kundennutzen	hoch	höherer Sicherheitsgewinn, LSV-Optimum
Marktattraktivität	wenig Sensorik erforderlich	eng verknüpft mit Sensormöglichkeiten des Fahrzeugs, deren Vernetzung und Auswertung
Erscheinungsbild	konventionelles Erscheinungsbild	verändertes Erscheinungsbild möglich (Hybrid-Ansatz)
Gesetzgebung	ab 2006 zulässig	teils offen, insbesondere UHP-Lampe bisher nicht zulässig
Einführungsszenarien		DMD-Zusatzscheinwerfer kombiniert mit konventioneller Lichttechnik (AFS-Scheinwerfer oder bi-funktionalen Scheinwerfern)

Aktive Zusatzscheinwerfer, kombiniert mit konventioneller (AFS-) Scheinwerfertechnik bieten ein Kosten- und Energieeinsatzoptimium, da sie die Vorteile beider Systeme zu einer

additiven, hoch variablen Lichtverteilung ergän-zen, wobei nur relativ geringe Kompromisse für den Endnutzer eingegangen werden müssen.

Im Rahmen der Scheinwerferentwicklung und der Modellierung neuer Scheinwerferlichtverteilungen kann der aktive Scheinwerfer in Form des DMD-Pixelarray-Scheinwerfers als „Pixellight-Lichtverteilungs-Demonstrator“ eingesetzt werden, wobei teure, kundenspezifische Lichtmuster in ihrer Anzahl deutlich reduziert werden können. Dieser Pixellight-Lichtverteilungs-Rapid-Prototyping-Demonstrator kann unter statischen oder auch dynamischen Bedingungen dem OEM-Kunden mehrere, d.h. bis zu unendlich viele Lichtverteilungen anbieten, die nur per Software modifiziert werden.

Dieses „Hardware-in-the-Loop“-Werkzeug des „Pixellight-Lichtverteilungs-Demonstrators“ stellt eine Alternative zur virtuellen Lichtverteilungssimulation am Fahrzeug-Nachtfahrtdemonstrator dar, wobei unter realen, teilweise sich ändernden Testbedingungen (Gegenverkehr, Witterung, Fahrbahnbelag, Straßenkrümmung etc.) getestet werden kann. Wie bei der virtuellen Nachtfahrtdemonstration stellt dieses Werkzeug eine Möglichkeit der Visualisierung von kundenspezifischen Lichtverteilungen dar. Weitere Kernkompetenz muss es dabei bleiben, diese dem Kunden angebotenen Lichtverteilungen mit realen kostenoptimierten, bewährt großserientauglichen, physikalisch möglichen und energetisch genügsamen Scheinwerfersystemtechnologien möglichst eins zu eins umzusetzen. Die Auswertung von vergleichenden Leuchtdichtebildern oder Computersimulationen können hierzu eingesetzt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Bei den aktiven Scheinwerferlichtfunktionen werden das Markierende Licht und die kollektive Verkehrsraumausleuchtung als die wichtigsten Hauptfunktionen mit dem höchsten Kundennutzen eingestuft, siehe Kapitel 6.1.1. Das Fahrerspezifische Licht und die gegenüber den AFS-Scheinwerfern optimierte straßensituationsabhängigen Lichtverteilungen, wie z.B. Berg- und Talfahrlicht, sind Lichtfunktionen, die den Fahrkomfort und die Fahrzeugsicherheit weiter erhöhen. Als Nebenfunktionen mit geringerem Endkundennutzen sind die Displayfunktion und das kommunizierende Licht anzusehen.

Bei der technologischen Umsetzung der aktiven Scheinwerfer-Prototypen stehen mehrere Technologien im Wettbewerb miteinander, Kapitel 5.1 bis 5.6. Aus diesem Wettbewerb lässt sich ein Optimum eines idealen aktiven Scheinwerfers herausarbeiten, der ein gekrümmtes AMD-Array besitzt, das den Lichtstrom umverteilt, aber dennoch ein hohes Maß an Variabilität, Winkelpositionsgenauigkeit und Dynamik aufweist. Von den realisierten aktiven Scheinwerferprototypen kommt der DMD-Scheinwerfer dieser aktiven Scheinwerfer-Vision am nächsten, da er ein hohes Maß an Variabilität und technologischer Reife besitzt. Energetisch ist dessen subtraktive Erzeugung der Lichtverteilung weniger vorteilhaft, als die Lichtstromumverteilenden Konzepte des scannenden Scheinwerfers und des AMD-Arrays. Die begrenzte Dynamik und Lichtquellen-Leuchtdichte des scannenden Scheinwerfers stellen limitierende Faktoren dar. Das AMD-Array ist technologisch noch am wenigsten ausgereift und bedarf weiterer Grundlagenforschung und -entwicklung. Das LCoS-Konzept bietet als subtraktives Lichtverteilungskonzept ähnliche Vorteile wie der DMD-Scheinwerfer, erfordert allerdings optischen Mehraufwand in der Polarisierung des Lichts und der Nutzung beider Polarisationsanteile. Die spektrale Anpassung und Abstimmung der optischen Polarisatoren, Strahlteiler und Linsen sind weitere Aufgaben für die Zukunft, um den höheren Wirkungsgrad des LCoS-Chip gegenüber dem DMD-Chip nutzen zu können. Thermische Herausforderungen bestehen sowohl beim LCoS-Chip, beim DMD-Chip als auch beim AMD-Array. Das AMD-Array teilweise und der scannende Scheinwerfer sind in diesem Aspekt weniger anspruchsvoll, da diese den Lichtstrom vorteilhafterweise innerhalb der Lichtverteilung umverteilen. Diesen Ansatz setzt auch das Flexprisma um, wobei hier der Strahlengang nicht gefaltet wird. Die Lichtstromverluste an den Grenzflächen des Optikkörper des Flexprismas und dessen Bauvolumen sind dabei zu minimieren. Die relativ geringe Dynamik der Lichtstromablenkung des Flexprismas ist hier von geringerer Bedeutung, da es für das dynamische Kurvenlicht bzw. auch für eine erweiterte Leuchtweitenregelung eingesetzt werden soll.

Zur Markteinführung aktiver Scheinwerfersysteme sind zum Teil Änderungen in der bestehenden Gesetzgebung erforderlich. Neue Lichtquellen, wie UHP-Lampen, die für den Automotive-Einsatz bisher nicht zulässig waren, seien exemplarisch genannt. Weiterentwicklungen der aktiven Scheinwerfersysteme werden evtl. den Einsatz von UHP-Lampen nicht mehr erfordern, da die Systeme wirkungsgradoptimiert werden oder nur Teile der zukünftigen Scheinwerferlichtverteilungen erzeugen und formen werden.

Damit der Markt die zukünftigen aktiven Scheinwerfer akzeptiert, müssen für den Laien dessen Lichtfunktionen deutlich von den bisherigen AFS-Lichtfunktionen unterscheidbar sein. Die Technik soll für den Endnutzer sichtbar sein, damit er / sie aktive Scheinwerfer von konventionellen Scheinwerfersystemen differenzieren kann.

Die Wettbewerbstechnologie LED-Arrays muss gegen die aktiven Scheinwerfersysteme bewertet werden, wobei LED-Arrays prinzipbedingt nicht das Auflösungsvermögen von z.B. DMD-Arrays erzielen werden. Das selektive Zuschalten von Lichtquellen nach Bedarf ist sicherlich ein Vorteil der LEDs. Die Vorteile der aktiven Scheinwerfersysteme in der Leuchtdichte der Lichtquelle werden auf absehbare Zeit erhalten bleiben.

Aktive Scheinwerfer werden zunächst in der Unterstützung der Scheinwerferentwicklung und der kostenoptimierten Visualisierung von kundenspezifischen Lichtverteilungen eingesetzt werden, bevor sie bei reduzierten Kosten Anwendung als Zusatzausstattung in Oberklassefahrzeugen bzw. nach und nach in Großserienfahrzeugen finden werden. Zur Gesamtsystem-Kostenreduktion werden diese zunächst mit konventioneller Scheinwerfertechnik, d.h. Xenon-Projektionsscheinwerfern kombiniert werden, da damit kostenoptimiert z.B. nur ein aktiver Scheinwerfer pro Fahrzeug eingesetzt werden kann. Das vom Gesetzgeber geforderte paarige Erscheinungsbild der Scheinwerfer wird durch den zweiten Scheinwerfer in Xenon-Projektionstechnik realisiert bzw. bei zwei Xenon-Projektionsscheinwerfern durch eine Leuchtdichteattrappe als Gegenstück zum aktiven Scheinwerfer.

Das sind erste, vielversprechende Ansätze eine kosten- und energieeinsatzoptimierte Gesamt-Fahrzeug-Scheinwerfer-Lichtverteilung zu formen, die einen hohen Freiheitsgrad und damit Variabilität aufweist. Diese Variabilität kann für die neuen, besser den tatsächlichen Anforderungen der straßen- und verkehrssituationsangepassten Lichtverteilungen, aber auch zur Gefährdungsminimierung durch Markierendes Licht oder Kollektive Verkehrsraumausleuchtung eingesetzt werden. Eine Individualisierung der Lichtverteilung, beim Fahrerspezifischen Licht, steigert den Fahrkomfort für den Nutzer merklich und wird dessen individuellen, physiologischen Sehgewohnheiten und dessen psychologischen Sicherheitsempfinden durch eine optimierte Ausleuchtung bei Nachtfahrten besser gerecht werden.

Die Höhe der Steigerung der lichttechnischen Sicherheit durch das Markierende Licht muss gegen die verbesserte Sicherheit einer kollektiven Verkehrsraumausleuchtung abgewogen werden. Die kollektive Verkehrsraumausleuchtung weist dabei das etwas höhere Sicherheitspotenzial auf, da deren Lichtverteilung vom Fernlicht abgeleitet ist und daher der optimalen Lichtverteilung bei Nacht, dem Fernlicht ohne Gegenverkehr näher kommt als das Markierende Licht. Das Verbesserungspotenzial der aktiven Scheinwerferfunktionen gegenüber der heutigen Abblendlichtverteilung ist nicht nur von deren Technologie selbst abhängig, sondern auch von deren Anbindung an die Fahrzeugsensorik, deren Auswertungselektronik und von den maximalen Datenübertragungsraten des Fahrzeugbordnetzes.

Die aktiven Scheinwerferlichtverteilungen werden dazu beitragen, dass der Fahrer nicht nur in seiner Wahrnehmung bei Nachtfahrten deutlich besser als bisher unterstützt wird, d.h. die

Fahrsicherheit bei Nacht wird signifikant gesteigert werden, sondern auch der Fahrkomfort bei Nacht wird durch eine, der menschlichen Physiologie besser angepasste, individuelle Ausleuchtung zu einer geringeren Ermüdung des menschlichen Auges und damit zu weniger Nachtunfällen führen.

Zusammengefasst bieten die aktiven Scheinwerfer ein Sicherheits- und Komfortsteigerungspotenzial, das einer optimalen Lichtverteilung, dem Fernlicht, erzeugt durch einen idealen Scheinwerfer, Kapitel 5.9 und 6.11, einen Lichtstrom-umverteilenden Scheinwerfer schon sehr nahe kommt.

Offene Aufgaben für die Zukunft der Scheinwerferlichttechnik sind die Umsetzung des idealen aktiven Scheinwerfers, der die Vorteile der unterschiedlichen, mit verfügbarer Technologie realisierten Prototypen vereint. Dieser wird auf den OEM- und Endkundenanforderungen, den theoretischen Erkenntnissen, den praktischen Erfahrungen mit den aktiven Scheinwerfer-Prototypen sowie der verfügbaren Fahrzeugsensorik, -auswertung und -vernetzung basieren. Interdisziplinäre Forschungs- und Entwicklungsansätze sind hierzu erforderlich. Eine völlige Substitution bestehender Scheinwerfertechnik wird aus Kosten- und energetischen Gesichtspunkten auf absehbare Zeit nicht erfolgen. Die Kostenoptimierung der aktiven Scheinwerfersysteme für einen breiten Großserieneinsatz in der Kompakt- und Mittelklasse sind spannende Aufgaben für die Zukunft.

Ein weiterer Aufgabenblock besteht in der Synthese und Validierung neuer aktiver Scheinwerferlichtfunktionen und deren Wirkung auf den Fahrer bzw. den Gegenverkehr. Diese sind Voraussetzung für eine Erweiterung der bestehenden Gesetzgebung. Wichtig wird dabei zu prüfen sein, welche Verbesserungen innerhalb der Lichtverteilung den höchsten Nutzen für den Endverbraucher kurzzeitig und auf Dauer haben werden.

Diese Arbeit trägt dazu bei sich einer Scheinwerfer-Lichttechnik-Zukunft, in der die ursprüngliche Vision eines aktiven Scheinwerfers, Schritt für Schritt umgesetzt wird, anzunähern. Die aktive Scheinwerfertechnologie wird ihren Beitrag zur Steigerung der Verkehrssicherheit leisten, wobei weniger Nachtunfälle, mehr Variabilität in der Lichtverteilung und eine ideale Ausleuchtung auch bei Gegenverkehr Kennzeichen dieser aktiven Scheinwerfer-Lichttechnik sein werden.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Konstruktionsmethodik

[BOCK, 2001] BOCK, P.: *Getting it right, R&D Methods for Science and Engineering*, 2001, Academic Press, ISBN 0-12-108852-9

[GAUSEMEIER, 2000] GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: *Entwicklungsumgebungen Mechatronik – Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme*, HNI-Verlagsschriftenreihe, HNI-Band.80, Universität Paderborn, 2000

[GAUSEMEIER, 2003] GAUSEMEIER, J.; MÖHRINGER, S. : *Die neue Richtlinie VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, VDI-Berichte, Nr.: 1753, Fulda Mechtronik-Tagung 2003.

[HÖHNE, 1997] HÖHNE, G.: *Vorlesungsskripte zur Konstruktion*, TU Ilmenau, 1997

[KALLENBACH, 1997] KALLENBACH, E.: *Vorlesungsskripte zur Antriebstechnik*, TU Ilmenau, 1998

[KRAUSE, 1993] KRAUSE, W.: *Konstruktionselemente der Feinmechanik*: 2.Auflage, 1993, Hanser Verlag, ISBN 3-446-16530-4

[KRAUSE, 2000] KRAUSE, W.: *Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik*: 3.Auflage, 2000, Hanser Verlag, ISBN3-446-19608-0

[MICHELS, 2001] MICHELS, J.; STEFFEN, D.: *Entwicklung einer Vorgehensweise zum Einsatz der TRIZ-Methoden „Idealität“ und „Stoff-Feld-Analyse“ in der Produktentwicklung*: Diplomarbeit, Hella KG, Lippstadt, Uni Paderborn, 2001

[PAHL, 1993] PAHL, G.; BEITZ, W: *Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung*: 3.Auflage, Springer Verlag, 1993, ISBN 3-540-56194-3

[o.V. PROJEKTSEMINAR, 2003] o.V.: *Projektseminar: Entwicklung innovativer Prinziplösungen für Beamer auf Basis der Technologie LED*, Fachgebiet GAUSEMEIER / WALLASCHEK, Heinz Nixdorf Institut, Uni Paderborn, 12.-16.05.2003

[SCHILLING, 1999] SCHILLING, M.: *Vorlesungsskripte zu mechanisch-optischen Funktionselementen der Feinwerktechnik; Gerätekonstruktion*, Ausgabe 1996, TU Ilmenau, 1999

TechOptimizer™-Software, Stand 2004 vgl. [8.1, MICHELS, 2001]

[VDI 2206] Richtlinie VDI 2206 (Entwurf) Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme, 2002

[VDI 2221] Richtlinie VDI 2221: 1993-5 *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, Beuth Verlag, Berlin, 1993

[VDI 2242] Richtlinie VDI 2242 Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik

[WALLSCHEK, 2002] WALLASCHEK, J.: *Vorlesungsskripte, Methods of Scientific Work und Grundlagen der Mechatronik*: 2002f, Universität Paderborn

[WALLASCHEK, 1995] WALLASCHEK, J.: *Modellierung und Simulation als Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeiten mechatronischer Produkte*, Simulation in der Praxis – neue Produkte effizienter gestalten. VDI-Berichte, VDI-Verlag Düsseldorf, 1995

[WÖRDENWEBER, 2004] WÖRDENWEBER, B.; WICKORD, W.: *Technologie- und Innovationsmanagement im Unternehmen*: Springer Verlag, 2004, ISBN 3-540-20992-1; 2. Auflage von [WÖRDENWEBER, 2001]

[WÖRDENWEBER, 2001] WÖRDENWEBER, B.; WICKORD, W.: *Chance oder Risiko? Erfolgreiche Technologieentwicklung mit Innovationsmanagement*: Springer Verlag, 2001, ISBN 3-540-42026-6

[ZIMMERMANN, 1994] ZIMMERMANN, K.: *Übungsaufgaben Technische Mechanik*: Fachbuchverlag Leipzig-Köln, 1994, ISBN 3-343-00859-1

8.2 Scheinwerfer

[ARMBRUSTER, 2001] ARMBRUSTER, D.: *Verbesserung der visuellen Informationsübermittlung durch adaptive Kraftfahrzeugsignalleuchten*; Dissertation, Fachgebiet Lichttechnik, TU Darmstadt 2001, ISBN 3-8316-0016-3

[BASS, 1995] BASS, M.; u.a.: *Handbook of Optics, Volume II; Devices, Measurements and Properties*: McGraw-Hill. Inc., 1995, ISBN 0-07-047974-7

[BÖRNCHEN, 2001] BÖRNCHEN, T.: *Zur Entwicklung dynamischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht*: HNI-Band 93, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, ISBN 3-935433-02-6, 2001

[BOERSCH, 1999] BOERSCH, J.: *Aufbau eines Funktionsmusters zur Realisierung eines programmierbaren Adaptive Frontlighting Systems (AFS)*: Diplomarbeit, TU Darmstadt in Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG, 1999 – nicht einsehbar

[BOSCH, 2002] HAMM, M.; u.a.: *Lichttechnik und Scheibenreinigung am Kraftfahrzeug*, Gelbe Reihe, Fachwissen Kfz-Technik, Bosch, Stuttgart, 2. Auflage, 2002

[BÜTTGENBACH, 2004] BÜTTGENBACH, S.; SEIDEMANN, V.: *Mikrotechnische Spulensysteme – Anwendungen in der Sensorik und Aktorik*: 2. Intelligente Mechatro-

nische Systeme-Tagung, HNI-Band 145, Paderborn, 25.+26.3.2004, S.229-238, ISBN 3-935433-54-9

[CASTELLON, 2000] CASTELLÓN RIVERA, W.A.: *Bewertung bildgebender Projektionsverfahren für zukünftige Scheinwerferkonzepte*, Diplomarbeit, Hella KG, FT-S, Lippstadt, TU Ilmenau 2000

[CHEMNITZ, 2004] CMS Mikrosysteme Chemnitz GmbH, www.tcc-chemnitz.de; www.tu-chemnitz.de , siehe auch: [ZFM, GRESSNER, 2004]; Stand 01.2006

[CMS, 2001] o.V.: *Damit Fernsehen noch schärfer wird, Laser-TV*: Technologie Centrum Chemnitz – Highlights Archiv, 2001, CMS Mikrosysteme GmbH Chemnitz

[CUMMINS, 2000] CUMMINS, D. u.a.: *Ultrafast electrochromic windows based on redox-chromophore modified nanostructured semiconducting and conducting films*, Journal Phys. Chem. B 2000, 104, p.11449 - 11459

[DASSANAYAKE, 2000] DASSANAYAKE, M.; u.a.: *Remote HID headlamp system options*, Automotive Engineering International, Magazine, Visteon Automotive Systems, February 2000

[DERRA, 2005] DERRA, G.; u.a. : *UHP lamps for projection applications* : Journal of Physic D. :Applied Physics 38 (2005) S.2995-3010

[DGaO, 2002, RIECHE] RIECHE: *Digitale Projektoren*, Zeiss Jenoptik, Vortrag bei der 103. DGaO 2002, 22.5. bis 25.05.2002

[DIN 5037 [3], Bl.1]: lichttechnische Bewertungsgrößen für Scheinwerfer

[DOLENEC, 2003] DOLENEC, S.: *Technologiebewertung von Mikroaktoren für Anwendungen im automotiven Bereich*: Diplomarbeit, Uni Dortmund, Hella KG, 2003

[DUDLEY, 2005] DUDLEY, D.; DUNN, C.: *DLP Technologie – nicht nur für Projektoren und Fernsehen*: Photonik, 1, 2005, S.32-35

[EICHHORN, 2004] EICHHORN, K.; GÖTZ, M.: *Scheinwerfertechnologien der Zukunft*, VDE Kongress 2004, Berlin, 2004

[EICHHORN, 2001] EICHHORN, K., HELLA KG; u.a.: *Optikkonzepte für einen aktiven Scheinwerfer*; Projektantrag Aktives Licht, Teilprojekt 1.3, L-LAB, Lippstadt, 2001

[EICHHORN, 2000] EICHHORN, K.; LABAHN, N; DECKER, D.: *Adaptive Lichtsteuerung im Kraftfahrzeug*, in Adaptronic Congress, 2000

[EICHHORN, 1999] EICHHORN, K.: *Maybach – multifunktionaler Scheinwerfer für adaptives Licht*, in Hella R&D Review, 1999

[EICHHORN, 1998] EICHHORN, K.: *Das Zukunftspotential von Scheinwerfern in Lichtleittechnik*, in ATZ, 100 (5), 1998, S.374-367

[ENDERS, 2001] ENDERS, M., BMW AG: *Pixel Light*: Elektronik im Kraftfahrzeug, VDI-Bericht, 1646, Baden-Baden, 2001

[ERBL, 2003] ERBL, H.; u.a.: *Tabellenbuch Fahrzeugtechnik*, 22. Auflage, Holland+Josenhaus Verlag Stuttgart, ISBN 3-7782-3510-9, S.204-208, 2003

[EUREKA 1403] o.V.: *EUREKA-Projekt 1403, AFS – Advanced Frontlighting Systems*

[EWERHART, 2001-1] EWERHART, F.: *Entwicklung und vergleichende Bewertung einer videobasierten Kurvenlichtsteuerung für adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer*: Dissertation, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, 2001

[EWERHART, 2001-2] EWERHART, F.; WOLF, S.; GALL, D.:*Video Based Curve Light System – Sensor, System and Results*: Robert Bosch GmbH, TU Ilmenau, PAL 2001, ISBN 3-89675-971-X, S.252 - 265

[FRAUNHOFER, IOF, 2002] *www.iof.fraunhofer.de*, Modellierung und Simulation optischer Systeme und Komponenten, Microdisplays, Stand 08.03.2004

[FRAUNHOFER, IZM, 2004] www.pb.izm.fhg.de/mdae

[FRAUNHOFER, IPMS, 2003-1] SCHEDWILL, I.; MENZEL, H.: *Lichtmodulatoren mit mikromechanischen Spiegelarrays*, Flyer im Internet, Fraunhofer Institut Photonische Mikrosysteme, 10.2003

[FRAUNHOFER, IPMS, 2003-2] o.V.: *Mikromechanische Scannerspiegel (1D und 2D),* Flyer im Internet, Fraunhofer Institut Photonische Mikrosysteme, 10.2003

[FRAUNHOFER, IPMS, 2004] SCHENK H.; u.a.: *Adaptive Optics–Workshop,* Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Präsentation, 01.03.2004; www.ipms.fhg.de

[FRAUNHOFER, ISIT, 2002] Itzehoe, Scan-Spiegel mit gestuften, galvanisch abgeformten Elektroden, www.isit.fhg.de

[FRAUNHOFER, ISIT, 2004] www.fraunhofer.de, www.isit.fhg.de, *Beamer für die Westentasche*, VDI-nachrichten, Nr.47, 19.11.2004, S.20; Itzehoe

[FRAUNHOFER, IPM, 2002] HINKOV, I.: *Elektro-optischer Ablenker, elektro-optischer Bragg-Modulator, elektro-optische Linse*, *elektrisch steuerbare Mikrooptik,* www.ipm.fhg.de, 2002

[FSRM, 2002] HERZIG, H.-P.; ROSSI, M.: *Micro Optics*:Training in Microsystems 2.+3.12.2002, Swiss Foundation for Research in Microtechnology

[GENTEX, 2004] o.V.: *Smart Beam®*, Internet: www.gentex.com

[GÖTZ, 2004] GÖTZ, M.; HÄRMENS, E.; KAUSCHKE, R.: Scannender Scheinwerfer: DGaO-Konferenz 2004, Bad Kreuznach, www.dgao.de

[GRÜNWEG, 2005] GRÜNWEG, T.: *Die Nacht verliert ihre Schrecken*, 25.11.2005, SPIEGEL Online

[GRE 48, 2002] o.V.: Adaptive Front Lighting Systems – AFS, Informal Document No. 28, 48th GRE, 9-12.04.2004; http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gre/greage.html; http://www.unece.org/trans/main/welcwp29.htm

[GSI, 2003] GSI Lumonics SC2000 Scan Controller version 2.0, www.gsilumonics.com; www.gsig.com/scanners/

[GUNNAR, 2004] GUNNAR, F.: *Der richtige Durchblick, Anzeige einmal anders*: Sonderausgabe von ATZ und MTZ, Der neue BMW 6er, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 05/2004, D58922, S.140-142

[GÜNZEL, 1999] GÜNZEL, G.: *Einsatzmöglichkeiten von mikrotechnischen und mikrooptischen Komponenten bei der Entwicklung innovativer Scheinwerferkonzepte*: Diplomarbeit TU Braunschweig, Hella KG

[HAMADA, 1995] HAMADA, H.: *A new high definition microlens array built in p-Si TFT-LCD panel*, Asia Display 1995, pp.887-890 (1995)

[HAMM, 1999] HAMM, M. et al.: *Bosch Technische Unterrichtung: Elektrik undElektronik für Kraftfahrzeuge: Lichttechnik*: Ausgabe 98/99, S.1-41

[HAMM, 2000] HAMM, M.; FRIEDRICH, A.: *Intelligente, adaptive Scheinwerfersysteme – die Fahrzeugaußenbeleuchtung der Zukunft: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* Nr.102, 2000, S. 1042-1047

[HCINEMA, 2003] *www.hcinema.de*, Stand 03.2004

[HELLA R&D Review 1999] HELLA KG HUECK & CO, (HRSG.): *Hella Licht und Elektronik – Research & Development Review 1999*, Lippstadt, 1999

[HELLA, 1999] HELLA KG Hueck & Co.: *100 Jahre Hella, 1899-1999*, Mohndruck GmbH, Gütersloh

[HELLA, 2005] *Golf 5 Scheinwerfer als LED-Scheinwerfer*, Hella Aktuell: Hella Mitarbeiter-Zeitschrift, 2005

[HEINZ, 2003] HEINZ, R.: *Lichtemittierende Halbleiterdioden*, PHILIPS Licht, Ilmenau, 03.02.2003

[HEMSEL, 2001] HEMSEL, T.: *Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe*: Dissertation, Heinz Nixdorf Institut, Band. 101, Universität Paderborn, ISBN 3-935433-10-7, 2001

[HILLERINGMANN, 1995] HILLERINGMANN, U.: *Mikrosystemtechnik auf Silizium*: Teubner Verlag, Stuttgart, 1995, ISBN 3-519-06158-9

[HILLERINGMANN, 2004] HILLERINGMANN, U.; DOLENEC, S; u.a.: *Integrierte Mikrospiegelarrays mit analoger thermoelektrischer Steuerung in Bulk-Mikromechanik*, 10.GMM-Tagung, Cottbus, 20.10-22.10.2004; http://www.mstonline.de/news/events/event.2005-06-16-0351186922; http://www.me.tu-cottbus.de/gmm10/ , Stand 01.2006

[HINKOV, 2001] HINKOV, I.; u.a.: *Domäneninvertierte elektrooptische Komponenten zur Laserstrahlmanipulation*, Photonik 02/2001, S.64-67

[HOFFMANN, 2003] HOFFMANN, A.v.: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*: Dissertation, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, 2003

[HOSTEIN, 2004] HOSTEIN, J.: *Further development of a scanning headlamp prototype*: diploma thesis, Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy (France), Hella KGaA, 2004

[HUJA, 2000] HUJA.M.; HUSAK, M.: *Mikroarray Design and Simulation*, MSM-Tagung 2000, T41.02, Czech Technical University of Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Microelectronics

[IBIZ, 2004] IBIZ TECHNOLOGY: *virtuelles Keyboard für PDAs*: Neue Westfälische Zeitung, Nr. 76, 30.03.2004, www.ibizcorp.com

[ISAL 2005, ALBOU] ALBOU, P.: *Headlamp with LEDs Light Sources Only*: Valeo Lighting Systems (FR), ISAL 2005, 27.+ 28.September 2005, Darmstadt, ISBN 3-8316-0499-1, S.157-168

[ISAL 2005, CEJNEK] CEJNEK, M.; DALIBOR, M.: *Advanced Adaptive Frontlighting Systems*: Visteon Co. (CZ), ISAL 2005, 27.+ 28.September 2005, Darmstadt, ISBN 3-8316-0499-1, S.333-342

[ISAL 2005, GÖTZ] GÖTZ, M.; EICHHORN, K.: *Optical Technologies for Future Headlamps*: Hella KGaA Hueck & Co., ISAL 2005, 27.+ 28.September 2005, Darmstadt, ISBN 3-8316-0499-1, S.307-316

[ISAL 2005, HAMM] HAMM, M.: *LED Revolution in Headlamp Optics, Mechanics, Thermomanagement and Styling*: Automotive Lighting Reutlingen, ISAL 2005, 27.+ 28.September 2005, Darmstadt, ISBN 3-8316-0499-1, S.128-145

[ISAL, 2005, KÖRSTEN] KÖRSTEN, M.: *AFS Solutions for Compact and Midsize Cars*, Hella KGaA Hueck & Co., ISAL 2005, 27.+ 28.September 2005, Darmstadt, ISBN 3-8316-0499-1, S.572-577

[ISAL 2005, YAMAMURA] YAMAMURA, S.: *Reduction of the Depth of the Projector Optical System*: Koito Manufacturing (JP), ISAL 2005, 27.+ 28.September 2005, Darmstadt, ISBN 3-8316-0499-1, S.380-388

[KALZE / DAMASKY 1999] KALZE, F.-J.; DAMASKY, J.: *Intelligente Scheinwerfer – die Lichttechnik für AFS*. in [HELLA R&D Review 1999], S. 13-20

[KIM, 2000] KIM, S.G.; KOO, M.K.: *Design of a microactuator array against the coupled nature of microelectromechanical systems (MEMS) processes*, Annals of CIRP, vol. 49/1, 2000

[KOBAYASHI, SAE 1998] KOBAYASHI, S.: Intelligent Lighting System – Their History, Function and General Direction of Development, SAE Technical Papers, 1998-11-73, 1998, S.141-149

[KOBAYASHI, 2002] Zweigeteiltes Vario-Walzen-System, Koito Manufacturing Company Tokyo (JP), DE 4318315 C2, Offenlegung 09.12.1993, Patenterteilung 22.07.1999

[KUHL, 2004] KUHL, P. et al: *Heutige und zukünftige KFZ-Lichtfunktionen basierend auf vollbeweglichen Scheinwerfermodulen*: 2.Intelligente Mechatronische Systeme-Tagung, HNI-Band 145, Universität Paderborn, 25.+26.3.2004, S.197-207, ISBN 3-935433-54-9

[LACHMAYER / NEUNZIG, 2001] *Licht und Fahrerassistenz als Systeme zur Verbesserung der Fahrzeugsicherheit*: Hella KGaA Hueck & Co., ATZ 6/2002, Jahrgang 104, S.2-10

[LÜDER, 2003] LÜDER, Ch.; EICHHORN, K.: *Einsatz der Lichtleittechnik in der Kfz-Beleuchtung*: Hella KGaA Hueck & Co., VDI-Berichte 1789: Elektronik im Kraftfahrzeug, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (2003)

[LOEHNEYSEN, 2001] *www.loehneysen.de/neu12-2001.html#134*, Ulrich von Löhneysen, Journalist, (Stand 03.2004)

[LÖBIG, 2004] LÖBIG, P.; ERDL, H.; KOVACEVIC, J.: *Licht und Design, Sehen und gesehen werden*: Sonderausgabe von ATZ und MTZ, Der neue BMW 6er, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 05/2004, D58922, S.119-125

[LOTT, MARTINOT, 1999] LOTT, S.; MARTINOT, S.M.: *Die Göttin schwebt*: Autoforum Nr. 6, 1999

[MAYER, 2003] MAYER, R.; BLUME, J: *Optik Design von Head-up-Displays für Kraftfahrzeuge*, KfOT-Tagung, Baden-Baden, 17.+18.06.2003, VDI-Bericht 1731, S.199-211, ISBN 3-18-091731-8

[MELCHER, 2003] MELCHER, R.L.: *Microdisplay Technology and Applications*: Three-Five-Systems, Inc. Tempe, 2003, www.threefive.com

[MORRISSY, 1999] MORRISSY, J.H., u.a.: *Reflective Microdisplays for Projection or Virtual-View Applications*, Three-Five Systems Inc., Tempe, AZ, 1999

[MOSIS, 2001] o.V.: *Development and applications of novel optoelectromechanical systems micro-machined in silicon*, MOSIS = micro optical silicon systems, FH Münster, Abschlussbericht, ESPRIT Projekt EP 31063

[MULLER, 1931] MULLER, L.: *Höhen- und seitenverstellbarer Scheinwerfer, insbesondere für Kraftfahrzeuge*, DE-Patentschrift Nr. 538752, Erteilung: 05.11.1931

[OSRAM, 2004] *Poster zu Keramikbrennern im Kfz-Einsatz*, 10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources Toulouse, 18.07.-22.07.2004

[OSRAM, PHILIPS, 2004] *D1S, D1R, D3S, D4S-EcoArc Lampenentwicklungen*, 10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources Toulouse, 18.07.-22.07.2004 ; http://www.osram.com/products/automotive; www.philips.com/automotive

[OPGEN-RHEIN, 2003] OPGEN-RHEIN, P., u.a.: *Weiterentwicklung einer dynamischen Leuchtweiteregelung unter Verwendung eines Prüfstands:* KfOT-Tagung, Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, Baden-Baden, 17.+18.06.2003, VDI-Bericht 1731, S.73-95, ISBN 3-18-091731-8

[OPEL, 2005] o.V.*: Intelligente Scheinwerfer*, Automobil-Elektronik, Ausgabe 3, Juni 2005, S.26f, www.automobil-produktion.de

[o.V. 2001] o.V.: *Aktives Licht, Vortrags-Hand-out*: AFS, Hella KG, FT-S, Lippstadt, 06 / 2001

[PAL 1997, LANGWIEDER] LANGWIEDER, K.; BÄUMLER, H.: *Charakteristik von Nachtunfällen*, Progress in Automotive Lighting, PAL 1997

[PAL 2001, ARMBRUSTER] ARMBRUSTER, D., F.Porsche AG: *Motor vehicle signal lamps in a fog environmen*; Progress in Automobile Lighting Symposium Darmstadt, PAL 2001, ISBN 3-89675-971-X, S.23-27

[PAL 2001, BAHNMÜLLER] BAHNMÜLLER, G., Automotive Lighting Reutlingen GmbH: *Headlamp Development – Reduced Time to Market*; Progress in Automobile Lighting Symposium Darmstadt, PAL 2001, ISBN 3-89675-971-X, S.28-34

[PAL 2001, ENDERS] ENDERS, M., BMW AG: *Pixel Light*: Progress in Automobile Lighting Symposium Darmstadt, PAL 2001, ISBN 3-89675-971-X, S.234-239

[PAL 2001, KALZE] KALZE, J.: *Situation Adapted Light Distributions for AFS-Headlamps*: Hella KG, PAL 2001, ISBN 3-89675-971-X, S.474 – 484

[PAL 2001, OYAMA] OYAMA, H.; AKUTAGAWA, T.: *The Devolopment of the Vertical Shape Line-Beam Headlamp*: STANLEY Electric Co. Ltd, PAL 2001, ISBN 3-89675-971-X, S.738 – 750

[PAL 2001, FUTAMI] FUTAMI, T.: *Development of the Gattling Beam Headlamps*: STANLEY Electric Co. Ltd., PAL 2001, ISBN 3-89675-971-X, S.316-329

[PAL 2003, GRUNDMANN] GRUNDMANN, D.: *Hg-free Gas Discharge Lamps for Automotive Use*: OSRAM GmbH, PAL 2003, S.351-355

[PAL 2003, JALINK] JALINK, C.J.: *Mercury Free Xenon HID – The Conscious Alternative*: Philips Automotive Lighting, PAL 2003, S.451-461

[PFEIFFER, 2000] PFEIFFER, M.: *An Overview with focus on LC on Silicon (LCOS) Displays*. Three-Five Systems, Inc., Tempe, 2000, www.threefive.com

[PIETZONKA, 2004] PIETZONKA, S. et al.: *Technik und Design: Neue Möglichkeiten für automobile Innenlichtkonzepte*, ATZ, 3/2004, S.210-217, ISSN 0001-2785

[RICHTER, 2004] RICHTER, W.; MITSCHUNAS, B.: *Optik in Kompaktbauweise, Optimierung eines 2D-Parallelstrahlscanners*: LASER+PHOTONIK, 04/2004, S.32-35

[RIEHEMANN, 2002] RIEHEMANN, S.; u.a.: *Beleuchtungskonzepte zum Einsatz reflektierender LCoS- und DMD-Mikrodisplays*, DGaO 2002-Poster, Fraunhofer IOF, Jena und Carl Zeiss Jena GmbH

[RITZ, 2004] RITZ, A.; MOENCH, H.: *UHP Lamps with Dichroic Coating*: Poster at 10th Light Sources Symposium, Toulouse, Philips Research, Aachen

[RODENKIRCHEN, 2005] RODENKIRCHEN, J.; KALZE F.-J.: *Besprechung des lichttechnischen Optimierungspotenzials des Flexprisma*, Hella KGaA, 2005

[ROSLAK, 2005] ROSLAK, J.: *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*: Dissertation, Heinz Nixdorf Institut, HNI Band 169, Universität Paderborn, ISBN 3-935433-78-6, 2005

[ROSLAK, 2003] ROSLAK, J.; WALLASCHEK, J.: *Aktive Kfz-Lichtverteilungen zur kollektiven Ausleuchtung des Verkehrsraumes*: 1.Paderborner Workshop Intelligente Mechatronische-Tagung, HNI, Paderborn, 20.+21.3.2003, HNI Band 122, Universität Paderborn, 3-935433-31-X, 2003

[SAE 1997, KOBAYASHI] KOBAYASHI, S; HAYAKAWA, M.: *Beam Controllable Headlighting System*, SAE Technical Papers, 1997-06-46, 1997, S.19-31

[SAE 2000, HOGREFE] HOGREFE, H.: *Adaptive Frontlighting Systems for Optimum Illumination of Curved Roads, Highway Landes and Other Driving Situations*, SAE Technical Paper 2000-01-431, 2000

[SAE 2001, HOFFMANN] HOFFMANN, A.v.: *Evaluation of Adaptive Light Distributions with AFSim*. SAE Technical Paper 2001 - 2001-03-03

[SAE 2002, HAMM] HAMM, M.: *Adaptive Lighting Functions History and Future – Performance Investigations and Field Test for User's Acceptance*, SAE SP-1668 Advanced Lighting Technology for Vehicles - 2002-01-0526, Automotive Lighting, S.151-156

[SAE 2003, LELEVE] LELEVE, J.; WIEGAND, B.: *Multifunction Projector*, SAE SP-1787 Lighting Technology – 2003-01-0553, Valeo Lighting Systems, S.47 – 51

[SAE 2004, KERN] KERN, S.: *Light-Emitting Diodes in Automotive Forward Lighting Applications: Materials Engineering Solutions to Fundamental Challenges*: SAE SP-1875, 2004-01-0225, Lumileds Lighting LLC, S.29-34

[SAE 2004, YAKAMOTO] YAKAMOTO, I.: *AFS Light Distribution Control*: SAE SP-1875, 2004-01-0438, Koito Manufacturing, ISBN 0-7680-1411-5, S.61-67

[SAE 2004, SAZUKA] SAZUKA, X: *An Automotive Forward Lighting Optical System using LEDs*: SAE SP-1875, 2004-01-0436, Koito Manufacturing, ISBN 0-7680-1411-5

[SAE 2004, WANG] WANG, B., JIAO J.: *Studies for Headlamp Optical Design Using LEDs*, SAE SP-1875, 2004-01-0434, North American Lighting Inc., ISBN 0-7680-1411-5, S.41-49

[SAE 2005, DECKER] DECKER, D.; SCHMIDT, C.: *Adaptive Systems for Motor Vehicle Lighting – First Steps and Future*: SAE SP-1932 Technical Papers, 2005-01-1013, Hella KGaA Hueck & Co., ISBN 0-7680-1577-4, 2005, S.155-162

[SCHAAL, 2003] SCHAAL, T.; ZEEB, E.: *Optische Datenkommunikation über LED-Außenbeleuchtungselemente an Kraftfahrzeugen*, KfOT-Tagung, Baden-Baden, 17.+18.06.2003, VDI-Bericht 1731, S.127-136, ISBN 3-18-091731-8

[SCHENK, 2004] SCHENK, H.; u.a.: *Adaptive Optics (AO)-Workshop*, Fraunhofer-Institut IPMS, 1.3.2004 in Dresden

[SCHENK, 2002] SCHENK, H.; u.a.: *Mikroprojektionssysteme*, Fraunhofer Institut, IMS, Dresden, Projektskizze für BMBF Förderkonzept Mikrosystemtechnik 2000+

[SCHENK, 2000] SCHENK, H.: *Ein neuartiger Mikroaktor zur ein- und zweidimensionalen Ablenkung von Licht*, Doktorarbeit, Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule-Duisburg, Fachbereich Elektrotechnik, 2000.

[SCHIEDECK, 2004] SCHIEDECK, F.: *Kurzbericht ACTUATOR 2004*, 9th International Conference on New Actuators, 14-16.06.2004, Bremen; Fachgebiet Mechatronik und Dynamik, Prof. Wallaschek, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn

[SCHIERMEISTER, 2003] SCHIERMEISTER, N.; u.a.: *LEDs, Leuchtdioden-Systeme im Scheinwerfer*, Hella KG Hueck & Co., ATZ 9 / 2003, Jahrgang 105, S.782-791

[SPIEGEL, 2005-4] WESSELHÖFT, P.: *Die Gedanken der Fahrer sind frei, Interview mit Mercedes-Forscher*: H.-G. Metzler, Leiter aktive Sicherheit und Fahrsicherheit bei Mercedes-Benz, SPIEGEL ONLINE, www.spiegel.de/auto, 03.12.2005

[SPIEGEL, 2005-3] GRÜNWEG, T.: *Die Nacht verliert ihre Schrecken, Sicherheit im Dunkeln*: SPIEGEL ONLINE, www.spiegel.de/auto, 25.11.2005

[SPIEGEL, 2005-2] o.V.: *Zittern im Lenkrad, Assistenzsysteme auf der IAA*: SPIEGEL ONLINE, www.spiegel.de/auto, 19.08.2005

[SPIEGEL, 2005-1] o.V.: *Lichtshow auf der Frontscheibe, Audi-Lasertechnik*: SPIEGEL ONLINE, www.spiegel.de/auto, 02.07.2005

[SPIEGEL, 2004] HAUPT, H.: *Wenn die Sehkraft ihre Grenzen erreicht, Nachts fahren*: SPIEGEL ONLINE, www.spiegel.de/auto, 23.01.2004

[TESCHKE, 2005] TESCHKE, M.: *Entwurf eines Optikkonzeptes zur Nutzung eines DMD-Arrays im Kfz-Scheinwerfer*, Diplomarbeit L-LAB, TU Ilmenau, 2005

[TI, 2001-1] o.V.: *Why is the Texas Instruments Digital MicroMirror Device™ (DMD™) so reliable?* www.dlp.com/dlp/resources/pixels, 12-2001

[TI, 2001-2] DOUGLASS, R.: *Lifetime Estimates and Unique Failure Mechanisms of the Digital Micromirror Device (DMD)*, www.dlp.com/dlp/resources, 12-2001

[TSAI, 2003] TSAI, J.-C.; u.a: *Analog Micromirror Arrays with orthogonal scanning directions for wavelength selective 1xN² switches*, University of California, Los Angeles, Electrical Engineering Department, TRANSDUCER 2003 Conference.

[TSCHUDI, 2002] TSCHUDI, T.: *Adaptive Optik mit Flüssigkristallen*, Vortrag Nr. 310, Carl-Zeiss-Optikkolloquium, Institut für Angewandte Physik TU Darmstadt, 02-2002

[TU CHEMNITZ, 2004] *www.infotech.tu-chemnitz.de/~zfm*

[VALEO, 2005] *Valeo LED-Hauptscheinwerfer in einem Volvo XC90 Gehäuse*, Autobild Nr. 22, 05.08.2005, S.41

[WALLASCHEK, 1998] WALLASCHEK, J.: *Innovation – Weiß Ihr Scheinwerfer, wo Sie hinfahren?*, Hella Lichttechnik Research & Development Review, 1998

[WEBER, 1996] WEBER, T.: *Von der Lichtstärkeverteilung zur Reflektorgestalt*, Hella Lichttechnik, Hella Lichttechnik Research & Development Review, 1996

[WELFORD, 1978] WELFORD, W.T; WINSTON, R.: *The Optics of Nonimaging Concentrators – Light and Solar Energy*: Academic Press, New York, 1978, ISBN 0-12-745350-4

[WELFORD, 1989] WELFORD, W.T., WINSTON, R.: *High Collecting Non Imaging Optics*: Academic Press Inc., San Diego, CA1989, ISBN 0-12-742885-2

[WELT, 2004] LÖFGEN, J.: *Kohlenstoff statt Wolfram-Draht: Glühbirne leuchtet mit Nanoröhrchen*, Die Welt, 25.11.2004

[WEIS, 2002] WEIS, T.: *Leuchtdichte- und Kontraststeuerung von Displays*: Dissertation, TU Ilmenau, 2002

[WMI KG, 1983] o.V.: *Entwicklung eines flachbauenden Abblend-Scheinwerfers mit neuartigem optischem System (Dreiachsiger Ellipsoid-Scheinwerfer)*: Technische Information Erzeugnisentwicklung, Westfälische Metall Industrie Hueck & Co. KG, Lippstadt, 1983

[WU, 2001] WU, SHIN-TSON; YANG, DENG-KE: *Reflective Liquid Crystal Displays*, Wiley & Sons Verlag, 2001, ISBN 0-471-49611-1

[WURMUS, 1999] WURMUS: *Skript zur Vorlesung: Mikrosystemtechnik*, TU Ilmenau, 1999

[ZFM, GRESSNER, 2004] GRESSNER, T.: *MEMS Technology, R&D Services and Prototypes*, Zentrum für Mikrotechnologien, Chemnitz, Hannover Messe 2004

[ZIMMERMANN, 2000] ZIMMERMANN, H.: *Integrated silicon optoelectronics*: Springer-Verlag, 2000, ISBN 3-540-66662-1

[ZISSIS, 2004] ZISSIS, G.: *Light Sources 2004*: Proceedings of the 10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources Toulouse, Institute of Physics, Nr. 182, 18.07.-22.07.2004

8.3 Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen

[DAMASKY, 1995] DAMASKY, J.: *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-Scheinwerfer*, Dissertation, TH Darmstadt, 1995

[DAHLEM, 2001] DAHLEM, T.: *Methoden zur Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern*: Dissertation, TU Darmstadt 2001, ISBN 3-89675-898-5

[GALL, 1998] GALL, D.: *Vorlesungsskripte zur Physiologischen Optik und Beleuchtungstechnik; Optoelektronik*, TU Ilmenau, 1998f

[KAUSCHKE, 2001] KAUSCHKE, R.: *Untersuchung der Adaptationsbedingungen bei inhomogener Ausleuchtung durch Kfz-Scheinwerfer*, Diplomarbeit, TU Ilmenau, Hella KG, 2001

[KAUSCHKE, 2002] KAUSCHKE, R.; VÖLKER, S.: *Neue mathematische Verfahren zur Sichtweitenbestimmung aus Leuchtdichtebildern.* 15. Gemeinschaftstagung der lichttechnischen Gesellschaften der Niederlande, Deutschlands, Österreichs und der Schweiz, 22-25.September 2002, Maastricht, Niederlande S.361-365, NSVV 2002

[KAUSCHKE, 2003-7] KAUSCHKE, R; FÖRTSCH, A.; VÖLKER, S.: *Sichtweitenuntersuchungen mit dem Histogramm- und dem Gradientenverfahren*. 6. Lux junior 2003-Konferenz, Arnstadt, 19.-21.September 2003, Abstrakt S.27, CD-ROM mit Volltext, TU Ilmenau, FG Lichttechnik

[KLEINKES, 2003] KLEINKES, M.: *Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen,* Dissertation, Hella KG, Uni Bielefeld, 2003, ISBN 3-8322-1784-3

[PAL 1997, RATTUNDE] RATTUNDE, R.: *The photometric Evaluation of CUTOFF-Lines*, PAL 1997, Herbert Utz Verlag, 1997, S.415-424

[PAL 2001, VÖLKER] VÖLKER, S.; KLEINKES, M.: *Investigation of the visible range of different types of headlamps*, PAL 2001, S.1009-1018

[POLLACK, 1998] POLLACK, W.: *Lage und Qualität der Hell-Dunkel-Grenze in der Lichtverteilung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*, ATZ 100, 1998, S.58-64

[SAE 2000, MANZ] MANZ, K.: *Are Measurements for the Cut-Off Gradient of Headlamps in different Measurement Distances Possible*: SAE Technical Papers Series 2000-01-0803, Warrendale, 2000

[SCHMIDT-CLAUSEN, 1995] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: *Bewertung der Hell-Dunkel-Grenze bezüglich Ihrer Qualität, Lage und Linearität*, PAL 1995, Herbert Utz Verlag, 1995, S.171-177

[SCHMIDT-CLAUSEN, 1999] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.:, *Vorlesungsskript zur Lichttechnik*, TU Darmstadt, 1999f

[TRISNADI, 2004] TRISDANI, J; u.a.: *Overview and application of Grating Light Valve ™ based optical write engines for high-speed digital imaging*: Photonics West 2004 – Micromachining and Microfabrication Symposium, January 26, 2004, San Jose, CA, USA, paper 5348-05, 13 pages

[VÖLKER, 2002] VÖLKER, S.; KAUSCHKE, R.; KLEINKES, M.: *Neue Algorithmen und neue Methoden für die Blendungsbewertung von Kfz-Scheinwerfern*. 15. Gemeinschaftstagung der lichttechnischen Gesellschaften der Niederlande, Deutschlands, Ös-

terreichs und der Schweiz, 22-25.September 2002, Maastricht, Niederlande S.340-348, NSVV 2002

[VÖLKER, 2006] VÖLKER, S.: *Hell- und Kontrastempfindung – ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kfz-Scheinwerfern*, Habilitationsschrift, Universität Paderborn, 2006

[WÖRDENWEBER, 2002] WÖRDENWEBER, B.: *Vorlesungsskript zur Lichttechnik*, L-LAB, Universität Paderborn, 2002f

8.4 Sensorumgebung und Displays

[HÖVER, 2003] HÖVER N.; SEUBERT, T.: *Heutige Fahrerassistenz-Systeme und ihr Potenzial für die Zukunft*, Hella KG Hueck & Co., ATZ 10 / 2003

[ISAL 2005, BÖHLAU] BÖHLAU, CH.: *Multibeam LIDAR ACC – Approaching the Start of Production*: Hella KGaA Hueck & Co., ISAL 2005, 27.+ 28.September 2005, Darmstadt, ISBN 3-8316-0499-1, S.82-90

[ISAL 2005, GRIESINGER] GRIESINGER, M.; u.a.: *Multifunctional Use of Semiconductor Based Car Lighting Systems: Potentials and Challenges*: DaimlerChrysler AG (GE), ISAL 2005, 27.+ 28.September 2005, Darmstadt, ISBN 3-8316-0499-1, S.73-81

[ISAL 2005, REBUT] REBUT, J.; BENOIST, F.: *Vision Based Systems for Lighting Automation*: Valeo Lighting Systems (FR), ISAL 2005, 27.+ 28.September 2005, Darmstadt, ISBN 3-8316-0499-1, S.59-72

[KAUSCHKE, 2003-7] KAUSCHKE, R; WALLASCHEK, J.; VÖLKER, S.; EICHHORN, K.: *Konstruktionssystematische Analyse und lichttechnische Bewertung von Konzepten für aktive Scheinwerfer*; KfOT-Tagung, Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, Baden-Baden, 17.+18.06.2003, VDI-Bericht 1731, S.63-72, ISBN 3-18-091731-8 (vgl. Kapitel 8.8)

[MÜHLENBERG, 2002] MÜHLENBERG, M.; SEUBERT, T.: *Fahrerassistenzsysteme basierend auf Bildsensorik*, Hella KG Hueck & Co., ATZ7-8/2002, Jahrgang 104, S.658-663, ISSN 0001-2785, www.all4engineers.com

[ROSLAK, 2005] ROSLAK, J.: *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*: Dissertation, Universität Paderborn, 2005 (vgl. Kapitel 8.2)

[SAE 1972, RAYNER] RAYNER, C.: *SSV2 Electrical Equipment*, SAE Technical Papers Series 1972-06-23, 1972

[SAE 2003, RUMAR] RUMAR, K.: *Infrared Night Vision Systems and Driver Needs*, SAE SP-1787, 2003-01-0293, 2003

[SCHAAL 2003] SCHAAL, T.; ZEEB, E.: *Optische Datenkommunikation über LED Außenbeleuchtungselemente an Kraftfahrzeugen*, S.127 – 136, VDI Bereicht Nr. 1731, 2003, KfOT-Tagung in Baden-Baden, 17.+18.06.2003, ISBN 3-18-091731-8 (vgl. Kapitel 8.2)

[SCHWAB, 2003] SCHWAB, G.: *Untersuchungen zur fahrdynamischen Ansteuerung adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer*: Dissertation, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, 2003

[SEUSS, 2003] SEUSS, J.; STRYSCHIK, D. : *Steuerungselektronik für dynamisches Kurvenlicht* : Hella KG Hueck & Co., ATZ 6 / 2003, Jahrgang 105, S.598-601

[WALLASCHEK, 2003] WALLASCHEK, J.; ROSLAK, J.: *Aktive Kfz-Lichtverteilungen zur kollektiven Ausleuchtung des Verkehrsraumes*: 1. Intelligente mechatronische Systeme-Tagung, HNI-Band 122, 20.03.-21.03.2003, Universität Paderborn, ISBN 3-935433-31-X

8.5 Sonstige Angaben

[GÖSCHEL, 2004] GÖSCHEL, B.: *Die Telematik als Chance für die zukünftige Mobilität*: Vorstand für Entwicklung und Einkauf der BMW Group, 100 Jahre Fahrzeugtechnik im VDI, S.14-17, März 2004

[VDI, 2004] VDI-nachrichten*: „esafety"-Konzept der EU soll bis 2010 die Anzahl der Verkehrstoten im Straßenverkehr halbieren*; Nr. 7, 13.2.2004, S.13

8.6 Optik und Lichttechnik

[BAER, 1996] BAER, R.; u.a.: *Beleuchtungstechnik – Grundlagen*, Verlag Technik Berlin, 2. Auflage, ISBN 3-341-01115-3

[BASS, 1995] BASS, M. et al.: *Handbook of Optics*, *Volume II; Devices, Measurements and Properties*: McGraw-Hill. Inc., 1995, ISBN 0-07-047974-7 (vgl. Kapitel 8.2)

[ECKERT, 1993] ECKERT, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*, Verlag Technik Berlin, 1993, ISBN 3-341-01072-6

[GALL, 2004] GALL, D.: *Grundlagen der Lichttechnik – Kompendium*, Pflaum Verlag, 2004, ISBN 3-7905-0923-X

[GALL, 1998] GALL, D.: *Vorlesungsskripte zur Lichttechnik; Farbe – Farbmetrik; Lichtmesstechnik; Lichterzeugung*, TU Ilmenau, 1998 - 2001

[HAFERKORN, 2003] HAFERKORN, H.: *Optik – Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*, 4. Auflage, Wiley-Vch-Verlag, 2003, ISBN 3-27-40372-8

[HECHT, 2001] HECHT, E.: *Optik*, 3. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2001, ISBN 3-486-24917-7

[HENTSCHEL, 2002] HENTSCHEL, H.: *Licht und Beleuchtung, Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik*; 5. Auflage, Hüthig Verlag 2002, ISBN 3-7785-2817-3

[HERZIG, 1997] HERZIG, H.P.: *Micro-Optics: Elements, Systems and Applications*: Taylor & Francis Verlag, London, 1997

[HERING, 1997] HERING, E.; ROLF, M; STOHRER, M.: *Physik für Ingenieure*, S.474ff, 6. Auflage, Springer Verlag, 1997, ISBN 3-540-6244-2

[LITFIN, 2001] LITFIN, G.: *Technische Optik in der Praxis*, 2. Auflage, Springer Verlag, 2001, ISBN 3-540-67796-8

www.optischetechnologien.de, vgl. Bmbf\Förderung\Aktuelle Ausschreibungen und Förderprogramme

[PAUL, 1999] PAUL, H. u.a.: *Lexikon der Optik*, Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, 1999, ISBN 3-8274-0382-0

[PEDROTTI, 2002] PEDROTTI, F.L.: *Optik für Ingenieure*: Grundlagen, 2. Aufl., Springer-Verlag, ISBN 3-540-67379-2

[RICHTER, 2000] RICHTER, W.: *Modellierung optischer Abbildungen* (Grundlagen zu Theorie der Abbildung und lens design), TU Ilmenau, 4. Ilmenauer Lehrgang, Fachgebiet Technische Optik

[RICHTER, 1998] RICHTER, W.: *Vorlesungsskript zur Technischen Optik*, TU Ilmenau, 1998

[RIEMANN, 1993] RIEMANN, M.: *Grundbegriffe und Grundbeziehungen des Licht- und Strahlungsfeldes*, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

[SCHRÖDER, 1998] SCHRÖDER, G.: *Technische Optik, Grundlagen und Anwendungen*: 8.Auflage, Vogel Verlag, 1998, ISBN 3-8023-1734-3

[SINZINGER, 1999] SINZINGER, S.; JAHNS, J.: *Microoptics*, Wiley-VCH, Weinheim, 1999

[TURUNEN, 1997] TURUNEN, J.; Wyrowski, F.: *Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications*: Akademie Verlag, Berlin, 1997

[VERBRUGH, 2003] VERBRUGH, S.: *Optical design of lighting systems and position tolerances of light sources*: Philips Lighting, Eindhoven 1,5h talk, 1st L-LAB Summerschool 2003, 31.08.-05.09.2003

[WINLENS, 2002] *Winlens-Optikberechnungssoftware – Anleitung; LINOS Pre-Designer users guide – an introduction*: www.winlens.de, www.linos.com, http://www.winlens.de/man/man_predes_v21.pdf; http://www.winlens.de/en/lensde_basic.html; Stand 2002

8.7 Promotionsbegleitende Diplom- und Studienarbeiten

[BERHEIDE, 2004] BERHEIDE, F.: *Konstruktiver Aufbau von Prototypen zur Lichtstrom-Modulation zukünftiger Kfz-Scheinwerfer – Flexprisma:* Diplomarbeit, Hella KG, FH Bielefeld, 2004

[BÜTTNER, 2003] BÜTTNER, K.: *Entwicklung und Aufbau eines LCoS-Scheinwerfer-Optikkonzeptes*: Diplomarbeit, Hella KG, TU Dresden, 2003

[HÄRMENS, 2003] HÄRMENS, E.: *Die konstruktive Auslegung und der Aufbau eines scannenden Scheinwerfer-Optikkonzeptes*: Diplomarbeit, Hella KG, FH Soest, 2003

[KOCH, 2005] KOCH, M.: *Sensorbasierte Ansteuerung für einen fahrzeugintegrierbaren Flexprisma-Scheinwerfer,* Diplomarbeit, Hella KGaA, Uni Paderborn, 2005

[MÖNCHMEIER, 2004] MÖNCHMEIER, T.: *Konstruktiver Aufbau eines Prototypen zur Umsetzung eines Spiegelarray-Scheinwerferkonzepts mit Schwenkfunktion für das Kfz*: Diplomarbeit, Hella KG, FH Bielefeld, 2004

[MÜLLER, 2004] MÜLLER, T.: *Bewertung von Aktiven Scheinwerferkonzepten unter technischen und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten*: Diplomarbeit, Hella KG, Uni Paderborn, 2004

[NÖLKEL, 2002] NÖLKEL, D.: *Entwicklung und Aufbau eines Spiegelarray-Optikkonzepts für den aktiven Scheinwerfer*: Diplomarbeit, Hella KG, FH Aalen, 2002

[REINSDORF, 2004] REINSDORF, M.: *Aufbau einer softwaretechnischen Ansteuerungsumgebung für einen Aktiven Scheinwerfer und die physiologische Validierung der Lichtverteilungen*: Diplomarbeit, Hella KG, FH Merseburg, 2004

[SPRENGER, 2003] SPRENGER, A.: *Konstruktiver Aufbau eines Prototypen zur Umsetzung eines Spiegelarray-Scheinwerferkonzepts ins dynamische Fahrzeugumfeld*: Diplomarbeit, Hella KG, FH Emden, 2003

[THIES, 2002] THIES, M.: *Testaufbau zur Evaluierung eines Mikrospiegel-Arrays*: Studienarbeit, Hella KG, TU Clausthal, 2002

[TAUBENRAUCH, 2004] TAUBENRAUCH, E.: *Konstruktiver Aufbau eines Prototypen eines Scheinwerferkonzepts mit Spiegelarray-Chip und Schwenkfunktion für das Kfz*: Diplomarbeit, Hella KG, FH Bremerhaven, 2004

8.8 Eigene Veröffentlichungen und Schutzrechtsanmeldungen

[KAUSCHKE, 2003-1] KAUSCHKE, R.; EICHHORN, K.; WALLASCHEK, J.: *Optikkonzepte für adaptive Kfz-Scheinwerfer-Systeme am Beispiel des scannenden Scheinwerfers.* Poster, 104. DGaO-Tagung, Münster, 10.-14.06.2003

[KAUSCHKE, 2003-2] KAUSCHKE, R; WALLASCHEK, J.; VÖLKER, S.; EICHHORN, K.: *Konstruktionssystematische Analyse und lichttechnische Bewertung von Konzepten für aktive Scheinwerfer*; KfOT-Tagung, Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, Baden-Baden, 17.+18.06.2003, VDI-Bericht 1731, S.63-72, ISBN 3-18-091731-8

[KAUSCHKE, 2003-3] elektrochromes Element, DE 103 30 215 A1, 20.01.2005 offengelegt

[KAUSCHKE, 2003-4] Flexprismenanordnung, DE 103 44 172 A1, 21.04.2005 offengelegt

[KAUSCHKE, 2003-5] DMD-Mikrospiegelanordnung, DE 103 44 173 A1, 28.04.2005 offengelegt

[KAUSCHKE, 2003-6] AMD-Mikrospiegelanordnung, DE 103 44 174 A1; 28.04.2005 offengelegt

[KAUSCHKE, 2003-8] KAUSCHKE, R.; EICHHORN, K.; WALLASCHEK, J.: *Innovative Optical Concepts for Future Car Headlights*. PAL 2003, Volume 10, TU Darmstadt, 23.-24.09.2003, S.487-495, ISBN 3-8316-0257-3

[KAUSCHKE, 2004-1] KAUSCHKE, R.; EICHHORN, K.; WALLASCHEK, J.: *Adaptive Scheinwerferkonzepte zur subtraktiven Lichtverteilungserzeugung*, 105.Tagung, DGaO 2004, Vortrag am 04.07.2004 in Bad Kreuznach

[KAUSCHKE, 2004-2] KAUSCHKE, R.; EICHHORN, K.; WALLASCHEK, J.: *Aktive Scheinwerfer zur subtraktiven Lichtverteilungserzeugung*, 105. DGaO-Tagung, Bad-Kreuznach, 01.-05.07.2004, www.dgao.de, on-line proceeding

[KAUSCHKE, 2004-3] KAUSCHKE, R.: *Pixellight – DMD active headlamps as tool for rapid prototyping of light distributions*: 1h talk and evening presentation of the DMD active headlamp device, 2nd L-LAB Summerschool 2004, 29.08.-03.09.2004

[KAUSCHKE, 2004-4] KAUSCHKE, R.; EICHHORN, K.; WALLASCHEK, J.: *Adaptive Scheinwerfer – ein Technologieüberblick*, Licht 2004-Tagung, Dortmund, 19.-22.09.2004, Tagungs-CD-ROM

[KAUSCHKE, 2004-5] *Scanner-Erfindungsmeldung*; 01.07.2004, Offenlegung in 02.2006

[KAUSCHKE, 2004-6] Interne Hella-Präsentation über DMD, Scanner, LCoS, AMD und Flexprisma-Device, Scheinwerfer-Entwicklungs-Systematik bei CR-O und im L-LAB, 09.2004

[GÖTZ, 2004] GÖTZ, M.; HÄRMENS, E.; KAUSCHKE, R.: *Scannender Scheinwerfer*: DGaO-Konferenz 2004, Bad Kreuznach, www.dgao.de (siehe Kapitel 8.2)

[ISAL 2005, ROSLAK] ROSLAK, J; KAUSCHKE, R.; WALLASCHEK, J.: *Active Headlamps for Increased Traffic Safety*, ISAL 2005, International Symposium of Automotive Lighting, Volume 11, TU Darmstadt, 27.+ 28.09.2005, , S.317-332, ISBN 3-8316-0499-1

[WALLASCHEK, 2003-1] WALLASCHEK, J.; KAUSCHKE, R.; EICHHORN, K.: *Aktive Lichtsysteme für das Kraftfahrzeug*. 5. VDI-Mechatroniktagung 2003 Innovative Produktentwicklung, Fulda, 07.-08.05.2003, VDI-Bericht 1753, S.21-42, ISBN 3-18-091753-9

[WALLASCHEK, 2003-2] WALLASCHEK, J.; KAUSCHKE, R.: *Aktive Lichtsysteme für das Kraftfahrzeug*, Zeitschrift Konstruktion 5-2003, VDI-Verlag, S. 48-50

8.9 Fremde Schutzrechtsveröffentlichungen

[AUDI, 2003] DE 10132981 B4 [*Audi Avantissimo, vertikal stehendes Klappspiegel-Projektions-/ Reflexionssystem*]: Audi AG, Ingolstadt, Offenlegung 23.01.2003 bzw. EP 1 273 477 A2

[AL, 2001] EP 738904 B1, [*Flexprisma, Hologramm, Aktorprinzipien, optische Prinzipien*]: Automotive Lighting, Italia Spa, Turin (IT), Offenlegung 11.07.2001

[AL, 2003] DE 10217194 A1, [*Projektionsschwenkmodul*], Automotive Lighting, Reutlingen, Offenlegung 30.10.2003

[AUTOPAL, 2001] EP 1065101 A2, [*LWR und variable LV durch Blende*]: Autopal S.R.O, Novy Jlcin (CZ), Offenlegung 03.01.2001

[BOSCH, 1985] DE 3342919 A1, [*Reflexionssystem mit Schwenkreflektor, schräg orientiert*]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 05.06.1985

[BOSCH, 1995-1] DE 4429496 A1, *Scheinwerfer für Fahrzeuge [Flexprisma, Flüssigkeitsoptik]*: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 22.06.1995

[BOSCH, 1995-2] DE 4418135 A1, [*variable Lichtverteilung durch Reflektor mit beweglichen Bereichen*]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 30.11.1995

[BOSCH, 1995-3] DE 4419365 A1, [*variable Lichtverteilung durch klappbare Reflektorbereiche hinter denen weitere Reflektoren positioniert sind*]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 07.12.1995

[BOSCH, 1996] DE 4436620 A1, *Scheinwerfer für Fahrzeuge [Zoomlinse]*: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung : 18.04.1996

[BOSCH, 1996-2] DE 4435507 A1, *Scheinwerfer für Abblendlicht und Fernlicht für Fahrzeuge [Lichtquellenschwenken]*: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 11.4.1996

[BOSCH, 1997] DE 19530008 B4, [*DMD-Scheinwerfer in Reflexionstechnik*]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 20.02.1997, B4-Schrift: 03.02.2005

[BOSCH, 1998] DE 19634754 A1, [*AFS-Scheinwerfer aus mehreren SW-Einheiten, mit einer Basis-LV und zusätzlichen LVs durch die zusätzlichen Einheiten*]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 05.03.1998

[BOSCH, 1999-1] DE 19756437 A1, [*Fernlicht-Lichtverteilung bei Projektionsmodul durch klappbaren Teil des Ellipsoid-Reflektors oder durch ein LCD-Element*]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 24.06.1999

[BOSCH, 1999-2] DE 19813032 A1, [*SW aus mehreren SW-Einheiten, mit einer Basis-LV und zus. LV durch die zusätzlichen Einheiten*]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung, 30.09.1999

[BOSCH, 2000-1] DE 19860461 A1, *Scheinwerferanlage für Fahrzeuge zur Erzeugung von Lichtbündeln unterschiedlicher Charakteristik [LVs sind horizontal bzw. vertikal schwenkbar]*: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 06.07.2000

[BOSCH, 2000-2] DE 19907943 C2, [*Reflektor mit DMD-Chip-Segment*]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung: 07.09.2000; Patent: 22.02.2001

[BOSCH, 2000-3] DE 19914417 A1, [*AFS: 2 LV mit einer festen und einer variablen LV, schwenkbarer Reflektor oder Blende bei Projektionssystem*]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 05.10.2000

[BOSCH, 2001] DE 19957377 A1, [variable LV beliebiger Intensität mittels Hologramm]: Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Offenlegung 31.05.2001

[BMW, 1999] DE 19810480 A1, [*Projektionsschwenksystem*]: BMW AG, München, Offenlegung, 16.09.1999

[BMW, 2000] DE 19834566 A1, [*Scheinwerfer mit variablen Reflektoren, Blenden zur Reduktion der Blendung des Gegenverkehrs*] : BMW AG, München, Offenlegung 09.03.2000

[DC, 2000] DE 19931008 C1, [*Fahrzeugleuchteneinheit mit variabler Prismenoptik, Lichtleiter*]: DaimlerChrysler AG, Stuttgart, Patent: 31.08.2000

[EPSON, 2003] DE 69715359 T2, *Linsenarrays als Homogenisatoren, Polarisationsprismenelemente, Strahlteilerwürfel, LCD, LCoS-Anordnungen*: Seiko EPSON Corp. (JP), Offenlegung 2.1.2003, Priorität 25.06.1996

[EPSON, 2000] EP 1 120 682 A2, [*Lichtleiter- bzw. Linsenarrayshomogenisator, Polarisationselemente, LCoS-Elemente, Mehrfarbenprismen*]: Seiko EPSON Corp. (JP), Offenlegung 01.08.2000, Priorität 28.01.2000

[ICHIKOH, 2004] EP 1 433 655 A2, *Digital lighting apparatus for vehicle, controller for digital lighting appartus, and control program for digital lighting apparatus*, ICHIKOH Industies, Ltd., Tokyo (JP), Offenlegung 30.06.2004, Priorität 29.12.2003

[HELLA, 1998] DE 19718540 A1, [*Scheinwerfer für links/rechts-Verkehr, Lichtverteilung erzeugt durch beweglichen Reflektor, Basislichtverteilung mit zusätzlichem Lichtfinger*]: Hella KG, Lippstadt, Offenlegung 05.11.1998

[HELLA, 2000-1] DE 19857439 A1, [*Scheinwerfer nach Projektionsprinzip mit Prismenoptik*]: Hella KG, Lippstadt, Offenlegung 15.06.2000

[HELLA, 2000-2] DE 1013098 A1, [*Projektionssystem-Schwenk-Scheinwerfer*]: Hella KG, Lippstadt, Offenlegung 09.01.2000

[HELLA, 2004] DE 1491400 A2, [*Reflexions-Schwenk-Scheinwerfer*]: Hella KG, Lippstadt, Offenlegung 29.12.2004

[HONDA, 2001] DE 19549077 C2, [*Reflexions-Schwenk-Scheinwerfer mit geschwenktem Teilreflektor*], Honda K.K., Stanley Ltd.(JP), Patenterteilung 29.11.2001

[KOITO, 1993] DE 4318315 C2, [*Zweigeteiltes Vario-Walzen-System*]: Koito Manufacturing Co. Tokyo (JP), Offenlegung 09.12.1993, Patenterteilung 22.07.1999

[KOITO, 1998] DE 19756574 A1, [*Zweigeteiltes Vario-Walzen-System mit horizontal verschiebbarem Ellipsoid-Reflektor*]: Koito Manufacturing Co. Tokyo (JP), Offenlegung: 08.10.1998

[KOITO, 1998] JP 10112202 A, [*variable LV durch beweglichen Reflektor und bewegliches Glühmittel*]: Koito Manufacturing Co. Tokyo (JP), Offenlegung: 28.04.1998

[KOITO, 2002] DE 4345330 C2, [*Blendenwalze mit schraubenförmiger Kontur bei Projektionssystem*]: Koito Manufacturing Co. Tokyo (JP), Patent: 29.08.2002

[KOITO, 2005] DE 102033346 A1, [*Projektionsschwenksystem*]: Koito Manufacturing Co. Tokyo (JP), Offenlegung: 17.02.2005

[MITSUBISHI, 2002] JP 2002122805 A, [*Lampe, Homogenisator, DMD-Element und V-Anordnung*] MITSUBISHI Electric Corp. (JP), Offenlegung 24.04.2002

[NEC, 2000-2] EP 1 024 670 A2, [*Linsenarrayshomogenisator, Polarisationselemente, Farbrad, LCD*] NEC Corp. Tokyo (JP), Offenlegung 02.08.2000, Priorität 29.1.1999

[NEC, 2000-1] EP 1 018 842 A3, [*Mehrfarbenprisma, mehrere Lichtmodulationselemente (DMD, LCoS)*]: NEC Corp. Tokyo (JP), Offenlegung 12.07.2000, Priorität 08.01.1999

[OSRAM, 1999] DE 19737653 A1, [*DMD-Scheinwerfer-Prinzip in Projektionstechnik*], Pat.-Treuhand-Ges. für elektr. Glühlampen, München, ENDERS, M., Offenlegung: 04.03.1999; siehe auch WO-99/11968-A1

[ÖZSOY, 2000] DE 19910004 A1, [*LCD Projektions-Scheinwerfer mit IR-Filter*]: ÖZSOY, F., privat, Duisburg, Offenlegung: 21.09.2000

[PHILIPS, 2002] WO 02089493 A2, [*LCoS-Video-Projektor, V-Anordnung*], PHILIPS Electronics N.V., Offenlegung: 17.04.2002

[PORSCHE, 2001] EP 1093965 A2, [*geschwenkter SW für Randstreifen oder Fernlicht-Beleuchtung*], Offenlegung: 25.04.2001

[SOARDO, 1995] EP 291475 B1, [*variable Lichtverteilung durch scannenden Aufbau mit 2 Einachsen-Galvanometerscannern und einem Laser*], Soardo, P., Turin (IT), Offenlegung: 17.11.1988, B1-Schrift: 16.05.1995

[STANLEY, 1998-1] DE 19741377 A1, *Fahrzeug-Scheinwerfer [Parallelkinematik für Lichtquelle]*: Stanley Electric. Co. Ltd., Tokyo (JP), Offenlegung 02.04.1998

[STANLEY, 1998-2] JP 10208510 A, [*SW mit beweglichem Reflektorteil zum Umschalten zwischen LB und HB*] Stanley Electric. Co. Ltd., Tokyo (JP), Offenlegung 07.08.1998

[STANLEY, 1998-3] JP 11111009 A, [*SW mit variablem Reflektor, Prismenoptik und einschwenkbarer Blende*] Stanley Electric. Co. Ltd., Tokyo (JP), Offenlegung 23.04.1999

[STANLEY, 2005] DE 197 41 377 B4, Fahrzeugscheinwerfer mit einer beweglichen Lichtquelle] Stanley Electric. Co. Ltd., Tokyo (JP), Offenlegung 29.12.2005

[VALEO, 1995] DE 19544211 C2, [variable Lichtverteilung durch bewegliche Reflektorteile]: Valeo Vision, Bobigny (FR), Offenlegung 05.06.1996, Patent: 11.12.2003

[VALEO, 1998-1] FR 2756237 A1, [*variable Lichtverteilung durch Blende und Reflektor-„Linse“ als gewinkeltes Projektionsmodul*], Valeo Vision, Bobigny (FR), Offenlegung 29.05.1998

[VALEO, 1998-2] FR 2758606 A1, [*Lichtverteilung durch bewegliche Blende nahe der Lampe*], Valeo Vision, Bobigny (FR), Offenlegung 24.07.1998

[VALEO, 1998-3] FR 2758607 A1, [*beweglicher Reflektor mit Blende für variable LV*], Valeo Vision, Bobigny (FR), Offenlegung 24.07.1998

[VALEO, 1998-4] FR 2760418 A1, [*Reflexions-Blende und geschwenkte Linse bei gewinkeltem Projektionssystem*], Valeo Vision, Bobigny (FR), Offenlegung 11.09.1998

[VALEO, 1998-5] FR 2760512 A1, [*geschwenkte LV durch Schwenkspiegel nach Projektionssystem*], Valeo Vision, Bobigny (FR), Offenlegung 11.09.1998

[VALEO, 1998-6] FR 2761026 A1, [*Reflektor mit TIR-Optik und verschiebbarem Blendenhut*], Valeo Vision, Bobigny (FR), Offenlegung 25.09.1998

[VALEO, 1999] DE 19838221 A1, [*Prismenoptik für Beleuchtungs- oder Signaleinrichtungen, Lichtleiter*], Valeo Vision, Bobigny (FR), Offenlegung 11.03.1999

[VALEO, 2001] US 2001/0006467 A1, [*Reflektor mit Teil-Flexprismenoptik*], Valeo Vision, Bobigny (FR), Offenlegung 05.07.2001

[VISTEON, 2004] DE 10339183 A1, [Projektions-Schwenksystem], Visteon Corp. (US, CZ, DE?), Offenlegung: 04.03.2004 bzw. US 2004-6761476 B2

[VW, 2002] DE 10062158 A1, [*Schwenkspiegel-Scheinwerfer, horizontal orientiert, mit 2 SW-Einheiten*] Offenlegung 20.06.2002

[ZIZALA, 2002] EP 1234716 A2, [*Projektionssystem mit geschwenkter Linse*], Offenlegung 28.08.2002

[ZEISS, 2001] DE 19955843 A1, [*T-Anordnung und Optikdesign eines DMD-Video-Projektors*] Offenlegung 13.06.2001

8.10 Glossar

AFS	= Adaptive Frontlighting System
AFS+	= um gezielterere Straßenausleuchtung erweiterte AFS-Funktionalitäten
AMD	= Analog MicroMirror Device
AO	= Adaptive Optics
ATN	= Verfahren zur Bestimmung der Steigung / Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze
AWL	= Adverse Weather Light = Schlechtwetterlicht
Beamer	= Video-Projektor zur Projektion von Bildschirminhalten auf eine Wand
Bi-Xenon	= Abblend- und Fernlicht erzeugt durch ein Xenon-Projektionsmodul
stat. BL	= statisches Kurvenlicht für Abbiegungen, Serpentinen und zum Einparken
dyn. BL	= dynamisches Kurvenlicht, Schwenken der Lichtverteilung bis zu +/-15°
CCD	= Charge Coupled Device
CLK	= Clock
CMOS	= Compound Metal Oxid Semiconductor
COL	= Kollektive Verkehrsraumausleuchtung – collective / connected lighting (Aktive Lichtfunktion)
COM	= Kommunikationsfunktion über Licht (LEDs arbeiten in Pulsweitenmodulation und deren Lichtimpulse werden von Fotodioden empfangen) (Aktive Lichtfunktion)
CPC	= Compound Parabolic Concentrator
1D	= 1 dimensionales Drehen
2D	= 2 dimensionales Drehen
D-ILA	= Digital-Image Light Amplification ©[JVC]
DLP	= Digital Light Processing ©[ti]
DMD	= Digital MicroMirror Device ©[ti]
DRL	= Daytime Running Light
DSL	= Driver Specific Light (Aktive Lichtfunktion)

DSY	= Display Light (Aktive Lichtfunktion)
D1S	= Xenon-Gasentladungslampe mit integriertem Zündgerät für Projektionsscheinwerfer
D2S	= Gasentladungslampe für Projektionsscheinwerfer
D2R	= Gasentladungslampe für Reflexionsscheinwerfer
D2S kurz	= Kurzbogenlampe auf Basis einer Gasentladungs-Projektionssystem-Lampe
D3S Eco Arc	= Quecksilberfreie Gasentladungslampe für Projektionssysteme
D4S	= Quecksilberfreie Gasentladungslampe für Projektionssysteme
ECE	= Economic Commission for Europe
ESP	= Elektronisches Stabilitäts Programm zur Fahrzeugdynamikstabilisierung
Etendué	= geometrischer Fluss, Lagrange'sche Invariante
FF	= Freiform-Spiegel- oder Linsenfläche, numerisch berechnete Geometrie
FFL	= Front Fog Light = Nebellicht
FNG	= Flächennutzungsgrad, Verhältnis aus Summe aus Einzelspiegelflächen zur Gesamtchipfläche
GDL	= Gas Discharge Lamp (Gasentladungslampe)
GLV	= Grundlichtverteilung
HB	= High Beam = Fernlicht
HDG	= Hell-Dunkel-Grenze
HF	= Hauptfunktion
HID	= High Intensity Discharge
HUD	= Head-up Display, virtuelles Anzeigefeld schwebt über der Kfz-Motorhaube
IR	= infrarote Strahlung, Wellenlängen > 780nm
KOM	= Kommunikationsfunktion (Aktive Lichtfunktion)
L-LAB	= Licht-Labor, Public-Private-Partnership der Universität Paderborn und der Hella KGaA Hueck & Co.
LB	= Low Beam = Abblendlicht = Landstraßenlicht
LCD	= Liquid Crystal Display = transmittives LC-Display

LCoS	= Liquid Crystal on Silicon = reflektives LC-Display
LSV	= Licht Stärke Verteilung
LV	= Lichtverteilung, Kurzform von Lichtstärkeverteilung
LWR	= Leuchtweiteregelung
LWR+	= Leuchtweiteregelung, die um den Winkelbereich eines Berg- und Talfahrlichts erweitert wurde.
MEM(S)	= Micro-Electro-Mechanical (-Systems)
MEOMS	= Micro-Elektro-Opto-Mechanical-Systems
MKL	= Marking Light = Markierungslicht (Aktive Lichtfunktion)
ML	= Motorway Light = Autobahnlicht
MMD	= Mikro Mechanical Devices
NF	= Nebenfunktion
OEM	= Original Equipment Manufacturer / Kfz-Hersteller
PBS	= Polarisations-Beam-Splitter = Polarisations-Strahl-Teiler
PDA	= Personal Digital Assistent (Taschencomputer und Organizer)
s-polarisiert	= senkrecht-polarisiertes Licht (zur Betrachtungsebene)
p-polarisiert	= parallel-polarisiertes Licht (zur Betrachtungsebene)
Polygon	= mehrflächiger Scanner-Kopf, bei dem jede Spiegelfläche eine Scanbewegung hervorruft
SAE	= Society of American Engineers
Scanner	= zeilenweises Ablenken eines Lichtbündels um 1D- oder 2D-Drehachsen
SLV	= Scannende Lichtverteilung / Scannender Lichtverteilungs (-Anteil)
SW	= Scheinwerfer
TIR	= total internal reflexion = totale interne Reflexion
tbd.	= to be defined
ti	= texas instruments
TL	= Town Light = Stadtlicht

UHP = Ultra High Performance-Lampe (eingesetzt bei Videoprojektoren und bei Aktiven Scheinwerfern)

UV = ultraviolette Strahlung, Wellenlängen < 380nm

Vario-Xenon = variables Projektionsmodul, bei dem die AFS-Lichtverteilungen und deren HDG mittels einer unterschiedlich konturierten Frei-Form-Walze, die rotatorisch um ihre Längsachse gedreht wird, erzeugt werden.

VIS = visueller Spektralbereich, 380nm bis 780nm

WKG = Wirkungsgrad

Xenon = Zündgas einer Gasentladungs-Quecksilberhochdruck-Lampe

Danksagung

Großer Dank gebührt meinen betreuenden Professoren Herrn Professor Wallaschek, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Fachgebiet Mechatronik und Dynamik sowie Herrn Professor Gall, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik für ihre fachliche und menschliche Unterstützung sowie die wissenschaftlichen Richtungsweise.

Vielen Dank auch an die zahlreichen Studenten, die mich mit ihrem Praxissemester, ihrer Studien- oder Diplomarbeit, u.a. auch mit konstruierter und aufgebauter Hardware, selbstprogrammierter Software oder einer ersten Validierung der Konzepte unterstützt haben. Zu nennen sind dabei: Daniel Nölkel, Elmar Taubenrauch, Thomas Müller, Karsten Büttner, Friso Berheide, Matthias Koch, Eva Härmens, Andreas Sprenger, Matthias Thies, Mario Reinsdorf, Andreas Förtsch, Tobias Mönchmeier, Pascal Höhner, André Größer.

Besonders gedankt sei Herrn Bernhard Newe beim Aufbau des L-LAB, einer Public-Private Partnership der Hella KGaA Hueck & Co. und der Universität Paderborn. Ein großes Dankeschön auch an meinen fachlichen Unterstützer, Herrn Dr. Stephan Völker, für zahlreiche interessante Diskussionen, seine guten Anregungen und motivierende Impulse.

Großer Dank gebührt auch Herrn Dr. Karsten Eichhorn für seine fachliche Unterstützung und sein reges Interesse am Fortschritt der Arbeit. Dankeschön auch an Herrn Dr. Mirco Götz und Herrn Dr. Reinhard Wille für die Betreuung der beiden Diplomarbeiten von Jean Hostein und Sascha Dolenec. Die fachliche Diskussion mit den Betreuern schätzte ich sehr.

Danke auch an den Hella L-LAB Vorstand Herrn Professor Wördenweber und jetzt Herrn Professor Woldt für ihre Unterstützung und das ausgewiesene Interesse an meiner Arbeit, meinen Erfindungsmeldungen sowie an meinen Publikationen.

Diese Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung von Frau Brigitte Krause, Herrn Erwin Freudenreich, Frau Ursula Gröger, die Unterstützung der Lichttechnische Vorentwicklung und Scheinwerfer Lichtsimulation, dem Musterbau der Hella KGaA und der Hella Leuchten Systeme GmbH und der HLS-Lehrwerkstatt.

Dank gebührt auch meinen netten Mechatronik und Dynamik-Fachkollegen, den netten Damen vom Sekretariat und dem sehr umgänglichen L-LAB, das für so manch abwechslungsreiche Stunden und Tage sorgte. Insbesondere Herr Dr. Jacek Roslak war mir stets ein aufgeschlossener und wechselweise anspornender Tischkollege, mit dem ich gerne über die „aktive Lichttechnik“ diskutiert habe.

Den Abschluss meiner Promotionsarbeit widme ich meiner Freundin Eugenia, die mich beständig unterstützt und bestärkt hat.

Schließlich danke ich meinen Eltern, die mich während meines ganzen Studiums im In- und Ausland stets motiviert und intensiv unterstützt haben.

Dank sei auch all jenen gesagt, welche ich hier nicht namentlich erwähnt habe.

9 Anhang

9.1 Bewertung der Hauptkonzepte im Detail

A.1: Bewertungsmatrix der aktiven Scheinwerfer-Teil 1 [8.7, MÜLLER, 2004]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Kriterien			DMD		Scanner		LCoS		Varia-Xenon	
2	Lichttechnische 0,30	Licht nach Optik 0,70	Maximale Beleuchtungsstärke bei Abblendlicht in 25m [lx]	107	4	50 - kritisch für Fernlicht	4	16 - noch zu hohe Einkoppelverluste	1	70	4
3			Lichtstrom nach Optik bei Fernlicht [lm]	1360	4	981	3	<850	2	1070	4
4			Scheinwerferwirkungsgrad (nach O./integr)	9,7%	2	30,7%	4	≈ 4,7%	1	33,4%	4
5			Kontrast Emax/B50L	1:1070	4	1:72	4	1:15	1	1:195	4
6		Lichtquelle 0,30	Leistung	220 W UHP-Lichtquelle		35 W Xenon modifiziert		220 W UHP-Lichtquelle		35 W D2S Xenon	
7			integraler Lichtstrom	14000		3200		14000		3200	
8			Lichtausbeute [lm/W]	63,64	3	91,43	4	63,64	3	91,43	4
9		Gesamt Lichttechnisch		3,42		3,83		1,78		4,00	
10	Technologisch 0,24	Komponenten und Geometrie 0,30	Wärmemanagement	2 Lüfter: DMD, Lampe	2	1 Lüfter	3	2 Lüfter (überdimensionierter Lüfter beim LCoS)	2	kein Lüfter	4
11			Komplexität	LQ, Reflektor, Sammellinse, Umlenkspiegel, DMD, Feldlinse, Auskoppellinse (7Stk)	1	LQ, Reflektor, Auskoppellinse, Umlenkspiegel, 2 Scannerspiegel (6Stk)	2	LQ, Reflektor, Polarisator, Umlenkspiegel, Sammellinse, PBS, LCoS, Auskoppellinse (8Stk.)	0	LQ, Reflektor, Walze, Linse (4Stk.)	4
12			Betriebsleistung [W]	235 W	2	233-272 W	2	≈ DMD-Wert	2	42W (35+6+1)	4
13			Leistungsspitzen	282 W	2	250W Start; 272W Schachtuetter	3	≈ DMD-Wert	2	49W (6+38+5)	4
14			Energieversorgung	220V	2	+15V und -15V	2	220V	2	12 V	4
15			Montagefreundlichkeit	empfindliche Einkoppelspiegel	2	schlecht (mehrere Spiegel, abhängig von einander)	1	empfindliche Einkoppelspiegel	2	Modularisierung	4
16			Bauraum	2 Kisten, am Kfz montierbar	2	1 Kiste, am Kfz montierbar	3	1 sehr große Kiste	1	optimal	4
17		Fehler-/Störanfälligkeit 0,35	Temperaturfestigkeit	Chip bis 65°C	2	Motoren 50°C	1	Chip bis 65°C	2	gegeben	4
18			Mechanische Festigkeit und dynamische Belastung	2 fache Lagerungen - Torsionsgelenke - kleine Massen	3	einseitige Lagerung - Dauerbelastung fraglich - mechanisch große Spiegel	2	keine beweglichen mechanischen Spiegel	4	optimal	4
19			Ausfallverhalten	siehe FMEA	2	siehe FMEA; GLV immer da	3	siehe FMEA, hohe Ausfallrisiken	1	ausgereift	4
20			Lebensdauer	Chip - Spiegeln	3	Problematisch bei Motoren und Kugellagern	2	unkritisch	4	Schrittmotor	3
21		Technologiebeurteilung 0,35	Entwicklungsbedarf	von 4:3 auf 10:1, Bauraum	3	Lichtstärke erhöhen, Bauraum verkleinern, robustere Scanner	2	violetter Licht, fehlender Kontrast, 4:3, Bauraum	2	erledigt (SOP Mitte 2005 möglich) Schrittmotor	4
22			Technologiereifegrad/-Potenzial	sehr hohes Potenzial (AMD)	4	neues Anwendungsfeld von Laserbeschriftung	2	LCD bekannt, LCoS relativ neu	3	hoch, ausgeschöpft; einfachste Mechanik	1
23			Anwendbarkeit für Hybridlösungen	möglich, Teilung von GLV und variablem Licht muß noch entwickelt werden	2	möglich mit vorhandenen Elementen	3	möglich, Teilung von GLV und variablem Licht muß noch entwickelt werden	2	unnötig, da bereits ausgereift	4
24			Variabilität der Lichtverteilung	sehr hoch, da Pixel einzeln ansteuerbar	4	gegeben, mit Grenzen	2	sehr hoch, da Pixel einzeln ansteuerbar	4	nicht variabel, Walze statisch	1
25			Grafischer Potenzial	1024 x 768	4	sehr schlecht 5 x 4	2	1024 x 1365	4	statisch auf Walze	1
26			Kurvenlichtpotenzial	Konzepte existieren schwenkbarer Spiegel/Flexprisma	2	Konzepte einfacher umsetzbar	3	Konzepte existieren schwenkbarer Spiegel/Flexprisma	2	realisiert	4
27			Patentschutz	AMD/DMD Erfindungsmeldungen vorhanden, Konkurrenzpatente vorhanden	2	1 Offenlegungsschrift und 1 Erfindungsmeldung	3	1 Erfindungsmeldung	2	umfassender Patentschutz, aber ein Konkurrenzpatent über Blendenkonturen	2
28		Gesamt Technologisch		2,47		2,23		2,33		3,32	

A.2: Bewertungsmatrix der aktiven Scheinwerfer-Teil 2 [8.7, MÜLLER, 2004]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
29	Kriterien			DMD		Scanner		LCoS		Vario-Xenon	
30	Physiologisch 0,26	Lichtqualität 0,60	Homogenität	Fragebogen-auswertung	4	Fragebogen-auswertung	2	Fragebogen-auswertung	4	Fragebogen-auswertung	3
31			Sichtweite		3		2		1		3
32			Helligkeitsniveau		4		2		1		3
33			Blendung		1		1		1		2
34		Lichtfunktionen 0,40	Abblendlicht	Fragebogen-auswertung	2	Fragebogen-auswertung	2	Fragebogen-auswertung	1	Fragebogen-auswertung	3
35			Fernlicht		4		1		1		3
36			Autobahnlicht		4		1		1		3
37			Stadtlicht		2		3		2		3
38			Markierungslicht		4		3		2		0
39			Displaylicht		4		0		3		0
40		Gesamt Physiologisch		3,07		1,74		1,65		2,58	
41	Wirtschaftlich 0,15	Marktattraktivität 0,37	Marktvolumen	alle ähnlich, Potenzial vorhanden	3	alle ähnlich, Potenzial vorhanden	3	alle ähnlich, Potenzial vorhanden	3	alle ähnlich, Potenzial vorhanden	3
42			Konkurrenzaktivitäten	nur Pixellight	3	keine bekannt	4	nur Pixellight	3	zahlreich vorhanden	3
43			Kundennutzen	AFS und Aktives Licht	4	AFS und eingeschränktes Aktives Licht	3	AFS und Aktives Licht	4	nur AFS	2
44		Wettbewerbsstärke 0,26	Marktanteilsprognose	stark steigend	4	nur leicht steigend	2	stark steigend	4	stark steigend	4
45			Entwicklungsstatus	früh	2	früh	2	ganz früh	1	fast Marktreife	4
46		Finanziell 0,37	Herstellkosten aktuell	3.000	1	6.800	1	5.000	1	< 100	4
47			Herstellkost. Potenzial	Mikrochipkosten sinken stark, große Menge, komplexe Technologie	3	große Menge reduziert Kosten	2	Mikrochipkosten sinken stark, große Menge	4	bereits relativ geringe Kosten	3
48			Durchsetzbarer Preis	1600 EUR	4	1400 EUR	2	1600 EUR	4	1300 EUR	3
49			Investitions-/E.-kosten	Chip für Anforderungen entwickeln	1	Laserscanner für Kfz-Anforderungen entwickeln; Kooperation im Gespräch	2	Chip für Anforderungen entwickeln	1	bereits nahe an Marktreife	4
50		Gesamt Wirtschaftlich		2,86		2,33		2,76		3,29	
51	Gesetzlich 0,05	Aktuelle Gesetzeslage 0,42		liegt bei einigen Werten darüber und Randproblematik	3	erfüllt die meisten Forderungen	4	erreicht einige Minimalforderungen nicht; liegt bei einigen Werten darüber und Randproblematik	1	erfüllt die meisten Forderungen	4
52		Ausmaß an gewünschten Veränderungen 0,23		für Displaylicht, Markierungslicht keine gesetzlichen Überlegungen	1	alle Verteilungen 2006 gesetzeskonform, außer Markierungslicht	3	für Displaylicht, Markierungslicht keine gesetzlichen Überlegungen	1	2005/2006 komplett gesetzeskonform	4
53		Lichtquelle 0,35		UHP hat keine Kfz-Zulassung	1	Xenon nach ECE No.99 zugelassen	4	UHP hat keine Kfz-Zulassung	1	Xenon nach ECE No.99 zugelassen	4
54		Gesamt Gesetzlich		1,84		3,77		1,00		4,00	
55	Gesamtergebnis			2,94		2,67		1,99		3,36	

9.2 Offene technologische und physiologische Fragen

Exemplarisch sind hier für den aktiven DMD-Scheinwerfer offene technologische und physiologische Fragen aufgelistet:

1. Was machen die Interferenz / Beugungsmuster der Pixel auf der Straße? Können diese bei stehendem Fahrzeug ermittelt werden? Was ist die Ursache dafür? Werden diese vom eigenen Fahrer oder vom Gegenverkehr wahrgenommen? Wie ist die Blendung dadurch? Pulsieren, wenn das entgegenkommende Fahrzeug nur leicht wippt im Vergleich zum eigenen Fahrerauge? Wie sind diese bei dynamischen Fahrzeugbewegungen zu sehen? Was sieht der Gegenverkehr? Werden die Lücken zwischen den Pixeln als pulsierendes Licht für den entgegenkommenden Verkehr wahrgenommen? Leuchtdichtespitzen?

2. Unterschiedliche Farbtemperaturen: Wie sieht es aus mit der Farbtemperatur der Scheinwerfer? Sind diese im zulässigen Bereich?

3. Können / werden die Farbsäume an den Pixelgrenzen bei der Farbtemperaturmessung wahrgenommen oder sind diese zu vernachlässigen?

4. Vergleich der Technologien: Wann erfolgt der unmittelbare direkte Vergleich mit konventionellen Scheinwerfern, identischen Lichtverteilungen, eingelesenen Lichtverteilungen, die vorher vermessen wurden und dann durch eine gezielte Ansteuerung des DMD-Chips in relative Graustufenhelligkeiten mit einer überlagerten Einkoppellichtverteilung umgesetzt wird.

5. Vibration: Was machen die Vibrationen innerhalb der Lichtverteilung? Sind die leichten Störungen im Fahrzeugvorfeld störend? Werden diese wahrgenommen? Sollten diese mit einem bisherigen konventionellen Scheinwerfer überlagert werden, damit diese nicht mehr sichtbar sind?

6. Lebensdauer: Was macht die relativ konstante Schaltstellung der Mikrospiegel in ihrem Dauereinsatz? Werden die Gelenke der Mikrospiegel ausgedehnt, überdehnt, überlastet, dauerhaft geschädigt, sodass die Mikrospiegel sich nicht in eine andere Kippstellung zurückschwenken lassen?